



Fatia Fatimah, dkk

SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR SOCIETY 5.0

EDITOR

SRI HARIJATI
SRI UTAMI
DINI NUR HAKIKI
W. NOVIANI PURWANTI



Fatia Fatimah, dkk

SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR SOCIETY 5.0

EDITOR

SRI HARIJATI
SRI UTAMI
DINI NUR HAKIKI
W. NOVIANI PURWANTI

Science and Technology for Society 5.0

Penulis:

1. Dr. Fatia Fatimah, S.Si., M.Pd.
2. Darsih Idayani, M.Si.
3. Selly Anastassia Amellia Kharis, S.Pd., M.Si.
4. Dra. Lintang Patria, M.Kom.
5. Ing. Mohamad Rajih Radiansyah, B.AS., M.Sc.
6. Athiefah Fauziyyah, S.T.P., M.Si.
7. Dini Nur Hakiki, S.T.P., M.Si.
8. Dra. Eko Yuliasuti Endah Sulistyawati, M.Si
9. Diki, S.Si., M.Ed., Ph.D.
10. Mutimanda Dwisatyadini, M.Kep
11. Cut Meutia Fajrina
12. Fikri Nashrullah
13. Venty Fitriany Nurunisa, SE., M.Si., M.Sc.
14. Ir. Sri Yuniati Putri Koes Hardini, M.P.
15. Prof. Dr. Ir. Iman Rahayu Hidayati Soesanto, MS. IPU
16. Adhi Susilo, S.Pt., M.Biotech.St., Ph.D.
17. Tejo Susanto, S.P.
18. Nurhidayat, Amd. Kom., S.P.
19. Timbul Rasoki, S.P., M.Si.
20. Ana Nurmalia, S.P., M.Si.
21. Lina Asnamawati, S.P., M.Si.
22. I Gede Wyana Lokantara, S.Pd., M.Eng
23. Farisa Maulinam Amo, ST., M.T.
24. Erika Pradana Putri, ST., M.Sc.
25. Ulul Hidayah, ST., M.Si.

ISBN: 978-623-312-545-1

e-ISBN: 978-623-312-546-8

Penelaah:

1. Dr. Lina Warlina, M.Ed.
2. Dr. Ir. Rinda Noviyanti, M.Si.
3. Dr. Hurip Pratomo, M.Si.
4. Dr. Welli Yuliatmoko, S.T.P., M.Si.
5. Elin Herlinawati, M.Si.
6. Dr. Harmi Sugarti, M.Si.
7. Sitta Alief Farihati, S.Si., M.Si.
8. Dra. Dyah Paminta Rahayu, MSI.
9. Dr. Lula Nadia, M.A., M.Si.
10. Dr. Nurul Huda, M.A.
11. Ir. Diarsi Eka Yani, M.Si.
12. Diki, S.Si., M.Ed., Ph.D.
13. Dra. Dwi Astuti Aprijani, M.Kom.

Penyunting:

1. Dr. Sri Harijati, M.A.
2. Sri Utami, S.ST., M.Kes.
3. Dini Nur Hakiki, S.T.P., M.Si.
4. Wahyu Noviani Purwanti, S.Si., M.Si

Penata letak: Nono Suwarno

Perancang Kover dan Ilustrasi: Sunarti, S.Des.

Penerbit:

Universitas Terbuka
Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi
Jalan Cabe Raya, Pondok Cabe, Pamulang, Tangerang Selatan - 15437
Banten – Indonesia
Telp.: (021) 7490941 (hunting); Fax.: (021) 7490147
Laman: www.ut.ac.id.

Cetakan pertama, Oktober 2021

© 2021 oleh Universitas Terbuka



Buku ini di bawah lisensi *Creative Commons* Atribusi Nonkomersial Tanpa turunan 4.0 Internasional oleh Universitas Terbuka, Indonesia.
Kondisi lisensi dapat dilihat pada [Http://creativecommons.or.id/](http://creativecommons.or.id/)

Universitas Terbuka : Katalog Dalam Terbitan (Versi RDA)

Nama : Fatia Fatimah

Judul : Science and Technology for Society 5.0. (BNBB) / penulis, Dr. Fatia Fatimah, S.Si., M.Pd., Darsih Idayani, M.Si., Selly Anastassia Amellia Kharis, S.Pd., M.Si., Dra. Lintang Patria, M.Kom., Ing. Mohamad Rajih Radiansyah, B.AS., M.Sc., Athiefah Fauziyyah, S.T.P., M.Si., Dini Nur Hakiki, S.T.P., M.Si., Dra. Eko Yuliasuti Endah Sulistyawati, M.Si., Diki, S.Si., M.Ed., Ph.D., Mutimanda Dwisatyadini, M.Kep., Cut Meutia Fajrina, Fikri Nashrullah, Venty Fitriany Nurunisa, SE., M.Si., M.Sc., Ir. Sri Yuniati Putri Koes Hardini, M.P., Prof. Dr. Ir. Iman Rahayu Hidayati Soesanto, MS. IPU, Adhi Susilo, S.Pt., M.Biotech.St., Ph.D., Tejo Susanto, S.P., Nurhidayat, Amd. Kom., S.P., Timbul Rasoki, S.P., M.Si., Ana Nurmalia, S.P., M.Si., Lina Asnamawati, S.P., M.Si., I Gede Wyana Lokantara, S.Pd., M.Eng., Farisa Maulinam Amo, ST., M.T., Erika Pradana Putri, ST., M.Sc., Ulul Hidayah, ST., M.Si.; penelaah, Dr. Lina Warlina, M.Ed., Dr. Ir. Rinda Noviyanti, M.Si., Dr. Hurip Pratomo, M.Si., Dr. Welli Yuliatmoko, S.T.P., M.Si., Elin Herlinawati, M.Si., Dr. Harmi Sugarti, M.Si., Sitta Alief Farihati, S.Si., M.Si., Dra. Dyah Paminta Rahayu, MSI., Dr. Lula Nadia, M.A., M.Si., Dr. Nurul Huda, M.A., Ir. Diarsi Eka Yani, M.Si., Diki, S.Si., M.Ed., Ph.D., Dra. Dwi Astuti Aprijani, M.Kom.; penyunting, Dr. Sri Harijati, M.A., Sri Utami, S.ST., M.Kes., Dini Nur Hakiki, S.T.P., M.Si., Wahyu Noviani Purwanti, S.Si., M.Si.; penata letak, Nono Suwarno; perancang kover dan ilustrasi, Sunarti, S.Des.

Cetakan : 1

Deskripsi : Tangerang Selatan : Universitas Terbuka, 2021 | 435 halaman ; 21 cm

(termasuk daftar referensi)

ISBN : 978-623-312-545-1

e-ISBN : 978-623-312-546-8

Subyek : 1. Ilmu -- Aspek Sosial

2. Science -- Social Aspect

Nomor klasifikasi : 303.483 [23]

Dicetak oleh PT. Gramedia

202100223

PENGANTAR DEKAN FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Dengan mengucapkan puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, Buku Seminar Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Terbuka (FST UT) tahun 2021 diterbitkan bersamaan dengan pelaksanaan perdana Seminar Internasional oleh FST UT, dengan tema besar “*Science and Technology for Society Development*” pada tahun 2021. Buku dengan tema lebih spesifik yaitu *Science and Technology for Society 5.0* merupakan sumbangsih para dosen FST UT yang konsisten menunjukkan komitmen akademiknya. Peluncuran buku ini juga membuktikan bahwa pandemi Covid-19 tidak menyurutkan semangat dosen FST UT yang konsisten membagikan ide, gagasan, dan pemikirannya di bidang ilmu masing-masing yang dituangkan melalui artikel-artikel dalam buku ini. Budaya akademik telah dibangun FST UT melalui peluncuran buku bersamaan dengan pelaksanaan seminar pada setiap tahun.

Sesuai tema, buku ini berisi kajian perkembangan sains dan teknologi menghadapi era *society 5.0* dari sudut pandang berbagai bidang ilmu. *Society 5.0* atau masyarakat 5.0 merupakan suatu era masyarakat yang diharapkan dapat menyelesaikan berbagai tantangan dan permasalahannya dengan memanfaatkan berbagai inovasi yang lahir dari perkembangan sains dan teknologi. Konsep *society 5.0* atau yang dikenal dengan ***super smart society*** atau **masyarakat super cerdas**, dikenalkan pertama kali oleh pemerintah Jepang, yang menekankan bahwa teknologi harus menjadi bagian dari manusia itu sendiri. Konsep *society 5.0* merupakan penyempurnaan dari konsep-konsep yang telah ada sebelumnya mulai dari era *society 1.0* hingga 4.0. Pada masa *society 4.0*, era informasi yang berbasis otomatisasi dan digitalisasi, membuat masyarakat dapat mengakses *cloud-cloud* (database) di dunia maya, mengumpulkan berbagai informasi melalui jaringan dan menganalisisnya terlebih dahulu untuk dapat memanfaatkannya. Sedangkan di era *society 5.0* ini, manusia, benda, dan sistem semuanya terhubung di dunia maya, dengan bantuan *artificial intelligence*, *internet of think*, dan *big data* yang ditransformasikan kembali ke dunia nyata menjadi berbagai alternatif solusi yang dapat dipilih masyarakat. Masyarakat menjadi pengendali dalam menentukan pilihan

solusi yang sesuai kebutuhannya tanpa harus mengganggu lingkungan fisik dan sosialnya; dan inilah alasan disebut sebagai masyarakat super cerdas.

Berbagai permasalahan global saat ini, seperti populasi manusia yang terus meningkat, menipisnya sumber daya alam dan energi, konversi lahan pertanian, kerusakan lingkungan, berkurangnya keanekaragaman hayati, ketahanan pangan, kesehatan, bencana alam, dan sebagainya, membutuhkan solusi dengan paradigma baru yaitu pendekatan sains dan teknologi *society 5.0* yang lebih berpusat ke manusia (*human centered*). Beberapa contohnya seperti: penggunaan *big data* yang dapat diterapkan dalam pemecahan isu perubahan lingkungan, bencana, kesehatan; penggunaan teknologi *computer vision* untuk keamanan dan analisa kualitas pangan; biologi molekuler dan genetika molekuler yang dengan data lebih akurat untuk konservasi sumber daya hayati; *smart farming* sebagai inovasi agribisnis di segala lini, dari hulu sampai hilir, *on farm* maupun *off farm* untuk mewujudkan ketahanan pangan dan kesejahteraan pelaku agribisnis yang berkelanjutan; *smart city* yang humanis, efisien, dan berinovasi tinggi; serta berbagai contoh lainnya. Muara dari paradigma *society 5.0* adalah keputusan manusia dalam memilih teknologi dan inovasi untuk membangun manusia yang lebih berkualitas, hidup selaras dengan alam, lingkungan, dan masyarakat sosialnya.

Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka terus berkontribusi dalam mengembangkan inovasi bidang sains dan teknologi yang bertumpu pada bidang ilmu yang dikembangkan di FST UT. Berbagai ide, pemikiran, dan kreativitas akademik telah dituangkan baik dalam bentuk kajian ilmiah, riset, pengabdian pada masyarakat, dan berbagai bentuk publikasi ilmiah. Salah satunya publikasi melalui penerbitan buku ini. Karya para dosen FST UT terkait peran sains dan teknologi dalam *society 5.0* melalui buku ini dikelompokkan ke dalam 3 (tiga) topik besar, yaitu (1) *big data* dan teknologi informasi, (2) ketahanan pangan dan kesehatan, serta (3) biodiversitas atau keanekaragaman hayati untuk lingkungan yang berkelanjutan. Ketiga topik besar ini mewadahi ragam 7 (tujuh) program studi dan dosen FST UT dengan kepakarannya; yaitu Program Studi Matematika, Statistika, Biologi, Agribisnis, Teknologi Pangan, Perencanaan Wilayah Kota, dan Sistem Informasi.

Terwujudnya buku ini merupakan kerja bersama dan komitmen dari berbagai pihak yaitu penulis, penelaah, editor, *layouter*, *illustrator*, dan sejumlah pihak lain yang tidak kenal lelah terlibat sejak awal pengembangan

hingga terbitnya buku ini. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya dan penghargaan yang setinggi-tingginya atas kontribusi, kerjasama, dukungan, serta doanya. Kerja keras dan semangat yang tak kenal lelah telah membuahkan karya ilmiah ini, sebagai bagian yang juga turut membangun terwujudnya tradisi ilmiah di FST UT khususnya, dan UT pada umumnya.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan kepada Rektor UT, Para Wakil Rektor, dan Seluruh Pimpinan Unit di UT yang telah memberikan arahan, dukungan, dan bantuannya dalam berbagai bentuk, sehingga buku ini dapat tersusun dan terbit pada waktunya. Kepada semua unsur pimpinan FST UT yaitu Wakil Dekan, Ketua Jurusan, Ketua Program Studi, Koordinator dan Sub Koordinator, serta seluruh Dosen dan Tenaga Kependidikan di FST UT, terima kasih atas perhatian, kerjasama, komitmennya serta semangatnya dalam bahu membahu mewujudkan buku ini.

Semoga ide, pemikiran, dan kreativitas akademik dalam buku karya dosen FST UT ini dapat memberi manfaat dan menggugah inspirasi para pembaca terutama dalam ikut berupaya mewujudkan masyarakat yang lebih cerdas; yaitu masyarakat yang mampu menjawab dan menyelesaikan berbagai tantangan serta permasalahannya dengan memanfaatkan perkembangan sains dan teknologi, tanpa harus mengorbankan lingkungan dan struktur sosialnya. Kami menyadari buku ini belum sempurna, sebagaimana perjalanan ilmu itu sendiri yang dinamis terus membutuhkan penyempurnaan dalam perjalanan pengembangan dan penerapannya, agar bermanfaat untuk kemaslahatan masyarakat serta keberlanjutan alam dan lingkungan. Untuk itu, saran dan masukan dari pembaca sangat kami butuhkan. Dengan senang hati kami menerima kritik, masukan, dan saran perbaikan untuk penyempurnaan buku ini.

Terimakasih atas perhatiannya.

Tangerang Selatan, 14 Oktober 2021
Dekan FST Universitas Terbuka

Dr. Subekti Nurmawati, M.Si.
NIP. 196705181991032001

DAFTAR ISI

PENGANTAR DEKAN FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI.....	i
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR SOCIETY 5.0.....	xix
Tim Editor	

BIG DATA SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY

N-SOFT SETS: TANTANGAN DALAM RISET BIG DATA

N-SOFT SETS: CHALLENGES IN BIG DATA RESEARCH

Fatia Fatimah	1
----------------------------	----------

**KONTROL OPTIMAL PADA MODEL PENGADAAN BAHAN MENTAH
DENGAN MEMPERHATIKAN TINGKAT KERUSAKAN DAN BIAYA
PEMESANAN**

***OPTIMAL CONTROL OF RAW MATERIAL PROCUREMENT MODEL
BY CONSIDERING THE DETERIORATION RATE AND ORDERING
COST***

Darsih Idayani	25
-----------------------------	-----------

**ANALISIS KEKERABATAN VIRUS DEMAM BERDARAH
MENGUNAKAN *TRIBE MARKOV CLUSTERING* DAN *SPARSE
MATRIX***

***ANALYSIS OF DANGUE VIRUS FAMILY USING TRIBE MARKOV
CLUSTERING AND SPARSE MATRIX***

Selly Anastassia Amellia Kharis	55
--	-----------

PENGGUNAAN AVERAGE – BASED FUZZY TIME SERIES CHEN
UNTUK PREDIKSI JUMLAH MAHASISWA BARU DI FST UT

*CHEN AVERAGE - BASED FUZZY TIME SERIES APPLICATION FOR
PREDICTING THE NUMBER OF NEW STUDENTS OF FST UT*

Lintang Patria..... 89

FOOD SECURITY AND HEALTH

PERAN COMPUTER VISION DALAM PRODUKSI PANGAN DAN
LINGKUNGAN BERKELANJUTAN

*COMPUTER VISION ROLE IN FOOD PRODUCTION AND
SUSTAINABILITY*

**M. Rajih Radiansyah, Athiefah Fauziyyah, Dini Nur Hakiki,
Eko Yuliasuti** 127

POTENSI MINUMAN TRADISIONAL INDONESIA SEBAGAI PRODUK
PANGAN FUNGSIONAL DI ERA SOCIETY 5.0

*THE POTENCY OF INDONESIAN TRADITIONAL BEVERAGES AS
FUNCTIONAL FOOD PRODUCTS IN THE SOCIETY 5.0 ERA*

**Athiefah Fauziyyah, Dini Nur Hakiki, Eko Yuliasuti, M. Rajih
Radiansyah**..... 153

BLIGO (*BENINCASA HISPIDA*): POTENSI DAN PENGEMBANGAN
RISET SEBAGAI PANGAN FUNGSIONAL DAN PRODUK BERNILAI
TAMBAH

*BLIGO (BENINCASA HISPIDA): POTENTIAL AND RESEARCH
DEVELOPMENT AS FUNCTIONAL FOOD AND VALUE ADDED
PRODUCTS*

**Dini Nur Hakiki, Athiefah Fauziyyah, Eko Yuliasuti, M. Rajih
Radiansyah**..... 177

BIODIVERSITY FOR SUSTAINABLE ENVIRONMENT

PERUBAHAN GENETIKA MIKROBA PADA KEADAAN
MIKROGRAVITASI DAN RADIASI ION DALAM PENERBANGAN DI
ANGKASA LUAR

*GENETIC MUTATION OF MICROBES IN MICROGRAVITY AND IONIC
RADIATION IN SPACEFLIGHT*

Diki, Mutimanda Dwisatyadini..... 209

HIBRIDISASI DAN INTROGRESI PADA PAUS BIRU (*Balaenoptera
musculus*) DAN PENGARUHNYA TERHADAP KONSERVASI

*HIBRIDIZATION AND INTROGRESSION OF BLUE WHALE
(Balaenoptera musculus) AND THEIR EFFECT TOWARD
CONSERVATION*

Diki, Cut Meutia Fajrina, Fikri Nashrullah 233

TANTANGAN DAN IMPLEMENTASI INOVASI NILAI
DALAM PENGEMBANGAN AGRIBISNIS UNTUK MASYARAKAT 5.0

*CHALLENGES AND VALUE INNOVATION IMPLEMENTATION IN
AGRICULTURAL DEVELOPMENT FOR SOCIETY 5.0*

Venty Fitriany Nurunisa 261

PERFORMA DAN TINGKAT KESEHATAN AYAM PEDAGING YANG
DIPELIHARA DENGAN KANDANG INTENSIF DAN KANDANG
UMBARAN

*PERFORMANCES AND HEALTH STATUS IN BROILERS MAINTAINED
WITH INTENSIVE AND FREE RANGE SYSTEM*

Sri Yuniati Putri Koes Hardini, Iman Rahayati Hidayati Soesanto.... 289

PENGARUH KOMPOS TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DAN KOTORAN SAPI DENGAN PGPR TERHADAP PRODUKSI PAKCHOI DI TANAH LATOSOL

EFFECT OF EMPTY FRUIT BUNCHES OF OIL PALM COMPOST, COW DUNG MANURE AND PGPR ON PAKCHOI GROWTH IN LATOSOL SOIL

Adhi Susilo, Tejo Susanto, Nurhidayat 309

ANALISIS KONVERSI LAHAN KELAPA SAWIT KE LAHAN PADI SAWAH

ANALYSIS OF LAND CONVERSION OF OIL PALM FARMING TO WETLAND

Timbul Rasoki, Ana Nurmalia, Lina Asnamawati 337

ANALISIS DAN STRATEGI PENGEMBANGAN MANAJEMEN KOTA BERBASIS SMART CITY DI KABUPATEN KENDAL

SMART CITY BASE ON URBAN MANAGEMENT ANALYSIS AND STRATEGY DEVELOPMENT IN KENDAL REGENCY

I Gede Wyana Lokantara, Farisa Maulinam Amo, Erika Pradana Putri, Ulul Hidayah 363

BIODATA PENULIS 393

DAFTAR TABEL

N-SOFT SETS: TANTANGAN DALAM RISET BIG DATA

Fatia Fatimah

Tabel 1. Volume Data	2
Tabel 2. Tabular <i>Soft Sets</i> Contoh 1.....	7
Tabel 3. <i>N-Soft Sets</i> (F, A, N)	8
Tabel 4. Tabular <i>6-soft sets</i> Contoh 2.....	9
Tabel 5. Perkembangan Teori <i>N-Soft Sets</i> per Tahun.....	10

KONTROL OPTIMAL PADA MODEL PENGADAAN BAHAN MENTAH DENGAN MEMPERHATIKAN TINGKAT KERUSAKAN DAN BIAYA PEMESANAN

Darsih Idayani

Tabel 1. Lintasan Optimal Periode Pengadaan Tepat Waktu.....	43
Tabel 2. Lintasan Optimal Periode Pergudangan.....	43
Tabel 3. Lintasan Optimal Periode Penundaan.....	44

ANALISIS KEKERABATAN VIRUS DEMAM BERDARAH MENGGUNAKAN *TRIBE MARKOV CLUSTERING* DAN *SPARSE MATRIX*

Selly Anastassia Amellia Kharis

Tabel 1. Algoritma MCL.....	69
Tabel 2. Algoritma <i>Tribe</i> MCL.....	69
Tabel 3. Data Sekuens Protein Virus Dengue.....	78
Tabel 4a. Nilai <i>E-value</i> Sekuens Protein Virus Dengue Kolom 1-9.....	80
Tabel 4b. Nilai <i>E-value</i> Sekuens Protein Virus Dengue Kolom 10-18...	81
Tabel 4c. Nilai <i>E-value</i> Sekuens Protein Virus Dengue Kolom 19-26...	82

PENGGUNAAN AVERAGE – BASED FUZZY TIME SERIES CHEN UNTUK PREDIKSI JUMLAH MAHASISWA BARU DI FST UT

Lintang Patria

Tabel 1. Data Historis dan Program Studi yang Diteliti.....	97
Tabel 2. Tabel Berbasis Interval.....	99
Tabel 3. FLRG Program Studi Matematika.....	102
Tabel 4. Hasil Defuzzifikasi Program Studi Matematika.....	103
Tabel 5. Hasil Peramalan Program Studi Matematika.....	103
Tabel 6. FLRG Program Studi Statistika.....	106
Tabel 7. Hasil Defuzzifikasi Program Studi Statistika.....	106
Tabel 8. Hasil Peramalan Program Studi Statistika.....	106

Tabel 9. FLRG Program Studi Agribisnis.....	108
Tabel 10. Hasil Defuzzifikasi Program Studi Agribisnis.....	109
Tabel 11. Hasil Peramalan Program Studi Agribisnis.....	109
Tabel 12. FLRG Program Studi Biologi.....	111
Tabel 13. Hasil Defuzzifikasi Program Studi Biologi.....	111
Tabel 14. Hasil Peramalan Program Studi Biologi.....	112
Tabel 15. FLRG Program Studi TP.....	113
Tabel 16. Hasil Defuzzifikasi Program Studi TP.....	114
Tabel 17. Hasil Peramalan Program Studi TP.....	114
Tabel 18. FLRG Program Studi PWK.....	116
Tabel 19. Hasil Defuzzifikasi Program Studi PWK.....	116
Tabel 20. Hasil Peramalan Program Studi PWK.....	117
Tabel 21. Hasil Defuzzifikasi Program Studi Sistem Informasi.....	118
Tabel 22. Hasil Peramalan Program Studi Sistem Informasi.....	119
Tabel 23. Akurasi Peramalan Program Studi.....	120

POTENSI MINUMAN TRADISIONAL INDONESIA SEBAGAI PRODUK PANGAN FUNGSIONAL DI ERA SOCIETY 5.0

Athiefah Fauziyyah, Dini Nur Hakiki, Eko Yuliasuti, M. Rajih Radiansyah

Tabel 1. Sumber Antioksidan Berbagai Tanaman Herbal.....	159
Tabel 2. Jenis Minuman Tradisional Indonesia.....	160

BLIGO (*BENINCASA HISPIDA*): POTENSI DAN PENGEMBANGAN RISET SEBAGAI PANGAN FUNGSIONAL DAN PRODUK BERNILAI TAMBAH

Dini Nur Hakiki, Athiefah Fauziyyah, Eko Yuliasuti, M.Rajih Radiansyah

Tabel 1. Taksonomi Tanaman Bligo.....	180
Tabel 2. Bagian dan Rendemen Buah Bligo.....	182
Tabel 3. Kandungan Nutrisi pada Buah Bligo.....	184
(per 100 g berat yang dapat dimakan)	
Tabel 4. Kandungan Gizi <i>Food Bar</i> Bligo.....	194

TANTANGAN DAN IMPLEMENTASI INOVASI NILAI DALAM PENGEMBANGAN AGRIBISNIS UNTUK MASYARAKAT 5.0

Venty Fitriany Nurunisa

Tabel 1. Perbedaan <i>Red Ocean Strategy</i> dan <i>Blue Ocean Strategy</i>	266
Tabel 2. Sumber Pembiayaan Sektor Pertanian.....	270
Tabel 3. Kategori <i>Startup</i> Pertanian di Indonesia.....	273

PERFORMA DAN TINGKAT KESEHATAN AYAM PEDAGING YANG
DIPELIHARA DENGAN KANDANG INTENSIF DAN KANDANG UMBARAN

Sri Yuniati Putri Koes Hardini, Iman Rahayu Hidayati Soesanto

Tabel 1. Skoring untuk Footpad Dermatitis.....	296
Tabel 2. Skoring untuk Hockburn.....	297
Tabel 3. Skoring untuk Breast Blister.....	299
Tabel 4. Rerata Penampilan atau Performa Ayam (N=100).....	300
Tabel 5. Rerata Pengamatan <i>Hockburn</i> dan <i>Footpad</i>	301
Dermatitis Ayam Umur 3 Minggu.	
Tabel 6. Rerata <i>Footpad</i> Dermatitis, <i>Breast Blister</i> , dan <i>Hockburn</i> pada Ayam Umur 6 Minggu.....	304

PENGARUH KOMPOS TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DAN
KOTORAN SAPI DENGAN PGPR TERHADAP PRODUKSI PAKCHOI DI
TANAH LATOSOL

Adhi Susilo, Tejo Susanto, Nurhidayat

Tabel 1. Rataan Hasil Panen Pakchoi Layak Pasar dari Masing-masing Kelompok/Ulangan (Dosis Kompos dalam Ton Ha ⁻¹ dan PGPR dalam Liter Ha ⁻¹).....	323
Tabel 2. Rataan Berat Segar Per Tanaman (Gram) pada Masing- masing Kombinasi (Dosis Kompos dalam Ton Ha ⁻¹ dan PGPR dalam Liter Ha ⁻¹).....	324
Tabel 3. Analisis Varian Kompos dan PGPR.....	326
Tabel 4. Analisis Varian Lanjutan Faktor Kompos dan PGPR terhadap Respon Variabel Dependen	330
Tabel 5. Respon Interaksi antara Kompos dengan PGPR.....	332

ANALISIS KONVERSI LAHAN KELAPA SAWIT KE LAHAN PADI SAWAH

Timbul Rasoki, Ana Nurmalia, Lina Asnamawati

Tabel 1. Karakteristik Responden Berdasarkan Umur.....	342
Tabel 2. Karakteristik Responden Berdasarkan Pendidikan Terakhir...	343
Tabel 3. Karakteristik Responden Berdasarkan Jumlah Anggota Keluarga.....	344
Tabel 4. Karakteristik Responden Berdasarkan Luasan Lahan.....	344
Tabel 5. Data Panjang Jaringan Irigasi Tingkat Usaha Tani Irigasi Air Manjunto.....	346
Tabel 6. Variabel Terikat dan Variabel Bebas Analisa Konversi Lahan dari Kelapa Sawit ke Padi Sawah di Kabupaten Mukomuko	352

Tabel 7. Uji Kompreherensif (Simultan) Model Regresi Probit Faktor-faktor yang Mempengaruhi Konversi Lahan dari Kelapa Sawit ke Padi Sawah di Kabupaten Mukomuko.....	353
Tabel 8. Uji Parsial Model Regresi Probit Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Konversi Lahan dari Kelapa Sawit ke Padi Sawah di Kabupaten Mukomuko.....	354

ANALISIS DAN STRATEGI PENGEMBANGAN MANAJEMEN KOTA BERBASIS SMART CITY DI KABUPATEN KENDAL

I Gede Wyana Lokantara, Farisa Maulinam Amo, Erika Pradana Putri, Ulul Hidayah

Tabel 1. Indikator <i>E-readiness</i> dalam Mengidentifikasi Kesiapan <i>Smart City</i> Kabupaten Kendal.....	370
Tabel 2. Indeks Pembangunan Kota Berbasis <i>Smart City</i>	372
Tabel 3. Contoh Penerapan Program <i>Smart City</i> Kabupaten Kendal.....	377
Tabel 4. Analisis Pengembangan <i>Smart City</i> Kabupaten Kendal.....	384

DAFTAR GAMBAR

SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR SOCIETY 5.0

Tim Editor

Gambar 1. Perkembangan Konsep <i>Society</i> 5.0.....	X
Gambar 2. Ilustrasi <i>Society</i> 5.0.....	xii

N-SOFT SETS: TANTANGAN DALAM RISET BIG DATA

Fatia Fatimah

Gambar 1. Tipe Analisis Big Data.....	4
Gambar 2. <i>Soft Sets</i> dalam Ruang Tiga Dimensi.....	7
Gambar 3. Penelitian <i>N-Soft Sets</i> Sejak Tahun 2018 Sampai 2021.....	12
Gambar 4. <i>State of The Art</i> dari <i>N-Soft Sets</i>	13

**KONTROL OPTIMAL PADA MODEL PENGADAAN BAHAN MENTAH
DENGAN MEMPERHATIKAN TINGKAT KERUSAKAN DAN BIAYA
PEMESANAN**

Darsih Idayani

Gambar 1. Skema Kontrol	30
Gambar 2. Arus Persediaan Bahan Mentah.....	37
Gambar 3. Solusi Optimal.....	50

**ANALISIS KEKERABATAN VIRUS DEMAM BERDARAH MENGGUNAKAN
TRIBE MARKOV CLUSTERING DAN SPARSE MATRIX**

Selly Anastassia Amellia Kharis

Gambar 1. Skema Penelitian.....	59
Gambar 2. Struktur Virus Dengue.....	60
Gambar 3. Flavivirus NS3 dan NS5 <i>Proteins Interaction Network</i>	62
Gambar 4. Penyejajaran Sekuens.....	63
Gambar 5. Format FASTA Sekuens Protein Hemaglutinin (HA) Virus A/swine/Hubei/02/2008 (H1N1).....	64
Gambar 6. Graf dan Matriks Ketetangaan.....	66
Gambar 7. Flow Chart Algoritma <i>Tribe</i> MCL.....	71
Gambar 8. Pembentukan Matriks <i>Adjacency</i>	73
Gambar 9. Pembentukan Matriks Markov.....	73
Gambar 10. Konversi Nilai <i>E-value</i>	74
Gambar 11. Penambahan Gelung Matriks S_0	75
Gambar 12. Matriks Hasil Normalisasi.....	75
Gambar 13. Matriks Hasil Ekspansi.....	76

Gambar 14. Matriks Hasil Proses Inflasi.....	76
Gambar 15. Matriks Hasil Pengelompokan.....	77
Gambar 16. Graf Hasil Pengelompokan.....	77
Gambar 17. <i>Adjacency Matrix</i> Virus Dengue dalam Bentuk <i>Sparse Matrix</i>	83
Gambar 18. Graf Interaksi 26 Protein Berdasarkan <i>Adjacency Matrix</i>	84
Gambar 19. Matriks Konvergen dengan <i>Tribe MCL</i>	85
Gambar 20. Hasil Pengelompokan dengan <i>Tribe MCL</i>	86

PENGUNAAN AVERAGE – BASED FUZZY TIME SERIES CHEN UNTUK PREDIKSI JUMLAH MAHASISWA BARU DI FST UT

Lintang Patria

Gambar 1. Himpunan: Muda, Paruh baya dan Tua.....	94
Gambar 2. Himpunan Fuzzy untuk Umur.....	95
Gambar 3. Skema Perhitungan <i>Average - Based Fuzzy Time Series</i> Chen.....	97
Gambar 4. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi Matematika.....	104
Gambar 5. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi Statistika.....	107
Gambar 6. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi Agribisnis.....	110
Gambar 7. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi Biologi.....	112
Gambar 8. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi TP	115
Gambar 9. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi PWK.....	117
Gambar 10. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi Sistem Informasi.....	119

PERAN COMPUTER VISION DALAM PRODUKSI PANGAN DAN LINGKUNGAN BERKELANJUTAN

M. Rajih Radiansyah, Athiefah Fauziyyah, Dini Nur Hakiki, Eko Yulastuti

Gambar 1. Prediksi Pertumbuhan Populasi Dunia 2000- 2050.....	128
Gambar 2. Penggunaan Lahan Dunia untuk Agrikultur pada Tahun 2018.....	130
Gambar 3. Ilustrasi Pembajakan Tanah oleh Petani di Mongolia.....	132
Gambar 4. Contoh Rancangan Sistem <i>Computer Vision</i> pada Suatu <i>Line</i> Produksi.....	135

Gambar 5. Rangkaian dasar sebuah sistem CV: (1) Sampel; (2) Alas/wadah sampel dengan latar belakang yang sesuai; (3) Kamera; (4) Sumber cahaya; (5) <i>Image capture board</i> ; (6) Komputer.....	136
Gambar 6. Sistem CV Statis Berupa Kotak 70 m ³ dengan Penerangan Lampu <i>Fluorescent</i> , Kamera Canon dan Wadah untuk Sampel.....	137
Gambar 7. Konfigurasi Iluminasi Sistem CV: (a) <i>Ring Illuminator</i> ; (b) <i>Diffuse Illuminator</i>	138
Gambar 8. Diagram Kromasitas Yxy.....	141
Gambar 9. Diagram CIE LAB dan LCH untuk parameter <i>lightness</i> (L*), <i>green – red</i> (a*), <i>blue – yellow</i> (b*), <i>chroma</i> (c*) dan <i>hue</i> (h°).....	142
Gambar 10. Empat Metode Analisa HI.....	144
BLIGO (<i>BENINCASA HISPIDA</i>): POTENSI DAN PENGEMBANGAN RISET SEBAGAI PANGAN FUNGSIONAL DAN PRODUK BERNILAI TAMBAH Dini Nur Hakiki, Athiefah Fauziyyah, Eko Yulastuti, M.Rajih Radiansyah	
Gambar 1. Tanaman Bligo Tumbuh di Lanjaran.....	180
Gambar 2. Bentuk Buah Bligo.....	181
Gambar 3. Proses Pembuatan <i>Food Bar</i> Bligo.....	193
PERUBAHAN GENETIKA MIKROBA PADA KEADAAN MIKROGRAVITASI DAN RADIASI ION DALAM PENERBANGAN DI ANGKASA LUAR Diki, Mutimanda Dwisatyadini	
Gambar 1. Manfaat Studi tentang Mikroorganisme di Angkasa Luar...	213
Gambar 2. Stasiun <i>International Space Station</i> (ISS).....	217
HIBRIDISASI DAN INTROGRESI PADA PAUS BIRU (<i>Balaenoptera musculus</i>) DAN PENGARUHNYA TERHADAP KONSERVASI Diki, Cut Meutia Fajrina, Fikri Nashrullah	
Gambar 1. Paus Biru (<i>Balaenoptera musculus</i>).....	236
Gambar 2. Paus Sirip (<i>Balaenoptera physalus</i>).....	236
Gambar 3. Individu Hibrida Paus Biru/Paus Sirip di Pesisir California, Amerika Serikat.....	248
Gambar 4. Pohon Filogenetik Keluarga Paus Balin.....	250

TANTANGAN DAN IMPLEMENTASI INOVASI NILAI
DALAM PENGEMBANGAN AGRIBISNIS UNTUK MASYARAKAT 5.0

Venty Fitriany Nurunisa

Gambar 1. Komposisi Penduduk Indonesia Berdasarkan Hasil Sensus Penduduk Tahun 2020.....	262
Gambar 2. Inovasi Nilai.....	267
Gambar 3. Alur Rantai Pasok Produk Pertanian secara Umum.....	271
Gambar 4. Alur Rantai Pasok Produk Pertanian dengan Inovasi E-Commerce.....	275
Gambar 5. Kanvas Strategi Awal Wisata Alam Umbul Besuki dan Umbul Ponggok.....	279
Gambar 6. Kanvas Strategi Industri Bunga Krisan di Kabupaten Cianjur	280
Gambar 7. Ilustrasi Kanvas Strategi PT Alinda di Masa Depan Terhadap Pesaing Menggunakan Pendekatan <i>Blue Ocean Strategy</i>	282

PERFORMA DAN TINGKAT KESEHATAN AYAM PEDAGING YANG
DIPELIHARA DENGAN KANDANG INTENSIF DAN KANDANG UMBARAN

Sri Yuniati Putri Koes Hardini, Iman Rahayu Hidayati Soesanto

Gambar 1. Kandang Intensif dan Kandang <i>Umbaran</i>	294
Gambar 2. Kondisi Footpad Dermatitis pada Ayam.....	296
Gambar 3. Kondisi Kasus Pengamatan Hockburn.....	297
Gambar 4. Kondisi Kasus Pengamatan <i>Breast blister</i>	299

PENGARUH KOMPOS TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DAN KOTORAN
SAPI DENGAN PGPR TERHADAP PRODUKSI PAKCHOI DI TANAH
LATOSOL

Adhi Susilo, Tejo Susanto, Nurhidayat

Gambar 1. Agribisnis dan Komponennya.....	313
Gambar 2. Proses Produksi Budi daya Tanaman.....	314
Gambar 3. Pengaruh Perlakuan Dosis Kompos (ton ha ⁻¹)	327
Gambar 4. Pengaruh Perlakuan Dosis PGPR (liter ha ⁻¹).....	327
Gambar 5. Pengaruh Perlakuan Kombinasi Dosis Kompos (Ton Ha ⁻¹) dengan PGPR (Liter Ha ⁻¹)	328
Gambar 6. Pola Interaksi Dosis Kompos TTKS dan PGPR.....	329
Gambar 7. Pola Respon Variabel Dependen terhadap Perlakuan Kompos dan PGPR (ton ha ⁻¹ ; liter ha ⁻¹).....	331

ANALISIS DAN STRATEGI PENGEMBANGAN MANAJEMEN KOTA
BERBASIS SMART CITY DI KABUPATEN KENDAL

I Gede Wyana Lokantara, Farisa Maulinam Amo, Erika Pradana

Putri, Ulul Hidayah

Gambar 1. Korelasi RPJMD dan <i>Smart City</i> Kabupaten Kendal.....	366
Gambar 2. Prioritas Pembangunan RPJMD Kabupaten Kendal.....	368
Gambar 3. Nilai <i>E-readiness</i> Berdasarkan Komponen Pendukung.....	375
Gambar 4. Nilai <i>E-readiness</i> Berdasarkan Faktor Keberhasilan <i>Smart City</i>	376
Gambar 5. Analisis <i>Boyd Cohen Smart City Wheel</i> Kabupaten Kendal Tahun 2021.....	380

SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR SOCIETY 5.0

Tim Editor

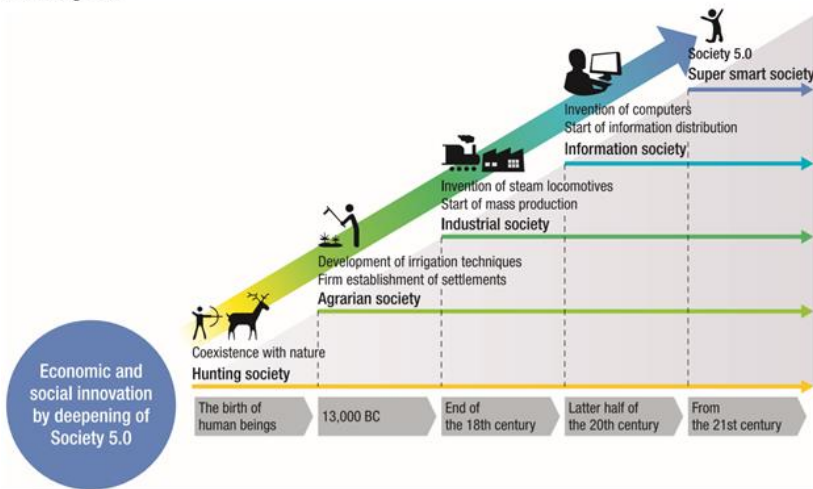
Inovasi dalam sains dan teknologi berkembang dengan sangat cepat; bahkan kecepatan pengembangannya melebihi kemampuan masyarakat mengadaptasi. Belum terlalu lama dunia menghadapi *ephoria* era industri 4.0, hampir semua aspek atau bidang melakukan adaptasi teknologi 4.0. Demikian juga dengan Indonesia, baru pada tahun 2018 pemerintah mengeluarkan kebijakan menghadapi era industri 4.0 di berbagai sektor; mulai dari peningkatan kemampuan sumberdaya manusia, pengembangan infrastruktur pendukung, penyesuaian sistem kerja yang serba digitalisasi, dan sebagainya (Kemenperin, 2018). Saat ini dunia sudah dihadapkan pada era baru, yaitu era *society* 5.0 atau masyarakat 5.0. Beberapa negara telah melakukan kajian sebagai respon awal terhadap hadirnya konsep *society* 5.0, termasuk Indonesia; bahkan ada yang sudah fokus cukup jauh menyiapkan diri untuk mewujudkan *society* 5.0.

Society 5.0 atau masyarakat 5.0 merupakan konsep yang dikenalkan pertama kali oleh pemerintah Jepang, yang menekankan bahwa teknologi harus menjadi bagian dari manusia itu sendiri. Konsep ini hadir untuk menyelesaikan permasalahan yang muncul di era industri 4.0; antara lain: tidak seimbanginya perkembangan teknologi dan kesejahteraan masyarakat; masih adanya jarak antara teknologi dan manusia; sehingga ada potensi teknologi dapat mendegradasi peran manusia, serta potensi ketimpangan kesejahteraan antar manusia. Era *society* 5.0 merupakan perkembangan atau penyempurnaan dari konsep-konsep yang telah ada sebelumnya. Dimulai dari era *society* 1.0 atau era masyarakat berburu (*hunting society*), era *society* 2.0 atau masyarakat pertanian (*agricultural society*), era *society* 3.0 atau masyarakat industri (*industrial society*), dan era *society* 4.0 atau masyarakat informasi (*information society*). Sebagai penyempurnaan dari *society* 4.0, *society* 5.0 disebut sebagai *super smart society* atau masyarakat super cerdas (**Gambar 1**).

Dalam rancangan pemerintah Jepang, konsep *society* 5.0 memiliki sejumlah karakteristik; yaitu: (1) merupakan sebuah tahap peradaban manusia yang didukung oleh kemajuan teknologi dan inovasi; (2) fokus pada aspek kemanusiaan dan menjadikan titik tumpu perkembangannya, terbuka untuk semua bidang dimasyarakat, berkelanjutan dan inklusif, tidak memprioritaskan kemajuan teknologi dan ekonomi yang akan berpihak

pada ahli tertentu; (3) didorong kuat oleh banyak percobaan untuk terus meningkatkan kehidupan; (4) memberikan kesempatan untuk semua orang agar dapat meningkatkan kualitas hidupnya; dan (5) mendorong seluruh bagian masyarakat untuk berkolaborasi dan berfokus pada tujuan yang sama untuk masa depan umat manusia (Nakanishi & Kitano, 2018; Padjadjaran Fest & Conference, 2021). *Society 5.0* merupakan suatu era masyarakat yang diharapkan dapat menjawab dan menyelesaikan berbagai tantangan dan permasalahannya dengan memanfaatkan berbagai inovasi yang lahir dari perkembangan sains dan teknologi. Dengan demikian, sesuai rancangan tersebut, *society 5.0* merupakan upaya manusia untuk membuat kemajuan teknologi, ekonomi, dan kehidupan yang nyaman secara inklusif untuk mencapai kemajuan bersama, berdampingan bersama teknologi yang sudah berkembang.

Society 5.0



Sumber: Fukuyama, 2018

Gambar 1. Perkembangan Konsep *Society 5.0*

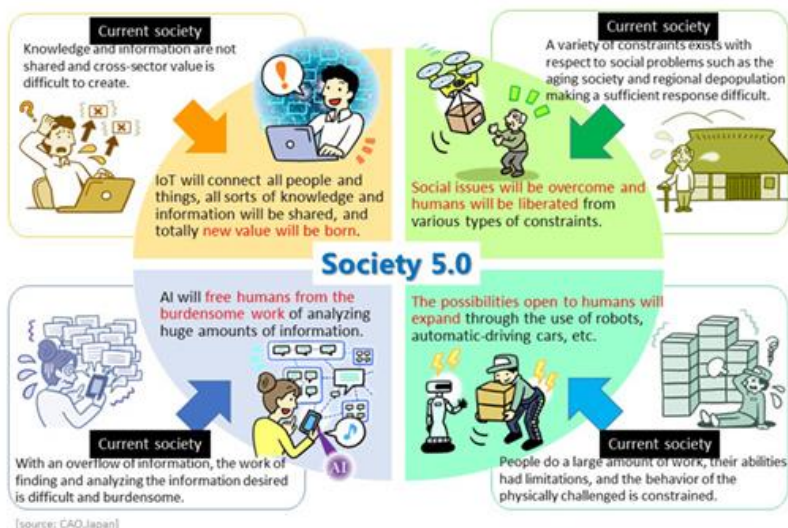
Pada masa *society 4.0*, era informasi yang berbasis otomatisasi dan digitalisasi, membuat masyarakat dapat mengakses basis data (*database*) di dunia maya, mengumpulkan berbagai informasi melalui jaringan dan menganalisisnya terlebih dahulu untuk dapat memanfaatkannya. Namun,

kondisi ini menimbulkan sejumlah masalah yaitu manusia dapat terdegradasi oleh mesin atau teknologi. Selain itu, masalah juga timbul karena kemakmuran bukan untuk semua masyarakat tetapi hanya individu atau kelompok yang memiliki keahlian saja. Sedangkan di era *society* 5.0 ini, manusia, benda, dan sistem semuanya terhubung di dunia maya, dengan bantuan *artificial intelligence*, *internet of think*, dan *big data* yang ditransformasikan kembali ke dunia nyata menjadi berbagai alternatif solusi yang dapat dipilih masyarakat. Kokritnya, melalui *society* 5.0, **kecerdasan buatan** yang memperhatikan sisi **kemanusiaan** akan mentransformasi **jutaan data** yang dikumpulkan melalui **internet** pada segala bidang kehidupan menjadi berbagai alternatif solusi. Masyarakat memiliki kesempatan yang sama untuk memanfaatkan berbagai solusi tersebut, sehingga kemakmuran diharapkan untuk semua masyarakat. Masyarakat menjadi pengendali dalam menentukan pilihan solusi yang sesuai kebutuhannya (**Gambar 2**).

Hingga saat ini, dunia masih dihadapkan pada berbagai permasalahan yang kompleks. Jumlah penduduk dunia yang terus meningkat, membutuhkan pangan dan tempat hunian; namun di satu sisi terjadi konversi lahan pertanian secara besar-besaran yang justru menurunkan ketahanan pangan. Penurunan luas lahan pertanian di pedesaan ini juga menyebabkan terjadinya urbanisasi. Tingginya jumlah penduduk perkotaan ini, pada akhirnya memunculkan masalah sosial yang kompleks. Berbagai masalah lanjutan muncul yaitu menipisnya sumber daya alam dan energi, kerusakan dan penurunan kualitas lingkungan, berkurangnya keanekaragaman hayati, dan masalah kesehatan. Belum lagi adanya bencana alam, juga menimbulkan masalah dan kerusakan pada berbagai aspek. Pengembangan sains dan teknologi ditujukan untuk mengatasi permasalahan dan tantangan tersebut. Namun, penerapan teknologi tanpa mempertimbangkan manfaat dan dampak lanjutannya justru dapat mengakibatkan masalah lanjutan. Kenyataan bahwa kemajuan teknologi juga dapat memacu industri untuk memenuhi kebutuhan manusia, berakibat pada lingkungan yang tereksplotasi. Sehingga menjadi sebuah pertanyaan besar "*Bagaimana perkembangan sains dan teknologi yang dapat memberikan manfaat sebesar-besarnya untuk manusia tanpa merusak lingkungan?*"

Berdasarkan paradigma *society* 5.0 yang dikembangkan oleh Pemerintah Jepang, sains dan teknologi dirancang pengembangan dan

penggunaannya untuk membantu meningkatkan kualitas hidup manusia tanpa merusak lingkungan dan struktur sosial. Pendekatan sains dan teknologi *society* 5.0 yang lebih berpusat ke manusia tersebut akan menyeimbangkan kemajuan ekonomi dengan penyelesaian masalah sosial melalui sistem dengan mengintegrasikan dunia maya (*big data, internet of things, artificial intelligence*) dan ruang fisik. Muara dari paradigma *society* 5.0 adalah keputusan manusia dalam memilih teknologi dan inovasi untuk membangun manusia yang lebih berkualitas, hidup selaras dengan alam, lingkungan, dan masyarakat sosialnya.



Sumber: Government of Japan, 2018

Gambar 2. Ilustrasi *Society* 5.0

Hadirnya paradigma baru “*society* 5.0” atau “masyarakat 5.0”, tentu memunculkan sejumlah pertanyaan atau kegalauan bagi kita. *Apakah kita siap berkontribusi mewujudkan masyarakat 5.0 ? Bagaimana perwujudan dari masyarakat 5.0 ini ? Apa yang harus disiapkan terutama berkaitan dengan kemampuan SDM atau kompetensi apa yang harus dimiliki SDM ? Apa yang harus disiapkan oleh semua pihak untuk mewujudkan masyarakat 5.0, termasuk institusi pendidikan?* Tentu, *society* 5.0 bukan hadir begitu saja sebagai barang yang dapat langsung dimanfaatkan, namun *society* 5.0

harus dibangun untuk diwujudkan, harus ada upaya untuk mewujudkan. Faktor utama yang perlu menjadi perhatian besar adalah aspek manusia yaitu kemampuan SDM, kemudian faktor inovasi teknologi mulai dari ide/gagasan, penelitian, ujicoba hasil penelitian sampai saat penerapan teknologi, serta pengembangan infrastruktur (Faulinda & 'Abdu, 2020).

Sebagai bagian dari institusi pendidikan, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Terbuka (FST UT) diharapkan mampu terlibat dalam mewujudkan *society* 5.0. Salah satunya adalah dalam hal pengembangan inovasi bidang sains dan teknologi yang bertumpu pada bidang ilmu yang dikelola. Upaya melalui berbagi pemikiran, ide/gagasan, melakukan reuview literatur, penelitian, dan diseminasi hasil penelitian merupakan bentuk awal kontribusi dalam mewujudkan *society* 5.0 atau masyarakat 5.0 yang dituangkan dalam sebuah buku. Buku ini berisi sejumlah kajian ilmiah dan kreativitas akademik para dosen FST UT terkait peran sains dan teknologi dalam *society* 5.0. Ada 3 (tiga) topik yang dikaji dalam buku ini; masing-masing topik diwakili sejumlah kajian ilmiah dosen FST UT. Topik pertama, yaitu *Big Data Science and Information Technology*, akan diisi dengan 4 (empat) kajian ilmiah oleh dosen dari Program Studi Matematika dan Sistem Informasi. Untuk topik kedua, *Food Security and Health*, akan diisi 3 (tiga) kajian ilmiah oleh dosen dari Program Studi Teknologi Pangan. Serta topik ketiga, *Biodiversity for Sustainable Environment* akan diisi dengan 7 (tujuh) kajian ilmiah dosen dari Program Studi Biologi, Agribisnis, dan Perencanaan Wilayah dan Kota. Buku ini diharapkan dapat digunakan sebagai langkah awal dalam upaya ikut mewujudkan *society* 5.0.

Salah satu karakteristik dalam menyongsong *society* 5.0 adalah adanya peningkatan pemanfaatan *big data* dan teknologi informasi yang membantu pengambilan keputusan dalam penyelesaian permasalahan di sejumlah bidang. Oleh karena itu, ***big data science and information technology*** menjadi salah satu topik yang dikaji dalam buku ini. Salah satu kontribusi ditunjukkan oleh tulisan **Fatia Fatima** berjudul ***N-Soft Sets: Tantangan dalam Riset Big Data***. Tulisan ini memberikan penjelasan tentang teori *N-soft sets*, yang merupakan salah satu teori untuk mengatasi masalah yang mengandung ketidakpastian (*uncertainty*) dengan menggunakan analisis *big data*. *N-soft sets* dapat direpresentasikan dalam bentuk tabular yang memuat objek, parameter dan nilai terhadap objek. Teori *N-soft sets* dapat diimplementasikan pada masalah pengambilan keputusan, antara lain pada bidang transportasi, kesehatan, pertanian, industri, produk makanan,

kebencanaan, dan energi. Secara khusus artikel ini membahas perkembangan penelitian *N-soft sets* dan mengulas tantangan teori *N-soft sets* pada riset *big data*. Implementasi dari teori *N-soft sets* pada *big data* diharapkan dapat membawa manfaat secara lebih masif untuk masyarakat.

Lebih lanjut tulisan **Darsih Idayani** yang berjudul **Kontrol optimal pada model pengadaan bahan mentah dengan memperhatikan tingkat kerusakan dan biaya pemesanan**, juga memberikan contoh simulasi pemanfaatan teknologi informasi di dunia industri untuk pengambilan keputusan. Penerapan teori kontrol optimal dengan memanfaatkan teknologi informasi, merupakan salah satu upaya untuk memperoleh penyelesaian masalah di era *society 5.0*, khususnya dalam dunia industri. Salah satu strategi yang dapat dilakukan adalah meminimalkan biaya yang dikeluarkan untuk persediaan dengan melakukan manajemen persediaan yang baik. Pengadaan bahan mentah yang termasuk bagian dari manajemen persediaan dapat dimodelkan dan diselesaikan dengan mengaplikasikan teori kontrol optimal. Terdapat tiga kebijakan pengadaan bahan mentah yang dikombinasikan dalam model ini, yaitu pengadaan tepat waktu (*just in time*), pergudangan (*warehousing*), dan penundaan (*backlogging*). Hasil analisis terhadap model matematika pada pengadaan bahan mentah menunjukkan bahwa model dengan kombinasi kebijakan pengadaan lebih optimal. Hal tersebut diharapkan menjadi informasi yang bermanfaat bagi para *stakeholder* untuk dapat mengambil kebijakan yang terbaik.

Di bidang kesehatan, pemanfaatan teknologi dan analisis terhadap *big data* untuk pengambilan keputusan juga dikaji dalam buku ini. **Selly Anastassia Amellia Kharis** melakukan analisis kekerabatan virus demam berdarah menggunakan algoritma *tribe markov clustering* dan *sparse matrix*. Perkembangan teknologi pada Ilmu Biologi terutama studi tentang virus telah menghasilkan *database* berskala besar (*big data*) yang terus bertambah dengan kecepatan yang cukup signifikan. Hasil analisis menunjukkan adanya hubungan kekerabatan pada sekuens protein virus dengue, yaitu dihasilkan 7 (tujuh) kelompok dari 26 sekuens protein virus dengue dengan kelompok-kelompoknya mempunyai satu atau lebih pusat kelompok. Harapannya hasil penelitian ini dapat membantu para ahli bioteknologi dan bioinformatika dalam menemukan antibiotik untuk virus dengue.

Dalam dunia pendidikan, pemanfaatan analisis *big data* dapat dimanfaatkan untuk memprediksi atau meramal jumlah mahasiswa baru

yang melakukan registrasi. Penggunaan **average - based fuzzy time series Chen untuk prediksi jumlah mahasiswa baru di FST UT**, dilakukan oleh **Lintang Patria**. Metode peramalan dengan *averaged-based fuzzy time series chen* ini digunakan untuk meramalkan jumlah mahasiswa baru pada 7 (tujuh) program studi di FST UT. Pada era *society 5.0*, yang menekankan antara keselarasan teknologi dengan pemecahan masalah secara efisien yang terjadi di masyarakat, maka keberadaan analisis data dengan menggunakan teknologi akan menjadi informasi yang berharga bagi pengambil keputusan.

Dampak pertambahan penduduk dunia tidak dapat dipungkiri lagi akan berpengaruh besar terutama terhadap permasalahan ketersediaan dan ketahanan pangan, serta kesehatan. *Big data* dan teknologi informasi juga telah dimanfaatkan untuk menghasilkan berbagai alternatif solusi sebagai bahan pengambilan keputusan dalam menjawab permasalahan pangan dan kesehatan. Oleh karena itu, **food security and health** merupakan topik lain yang dikaji dalam buku ini. Di era *society 5.0* kebutuhan pangan yang terus meningkat membuat industri pangan harus berkembang ke arah yang lebih produktif namun tetap selaras dengan lingkungan dan alam sekitar. **M.Rajih Radiansyah, Athiefah Fauziyyah, Dini Nur Hakiki, dan Eko Yuliasuti** melakukan analisis terhadap **peran computer vision dalam produksi pangan dan lingkungan berkelanjutan**. Teknologi *computer vision* merupakan salah satu teknologi yang menjanjikan untuk dapat mengolah pangan secara cepat dan hemat di masa depan. Teknologi ini dapat dimanfaatkan sebagai metode analisa kualitas pangan yang bersifat non destruktif dengan memanfaatkan prinsip pengambilan gambar dan spektroskopi. Inspeksi dengan menggunakan *Computer vision* memberikan fleksibilitas dan repetisi yang stabil dengan biaya yang relatif rendah dan ramah lingkungan.

Paradigma *society 5.0* menawarkan masyarakat yang berpusat pada manusia, yang menjadi pusat keseimbangan antara kemajuan ekonomi dengan penyelesaian masalah sosial telah melahirkan **konsep pangan 5.0**. yaitu pangan tidak hanya lezat, aman, bergizi, namun juga akan menuntut aspek kesehatan, ketenangan pikiran, keadilan perdagangan, bebas dari beban lingkungan, dan lain sebagainya. Konsep ini dapat ditangkap untuk pengembangan minuman tradisional di Indonesia. **Athiefah Fauziyyah, Dini Nur Hakiki, Eko Yuliasuti, dan M. Rajih Radiansyah** melakukan kajian terhadap **potensi minuman tradisional Indonesia sebagai produk pangan**

fungsional di era *society* 5.0. Berbagai minuman tradisional Indonesia seperti wedang uwuh, bir pletok, kahwa daun, jamu, loloh, teh talua, dan sebagainya telah diteliti dan hasilnya menunjukkan adanya kandungan senyawa antioksidan yang bermanfaat untuk tubuh. Upaya yang dapat dilakukan untuk mempertahankan minuman tradisional di tengah gempuran berbagai produk minuman modern antara lain pengembangan teknologi pengolahan minuman tradisional yang praktis dan tahan lama, pengembangan riset tentang kandungan senyawa psikoaktif, dan reformulasi komposisi gula pada minuman tradisional.

Dukungan terhadap terwujudnya *society* 5.0 dapat dilakukan dengan menggali potensi komoditas lokal. Berbagai inovasi terkait pemanfaatan komoditas lokal didukung pemanfaatan inovasi teknologi yang tepat, dapat berujung pada peningkatan perekonomian masyarakat setempat. Aspek ekonomi yang selaras dengan kemajuan teknologi juga merupakan landasan dalam mewujudkan paradigma *society* 5.0. **Dini Nur Hakiki, Athiefah Fauziyyah, Eko Yuliasuti, dan M.Rajih Radiansyah** melakukan kajian terhadap komoditas lokal Bligo. Bligo, merupakan tanaman lokal yang dapat tumbuh subur di Indonesia namun belum banyak dimanfaatkan. Kajian dengan judul **bligo (*benincasa hispida*): potensi dan pengembangan riset sebagai pangan fungsional dan produk bernilai tambah**, bukan hanya bertujuan menggali potensi komoditas lokal namun juga melihat pengembangan inovasi produk pangan *food bar* sebagai pangan darurat di kala kondisi bencana. Beberapa riset pendahuluan menunjukkan bahwa bligo berpotensi untuk kesehatan tubuh karena ada kandungan antioksidan, antibakteri, antidiare, anti kompulsif, dan obat lambung. Riset pengembangan produk, yang berasal dari kulit dan daging buah bligo, menunjukkan bahwa daging buah bligo dapat dimanfaatkan sebagai *food bar* sedangkan kulit bligo dilakukan karakterisasi adanya senyawa penting.

Paradigma *society* 5.0 merupakan perwujudan masyarakat super cerdas yaitu masyarakat yang mampu memilah alternatif solusi berdasarkan perkembangan sains dan teknologi dalam menjawab ataupun memecahkan permasalahannya, tanpa melakukan gangguan terhadap kelestarian lingkungan maupun struktur sosial masyarakatnya. Dengan kata lain, masyarakat atau *society* 5.0 mampu menjaga keragaman hayati untuk menjamin lingkungan yang berkelanjutan. ***Biodiversity for Sustainable Environment*** merupakan topik terakhir yang dikaji dalam buku ini. Salah satu bagian dari biodiversitas adalah keanekaragaman mikroorganisme. **Diki**

dan **Mutimanda Dwisatyadini** mengkaji **perubahan genetika mikroba pada keadaan mikrogravitasi dan radiasi ion dalam penerbangan di angkasa luar**. Penerbangan angkasa luar dapat berdampak pada penurunan kompetensi kekebalan imun tubuh di antara kru, mempengaruhi kerentanan mikroorganisme di dalam pesawat ruang angkasa, serta merusak DNA akibat adanya radiasi ion di angkasa luar. Radiasi ion dan mikrogravitasi merupakan komponen penting yang perlu diidentifikasi dalam penerbangan di angkasa luar, untuk menjamin keberhasilan dan pengurangan segala kemungkinan risiko kesehatan dan lingkungan bagi para astronot. Selain mendukung kualitas hidup para astronot, inovasi pengetahuan baru dan teknologi dari eksplorasi ruang angkasa juga memberikan kontribusi pada banyak aspek yang beragam pada kehidupan sehari-hari manusia. Hal ini merupakan wujud pemanfaatan *science and technology for society* 5.0 pada kehidupan manusia.

Keanekaragaman hayati di laut dalam juga menjadi kajian penting, sebagai jaminan terjadinya proses rantai makanan yang berkelanjutan di darat, laut, maupun udara. **Hibridisasi dan introgresi pada paus biru (*Balaenoptera musculus*) dan pengaruhnya terhadap konservasi**, merupakan kajian yang dilakukan **Diki, Cut Meutia Fajrina, dan Fikri Nashrullah** untuk mendukung konservasi kehidupan di laut seperti paus biru yang terancam kepunahannya. Salah satu upaya untuk menjaga kelestariaannya adalah melalui konservasi, yang perlu dilakukan dengan memperhatikan konsep ekologi molekuler dan genetika. Namun adanya hibridisasi dan introgresi akan merugikan upaya konservasi dan mengancam pemulihan populasi paus biru. Kemajuan teknologi biologi melalui penggunaan teknik genetika molekuler dapat membantu pengamatan atas tingkat hibridisasi dan introgresi yang terjadi di beberapa sub spesies populasi paus biru di berbagai tempat sehingga dapat membantu konservasi paus biru. Upaya pelestarian lingkungan hidup melalui pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi ini merupakan salah satu bentuk aplikasi paradigma *society* 5.0, mengingat lingkungan hidup yang terjaga juga merupakan penentu kesejahteraan manusia.

Sektor agribisnis juga tidak lepas dari perwujudan *society* 5.0. Pertambahan penduduk dunia, tentu membutuhkan inovasi sains dan teknologi senagai alternatif pengembangan bisnis pertanian. Kajian yang dilakukan **Venty Fitriany Nurunisa** berjudul **Tantangan dan Implementasi Inovasi Nilai dalam Pengembangan Agribisnis Untuk Masyarakat 5.0**.

Sektor pertanian Indonesia menghadapi berbagai tantangan dalam menyongsong era masyarakat 5.0; selain isu pembiayaan, harga dan pasar, sumberdaya manusia pertanian, juga tantangan adaptasi sektor pertanian terhadap inovasi teknologi. Salah satu inovasi dalam agribisnis adalah penerapan strategi *blue ocean* yaitu implementasi *inovasi nilai* di tingkat petani atau pelaku usaha agribisnis. Merujuk pada konsep masyarakat 5.0, pendekatan sistemik/holistik dalam persiapan sektor pertanian berdayasaing dan adaptif menjadi sangat penting untuk diterapkan. Dengan adanya kolaborasi dan integrasi antar subsistem agribisnis, maka petani maupun pelaku usaha agribisnis akan mampu berkontribusi mewujudkan pertanian berdayasaing dan adaptif.

Kajian juga dilakukan di sektor pertanian untuk mendukung terwujudnya *society* 5.0. Antara lain inovasi dalam mendukung sumber pangan protein, pemanfaatan limbah pertanian untuk sayuran, penyediaan lahan pertanian, dan tata kelola kota yang ramah lingkungan. **Performa dan Tingkat Kesehatan Ayam Pedaging yang Dipelihara dengan Kandang Intensif dan Kandang Umbaran** sebagai salah satu inovasi untuk menghasilkan sumber pangan sehat yang mendukung terwujudnya masyarakat sehat sesuai paradigma *society* 5.0. Penelitian tersebut dilakukan **Sri Yuniati Putri Koes Hardini dan Iman Rahayu Hidayati Soesanto**. Performa, kesehatan dan kualitas karkas dari ayam pedaging dapat dipengaruhi oleh sistem pemeliharaannya; antara lain sistem pemeliharaan intensif dan sistem semi intensif dengan umbaran. Hasil dari penelitian ini dapat dijadikan acuan bagi peternak, bahwa kondisi lantai kandang merupakan hal utama yang harus diperhatikan dalam memelihara ayam pedaging agar diperoleh karkas dengan kualitas baik tanpa adanya *breast blister*, *footpad dermatitis* dan *hockjont*. Sumber pangan yang sehat akan menentukan kualitas manusia.

Pemanfaatan limbah pertanian merupakan salah satu dukungan terwujudnya masyarakat 5.0. **Adhi Susilo, Tejo Susanto, dan Nurhidayat** meneliti **Pengaruh Kompos Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Kotoran Sapi dengan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) terhadap Produksi Pakchoi di Tanah Latosol**. Upaya untuk mewujudkan kesejahteraan dan keberlanjutan lingkungan manusia, alam, dan makhluk hidup lainnya perlu terus dilakukan. Salah satunya melalui penelitian secara berkelanjutan yang melibatkan berbagai variabel hingga menghasilkan inovasi pertanian. Diketahui bahwa penerapan pertanian organik dengan pemanfaatan limbah

pertanian berupa kompos tandan kosong kelapa sawit dan kotoran sapi yang dikombinasikan dengan *PGPR*, dapat memberikan pengaruh terhadap pertumbuhan tanaman pakchoi (*Brassica rapa L var. chinensis*) di tanah berjenis *latosol*. Di era *society 5.0*, manusia sebagai pengendali teknologi dan inovasi; harus tanggap dan bijak dalam memutuskan inovasi yang mampu memberi solusi untuk peningkatan kesejahteraan manusia.

Timbul Rasoki, Ana Nurmalia, dan Lina Asnamawati melakukan **analisis konversi lahan kelapa sawit ke lahan padi sawah**. Sektor pertanian khususnya komoditas pangan berperan penting dalam pencapaian kedaulatan pangan. Hal ini terwujud dengan ketersediaan lahan untuk tanaman pangan, antara lain lahan sawah. Meskipun di Indonesia sedang marak konversi lahan pertanian ke non pertanian, di Kabupaten Mukomuko Bengkulu telah terjadi alih fungsi dari lahan perkebunan kelapa sawit ke lahan sawah. Faktor-faktor yang secara signifikan mempengaruhi konversi lahan kelapa sawit ke padi sawah adalah umur petani, jenis lahan dan kebijakan pemerintah terkait cetak sawah. Salah satu faktor pendorong masyarakat untuk berkonversi ke lahan pangan adalah mekanisasi pertanian yakni tersedianya teknologi yang mendukung efisiensi usahatani padi sawah. Kondisi tersebut menggambarkan petani secara terbuka menerima perkembangan teknologi dan menjadi dasar kesiapan petani menghadapi konsep masyarakat yang berpusat pada manusia yang berbasis teknologi.

Upaya lain untuk meningkatkan kualitas hidup secara berkelanjutan sebagai bagian dari *society 5.0* adalah peningkatan ruang hidup masyarakat melalui pengembangan kota berbasis *smart city*. *Smart city* dibutuhkan untuk mendorong pengelolaan pembangunan wilayah yang lebih terintegrasi yang mampu mengendalikan masalah ekonomi, sosial, lingkungan serta masalah pelayanan publik. **I Gede Wyana Lokantara, Farisa Maulinam Amo, Erika Pradana Putri, Ulul Hidayah** melakukan penelitian terkait **analisis dan strategi pengembangan manajemen kota berbasis smart city di Kabupaten Kendal**. Analisis tingkat kesiapan Kabupaten Kendal dalam penerapan teknologi *smart city* dilakukan berdasarkan indikator kelembagaan, sumber daya manusia, dan teknologi yang diukur menggunakan metode *e-readiness* dan *Boyd Cohen Smart City Wheel*. Pengembangan *smart city* ini diharapkan mampu mengoptimalkan masyarakat secara tepat terkait dengan pemanfaatan teknologi yang diperlukan untuk memberikan layanan masyarakat berkualitas tinggi (yang memungkinkan masyarakat untuk hidup bahagia dan nyaman).

Sebagai penutup, kontribusi buku ini mungkin masih dalam batas cakupan kecil sebagai upaya awal untuk turut mewujudkan *society* 5.0. Ide, pemikiran, kajian maupun hasil penelitian disajikan dari sudut pandang beberapa bidang ilmu yang dikembangkan di FST UT. Setiap kajian ataupun hasil penelitian serta pengembangannya harus ditujukan pada kemanfaatan dan kemakmuran masyarakat secara umum, sesuai konsep *society* 5.0. Keberhasilan dalam mewujudkan *society* 5.0 harus diupayakan secara konsisten dan dilakukan oleh berbagai pihak secara simultan. Kajian dan penelitian lanjutan harus terus dilakukan baik oleh setiap dosen atau peneliti, dengan kolaborasi antar peneliti dari berbagai bidang ilmu, maupun kolaborasi antar perguruan tinggi, serta antara perguruan tinggi dengan *stakeholder* lain, pemerintah dan swasta. Demikian juga, penerapan hasil pengembangan sains dan teknologi perlu diuji secara terus menerus untuk mencapai inovasi yang dapat dimanfaatkan masyarakat untuk hidup sejahtera, aman, nyaman, dan bahagia. Secara bersamaan, infrastruktur jaringan internet sebagai penunjang terwujudnya *society* 5.0 juga harus dibangun secara masif diberbagai wilayah. Seiring perkembangan dan kemajuan sains dan teknologi, masyarakat harus mendapatkan kualitas hidup yang lebih baik, hidup sejahtera selaras dengan alam, lingkungan, dan masyarakat sosialnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Fukuyama, M. (2018). Society 5.0: aiming for a new human-centered society. Retrieved from https://www.jef.or.jp/journal/pdf/220th_Special_Article_02.pdf
- Government of Japan. (2018). Society 5.0. Retrieved from: https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5_0/index.html
- Kemenperin. (2018). Pemerintah keluarkan 10 jurus jitu hadapi revolusi industri 4.0. Retrieved from <https://kemenperin.go.id/artikel/19169/Pemerintah-Keluarkan-10-Jurus-Jitu-Hadapi-Revolusi-Industri-4.0>
- Nakanishi, H. & Kitano, H. (2018). Society 5.0 co-creating the future. Keidanren Policy and Action. Retrieved from https://www.keidanren.or.jp/en/policy/2018/095_booklet.pdf
- Nastiti, E.,F., 'Abdu, A.,R.,N. (2020). Kesiapan pendidikan Indonesia menghadapi era society 5.0. *Jurnal Kajian Teknologi Pendidikan*, 9(1), 61-66. Retrieved from <https://media.neliti.com/media/publications/334820-kajian-kesiapan-pendidikan-indonesia-men-e84d0bfd.pdf>
- Padjadjaran Fest & Conference. (2021). Perbedaan industrial revolution 4.0 dengan society 5.0: definisi, latar belakang, dan karakteristik. Retrieved from <https://medium.com/padjaran-fest-and-conference/perbedaan-industrial-revolution-4-0-dengan-society-5-0-73838dd5448f>



01

**BIG DATA SCIENCE AND
INFORMATION TECHNOLOGY**



Fatia Fatimah

.....
N-Soft Sets: Tantangan dalam Riset Big Data

Darsih Idayani

.....
Kontrol Optimal pada Model Pengadaan Bahan Mentah
dengan Memperhatikan
Tingkat Kerusakan dan Biaya Pemesanan

Selly Anastassia Amellia Kharis

.....
Analisis Kekerabatan Virus Demam Berdarah
Menggunakan *Tribe Markov Clustering* dan *Sparse Matrix*

Lintang Patria

.....
Penggunaan *Average - Based Fuzzy Time Series* Chen
untuk Prediksi Jumlah Mahasiswa Baru di FST UT

N-SOFT SETS: TANTANGAN DALAM RISET BIG DATA N-SOFT SETS: CHALLENGES IN BIG DATA RESEARCH

Fatia Fatimah

**Program Studi Matematika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi,
Universitas Terbuka
fatia@ecampus.ut.ac.id**

ABSTRAK

Tema masyarakat 5.0 terus digaungkan khususnya di Indonesia dalam tataran konsep dan diskusi. Sementara Jepang sebagai pionir untuk istilah ini sudah mengikrarkan Society 5.0 sejak lima tahun lalu sebagai bentuk visi kabinet Jepang menatap masa depan. Tantangannya adalah Indonesia khususnya akademisi harus mempunyai keberanian untuk mendobrak zona nyaman dan membuka diri terhadap saran dan ide-ide kreatif. Jika tetap bertahan dan merasa nyaman pada kondisi yang ada maka kita akan tertinggal dan selalu menjadi pengikut tren karya orang lain. Oleh karena itu, masyarakat khususnya akademisi perlu menemukan kebaruan dan menjadi pelopor pada bidang kajian masing-masing. Teori N-soft sets yang diperkenalkan pertama kali oleh Fatimah, et al., pada tahun 2018 mendasari semangat memberikan perubahan arah penelitian khususnya pada bidang kajian soft computing. Saat ini, penelitian terkait N-soft sets terus dikembangkan oleh peneliti mancanegara khususnya pendalaman teori serta berbagai bentuk kombinasi N-soft sets dengan topik lain. Namun penelitian yang ada masih dalam tahap pengembangan teoritis N-soft sets dan formula, teorema serta sifat yang ditimbulkan akibat kombinasi N-soft sets dengan teori ketidakpastian lainnya. Tantangan berikutnya adalah mengimplementasikan teori N-soft sets pada big data agar dapat membawa manfaat secara lebih masif pada masyarakat. Tujuan artikel ini adalah membahas perkembangan penelitian N-soft sets dan mengulas tantangan teori N-soft sets pada riset big data.

Kata Kunci: big data, masyarakat 5.0, N-soft sets, soft sets.

PENDAHULUAN

Pernahkah Anda membayangkan jumlah data di dunia yang beredar saat sekarang? Atau lebih spesifik lagi, jumlah data di dunia yang sedang digunakan setiap satu menit. Sebagian orang mungkin masih membiasakan diri dengan kapasitas data berukuran *gigabytes* dan mengalami kendala untuk memperkecil ukuran file hingga menjadi *megabytes* atau bahkan diharuskan memenuhi *kilobytes* tertentu agar dapat diunggah. Sementara faktanya, dunia sekarang (bahkan saat Anda membaca kalimat ini), diketahui ataupun tanpa kita sadari data terus bergerak cepat pada era ukuran *yottabytes*.

Satu *kilobytes* (KB) berarti 1.000 *bytes*, dan satu *megabytes* (MB) berarti 1.000.000 *bytes* dan seterusnya. Agar mendapat gambaran seberapa besar ukuran masing-masing data, perhatikan Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Volume Data

Volume Data	Nilai Desimal	Nilai Biner
Kilobytes (KB)	10^3	2^{10}
Megabytes (MB)	10^6	2^{20}
Gigabytes (GB)	10^9	2^{30}
Terabytes (TB)	10^{12}	2^{40}
Petabyte (PB)	10^{15}	2^{50}
Exabyte (EB)	10^{18}	2^{60}
Exabyte (EB)	10^{21}	2^{70}
Yottabyte (YB)	10^{24}	2^{80}

Sumber: Gentsh, 2019

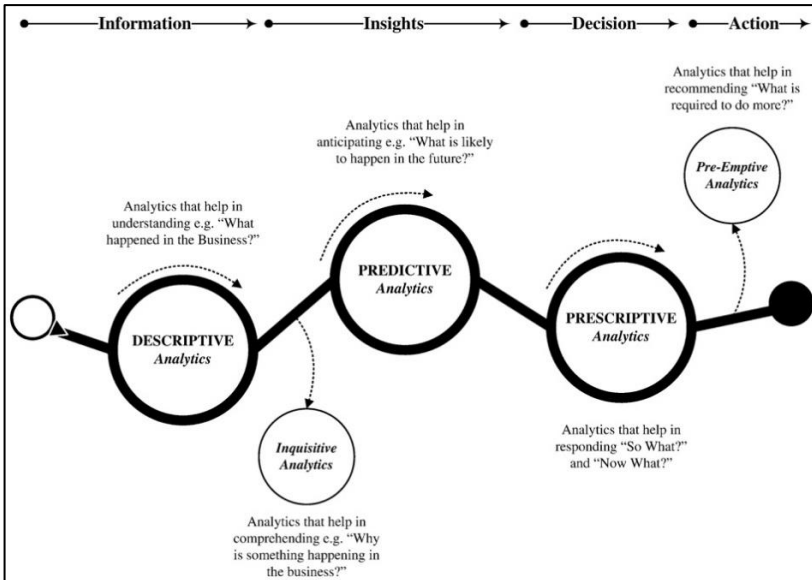
Volume data yang sangat besar membutuhkan kepedulian dan keahlian tertentu untuk mengolahnya. Volume data merupakan salah satu dasar lahirnya gagasan *big data*. *Big data* mulai dikenal secara luas sejak tahun 2000. Secara umum *big data* minimal selalu memiliki 4V karakteristik yaitu *Volume*, *Variety*, *Velocity*, dan *Veracity* (Gentsh, 2019).

Big data sudah dimanfaatkan secara luas di berbagai bidang. Jika pemerintah ingin meningkatkan kualitas kesehatan, transportasi, energi, dan air pada sebuah kota maka dapat menggunakan analisis *big data*

dengan memanfaatkan berbagai teknologi untuk mewujudkan *smart city* yang sesungguhnya. Hal ini dapat menekan biaya pengeluaran pemerintah dan solusi untuk mengantisipasi sumber daya alam yang semakin terbatas (Al Nuaimi, Al Neyadi, Mohamed, & Al-Jaroodi, 2015). Maciejewski (2017) mengidentifikasi terjadinya ketidaktaatan hukum, perilaku sosial masyarakat terkait izin, perintah atau larangan dari pemerintah serta upaya peningkatan kualitas layanan publik dengan menerapkan analisis *big data*.

Sementara itu, Elshendy dan Colladon (2017) memprediksi indikator ekonomi makro menggunakan analisis *big data* dimana data berbentuk teks yang diperoleh dari berita siaran langsung, cetak, dan *website*. Einav dan Levin (2014) menggunakan data berskala besar dari pemerintah dan sektor swasta untuk menggambarkan aktivitas ekonomi terkini. Dong et al. (2017) juga mengukur aktivitas ekonomi dengan cara berbeda yaitu mengamati penggunaan telepon seluler di Cina. Dari data tersebut diketahui tren konsumen, indeks konsumsi dan lainnya. *Big data* juga dapat difungsikan untuk melacak suatu lokasi, kondisi alam, terjadinya transaksi keuangan, pola perilaku, dan banyak hal lainnya seperti yang dijelaskan oleh Hilbert (2016) ketika membahas 180 artikel jurnal internasional tentang penerapan *big data*. Analisis *big data* juga bermanfaat untuk meningkatkan kinerja pemasaran khususnya upaya meningkatkan kualitas hubungan secara teknologi antara pelanggan dengan pihak manajemen (Andriyansah & Fatimah, 2020).

Berbagai penerapan *big data* seperti yang dijelaskan pada paragraf sebelumnya menggunakan salah satu atau lebih tipe analisis *big data*. Analisis *big data* berdasarkan fungsinya dibedakan menjadi tiga yaitu analisis deskriptif, analisis prediksi, dan analisis preskriptif (Sivarajah, Kamal, Irani, & Weerakkody, 2017; Sun, Zou, & Strang, 2015). Untuk lebih jelas perhatikan Gambar 1 berikut.



Sumber: Sivarajah et al., 2017

Gambar 1. Tipe Analisis Big Data

Big data dengan karakteristik yang dimilikinya yaitu 4V menjadikan data bersifat tidak pasti Sehingga perlu terus ada inovasi ilmu pengetahuan dan bersifat dinamis terhadap perkembangan. Kombinasi beberapa teori dilakukan oleh peneliti untuk memperkaya ilmu pengetahuan, menemukan kebaruan dan memberikan solusi terhadap permasalahan yang ditemui. Diantaranya adalah *expanded dual hesitant fuzzy sets* (Fatimah & Alcantud, 2018), *multi (Q, N)-soft multi granulation rough model* (Akram & Ali, 2021), dan *multi-fuzzy N-soft sets* (Fatimah & Alcantud, 2021).

Beberapa inovasi teori yang dijelaskan pada paragraf sebelumnya merupakan hasil kombinasi dari beberapa teori ketidakpastian (*uncertainty*). Salah satu teori *uncertainty* yang perkembangan sangat pesat termasuk diterapkan pada *big data* adalah teori *soft sets*. *Soft sets* diperkenalkan pertama kali oleh Molodtsov pada tahun 1999. Teori ini fleksibel terhadap berbagai tipe atribut sehingga dapat beradaptasi untuk membantu penyelesaian masalah keputusan yang bersifat *uncertainty*.

Penerapan *soft sets* sudah sangat luas dibahas dan masih terus berkembang. Beberapa diantara penelitian tersebut sebagai berikut. Selvachandran, Garg dan Quek (2018) mengusulkan modifikasi rumus ukuran *entropy* dengan menggunakan pendekatan *vague soft sets*. Ukuran tersebut diujicobakan untuk melihat keakuratan hasil deteksi robot terhadap foto yang diberikan. Mostafa, Kareem, & Jad (2020) membahas penerapan *soft set* pada *coding*. Xiao et al., (2012) menyelesaikan masalah diagnosis medis menggunakan *fuzzy soft sets*. Saqlain, Jafar, & Riaz (2020) menerapkan *neutrosophic soft sets* untuk pemilihan *smartphone*. Abu Qomar dan Hassan (2019) menggunakan *Q-neutrosophic soft* dan *neutrosophic soft* untuk pemilihan dosen di jurusan Matematika. Menariknya, Fatimah, Rosadi, & Hakim (2018b) bahkan menerapkan *probabilistic soft sets* dan *dual probabilistic soft sets* pada pengambilan keputusan dengan atribut bernilai negatif. Penelitian yang masih jarang dibahas karena biasanya parameter atau atribut yang digunakan adalah positif.

Berikut beberapa penelitian terkait *big data* dan *soft sets*. *Soft-rough sets* dapat digunakan untuk menangani keterbatasan kontekstual dalam sistem rekomendasi video (Abbas, Alam, & Shamshirband, 2019). *Soft sets* dimanfaatkan dalam penyelidikan untuk menemukan pola perilaku pengguna media sosial dengan data sangat kompleks dan dinamis yang lebih dikenal dengan analisis jaringan sosial (Hao, Park, & Pei, 2018). Analisis jaringan sosial menjadi primadona karena masyarakat dunia terutama Indonesia sangat aktif dalam menggunakan media sosial. Media sosial dapat digunakan untuk kepentingan politik, ekonomi, pemerintah, swasta dan lainnya. Haruna et al., (2018) membuktikan bahwa pendekatan berdasarkan *soft set* menghasilkan waktu operasional lebih efektif dibandingkan dengan pendekatan berdasarkan *rough sets*. Hal ini mereka ujicobakan untuk pemilihan film dengan memodifikasi perhitungan ukuran *support*, *strength*, *certainty*, dan *coverage* pada algoritma *nearest neighbours*. Penerapan *soft set* pada *artificial neural network* dibahas oleh Liu, Chen, Chen, & Zhang (2020). Sementara itu Mohamad, Selamat, Krejcar, Fujita, & Wu (2020) mengkombinasikan *soft set* dan *rough sets* pada analisis *big data* dengan cara menerapkan masing-masing teori pada tahapan pemilihan parameter. Xu, Zhang, Hu, & Chen (2020) menggunakan *generalized fuzzy soft sets* dalam model penilaian kredit. Berdasarkan penelitian terdahulu dapat diketahui bahwa *soft sets* dan perluasannya dapat diterapkan pada *big data*.

Diantara bentuk perluasan *soft sets* yang masih butuh perkembangan lebih lanjut adalah teori yang diusulkan oleh Fatimah, Rosadi, Hakim, & Alcantud (2018a). Selanjutnya Fatimah et al., (2018a) memperluas teori *soft sets* agar dapat merepresentasikan peringkat. Teori tersebut diberi nama *N-soft sets*. Teori *N-soft sets* dapat menangani pengambilan keputusan dengan tipe penilaian biner, non biner antara interval tertutup dengan nilai $[0,1]$ dan non biner *N-array*. Pada artikel ini akan dibahas tentang penelitian *N-soft sets* yang sudah dikembangkan dan tantangannya dalam riset yang menggunakan *big data*.

PEMBAHASAN

Sebelum membahas lebih lanjut tentang *N-soft sets*, kita lihat kembali definisi *soft sets*. *Soft sets* atas semesta U dinotasikan dengan (F, A) merupakan hasil pemetaan $F: A \rightarrow 2^U$. U menyatakan himpunan semesta. E menyatakan himpunan parameter atau atribut dimana $A \subseteq E$. $R = \{0, 1, \dots, N-1\}$ menyatakan himpunan peringkat terurut dengan $N = \{2, 3, \dots\}$ (Molodtsov, 1999).

Pada *soft sets*, objek dapat dinyatakan dalam bentuk baris, parameter dalam bentuk kolom dan nilai objek berdasarkan parameter merupakan isi tabel. Isi tabel yaitu pertemuan baris u_i dan kolom e_j bernilai 1 jika dan hanya jika $u_i \in F(e_j)$, dan bernilai 0 untuk selainya dimana $u_i \in U, e_j \in A$.

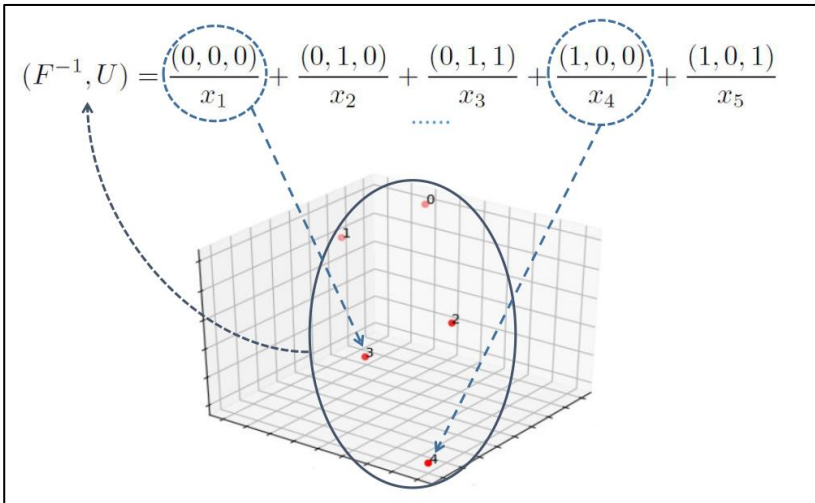
Soft sets dan *machine learning* dapat dilihat keterkaitannya secara intuitif. Untuk lebih detil, perhatikan contoh dari Liu et al., (2020) berikut.

Contoh 1 (Liu et. al., 2020). Misalkan $U = \{u_i\}, i = 1, 2, 3, 4, 5$ menyatakan objek, $E = \{e_j\}, j = 1, 2, 3$ menyatakan parameter dan *soft sets* didefinisikan sebagai $F(e_1) = \{u_4, u_5\}, F(e_2) = \{u_2, u_3\},$ dan $F(e_3) = \{u_3, u_5\}$. Bentuk tabular *soft sets* dari contoh ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabular *Soft Sets* Contoh 1

$U \setminus E$	e_1	e_2	e_3
u_1	0	0	0
u_2	0	1	0
u_3	0	1	1
u_4	1	0	0
u_5	1	0	1

Selanjutnya *soft sets* diilustrasikan sebagai sekelompok titik dalam ruang n -dimensi yang terdiri dari himpunan parameter. Pada Contoh 1, karena terdapat tiga parameter maka diperoleh ruang tiga dimensi seperti terlihat pada Gambar 2 berikut.



Sumber: Liu et al., 2020

Gambar 2. *Soft Sets* dalam Ruang Tiga Dimensi

N -soft sets didefinisikan sebagai berikut. N -soft sets atas U dinotasikan dengan (F, A, N) merupakan hasil pemetaan $F: A \rightarrow 2^{U \times R}$ dengan syarat untuk setiap $a \in A$ terdapat secara tunggal pasangan terurut

$(u, r_e) \in U \times R$ sedemikian sehingga $(u, r_e) \in F(e) \in U, r_e \in R$ (Fatimah et al., 2018a). *N-soft sets* dapat direpresentasikan dalam bentuk tabular seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. *N-Soft Sets* (F, A, N)

(F, A, N)	a_1	a_2	...	a_q
u_1	$\{r_{11}\}$	$\{r_{12}\}$...	$\{r_{1q}\}$
u_2	$\{r_{21}\}$	$\{r_{22}\}$...	$\{r_{2q}\}$
...
u_p	$\{r_{p1}\}$	$\{r_{p2}\}$...	$\{r_{pq}\}$

Sumber: Fatimah et al., 2018a

Untuk data yang tidak lengkap, Fatimah et al., (2018a) mendefinisikan *incomplete N-soft sets* dengan definisi sebagai berikut. Jika untuk setiap $e \in A$ dan $u \in U$ pada *N-soft sets* terdapat setidaknya satu $(u, r_e) \in U \times R$ sedemikian sehingga $(u, r_e) \in F(e)$ maka disebut *incomplete N-soft sets* dan dinotasikan dengan (F^*, A, N) . Contoh *incomplete N-soft sets* terkait *Sustainable Development Goals* (SDGs) dapat dilihat pada Contoh 2.

Contoh 2 (Fatimah, 2018). Misalkan $U = \{u_i\}$, $i = 1, 2, \dots, 5$ menyatakan lima provinsi di Indonesia. Misalkan $A = \{a_j\}$, $j = 1, 2, \dots, 6$ menyatakan enam parameter untuk mewujudkan pendidikan sebagai wahana pembangunan manusia. Penjelasan masing-masing parameter sebagai berikut.

- a_1 : meningkatkan akses layanan pendidikan, pelatihan, keterampilan untuk meningkatkan kualitas lembaga pendidikan formal;
- a_2 : meningkatkan pengelolaan dan penempatan guru secara tepat;
- a_3 : meningkatkan pemerataan akses pendidikan tinggi;
- a_4 : meningkatkan kualitas pendidikan tinggi;
- a_5 : meningkatkan relevansi dan daya saing pendidikan tinggi; dan
- a_6 : meningkatkan tata kelola kelembagaan perguruan tinggi

Misalkan $R = \{r_{ij}\}$ menyatakan peringkat yang diberikan untuk mengevaluasi parameter pada Contoh 2. Penilaian ketercapaian indikator menggunakan peringkat 0 sampai 5, dimana nilai 5 merupakan nilai maksimal terjadi peningkatan sesuai yang diharapkan, dan 0 sebaliknya mengindikasikan tidak tercapainya target. Sementara tanda * merupakan data yang tidak lengkap. Data disajikan seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Tabular *6-soft sets* Contoh 2

$(F^*, A, 6)$	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
u_1	4	3	3	4	5	4
u_2	4	*	3	4	4	4
u_3	4	2	3	3	4	4
u_4	*	3	2	3	4	3
u_5	3	0	2	*	3	2

Perkembangan penelitian *N-soft sets* sejak dipopulerkan tahun 2018 hingga kini dapat dilihat pada Tabel 5. Secara garis besar alur pengembangan teori *N-soft sets* dapat dikelompokkan menjadi tujuh topik yaitu *fuzzy N-soft sets* (Akram et al., 2018, 2019, 2021; Adeel, et al., 2020; Zhang, Jia-Hua, & Yan, 2020; Kamacı & Saqlain, 2021; Mahmood, Ur Rehman, & Ali, 2021; Rehman & Mahmood, 2021), *hesitant N-soft sets* (Akram, Adeel, & Alcantud, 2019; Akram & Adeel, 2019; Fatimah, 2020) *N-soft rough sets* (Alcantud, Ali, & Alcantud, 2019; Akram & Ali, 2021; Zhang, Li, & An, 2021), *N-soft topology* dan *N-soft algebraic structures* (Kamacı, 2020; Kamacı & Petchimuthu, 2020; Riaz, et al., 2019, 2021), *vague N-soft sets* (Chen, Liu, Chen, & Zhang, 2020; Liu, Chen, Chen, & Zhang, 2020), *neutrosophic N-soft sets* (Riaz, Naeem, Zareef, & Afzal, 2020; Akram et al., 2021; Ashraf & Butt, 2021), dan reduksi parameter *N-soft sets* (Akram et al., 2021).

Tabel 5. Perkembangan Teori N -Soft Sets per Tahun

Tahun	Penulis	Topik
2018	Akram et al.	<i>Fuzzy N-soft sets</i>
2019	Akram et al.	<i>Hesitant N-soft sets</i>
2019	Akram et al.	<i>Hesitant fuzzy N-soft sets</i>
2019	Akram et al.	<i>Intuitionistic fuzzy N-soft rough sets</i>
2019	Akram & Adeel	<i>Interval-valued hesitant fuzzy N-soft sets</i>
2019	Alcantud et al.	<i>N-soft set approach to rough sets</i>
2019	Riaz et al.	<i>N-soft topology</i>
2020	Adeel et al.	<i>Detection and severity of tumor cells by graded decision-making methods under fuzzy N-soft model</i>
2020	Chen et al.	<i>Generalized vague N-soft sets</i>
2020	Fatimah	<i>Multi hesitant N-soft sets</i>
2020	Kamaci	<i>N-soft algebraic structures</i>
2020	Kamaci & Petchimuthu	<i>Bipolar N-soft sets</i>
2020	Liu et al.	<i>Neutrosophic vague N-soft sets</i>
2020	Riaz et al.	<i>Neutrosophic N-soft sets with TOPSIS method</i>
2020	Zhang et al.	<i>Pythagorean fuzzy N-soft sets</i>
2021	Akram et al.	<i>Bipolar fuzzy N-soft information</i>
2021	Akram et al.	<i>Complex neutrosophic N-soft sets</i>
2021	Akram et al.	<i>Complex spherical fuzzy N-soft sets</i>
2021	Akram et al.	<i>Parameter reductions in N-soft sets</i>
2021	Akram et al.	<i>A hybrid decision-making approach under complex Pythagorean fuzzy N-soft sets</i>
2021	Akram & Ali	<i>Multi (Q, N)-soft multi granulation rough model</i>
2021	Ashraf & Butt	<i>Single-valued neutrosophic N-soft environment</i>
2021	Kamaci & Saqlain	<i>N-ary fuzzy hypersoft expert sets</i>
2021	Mahmood, et al.	<i>A novel complex fuzzy N-soft sets</i>
2021	Rehman & Mahmood	<i>Picture fuzzy N-soft sets</i>
2021	Riaz et al.	<i>M-parameterized N-soft topology</i>
2021	Zhang et al.	<i>N-soft rough sets</i>

Fuzzy N-soft sets atau disingkat dengan (F, N) -soft sets merupakan kombinasi antara teori *fuzzy sets* dengan *N-soft sets*. Pada (F, N) -soft sets, semua kemungkinan karakteristik parameter *N-soft sets* dinyatakan dalam bentuk *fuzzy sets* (Akram et al., 2018). *Hesitant N-soft sets* adalah hasil hibridisasi *N-soft sets* dengan keragu-raguan (*hesitancy*). Hal ini dapat terjadi ketika pengambil keputusan memiliki keraguan dalam memberikan nilai terhadap objek berdasarkan parameter yang diamati. Sehingga analisis dilakukan terhadap data yang merupakan penggabungan penilaian dari beberapa pengambil keputusan (Akram et al., 2019).

N-soft rough sets merupakan kombinasi *N-soft sets* dengan *rough sets* (Alcantud, et al, 2019; Zhang, et al., 2021). Model ini untuk mengatasi masalah inkonsistensi dalam analisis keputusan. Pada *N-soft rough sets*, elemen terbaik dipilih menjadi himpunan keputusan berdasarkan atribut keputusan, dan himpunan diaproksimasi oleh himpunan elemen terbaik berdasarkan nilai atribut masing-masing atribut kondisi yaitu proses pemilihan objek terbaik diantara objek yang bagus (Zhang, et al., 2021).

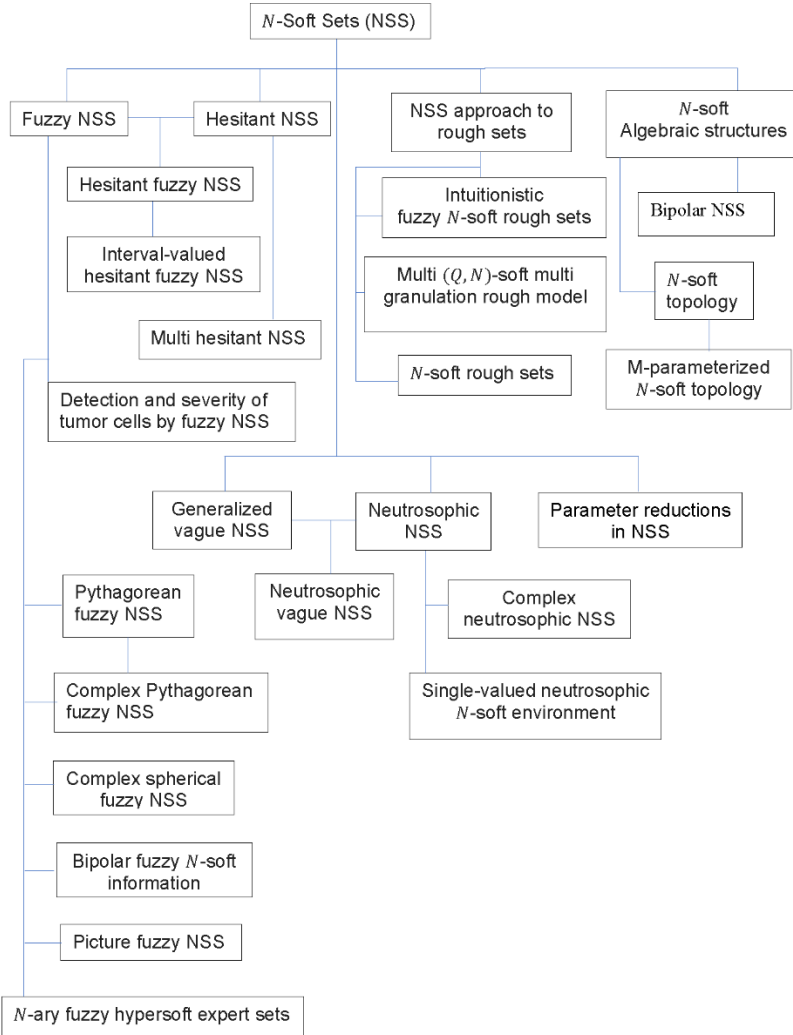
N-soft topology membahas tentang *N-soft interior*, *N-soft exterior*, *N-soft closure*, *N-soft basis*, dan *N-soft frontier* (Riaz, et al., 2019). *N-soft algebraic structures* selain menjelaskan beberapa operasi *N-soft sets* juga mendefinisikan *N-soft group*, *N-soft ring*, *N-soft ideal*, dan *N-soft lattice* (Kamaci, 2020).

Generalized vague N-soft set, atau disingkat dengan (GV, N) -soft sets, merupakan kombinasi *N-soft sets* dengan *generalized vague soft sets* untuk mengatasi ketidakjelasan (*vagueness*) dalam pengambilan keputusan. (GV, N) -soft sets selain membahas tentang derajat kepemilikan elemen tetapi juga tingkat kemungkinan kepemilikan tersebut (Chen et al., 2020).

Neutrosophic N-soft sets merupakan kombinasi *neutrosophic sets* dengan *N-soft sets*. Karena *neutrosophic sets* merupakan perluasan dari *intuitionistic fuzzy sets* maka *Neutrosophic N-soft sets* juga menggunakan prinsip dari *fuzzy N-soft sets* dan *intuitionistic fuzzy N-soft* (Riaz et al., 2020).

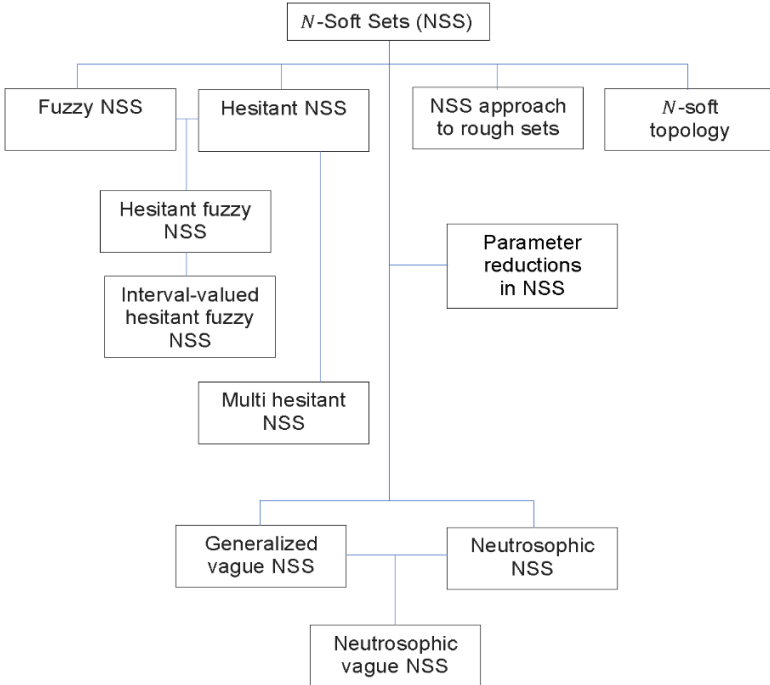
Reduksi parameter *N-soft sets* memperkenalkan konsep *N-soft subset*, reduksi *N-soft sets* dan parameter berlebihan (Akram et al., 2021). Reduksi parameter pada *soft sets* menggunakan prinsip teori *rough sets*. Namun, Akram et al. (2021) membuktikan bahwa pada *N-soft set* pendekatan *rough sets* tidak dapat digunakan sehingga diperlukan algoritma khusus untuk mengatasi ini. Reduksi parameter diperlukan agar pengambilan keputusan efektif terlebih jika data yang digunakan dalam jumlah besar.

Penelitian terkait *N-soft sets* terus dikembangkan. Untuk melihat pengelompokan masing-masing penelitian pada Tabel 4 maka dibuat bagan yang menggambarkan alur perkembangan penelitian *N-soft sets* sejak tahun 2018 sampai 2021. Bagan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Penelitian *N-Soft Sets* Sejak Tahun 2018 Sampai 2021

Secara umum perkembangan teori N -Soft Sets dapat dilihat pada Gambar 4 berikut. Bagan ini dapat menjadi arah untuk ide penelitian selanjutnya.



Gambar 4. State of The Art dari N -Soft Sets

Teori *soft sets* (Molodtsov, 1999) termasuk dalam hal ini N -soft sets (Fatimah et al., 2018a) menggunakan prinsip yang sama yaitu semua parameter layak dipertimbangkan dan dianalisis. Hal ini menjadi tantangan dalam analisis yang menggunakan data besar karena membutuhkan waktu lebih banyak, biaya lebih tinggi dan berpotensi mendapatkan hasil yang tidak akurat karena banyaknya kemungkinan *output*. Oleh karena itu, hal ini menjadi tantangan tersendiri dalam pengembangan teori N -soft sets.

Terinspirasi dari strategi Jepang dalam mewujudkan masyarakat 5.0 (Deguchi et al., 2020; Fukuyama, 2018; Harayama, 2017; dan website www8.cao.go.jp), perlu kontribusi akademisi pada bidang kajian masing-masing menjawab tantangan ini. Berikut beberapa tantangan N -soft sets dalam riset *big data* khususnya era masyarakat 5.0.

1. Bidang Mobilitas dan Transportasi

Seperti yang kita ketahui bersama, polusi menjadi masalah serius khususnya bagi Indonesia dengan jumlah penduduk yang sangat banyak. Sehingga perlu ada solusi berkelanjutan dan berkesinambungan untuk membantu mengurangi emisi CO₂ sekaligus mendorong revitalisasi perkotaan atau kawasan. Penerapan *N-soft sets* dalam mengatasi kemacetan, menemukan rute terpendek di beberapa wilayah padat penduduk atau kunjungan seperti lokasi wisata, serta upaya menggabungkan berbagai mode transportasi umum agar terbentuk alur transportasi yang nyaman untuk setiap orang termasuk anak-anak, lansia dan disabilitas.

2. Bidang Kesehatan

Isu terkini yang dihadapi masyarakat dunia adalah virus Covid-19. Penerapan *N-soft sets* dalam bidang medis sudah ada yang melakukan namun deteksi keakuratan cara penanganan Covid-19 dengan *N-soft sets* belum banyak yang membahas. Secara umum, solusi masalah kesehatan diperlukan untuk membantu mengurai dilema biaya perawatan kesehatan yang mahal dan belum dapat diakses oleh siapa saja karena keterbatasan lokasi dan sarana. Belum lagi, masalah kekurangan tenaga kesehatan di wilayah-wilayah terluar dan susah dijangkau. Teori *N-soft sets* ditantang untuk terus dikembangkan dan diterapkan pada berbagai jenis data fisiologis dan medis. Algoritma sebagai upaya untuk mendeteksi penyakit sejak awal agar keberlangsungan hidup lebih meningkat dan meringankan biaya perawatan.

3. Bidang Manufaktur

Daya saing industri dan tenaga kerja menjadi masalah yang terus dihadapi khususnya oleh negara-negara berkembang terlebih lagi Indonesia. Solusi pada bidang manufaktur dibutuhkan untuk memperkuat daya saing perusahaan minimal daya tawar Indonesia di mata dunia. *N-soft sets* dengan karakteristik parameterisasi ditantang untuk dapat membuat algoritma dalam distribusi barang agar tidak ada produk yang menumpuk pada Gudang atau lokasi transit. Sehingga pelanggan mendapatkan barang tepat waktu, dan target sesuai harapan. Oleh karena itu, *N-soft sets* diharapkan dapat diterapkan dalam berbagai pemodelan.

4. Bidang Pertanian

Peningkatan produksi pangan dan memastikan pasokan stabil perlu menjadi perhatian pemerintah. Disamping itu, perlu kajian dan solusi agar dapat mengurangi limbah perusahaan, dan perkantoran. Tantangan *N-soft sets* berikutnya adalah implementasi teori ini untuk menganalisis data terkait prediksi cuaca, kondisi perairan agar dapat menghasilkan produksi tinggi dan menghemat tenaga kerja.

5. Bidang Produk Makanan

Limbah makanan baik di industri pembuatnya maupun di pengguna seperti perkantoran, limbah makanan di rumah tangga, restoran dan sejenisnya menjadi persoalan serius. Hal ini dikarenakan beberapa sampah makanan khususnya makanan kemasan menyisakan banyak sampah yang tidak dapat didaur ulang. Oleh karena itu, agar industri makanan lebih kompetitif dan membantu mengurangi limbah makanan maka perlu analisis data dan peran serta semua pihak. Tantangan *N-soft sets* adalah menerapkan analisis data agar konsumen mendapat saran jenis makanan yang dibutuhkan, rekomendasi terhadap jenis makanan sehat, preferensi diberikan sesuai kebutuhan konsumen. Data yang dimasukkan dapat berupa jenis kelamin, usia, berat badan, jenis pekerjaan, banyaknya aktivitas, serta jenis alergi yang diderita. Analisis *big data* terhadap parameter di atas akan memberikan program tertentu yang dapat membantu kebutuhan konsumen tentang jenis makanan yang tepat. Disamping itu, industri makanan terbantu mendapatkan informasi dari konsumen langsung produk makanan yang sedang dicari.

6. Bidang Kebencanaan

Indonesia merupakan salah satu negara yang rawan terhadap bencana dan dampak yang diakibatkannya. Solusi terkait kebencanaan yang diharapkan adalah mengantisipasi seminimal mungkin dampak kerusakan baik nyawa, materi dan moral akibat bencana. Serta diharapkan terdapat alur yang jelas dan tepat sasaran agar pemulihan pasca bencana dapat segera dituntaskan. Tantangan *N-soft sets* pada bidang kebencanaan adalah menganalisis data *smartphone* untuk dapat memberikan informasi tanggap darurat terhadap bencana di lokasi terdekat. Hal ini termasuk informasi tentang alur evakuasi terdekat. Selanjutnya *N-soft sets* diharapkan dapat diterapkan untuk menemukan korban dengan menggunakan deteksi alat

serta pengiriman bantuan yang tepat sasaran pada korban bencana dan tepat waktu.

7. Bidang Energi

Emisi gas rumah kaca, beban lingkungan dan pasokan energi di Indonesia yang mulai terbatas harus dicarikan bersama solusinya serta peran aktif semua pihak. Tantangan *N-soft sets* adalah membuat algoritman pengambilan keputusan agar produksi dan konsumsi produk lokal semakin meningkat. Rekomendasi jenis pemasaran produk lokal agar diminati oleh masyarakat lokal dan mancanegara. *N-soft sets* diharapkan dapat digunakan untuk memprediksi pasokan, analisis kebutuhan energi dan prediksi cuaca yang akurat.

Berdasarkan penjelasan tentang berbagai tantangan *N-soft sets* dalam riset *big data* dikaitkan dengan menghadapi masyarakat 5.0 dapat diketahui bahwa masih banyak peluang penelitian yang dapat dilakukan untuk mengembangkan *N-soft sets*. Berbagai masalah terbuka tersebut diharapkan dapat menjadi inspirasi dan menjawab tantangan bahwa teori *N-soft sets* dapat juga diterapkan secara aplikatif sesuai kebutuhan masyarakat.

KESIMPULAN

Saat ini, berbagai negara termasuk Indonesia masih tertatih membuat konsep masyarakat super cerdas. Tantangannya adalah apa yang akan terjadi dengan data untuk 5 tahun ke depan? Tema masyarakat 5.0 menjadi isu menarik dan penting sehingga perlu untuk terus diinformasikan kepada masyarakat Indonesia agar mempunyai persiapan untuk menghadapinya. Hal ini dapat diatasi dengan kondisi yang ada dan keterbatasan di berbagai wilayah. Namun, masyarakat 5.0 menjadi sesuatu yang tidak dapat dihindari oleh kita warga negara Indonesia. Jepang sebagai pionir untuk istilah ini bahkan sudah mengikrarkan *Society 5.0* sejak lima tahun lalu sebagai bentuk visi kabinet Jepang dalam menatap masa depan. Tantangannya adalah apakah kita mempunyai keberanian untuk mendobrak zona nyaman dan membuka diri terhadap beberapa saran dan ide kebaruan. Sehingga kita terlatih untuk menciptakan kebaruan di bidang masing-masing. Kalau tetap bertahan dan merasa nyaman pada kondisi sekarang maka kita akan selalu menjadi pengikut tren karya orang lain.

Teori *N-soft sets* yang diperkenalkan pertama kali oleh Fatimah et al. (2018) mendasari semangat memberikan perubahan arah penelitian khususnya pada bidang kajian *soft computing*. Saat ini, penelitian terkait *N-soft sets* terus dikembangkan oleh peneliti mancanegara khususnya pendalaman teori serta berbagai bentuk kombinasi *N-soft sets* dengan topik lain. Tantangan berikutnya adalah mengimplementasikan teori *N-soft sets* pada *big data* agar dapat membawa manfaat secara lebih masif pada masyarakat. Beberapa tantangan tersebut dijabarkan pada artikel ini melalui tujuh bidang esensial untuk menyongsong masyarakat Indonesia super cerdas dan memiliki daya saing dengan negara lain yang berada di dalam masyarakat 5.0.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, S. M., Alam, K. A., & Shamshirband, S. (2019). A soft-rough set based approach for handling contextual sparsity in context-aware video recommender systems. *Mathematics*, 7(8), 740.
- Abu Qamar, M., & Hassan, N. (2019). An approach toward a Q-neutrosophic soft set and its application in decision making. *Symmetry*, 11(2), 139.
- Adeel, A., Akram, M., Yaqoob, N., & Chammam, W. (2020). Detection and severity of tumor cells by graded decision-making methods under fuzzy N-soft model. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 39(1), 1303-1318.
- Akram, M., & Adeel, A. (2019). TOPSIS approach for MAGDM based on interval-valued hesitant fuzzy N-soft environment. *International Journal of Fuzzy Systems*, 21(3), 993-1009.
- Akram, M., Adeel, A., & Alcantud, J. C. R. (2018). Fuzzy N-soft sets: A novel model with applications. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 35(4), 4757-4771.
- Akram, M., Adeel, A., & Alcantud, J. C. R. (2019). Group decision-making methods based on hesitant N-soft sets. *Expert Systems with Applications*, 115, 95-105.
- Akram, M., Adeel, A., & Alcantud, J. C. R. (2019). Hesitant fuzzy N-soft sets: A new model with applications in decision-making. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 36(6), 6113-6127.
- Akram, M., & Ali, G. (2021). Group decision-making approach under multi (Q, N)-soft multi granulation rough model. *Granular Computing*, 6(2), 339-357.
- Akram, M., Ali, G., & Alcantud, J. C. R. (2019). New decision-making hybrid model: intuitionistic fuzzy N-soft rough sets. *Soft Computing*, 23(20), 9853-9868.
- Akram, M., Ali, G., Alcantud, J. C., & Fatimah, F. (2021). Parameter reductions in N-soft sets and their applications in decision-making. *Expert Systems*, 38(1). <https://doi.org/10.1111/exsy.12601>

- Akram, M., Amjad, U., & Davvaz, B. (2021). Decision-making analysis based on bipolar fuzzy N-soft information. *Computational and Applied Mathematics*, 40(6), 1-39.
- Akram, M., Shabir, M., & Ashraf, A. (2021). Complex neutrosophic N-soft sets: A new model with applications. *Neutrosophic Sets and Systems*, 42, 278-301.
- Akram, M., Shabir, M., Al-Kenani, A. N., & Alcantud, J. C. R. (2021). Hybrid decision-making frameworks under complex spherical fuzzy N-soft sets. *Journal of Mathematics*.
- Akram, M., Wasim, F., & Al-Kenani, A. N. (2021). A hybrid decision-making approach under complex Pythagorean fuzzy N-soft sets. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 14(1), 1263-1291.
- Alcantud, J. C. R., Feng, F., & Yager, R. R. (2019). An N-soft sets approach to rough sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28(11), 2996-3007.
- Al Nuaimi, E., Al Neyadi, H., Mohamed, N., & Al-Jaroodi, J. (2015). Applications of big data to smart cities. *Journal of Internet Services and Applications*, 6(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s13174-015-0041-5>
- Andriyansah, & Fatimah, F. (2020). Developing the concept of e-customer relationship management model to improve marketing performance. In 2020 The 4th International Conference on E-commerce, E-Business and E-Government, 22-26.
- Ashraf, A., & Butt, M. A. (2021). Extension of TOPSIS method under single-valued neutrosophic N-soft environment. *Neutrosophic sets and systems*, 41, 286-303.
- Chen, Y., Liu, J., Chen, Z., & Zhang, Y. (2020). Group decision-making method based on generalized Vague N-soft sets. In 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 4010-4015. IEEE.
- Deguchi, A., Hirai, C., Matsuoka, H., Nakano, T., Oshima, K., Tai, M., & Tani, S. (2020). What is society 5.0. *Society*, 5, 1-23.
- Dong, L., Chen, S., Cheng, Y., Wu, Z., Li, C., & Wu, H. (2017). Measuring economic activity in China with mobile big data. *EPJ Data Science*, 6(29), 1-17. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-017-0125-5>

- Einav, L., & Levin, J. (2014). The data revolution and economic analysis. *Innovation Policy and the Economy*, 14(1), 1-24. Retrieved from <https://www.journals.uchicago.edu/doi/full/10.1086/674019>
- Elshendy, M., & Colladon, A. F. (2017). Big data analysis of economic news: Hints to forecast macroeconomic indicators. *International Journal of Engineering Business Management*, 9, 1-12. <https://doi.org/10.1177%2F1847979017720040>
- Fatimah, F. (2018). Pengambilan keputusan incomplete N-Soft Sets pada data untuk mengukur indikator sustainable development goals. Book Chapter: *Seminar Nasional FMIPA Universitas Terbuka*, pp. 209-228.
- Fatimah, F. (2020). Pengambilan keputusan multi hesitant N-soft sets. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*, 4(6), 1110-1116.
- Fatimah, F., & Alcantud, J. C. R. (2018). Expanded dual hesitant fuzzy sets. *International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 102-108. doi: 10.1109/IS.2018.8710539.
- Fatimah, F., & Alcantud, J.C.R. (2021). The multi-fuzzy N-soft sets and its applications to decision-making. *Neural Computing & Application*. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05647-3>
- Fatimah, F., Rosadi, D., Hakim, R.B.F., & Alcantud, J. C. R. (2018a). N-soft sets and their decision making algorithms. *Soft Computing*, 2, 3829–3842. <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2838-6>
- Fatimah, F., Rosadi, D., & Hakim, R. B. F. (2018b). Probabilistic soft sets and dual probabilistic soft sets in decision making with positive and negative parameters. *Journal of physics: conference series*, 983(1). Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/983/1/012112>
- Fukuyama, M. (2018). Society 5.0: Aiming for a new human-centered society. *Japan Spotlight*, 1, 47-50.
- Gentsh, P. (2019). *AI in Marketing, Sales and Service*. Switzerland: Palgrave Macmillan.

- Hao, F., Park, D. S., & Pei, Z. (2018). When social computing meets soft computing: opportunities and insights. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 8(1), 1-18
- Harayama, Y. (2017). Society 5.0: aiming for a new human-centered society. *Hitachi Review*, 66(6), 8-13.
- Haruna, K., Ismail, M. A., Suyanto, M., Gabralla, L. A., Bichi, A. B., Danjuma, S., ... Herawan, T. (2019). A soft set approach for handling conflict situation on movie selection. *IEEE access*, 7, 116179-116194.
- Hilbert, M. (2016). Big data for development: A review of promises and challenges. *Development Policy Review*, 34(1), 135-174. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/4nq8z7dn>
- Kamacı, H. (2020). Introduction to N-soft algebraic structures. *Turkish Journal of Mathematics*, 44(6), 2356-2379.
- Kamacı, H., & Petchimuthu, S. (2020). Bipolar N-soft set theory with applications. *Soft Computing*, 24(22), 16727-16743.
- Kamacı, H., & Saqlain, M. (2021). n-ary fuzzy hypersoft expert sets. *Neutrosophic Sets and Systems*, 43, 180-211.
- Liu, J., Chen, Y., Chen, Z., & Zhang, Y. (2020). Multi-attribute decision making method based on neutrosophic vague N-soft sets. *Symmetry*, 12(5), 853.
- Liu, Z., Alcantud, J. C. R., Qin, K., & Xiong, L. (2020). The soft sets and fuzzy sets-based neural networks and application. *IEEE Access*, 8, 41615-41625.
- Maciejewski, M. (2017). To do more, better, faster and more cheaply: using big data in public administration. *International Review of Administrative Sciences*, 83(1), 120-135. doi:10.1177/0020852316640058
- Mohamad, M., Selamat, A., Krejcar, O., Fujita, H., & Wu, T. (2020). An analysis on new hybrid parameter selection model performance over big data set. *Knowledge-Based Systems*, 192, 105441.

- Mahmood, T., Ur Rehman, U., & Ali, Z. (2021). A novel complex fuzzy N-soft sets and their decision-making algorithm. *Complex & Intelligent Systems*, 1-26.
- Molodtsov, D., (1999). Soft set theory-first results, *computers and mathematics with applications*, 37 (4-5), 19-31. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(99)00056-5)
- Mostafa, S. M., Kareem, F. F., & Jad, H. A. (2020). Brief review of soft set and its application in coding theory. *Journal of New Theory*, (33), 95-106. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1467381>
- Rehman, U. U., & Mahmood, T. (2021). Picture fuzzy N-soft sets and their applications in decision-making problems. *Fuzzy Information and Engineering*, 1-33.
- Riaz, M., Çağman, N., Zareef, I., & Aslam, M. (2019). N-soft topology and its applications to multi-criteria group decision making. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 36(6), 6521-6536.
- Riaz, M., Naeem, K., Zareef, I., & Afzal, D. (2020). Neutrosophic N-soft sets with TOPSIS method for multiple attribute decision making. *Neutrosophic sets and systems*, 32, 146-170.
- Riaz, M., Razzaq, A., Aslam, M., & Pamucar, D. (2021). M-parameterized N-soft topology-based TOPSIS approach for multi-attribute decision making. *Symmetry*, 13(5), 748.
- Saqlain, M., Jafar, M. N., & Riaz, M. (2020). A new approach of neutrosophic soft set with generalized Fuzzy TOPSIS in application of smart phone selection. *Neutrosophic Sets and Systems*, 32, 307-316. Retrieved from https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1491&context=nss_journal
- Selvachandran, G., Garg, H., & Quek, S. G. (2018). Vague entropy measure for complex vague soft sets. *Entropy*, 20(6), 403.
- Sivarajah, U., Kamal, M. M., Irani, Z., & Weerakkody, V. (2017). Critical analysis of big data challenges and analytical methods. *Journal of*

Business Research, 70, 263-286.
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.08.001>

- Sun Z., Zou H., & Strang K. (2015). Big data analytics as a service for business intelligence. In: Janssen, M. et al. (eds) Open and big data management and innovation. I3E 2015. *Lecture Notes in Computer Science*, 9373. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25013-7_16Www8.cao.go.jp/cstp/english/society5_0/index.html, What is Society 5.0? diakses 5 Agustus 2021.
- Xiao, Z., Yang, X., Niu, Q., Dong, Y., Gong, K., Xia, S., & Pang, Y. (2012). A new evaluation method based on D–S generalized fuzzy soft sets and its application in medical diagnosis problem. *Applied Mathematical Modelling*, 36(10), 4592-4604.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.049>
- Xu, D., Zhang, X., Hu, J., & Chen, J. (2020). A novel ensemble credit scoring model based on extreme learning machine and generalized fuzzy soft sets. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Zhang, H., Jia-Hua, D., & Yan, C. (2020). Multi-attribute group decision-making methods based on Pythagorean fuzzy N-soft sets. *IEEE Access*, 8, 62298-62309.
- Zhang, D., Li, P. Y., & An, S. (2021). N-soft rough sets and its applications. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, (Preprint), 1-9.

**KONTROL OPTIMAL PADA MODEL PENGADAAN
BAHAN MENTAH DENGAN MEMPERHATIKAN
TINGKAT KERUSAKAN DAN BIAYA PEMESANAN**

**OPTIMAL CONTROL OF RAW MATERIAL
PROCUREMENT MODEL BY CONSIDERING THE
DETERIORATION RATE
AND ORDERING COST**

Darsih Idayani

Program Studi Matematika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi,
Universitas Terbuka
darsih@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Saat ini persaingan di dunia industri berkembang pesat. Perusahaan berupaya untuk tetap bertahan dalam situasi yang tidak menentu. Salah satu strategi yang dapat dilakukan adalah meminimalkan biaya yang dikeluarkan untuk persediaan dengan melakukan manajemen persediaan yang baik. Pengadaan bahan mentah yang termasuk bagian dari manajemen persediaan dapat dimodelkan dan diselesaikan dengan mengaplikasikan teori kontrol optimal. Jumlah pembelian dijadikan sebagai kontrol dengan tujuan meminimalkan fungsi tujuan atau fungsi objektif, yaitu biaya pengadaan bahan mentah. Terdapat tiga kebijakan pengadaan bahan mentah yang dikombinasikan dalam model ini, yaitu pengadaan tepat waktu (just in time), pergudangan (warehousing), dan penundaan (backlogging). Model pengadaan bahan mentah juga dimodifikasi dengan memperhatikan tingkat kerusakan pada saat menyimpan bahan mentah di gudang (deteriorating rate) dan menambahkan biaya pemesanan (ordering cost). Untuk mendapatkan biaya pengadaan bahan mentah yang optimal, syarat perlu Prinsip Maksimum Pontryagin dan Karush-Kuhn-Tucker telah dipenuhi. Selain itu syarat umum Legendre Clebs juga terpenuhi sehingga persamaan Hamiltonian terjamin optimal secara lokal sepanjang busur singular. Simulasi numerik dilakukan dengan membandingkan model bahan mentah dengan kombinasi kebijakan pengadaan dan model yang hanya

menggunakan satu kebijakan yaitu tepat waktu seperti yang banyak dilakukan perusahaan. Hasilnya menunjukkan bahwa model dengan kombinasi kebijakan pengadaan membutuhkan biaya lebih sedikit daripada hanya melakukan kebijakan tepat waktu. Hal ini berarti kombinasi kebijakan pengadaan lebih optimal. Penerapan teori kontrol optimal yang termasuk dalam lingkup matematika terapan dengan memanfaatkan teknologi informasi merupakan salah satu upaya untuk memperoleh penyelesaian masalah di era Society 5.0. Hasil analisis terhadap model matematika pada pengadaan bahan mentah diharapkan menjadi informasi yang bermanfaat bagi para stakeholder untuk dapat mengambil kebijakan yang terbaik.

Kata Kunci: *biaya pemesanan, Karush-Kuhn-Tucker, kontrol optimal, prinsip maksimum pontryagin, tingkat kerusakan.*

PENDAHULUAN

Dalam dunia modern saat ini dunia industri semakin kompetitif. Agar tetap bertahan dan tumbuh di dunia yang kompetitif ini, perusahaan dituntut untuk mempunyai strategi dalam meningkatkan performa dan kualitasnya. Salah satu strategi tersebut adalah dengan memiliki manajemen persediaan yang baik.

Persediaan adalah stok material atau barang yang dapat dipakai untuk memenuhi permintaan pelanggan atau untuk memfasilitasi produksi. Bentuk persediaan antara lain barang semi-jadi, bahan mentah, atau barang jadi. Ketersediaan bahan mentah sangat penting dalam mendukung keberlangsungan produksi. Kekurangan bahan mentah dapat mengakibatkan produksi terhenti. Perusahaan harus dapat menyediakan bahan mentah tepat waktu agar tidak perlu mengeluarkan biaya penalti akibat tidak dapat memenuhi permintaan saat itu juga (*backlogging*). Namun, perusahaan akan dibebankan biaya penyimpanan jika terlalu banyak persediaan bahan mentah di gudang. Apalagi jika salah memprediksi, bahan mentah yang disimpan akan rusak karena sudah kedaluwarsa sehingga hanya dibuang begitu saja. Hal ini juga dapat membuat perusahaan merugi. Oleh karena itu ketepatan prediksi sangat penting untuk mengatur atau mengontrol pengadaan bahan mentah agar perusahaan tidak kehilangan kesempatan dalam memenuhi permintaan pembeli dan tidak mengalami kerugian.

Pengadaan bahan mentah dapat diatur sedemikian rupa menggunakan matematika terapan, yaitu teori kontrol optimal. Teori kontrol optimal merupakan salah satu optimasi matematika yang berasal dari perluasan kalkulus variasi. Dalam kontrol optimal dilakukan proses penemuan variabel kontrol (*control*) untuk sistem dinamis (*dynamic system*) dengan tujuan mengoptimalkan fungsi tujuan (*objective function*). Dalam pengadaan bahan mentah, fungsi tujuan dapat berupa biaya, waktu, atau keduanya, tergantung permasalahan yang akan diselesaikan. Jackson, Tolujew, Tolujevs, dan Kegenbekov (2020) memaparkan bahwa masalah kontrol inventori dapat diselesaikan dengan berbagai macam metode numerik, sehingga masalah ini menarik bagi para peneliti dari berbagai disiplin ilmu yang berbeda.

Beberapa penelitian terkait kontrol optimal manajemen inventori telah dilakukan. Pada tahun 2017, Dhaiban membandingkan pemrograman kuadratik stokastik (*Stochastic Quadratic Programming/SQP*) dan model optimal kontrol dalam sistem produksi-inventori dengan permintaan stokastik. Hasilnya menunjukkan bahwa kontrol inventori lebih baik daripada kasus SQP. Wagner (2017) memformulasi dan menyelesaikan model manajemen inventori statis dan dinamis yang terdapat di titik persimpangan atau titik potong optimasi *robust* dan teori kontrol optimal. Taleizadeh, Zarei, dan Sarker (2017) menggunakan kontrol optimal pada persediaan dengan interval pengisian ulang probabilistik dan kenaikan harga yang diketahui. Gayon, Vercraene, dan Flapper (2017) mempertimbangkan sistem produksi-inventori dengan barang yang dikembalikan (*product return*) yang dapat dibuang pada saat kedatangan (barang) atau diletakkan dalam inventaris yang dapat digunakan, adapun produk yang dapat digunakan bisa dibuang kapan saja. Affandi (2018) menggunakan pendekatan kontrol optimal untuk menentukan tingkat produksi yang optimal.

Pada tahun 2019, Ahmadi, Atan, Kok, dan Adan membahas masalah suatu perusahaan yang menghadapi permintaan pembeli Poisson. Kemudian perusahaan tersebut menggunakan kebijakan persediaan pengaman (*base-stock*) untuk mengisi ulang persediaan dari pemasok luar dengan waktu tunggu (*lead time*) yang sudah ditentukan. Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut, Ahmadi et al. (2019) menggunakan teori kontrol optimal. Apabila telah ditentukan kontrol optimal dari jumlah pemesanan barang, maka teori kontrol stokastik dapat digunakan untuk

meminimalkan biaya total yang telah diprediksi hingga waktu kadaluarsa barang (Kanekiyo & Agata, 2019). Selanjutnya pada tahun 2020, Idayani dan Subchan mengaplikasikan kontrol optimal manajemen persediaan *multi-supplier* dengan *lead time* untuk mengoptimalkan persediaan beras yang diselesaikan menggunakan LQR (*Linear Quadratic Regulator*). Adapun Dizbin dan Tan (2020) menunjukkan bahwa sebuah kebijakan kontrol produksi yang efektif harus mempertimbangkan korelasi dalam proses layanan dan permintaan.

Arnold, Minner, dan Eidam (2009) menggunakan pendekatan deterministik kontrol optimal untuk mengoptimalkan kebijakan pengadaan dan inventori bahan mentah dengan memperhatikan harga beli yang fluktuatif. Hasilnya adalah model yang menggabungkan beberapa kebijakan, yaitu pengadaan tepat waktu (*just in time*), pergudangan (*warehousing*), dan penundaan (*backlogging*) yang menghasilkan biaya pengadaan optimal. Kemudian pada tahun 2019, Idayani, Sari, dan Munawwir mengembangkan model pengadaan bahan mentah Arnold et al. (2009) tersebut dengan menambahkan kendala kapasitas gudang. Model tersebut diselesaikan menggunakan kontrol optimal yaitu Prinsip Maksimum Pontryagin. Dalam hal ini, mereka membandingkan dua kasus yaitu persediaan habis pada saat t_f (waktu akhir) dan persediaan bersisa di gudang. Hasil yang lebih optimal diperoleh ketika tidak ada persediaan tersisa di gudang pada saat t_f . Dalam model ini, biaya pemesanan (*ordering cost*) diasumsikan tidak ada dan tidak memperhatikan kerusakan bahan mentah. Padahal pada kenyataannya, biaya pemesanan dapat mempengaruhi pengeluaran biaya pengadaan dan bahan mentah mempunyai batas waktu kadaluarsa.

Oleh karena itu, dalam artikel ini disajikan pengembangan model pengadaan bahan mentah dengan memperhatikan tingkat kerusakan dan menambahkan biaya pemesanan dalam biaya pengadaan. Jumlah pemesanan sebagai kontrol dengan fungsi tujuan meminimalkan biaya pengadaan atau pembelian bahan mentah. Kemudian diselesaikan dengan menerapkan teori kontrol optimal dengan memenuhi Prinsip Maksimum Pontryagin dan kondisi Karush-Kuhn-Tucker. Simulasi numerik menggunakan *software* Matlab dilakukan dengan membandingkan dua kasus, kasus pengadaan yang menggabungkan beberapa kebijakan pengadaan, yaitu pengadaan tepat waktu, pergudangan, dan penundaan dengan kasus yang hanya melakukan kebijakan tepat waktu.

1. *Net Present Value*

Net Present Value (NPV) merupakan nilai di masa sekarang dari sejumlah uang yang akan diperoleh di masa depan dan dikonversikan ke nilai di masa sekarang menggunakan tingkat bunga atau *interest rate* (*discount rate*) (Fabozzi & Drake, 200). *Discounted Cash Flow* (DCF) dianalisis menggunakan NPV yang merupakan metode standar untuk mengestimasi kondisi keuangan suatu proyek jangka panjang. Pemotongan dengan faktor diskon (*discount factor*) dilakukan untuk memperoleh NPV. Faktor diskon $\frac{1}{(1+r)^t}$ digunakan untuk sistem waktu diskrit sedangkan faktor diskon e^{-rt} untuk sistem waktu kontinu. Dengan demikian diperoleh

$$NPV = \frac{R_t}{(1+r)^t} \tag{1}$$

untuk sistem waktu diskrit, atau

$$NPV = e^{-rt} R_t \tag{2}$$

untuk sistem waktu kontinu, dengan

t = waktu investasi;

R_t = arus kas bersih pada saat t ; dan

r = tingkat suku bunga (*interest rate*).

Sebagai contoh, misalkan kita ingin mempunyai uang senilai Rp 12.000.000,- enam tahun kedepan. Jika diketahui tingkat suku bunga tiap tahun adalah 10%, maka diperoleh NPV berikut

$$NPV = \frac{12.000.000}{(1+0,1)^6} = 6.773.600$$

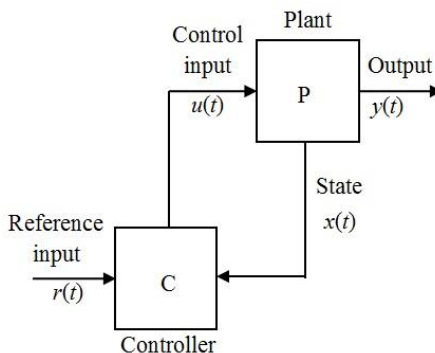
Hal ini berarti jika kita mempunyai uang Rp 12.000.000,- pada enam tahun yang akan datang, maka nilainya sama seperti kita mempunyai uang Rp 6.773.600,- pada tahun ini. Jadi, untuk mempunyai uang Rp 12.000.000,- pada enam tahun yang akan datang, tahun ini harus menabung sebanyak Rp 6.773.600,-.

2. Kontrol Optimal

Permasalahan kontrol optimal mempunyai tujuan mendapatkan nilai dari kontrol atau kendali yang kemudian dimasukkan ke dalam suatu sistem atau model sekaligus untuk memenuhi beberapa kendala (*constraints*) yang ada. Dalam Naidu (2002) disebutkan bahwa formulasi dalam masalah kontrol adalah:

- mendeskripsikan suatu model atau sistem secara matematis biasanya dalam bentuk variabel *state* atau variabel keadaan;
- menentukan fungsi tujuan; dan
- menentukan kendala fisik dan kondisi batas pada kontrol dan *state*.

Sebagai contoh, perhatikan Gambar 1 berikut. Bagaimana mendapatkan kontrol $u^*(t)$ (tanda * menyatakan kondisi optimal) yang dideskripsikan pada Gambar 1.



Sumber: Naidu, 2002

Gambar 1. Skema Kontrol

Pada umumnya masalah kontrol optimal disajikan dalam bentuk ekspresi matematika yang diformulasikan sebagai fungsi tujuan (*objective function*) dan beberapa kendala (*constraints*). Dalam hal ini, masalah kontrol optimal bertujuan untuk mendapatkan kontrol yang dinotasikan dengan $u(t)$ yang mengoptimalkan fungsi tujuan berikut.

$$J = \phi(\mathbf{x}(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} \mathcal{L}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \quad (3)$$

dengan kendala

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (4)$$

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}(t_f), t_f) = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \leq 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{S}(\mathbf{x}(t)) \leq 0. \quad (8)$$

Fungsi tujuan (3) adalah ukuran dari performa suatu sistem. Contohnya dalam permasalahan ekonomi, fungsi tujuan dapat memberikan ukuran dari keuntungan, penjualan, biaya, dan lain-lain. Contoh lainnya dalam masalah transformasi, fungsi tujuan dapat memberikan ukuran waktu, banyaknya bahan bakar, jarak, dan lain-lain. Fungsi tujuan (3) dengan $\phi(\mathbf{x}(t_f), t_f) = 0$ adalah fungsi tujuan dalam bentuk Lagrange, sedangkan nilai $\mathcal{L}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) = 0$ disebut bentuk Mayer (Subchan & Zbikowski, 2009).

Kontrol dengan tanda bintang ($\mathbf{u}^*(t)$) adalah kontrol yang optimal (minimal atau maksimal tergantung pada permasalahan yang dimodelkan). Ketika disubstitusikan ke persamaan sistem dinamik (4) akan memperoleh persamaan *state* optimal $\mathbf{x}^*(t)$ dan fungsi tujuan optimal J^* . Kondisi awal (5) dan kondisi akhir (6) adalah kondisi batas dari *state* optimal $\mathbf{x}^*(t)$. Pertidaksamaan (7) dan (8) adalah kendala campuran yang merupakan batas dari kontrol optimal dan *state* optimal.

3. Kontrol Optimal *Current-Value*

Kontrol optimal telah banyak diaplikasikan dalam masalah ilmu ekonomi dan manajemen. Secara umum, fungsi tujuan diinterpretasikan dalam nilai waktu dari uang atau barang karena kepemilikan uang atau barang di masa depan selalu terpotong (*discounted*).

Misalkan diasumsikan bahwa $r \geq 0$ adalah tingkat diskon yang kontinu dan konstan. Fungsi tujuan yang *discounted* adalah kasus yang khusus dari

fungsi tujuan dengan asumsi bahwa ketergantungan fungsi waktu terjadi melalui faktor diskon (Sethi, 2019). Dengan demikian fungsi tujuan menjadi

$$J = e^{-rt} \phi(\mathbf{x}(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} e^{-rt} \mathcal{L}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt. \quad (9)$$

Syarat perlu untuk mendapatkan kondisi optimal dengan fungsi tujuan *discounted* adalah:

- a. Kondisi stasioner

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{u}} = 0. \quad (10)$$

- b. Persamaan *state* and *co-state*

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\lambda}} \quad (11)$$

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}}^T = r\boldsymbol{\lambda}^T - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} \quad (12)$$

dengan $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ dan $\boldsymbol{\lambda}^T(t_f) = 0$.

4. Prinsip Maksimum Pontryagin

Prinsip maksimum adalah syarat perlu untuk dapat memperoleh solusi kontrol optimal sesuai dengan sistem dinamik mulai *state* awal hingga *state* akhir, yaitu mengoptimalkan fungsi tujuan dengan kontrol $\mathbf{u}(t)$ terbatas pada $\mathbf{u}(t) \in \mathcal{U}$. Prinsip maksimum ini diformulasikan pada tahun 1956 oleh matematikawan Rusia yaitu Lev Pontryagin dan murid-muridnya (Naidu, 2002). Prinsip ini menyatakan bahwa persamaan Hamiltonian akan maksimal sepanjang \mathcal{U} , dengan \mathcal{U} adalah himpunan kontrol yang mungkin (Bryson & Ho, 1975). Adapun persamaan Hamiltonian yang dimaksud adalah

$$H = \mathcal{L}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) + \boldsymbol{\lambda}^T(t) f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t). \quad (13)$$

Karena kontrol $\mathbf{u}(t)$ dibatasi oleh $a < \mathbf{u}(t) < b$, maka persamaan Hamiltonian-Lagrangian yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$L = \mathcal{L}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) + \boldsymbol{\lambda}^T(t) f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) + w_1 + w_2(\mathbf{u}(t) - a). \quad (14)$$

Syarat perlu untuk memperoleh kondisi optimal adalah:

a. Kondisi stasioner

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{u}} = 0. \quad (15)$$

b. Persamaan *state* dan *co-state*

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\lambda}} \quad (16)$$

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}}^T = -\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} \quad (17)$$

dengan $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ dan $\boldsymbol{\lambda}^T(t_f) = 0$.

5. Pendekatan Pemrograman Nonlinier Dan Kondisi Karush-Kuhn-Tucker

Pendekatan pemrograman nonlinier dapat digunakan untuk pendiskretan kontrol optimal dan menafsirkan hasilnya sebagai masalah optimasi dimensi-tak hingga (Subchan & Zbikowski, 2009) Misalkan terdapat masalah optimasi

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (18)$$

dengan kendala $\mathbf{g}_i(\mathbf{x}) \leq 0, i=1, \dots, m$. Adapun fungsi tujuan dan fungsi kendala diasumsikan terdiferensiasi dan kontinu. Masalahnya adalah bagaimana menemukan penyelesaian \mathbf{x}^* yang dapat meminimumkan fungsi tujuan untuk memenuhi kendala-kendala yang ada. Salah satu metodenya adalah dengan menggunakan fungsi Lagrange $\mathcal{L}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ sebagai berikut.

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \mathbf{g}_i(\mathbf{x}) \quad (19)$$

dengan $\lambda_i, i=1, \dots, m$ adalah pengali Lagrange.

Agar \mathbf{x} optimal secara lokal, syarat perlu orde pertama Karush-Kuhn-Tucker (KKT) harus dipenuhi. Syarat perlu KKT adalah generalisasi dari metode pengali Lagrange untuk masalah optimasi dengan kendala berupa

pertidaksamaan. Berikut ini syarat perlu KKT yang harus dipenuhi (Sharma, 2006).

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{x}_j} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_j} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial \mathbf{g}_i}{\partial \mathbf{x}_j}, j = 1, \dots, n \quad (20)$$

$$\lambda_i \mathbf{g}_i(\mathbf{x}) = 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

$$\mathbf{g}_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

$$\lambda_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m. \quad (23)$$

6. Kontrol *Bang-Bang* dan Kontrol Singular

Jika Prinsip Maksimum Pontryagin sulit untuk diimplementasikan, maka masalah kontrol optimal dapat diselesaikan dengan menggunakan kontrol *bang-bang* dan singular. Hal ini terjadi ketika persamaan Hamiltonian bergantung pada kontrol $\mathbf{u}(t)$ secara linier. Jika kontrol $\mathbf{u}(t)$ muncul secara linier dalam Hamiltonian, maka kontrol optimal $\mathbf{u}(t)$ tidak dapat ditentukan dari kondisi $H_u = 0$ dengan $\frac{\partial}{\partial t} H = H_u$. Oleh karena $\mathbf{u}(t)$ terbatas, maka diperoleh Hamiltonian yang maksimum sebagai berikut (Subchan & Zbikowski, 2009)).

$$\mathbf{u}(t) = \begin{cases} \mathbf{u}_{maks}, & \text{if } H_u < 0; \\ \mathbf{u}_{sing}, & \text{if } H_u = 0; \\ \mathbf{u}_{min}, & \text{if } H_u > 0. \end{cases} \quad (24)$$

Fungsi H_u disebut sebagai fungsi *switching* saat terjadi perubahan $\mathbf{u}(t)$. Fungsi *switching* bisa positif, nol, atau negatif. Kontrol dalam penyelesaian ini disebut kontrol *bang-bang*. Peralihan kontrol $\mathbf{u}(t)$ dari \mathbf{u}_{maks} ke \mathbf{u}_{min} yang terjadi ketika H_u berubah dari yang bernilai negatif menjadi positif. Nilai H_u adalah nol dalam jangka waktu yang terbatas $t_0 \leq t \leq t_f$. Dalam kondisi ini, kontrol $\mathbf{u}(t)$ disebut kontrol singular. Dalam interval tersebut, kontrol $\mathbf{u}(t)$ dapat ditemukan dari turunan berulang H_u terhadap waktu sehingga kontrol $\mathbf{u}(t)$ muncul secara eksplisit. Oleh karena

itu, kontrol dalam interval tersebut dikatakan sebagai syarat perlu dari singularitas yang kontinu.

Dalam Sethi (2019) disebutkan bahwa busur singular optimal akan dihasilkan oleh kontrol $u(t)$ jika memenuhi:

- a. persamaan Hamiltonian $H \equiv 0$; dan
- b. syarat Kelley

$$(-1)^k \frac{\partial}{\partial u} \left[\left(\frac{d}{dt} \right)^{2k} H_u \right] \geq 0, k = 0, 1, \dots \quad (25)$$

Kondisi tersebut dinamakan syarat umum Legendre Clebs yang dapat menjamin keoptimalan persamaan Hamiltonian di sepanjang busur singular (Sethi, 2019).

PEMBAHASAN

1. Pengembangan Model Pengadaan Bahan Mentah dengan Tingkat Kerusakan dan Biaya Pemesanan

a. Biaya pengadaan bahan mentah

Model matematika pengadaan bahan mentah menggabungkan strategi kebijakan pergudangan, penundaan, dan pengadaan tepat waktu. Pengadaan tepat waktu adalah membeli bahan mentah untuk memenuhi permintaan produksi dan menggunakannya langsung dalam proses produksi tanpa melakukan penyimpanan di gudang. Strategi ini dapat dilakukan dalam kondisi ideal, yaitu jika kondisi harga beli murah dan persediaan di pemasok cukup tersedia.

Namun kondisi tidak selalu ideal. Terkadang harga beli naik atau persediaan di pemasok tidak ada sehingga tidak dapat memenuhi permintaan produksi. Untuk mengantisipasi kondisi tersebut digunakan kebijakan pergudangan, yaitu membeli dan menyimpan bahan mentah di gudang ketika bahan mentah tersedia di pemasok atau menggunakan bahan mentah yang ada di gudang ketika harga bahan mentah mahal. Namun dalam pergudangan, penyimpanan bahan mentah dibatasi oleh kapasitas gudang yang menyebabkan jumlah persediaan di gudang $x(t)$ tidak dapat melebihi atau di atas kapasitas gudang w .

Strategi selanjutnya adalah penundaan. Strategi ini dilakukan ketika persediaan di gudang tidak ada atau persediaan di pemasok tidak ada atau harga bahan mentah terlampau mahal. Kebijakan penundaan adalah menunda untuk memenuhi permintaan dan mengakumulasi untuk dipenuhi di lain waktu ketika persediaan ada atau ketika harga murah.

Jika kebijakan pergudangan diterapkan maka akan menimbulkan biaya penyimpanan $h_w(t)$. Di sisi lain, jika penundaan diterapkan maka akan menimbulkan biaya penalti $h_b(t)$ karena tidak dapat memenuhi permintaan saat itu juga. Oleh karena itu, formula biaya penyimpanan adalah

$$h(t) = \begin{cases} h_w(t); 0 \leq x(t) \leq w \\ -h_b(t); x(t) < 0 \end{cases} \quad (26)$$

Model pengadaan bahan mentah terdiri atas biaya pengadaan bahan mentah dan persamaan penyimpanan persediaan. Biaya pengadaan bahan mentah adalah biaya pembelian (*item cost*) dan biaya pemesanan (*ordering cost*). Selain itu, jika menyimpan persediaan di gudang akan menimbulkan biaya penyimpanan (*holding cost*), dan jika kehabisan persediaan akan menimbulkan biaya penalti (*shortage cost*). Jadi formula biaya pengadaan bahan mentah adalah

$$\text{Biaya pengadaan bahan mentah} = p(t) u(t) + o(t) u(t) + h(t) x(t) \quad (27)$$

dengan

$p(t)$ = harga bahan mentah pada saat t ,

$o(t)$ = biaya pemesanan pada saat t ,

$u(t)$ = jumlah pengadaan pada saat t ,

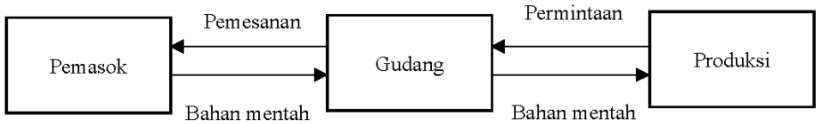
$h(t)$ = biaya penyimpanan pada saat t ,

$x(t)$ = jumlah persediaan pada saat t .

b. Perubahan jumlah persediaan di gudang

Perubahan jumlah persediaan di gudang $\dot{x}(t)$ dipengaruhi oleh pengadaan $u(t)$ yang menyebabkan persediaan bertambah dan

pemenuhan permintaan $d(t)$ yang menyebabkan persediaan berkurang. Selain itu juga dapat dipengaruhi oleh kerusakan bahan mentah yang telah kadaluarsa yang menyebabkan berkurangnya persediaan. Kerusakan bahan mentah tergantung pada tingkat kerusakan yang dinotasikan dengan $\theta(t)$ untuk $0 \leq t \leq T$. Berikut gambaran secara umum mengenai perubahan persediaan bahan mentah di gudang.



Gambar 2. Arus Persediaan Bahan Mentah

Pada waktu yang berbeda, tingkat kerusakan juga berbeda. Semakin lama bahan mentah disimpan, maka semakin tinggi tingkat kerusakannya. Hal ini dikarenakan tingkat kerusakan $\theta(t)$ bergantung pada waktu t dan jumlah persediaan pada saat t . Oleh karena itu formula perubahan jumlah persediaan adalah

$$\dot{x}(t) = u(t) - d(t) - \theta(t)x(t)$$

Dengan $u(t) \geq 0$.

c. Model pengadaan bahan mentah

Model pengadaan bahan mentah merupakan NPV minimum dari biaya pengadaan bahan mentah pada persamaan (27), yaitu:

$$\min_{u(t)} J = \int_0^T e^{-rt} [p(t)u(t) + o(t)u(t) + h(t)x(t)] dt \tag{28}$$

dengan sistem dinamik

$$\dot{x}(t) = u(t) - d(t) - \theta(t)x(t), u(t) \geq 0 \tag{29}$$

dan kendala

$$k_1(x(t), t) = x(t) - b \geq 0 \tag{30}$$

$$k_2(x(t), t) = w - x(t) \geq 0 \tag{31}$$

$$x(0) = x_0 \quad (32)$$

$$x(T) = 0 \quad (33)$$

dengan

$d(t)$ = jumlah permintaan pada saat t ,

w = batas atas kapasitas gudang,

b = batas bawah penundaan,

r = tingkat suku bunga (*interest rate*),

t = waktu.

2. Aplikasi Kontrol Optimal pada Model Pengadaan Bahan Mentah

Model pengadaan bahan mentah dapat diselesaikan dengan menggunakan kontrol optimal yaitu Prinsip Maksimum Pontryagin. Terdapat beberapa langkah yang harus dilakukan agar memperoleh kontrol $u(t)$ yang optimal. Langkah pertama adalah menentukan fungsi Hamiltonian (13) dan fungsi Hamiltonian-Lagrangian (14). Untuk itu, diberikan fungsi H sebagai berikut.

$$\begin{aligned} H &= -[p(t)u(t) + o(t)u(t) + h(t)x(t)] + \lambda(t)[u(t) - d(t) - \theta(t)x(t)] \\ &= -p(t)u(t) - o(t)u(t) - h(t)x(t) + \lambda(t)[u(t) - d(t) - \theta(t)x(t)] \end{aligned} \quad (34)$$

Karena kontrol $u(t)$ terbatas, maka fungsi Hamiltonian-Lagrangian $L(u(t), x(t), \lambda(t), t)$ diperoleh dari Hamiltonian nilai sekarang (*current value*) $H(u(t), x(t), \lambda(t), t)$ ditambah pengali Lagrange $\alpha_1(t)$ and $\alpha_2(t)$ yang masing-masing dikalikan dengan batas bawah kontrol $u(t)$ dan persediaan $x(t)$, sedangkan $\alpha_3(t)$ dikalikan dengan kendala kapasitas gudang. Dalam hal ini $\alpha_1(t) \geq 0$, $\alpha_2(t) \geq 0$, dan $\alpha_3(t) \geq 0$. Dengan demikian, fungsi Hamiltonian-Lagrangian yang dimaksud adalah

$$\begin{aligned} L &= H + \alpha_1(t)u(t) + \alpha_2(t)[x(t) - b] + \alpha_3(t)[w - x(t)] \\ &= -p(t)u(t) - o(t)u(t) - h(t)x(t) + \lambda(t)[u(t) - d(t) - \theta(t)x(t)] \end{aligned}$$

$$+\alpha_1(t)u(t)+\alpha_2(t)[x(t)-b]+\alpha_3(t)[w-x(t)]. \quad (35)$$

Berdasarkan syarat perlu yang diberikan oleh Prinsip Maksimum Pontryagin pada persamaan (15), (16), dan (17), maka diperoleh

a. Kondisi stasioner

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{u}(t)} = -p(t) - o(t) + \lambda(t) + \alpha_1(t) = 0. \quad (36)$$

b. Persamaan *state* (keadaan)

$$\dot{x}(t) = \frac{\partial L}{\partial \lambda(t)} = u(t) - d(t) - \theta(t)x(t). \quad (37)$$

c. Persamaan *co-state*

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}(t) &= r\lambda(t) - \frac{\partial L}{\partial x(t)} = r\lambda(t) - [-h(t) - \lambda(t)\theta(t) + \alpha_2(t) - \alpha_3(t)] \\ &= r\lambda(t) + h(t) + \lambda(t)\theta(t) - \alpha_2(t) + \alpha_3(t). \end{aligned} \quad (38)$$

Adapun syarat perlu yang dibentuk oleh Karush-Kuhn-Tucker pada persamaan (21) sampai dengan persamaan (23) menjadi

$$\begin{aligned} \alpha_1(t)u(t) &= 0, u(t) \geq 0, \alpha_1(t) \geq 0 \\ \alpha_2(t)[x(t)-b] &= 0, x(t) \geq b, \alpha_2(t) \geq 0 \\ \alpha_3(t)[w-x(t)] &= 0, x(t) \leq w, \alpha_3(t) \geq 0 \end{aligned} \quad (39)$$

Kontrol $u(t)$ akan muncul secara linier di fungsi Hamiltonian sehingga $u(t)$ yang optimal tidak dapat ditentukan dari kondisi $H_u = -p(t) - o(t) + \lambda(t) = 0$ (fungsi *switching*). Oleh karena itu dicari

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} H_u &= 0 \text{ dan } \frac{d^2}{dt^2} H_u = 0, \text{ yaitu} \\ \frac{\partial}{\partial t} H_u &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow -\dot{p}(t) + \dot{\lambda}(t) &= 0 \\ \Leftrightarrow -\dot{p}(t) + r\lambda(t) + h(t) + \lambda(t)\theta(t) - \alpha_2(t) + \alpha_3(t) &= 0 \end{aligned} \quad (40)$$

dan

$$\frac{d^2}{dt^2} H_u = 0$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow -\ddot{p}(t) + \ddot{\lambda}(t) + r\dot{\lambda}(t) + \dot{h}(t) + \dot{\lambda}(t)\theta(t) + \lambda(t)\dot{\theta}(t) - \dot{\alpha}_2(t) + \dot{\alpha}_3(t) &= 0 \\ \Leftrightarrow -\ddot{p}(t) + \ddot{\lambda}(t) + r(r\lambda(t) + h(t) + \lambda(t)\theta(t) - \alpha_2(t) + \alpha_3(t)) + \dot{h}(t) & \\ + (r\lambda(t) + h(t) + \lambda(t)\theta(t) - \alpha_2(t) + \alpha_3(t))\dot{\theta}(t) + \lambda(t)\dot{\theta}(t) & \\ - \dot{\alpha}_2(t) + \dot{\alpha}_3(t) &= 0 \end{aligned} \quad (41)$$

Kontrol tidak dapat ditentukan dari kondisi (40) dan (41) sehingga dapat disimpulkan bahwa busur singular tidak terdefinisi. Karena $u(t)$ terbatas, Hamiltonian yang maksimum dapat ditentukan dari persamaan (24) yang menjadi

$$u^*(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } \lambda(t) < p(t) + o(t); \\ \text{tidak terdefinisi,} & \text{if } \lambda(t) = p(t) + o(t); \\ \infty, & \text{if } \lambda(t) > p(t) + o(t). \end{cases} \quad (42)$$

Berdasarkan kontrol optimal (42), maka $u^*(t) = d(t) + \theta(t)x(t)$ dapat ditentukan ketika $\lambda(t) = p(t) + o(t)$, agar dapat memenuhi permintaan dan mengganti yang rusak. Dengan demikian persamaan (42) dapat ditulis kembali menjadi

$$u^*(t) = \begin{cases} 0; & \text{jika } \lambda(t) < p(t) + o(t) \\ d(t) + \theta(t)x(t); & \text{jika } \lambda(t) = p(t) + o(t) \\ \infty; & \text{jika } \lambda(t) > p(t) + o(t) \end{cases} \quad (43)$$

Selanjutnya dengan menggunakan syarat umum Legendre Clebs orde dua ($k=1$), dapat dibuktikan bahwa persamaan Hamiltonian mencapai optimal secara lokal sepanjang busur singular. Dalam hal ini, turunan kedua

dari H_u atau $\frac{d^2}{dt^2}H_u$ pada persamaan (41) diturunkan terhadap kontrol $u(t)$ menjadi

$$\frac{\partial}{\partial u} \left[\frac{d^2}{dt^2} H_u \right] = 0$$

dan dengan $k=1$, syarat Kelley pada persamaan (25) menjadi

$$(-1)^k \frac{\partial}{\partial u} \left[\left(\frac{d}{dt} \right)^{2k} H_u \right] = 0$$

Dengan terpenuhinya syarat umum Legendre Clebs, maka terbukti bahwa persamaan Hamiltonian optimal secara lokal di sepanjang busur singular.

3. Penyelesaian Optimal

a. Sifat-sifat penyelesaian

Sifat Pertama:

Jika harga bahan mentah dan biaya pemesanan naik melebihi tingkat bunga (*discount rate*) dikalikan harga bahan mentah dan biaya pemesanan saat ini ditambah biaya penyimpanan serta tingkat kerusakan dikalikan harga bahan mentah dan biaya pemesanan sekarang maka diperoleh ekspresi matematika berikut ini.

$$\dot{p}(t) + \dot{o}(t) > r(p(t) + o(t)) + h_w(t) + (p(t) + o(t))\theta(t).$$

Dengan demikian kebijakan pergudangan lebih baik diterapkan daripada pengadaan tepat waktu, dan keduanya tidak dapat terjadi secara bersamaan.

Kesimpulan dari sifat pertama adalah:

- 1) kebijakan pergudangan dan pengadaan tepat waktu tidak dapat dilakukan secara bersamaan; dan
- 2) kondisi

$$\dot{p}(t) + \dot{o}(t) = r(p(t) + o(t)) + h_w(t) + (p(t) + o(t))\theta(t), t \in [0, T] \quad (45)$$

menginterpretasikan calon titik untuk memasuki interval waktu penerapan kebijakan pergudangan.

Sifat Kedua:

Jika harga bahan mentah turun melebihi tingkat bunga dikalikan harga bahan mentah dan biaya pemesanan saat ini ditambah biaya penyimpanan serta tingkat kerusakan dikalikan harga bahan mentah dan biaya pemesanan sekarang maka diperoleh ekspresi matematika berikut ini.

$$\dot{p}(t) + \dot{o}(t) < r(p(t) + o(t)) - h_b(t) + (p(t) + o(t))\theta(t),$$

Dengan demikian kebijakan penundaan lebih baik dari pada pengadaan tepat waktu. Pada saat terdapat permintaan tetapi tidak ada persediaan di gudang, maka permintaan diakumulasikan untuk dipenuhi di masa yang akan datang. Hal ini berarti persediaan bernilai negatif ($x(t) < 0$) karena mempunyai tanggungan (hutang) yang harus dipenuhi di masa mendatang dan tidak ada pengadaan bahan mentah ($u(t) = 0$). Dengan kata lain, kebijakan penundaan dan pengadaan tepat waktu tidak dapat dilakukan di waktu yang sama.

Kesimpulan dari sifat kedua adalah:

- 1) kebijakan penundaan dan pengadaan tepat waktu tidak dapat terjadi di waktu yang sama; dan
- 2) Kondisi

$$\dot{p}(t) + \dot{o}(t) = r(p(t) + o(t)) - h_b(t) + (p(t) + o(t))\theta(t), t \in [0, T] \quad (46)$$

menginterpretasikan calon titik untuk menyelesaikan kebijakan penundaan atau meninggalkan interval persediaan yang negatif.

Sifat ketiga:

Penerapan kebijakan pergudangan saat $x(t) > 0$ dan pengadaan tepat waktu saat $x(t) > 0$ dapat terjadi secara bersamaan jika $x(t) = w$.

Kesimpulan dari sifat ketiga adalah:

- 1) kebijakan pergudangan dan kebijakan pengadaan tepat waktu dapat terjadi dalam waktu yang sama jika $x(t) = w$; dan

2) kendala kapasitas maksimum gudang digunakan karena waktu pemesanan dimulai ketika interval persediaan positif.

Ketiga sifat tersebut menginterpretasikan waktu perubahan atau transisi antar kebijakan.

b. Periode waktu kebijakan yang optimal

Lintasan optimal dapat diperoleh pada masing-masing kondisi $u^*(t)$, $x^*(t)$, $\lambda(t)$, $\alpha_1(t)$, $\alpha_2(t)$, and $\alpha_3(t)$ melalui hasil analisis dari kontrol optimal. Lintasan optimal dari periode pengadaan tepat waktu ditunjukkan pada Tabel 1, sedangkan lintasan optimal dari periode pergudangan ditunjukkan pada Tabel 2, dan lintasan optimal dari kebijakan penundaan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 1. Lintasan Optimal Periode Pengadaan Tepat Waktu

Variabel	Pengadaan Tepat Waktu
$u^*(t)$	$d(t)$
$x^*(t)$	0
$\lambda(t)$	$p(t)+o(t)$
$\alpha_1(t)$	0
$\alpha_2(t)$	$r(p(t)+o(t))+h_w(t)-\dot{p}(t)-\dot{o}(t)$
$\alpha_3(t)$	0

Tabel 2. Lintasan Optimal Periode Pergudangan

Variabel	Pergudangan
$u^*(t)$	0
$x^*(t)$	$-\int d(t)+\theta(t)x(t)dt$
$\lambda_w(t)$	$e^{rt} \int_{t^D}^t h_w(t) e^{-rt} dt + e^{r(t-t^D)} p(t^D)$
$\alpha_1(t)$	$p(t)-\lambda(t)$
$\alpha_2(t)$	0
$\alpha_3(t)$	0 jika $w-x(t) \neq 0$ $\dot{\lambda}(t)-r\lambda(t)-h(t)-\lambda(t)\theta(t)$ jika $w=x(t)$

Tabel 3. Lintasan Optimal Periode Penundaan

Variabel	Penundaan
$u^*(t)$	0
$x^*(t)$	$-\int d(t) + \theta(t)x(t) dt$
$\lambda_b(t)$	$e^{rt} \int_t^{t^{BJ}} h_b(t) e^{-rt} dt + e^{r(t-t^{BJ})} p(t^{BJ})$
$\alpha_1(t)$	$p(t) - \lambda(t)$
$\alpha_2(t)$	0
$\alpha_3(t)$	0

Periode waktu kebijakan yang optimal dapat ditentukan melalui titik-titik kritis persamaan yang diperoleh pada sifat 1, 2, dan 3, yaitu

$$\dot{p}(t) + \dot{o}(t) = r(p(t) + o(t)) + h(t) + (p(t) + o(t))\theta(t) \quad (47)$$

$$\dot{\lambda}(t) = r\lambda(t) + h(t) + \lambda(t)\theta(t) \quad (48)$$

$$\lambda(t) = p(t) + o(t). \quad (49)$$

Berikut ini merupakan titik-titik ekstrim yang menginterpretasikan pergantian penerapan kebijakan.

- 1) Titik t^{JD} adalah waktu saat kebijakan pengadaan tepat waktu berganti menjadi kebijakan pergudangan.
- 2) Titik t^{DJ} adalah waktu saat kebijakan pergudangan berganti menjadi kebijakan pengadaan tepat waktu.
- 3) Titik t^{JB} adalah waktu saat kebijakan pengadaan tepat waktu berganti menjadi kebijakan penundaan.
- 4) Titik t^{BJ} adalah waktu saat kebijakan penundaan berganti menjadi kebijakan pengadaan tepat waktu.
- 5) Titik t^{DB} adalah waktu saat kebijakan pergudangan berganti menjadi kebijakan penundaan.
- 6) Titik t^{lot} adalah waktu untuk membeli bahan mentah.

c. Langkah-langkah untuk memperoleh penyelesaian optimal

Untuk mendapatkan penyelesaian optimal maka perlu dilakukan langkah-langkah berikut.

- 1) Titik t^{JD} ditentukan dengan mencari penyelesaian persamaan

$$\dot{p}(t) + \dot{o}(t) = r(p(t) + o(t)) + h_w(t) + (p(t) + o(t))\theta(t)$$

dengan syarat

$$\dot{p}(t) + \dot{o}(t) > r(p(t) + o(t)) + h_w(t) + (p(t) + o(t))\theta(t).$$

- 2) Titik t^{DJ} ditentukan dengan menyelesaikan persamaan

$$p(t^{DJ}) = \lambda_w(t^{DJ}), \text{ dengan syarat } t^{DJ} > t^{JD}.$$

- 3) Titik t^{BJ} ditentukan dengan menyelesaikan persamaan

$$\dot{p}(t) + \dot{o}(t) = r(p(t) + o(t)) - h_b(t) + (p(t) + o(t))\theta(t)$$

dengan syarat

$$\dot{p}(t) + \dot{o}(t) < r(p(t) + o(t)) - h_b(t) + (p(t) + o(t))\theta(t).$$

- 4) Titik t^{JB} ditentukan dengan menyelesaikan persamaan

$$p(t^{JB}) + o(t^{JB}) = \lambda_b(t^{JB}), \text{ dengan syarat } t^{BJ} > t^{JB}.$$

- 5) Memeriksa eksistensi titik t^{DB} . Jika $t^{DJ} > t^{JB}$ maka dikatakan terjadi tumpang tindih sehingga titik t^{JB} diabaikan. Dengan demikian titik t^{DJ} menjadi titik t^{DB} . Titik t^{DB} dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan $\lambda_w(t^{DB}) = \lambda_b(t^{DB})$, dengan syarat $t^{JB} < t^{DJ}$.

- 6) Hitung jumlah pembelian atau pengisian gudang yaitu

$$Q(t^{JD}) = \int_{t^{JD}}^{t^{DJ}} d(t) dt.$$

- 7) Titik t^{lot} diperoleh dengan melakukan pemeriksaan jumlah pembelian pada poin 6) dengan memperhatikan kapasitas maksimum gudang. Dalam kasus ini terdapat dua kondisi, yaitu:

- Jika $Q(t^{JD}) \leq w$, maka titik $t^{lot} = t^{JD}$. Dengan demikian titik-titik $t^{JD}, t^{DJ}, t^{BJ}, t^{JB}$, dan t^{DB} tetap.

- Jika $Q(t^{JD}) > w$, maka titik $t^{lot} = t^{JD}$. Titik-titik t^{BJ} dan t^{JB} tetap karena tidak mempunyai pengaruh pada kapasitas maksimum gudang, tetapi titik t^{JD} dan t^{DJ} atau t^{DB} berubah. Titik t^{JD} yang baru dapat diperoleh dari penyelesaian persamaan kapasitas gudang $\int d(t)dt = w$, sedangkan titik t^{DJ} yang baru dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan $p(t^{DJ}) = \lambda_w(t^{DJ})$, dengan syarat $t^{DJ} > t^{JD}$. Jika terjadi tumpang tindih, maka titik t^{DB} harus dicari, tetapi titik t^{DJ} tidak perlu dicari. Adapun titik t^{DB} yang baru dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan $\lambda_w(t^{DB}) = \lambda_b(t^{DB})$ seperti pada langkah e).

8) Hitunglah biaya pengadaan bahan mentah.

Untuk mendapatkan nilai optimal, NPV dari biaya pengadaan dibagi menjadi beberapa bagian seperti berikut.

- Periode pengadaan tepat waktu

$$J_1 = \int_0^{t^{JD}} e^{-rt} (p(t) + o(t))d(t)dt + \int_{t^{DJ}}^{t^{JB}} e^{-rt} (p(t) + o(t))d(t)dt + \int_{t^{DB}}^T e^{-rt} (p(t) + o(t))d(t)dt.$$

Jika terjadi tumpang tindih periode, maka

$$\int_{t^{DJ}}^{t^{JB}} e^{-rt} (p(t) + o(t))d(t)dt = 0$$

sehingga

$$J_1 = \int_0^{t^{JD}} e^{-rt} (p(t) + o(t))d(t)dt + \int_{t^{DB}}^T e^{-rt} (p(t) + o(t))d(t)dt. \quad (51)$$

- Periode pergudangan

$$J_2 = \int_{t^{JD}}^{t^{DB}} e^{-rt} h_w(t)x(t)dt \quad (52)$$

dengan

$$x(t) = D(t^{JD}) - \int d(t) + \theta(t)x(t)dt$$

dan

$$D(t^{JD}) = \int d(t) dt \Big|_{t=t^{JD}} .$$

- Periode penundaan

$$J_3 = - \int_{t^{DB}}^{t^{BJ}} e^{-rt} h_b(t) x(t) dt \quad (53)$$

dengan

$$x(t) = D(t^{DB}) - \int d(t) dt$$

dan

$$D(t^{DB}) = \int d(t) dt \Big|_{t=t^{DB}} .$$

- Pembelian mentah

$$J_4 = e^{-rt^{lot}} \left(p(t^{lot}) + o(t^{lot}) \right) \int_{t^{lot}}^{t^{JD}} d(t) dt . \quad (54)$$

- Pemenuhan permintaan karena kebijakan penundaan

$$J_5 = e^{-rt^{DB}} \left(p(t^{DB}) + o(t^{DB}) \right) \int_{t^{DB}}^{t^{BJ}} d(t) dt . \quad (55)$$

Jadi total biaya pengadaan bahan mentah adalah

$$J = \sum_{i=1}^5 J_i . \quad (56)$$

4. Simulai Numerik

Simulasi dilakukan dengan menggunakan data parameter yang merepresentasikan kondisi harga bahan mentah yang berfluktuasi, permintaan yang meningkat, tingkat suku bunga, tingkat kerusakan, kapasitas gudang, biaya pemesanan, biaya penyimpanan, dan biaya penundaan dengan rentang waktu $0 \leq t \leq 7$.

Berikut ini data parameter yang digunakan untuk simulasi numerik.

$$p(t) = 5 + \sin(t - 0,5\pi) + 0,2t$$

$$d(t) = 1 + 0,1t$$

$$r = 0,05$$

$$\theta(t)=0,01$$

$$w=2$$

$$b=-3$$

$$o(t)=0,1$$

$$h_w(t)=0,2$$

$$h_b(t)=0,4.$$

Sebelum mencari biaya pengadaan bahan mentah melalui kombinasi kebijakan-kebijakan yang ada dengan tingkat kerusakan dan biaya pemesanan, akan dicari biaya pengadaan bahan mentah yang hanya menggunakan pengadaan tepat waktu sebagai kasus pertama. Pada saat menerapkan kebijakan tepat waktu tidak ada persediaan di dalam gudang dengan kata lain $x(t)=0$, $\theta(t)=0$, dan $u(t)=d(t)$. Dengan demikian biaya pengadaan bahan mentah yang hanya menerapkan kebijakan pengadaan tepat waktu adalah

$$\begin{aligned} J_{JIT} &= \int_0^T e^{-rt} (p(t)+o(t))d(t)dt \\ &= \int_0^7 e^{-0,05t} (5 + \sin(t-0,1\pi) + 0,2t + 0,01 + 0,001t)(1 + 0,1t)dt \\ &= 44,895 \end{aligned}$$

Jadi biaya pengadaan bahan mentah yang hanya mengaplikasikan satu kebijakan yaitu kebijakan tepat waktu dengan biaya pemesanan adalah sebesar 44,895. Selanjutnya akan ditentukan biaya pengadaan untuk kasus kedua.

Dalam penelitian sebelumnya, Idayani et al. (2019) telah menyimpulkan bahwa kasus dengan $x(T)=0$, yaitu kasus dengan kondisi tanpa sisa persediaan di gudang pada saat T adalah yang paling optimal. Oleh karena itu, dalam artikel ini kasus kedua yang dibahas adalah saat kondisi $x(T)=0$ dengan $x(t_0) \geq 0$. Titik-titik ekstrim yang diperoleh pada kasus kedua ini adalah $t_1^{lot}=0$, $t_2^{lot}=6,03$, $t_1^{JD}=0,25$, $t_2^{JD}=6,66$, $t^{DB}=3,32$, dan $t^{BJ}=5,47$. Dengan titik-titik ekstrim tersebut terdapat lima fase kebijakan yang dilakukan dari $t_0=0$ sampai $T=7$, yaitu kebijakan pengadaan tepat waktu

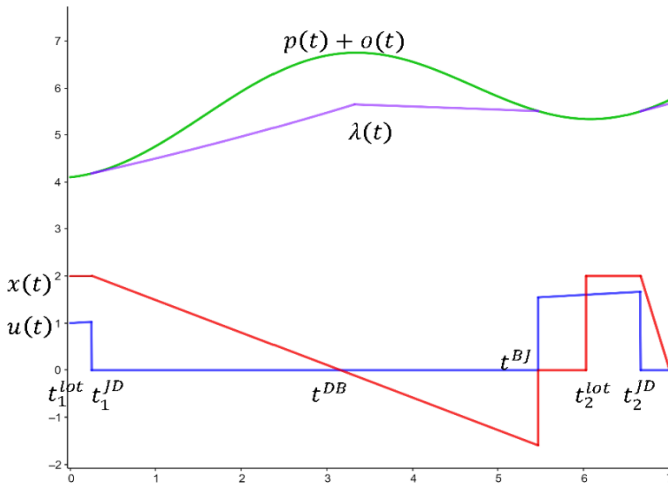
$(0 < t < 0,25)$, kebijakan pergudangan $(0,25 < t < 3,32)$, kebijakan penundaan $(3,32 < t < 5,47)$, kebijakan tepat waktu kedua $(5,47 < t < 6,66)$, pergudangan kedua $(6,66 < t < 7)$.

Biaya pengadaan bahan mentah pada persamaan (56) menyesuaikan dengan kebijakan pengadaan yang dilakukan pada persamaan (50) – (55). Dengan demikian biaya yang dikeluarkan adalah

$$\begin{aligned} J &= J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 \\ &= 5,768 - 0,813 + 2,725 + 5,103 + 17,691 \\ &= 30,474. \end{aligned}$$

Jadi diperoleh biaya pengadaan bahan mentah sebesar 30,474. Hasil tersebut lebih kecil daripada biaya pada kasus pertama yaitu 44,895. Dengan demikian biaya pada kasus kedua dapat disebut sebagai hasil yang optimal. Kesimpulan ini sama seperti penelitian sebelumnya yang belum memperhatikan tingkat kerusakan dan belum menambahkan biaya pemesanan (Arnold et al., 2009; Idayani et al., 2019). Adapun biaya pengadaan bahan mentah yang menggunakan kombinasi kebijakan pengadaan lebih optimal dari pada biaya pengadaan yang hanya menggunakan kebijakan tepat waktu.

Grafik penyelesaian yang optimal dapat dilihat pada Gambar 3 dengan kombinasi kebijakan pengadaan tepat waktu, pergudangan, dan penundaan. Grafik biru adalah kontrol $u(t)$ dari jumlah pengadaan bahan mentah dan grafik merah adalah $u(t)$ yaitu jumlah persediaan di gudang.



Gambar 3. Solusi Optimal

Terlihat bahwa pada fase pertama antara t^{lot} dan t_1^{JD} dilakukan kebijakan tepat waktu. Jumlah pengadaan sama dengan jumlah permintaan dan jumlah kerusakan barang sedangkan jumlah persediaan di gudang dalam kondisi penuh ($x(t)=w$) sesuai batas maksimum kapasitas gudang yaitu $w=2$. Pada fase ini dikeluarkan biaya penyimpanan $h_w(t)$.

Fase kedua adalah pergudangan dari t_1^{JD} sampai t^{DB} yaitu menggunakan bahan mentah yang tersedia di gudang. Pada fase ini tidak terjadi pengadaan bahan mentah atau pembelian ($u(t)=0$) sehingga persediaan di gudang berkurang yang diinterpretasikan dengan grafik yang menurun. Hal ini terjadi karena harga bahan mentah mulai naik.

Fase ketiga adalah penundaan dari t^{DB} sampai t^{BJ} . Sama seperti pada fase sebelumnya (pergudangan), pada fase ini masih belum ada pengadaan bahan mentah ($u(t)=0$). Pemenuhan permintaan ditunda hingga harga mulai turun sehingga harus mengeluarkan biaya penalti $h_b(t)$. Sebenarnya ada batas penundaan yang telah ditentukan ($b=-3$) tetapi harga mulai

turun sehingga sebelum batas penundaan sudah dilakukan kebijakan tepat waktu kembali.

Fase keempat dan kelima yaitu pengadaan tepat waktu dan pergudangan sama seperti fase pertama dan kedua sehingga pada saat $T=7$ tidak ada persediaan di gudang ($x(T)=0$). Misalkan berlanjut hingga $t > 7$ maka akan berulang kebijakan bahan mentah yang dilakukan bergantung pada naik turunnya harga bahan mentah.

Pada Gambar 3 juga terdapat grafik harga bahan mentah ditambah biaya pemesanan ($p(t)+o(t)$) yang berwarna hijau dan grafik $\lambda(t)$ yang berwarna ungu. Terlihat bahwa titik-titik kritis merupakan titik-titik saat terjadinya perubahan penerapan kebijakan yang disebut sebagai titik *switching* pada masalah kontrol optimal.

KESIMPULAN

Pengadaan bahan mentah dapat dimodelkan dan diselesaikan dengan mengaplikasikan teori kontrol optimal dengan memperhatikan tingkat kerusakan dan menambahkan biaya pemesanan. Biaya pengadaan bahan mentah yang mengkombinasikan tiga kebijakan, yaitu pengadaan tepat waktu, pergudangan, dan penundaan lebih optimal dari pada yang hanya menerapkan kebijakan pengadaan tepat waktu.

Model pengadaan bahan mentah masih dapat dikembangkan lagi dengan menambahkan berbagai sumber pemasok (*multi supplier*), waktu tunggu (*lead time*), atau dengan jenis barang yang bermacam-macam (*multi-item*). Selain itu, juga dapat dikhususkan untuk bahan mentah tertentu dengan data real seperti tepung, beras, logam, kayu, dan lain-lain.

Dalam menghadapi era *Society 5.0*, penerapan model matematika dengan menggunakan teknologi informasi merupakan salah satu upaya untuk memperoleh penyelesaian masalah terutama dalam bidang ekonomi. Hasil analisis terhadap model matematika pada pengadaan bahan mentah akan menjadi informasi yang bermanfaat bagi para *stakeholder* untuk dapat mengambil keputusan dengan lebih baik. Selain itu, penerapan teori kontrol optimal diharapkan dapat memberikan manfaat bagi kemajuan masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- Affandi, P. (2018). Optimal control inventory stochastic with production deteriorating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 300(1), 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/300/1/012019.
- Ahmadi, T., Atan, Z., Kok, T., & Adan, I. (2019). Optimal control policies for an inventory system with commitment lead time. *Naval Research Logistics (NRL)*, 66(3),193–212. doi: 10.1002/NAV.21835.
- Arnold, J., Minner, S., & Eidam, B. (2009). Raw material procurement with fluctuating prices. *International Journal of Production Economics*, 121(2),353–64. doi: 10.1016/J.IJPE.2007.02.038.
- Bryson, A. E., & Ho, Y.C. (1975). Applied optimal control: optimization, estimation, and control. Taylor & Francis Group.
- Dhaiban, A. K. (2017). A comparative study of stochastic quadratic programming and optimal control model in production-inventory system with stochastic demand. *Pesquisa Operacional*, 37(1),193–208. doi: 10.1590/0101-7438.2017.037.01.0193.
- Dizbin, N. M. & Tan, B. (2020). Optimal control of production-inventory systems with correlated demand inter-arrival and processing times. *International Journal of Production Economics*, 228,107692. doi: 10.1016/J.IJPE.2020.107692.
- Fabozzi, F. J. & Drake, P.P. (2009). Finance: capital markets, financial management, and investment management. John Wiley Son, Inc.
- Gayon, J. P., Vercraene, S., & Flapper, S. D. P. (2017). Optimal control of a production-inventory system with product returns and two disposal options. *European Journal of Operational Research*, 262(2), 499–508. doi: 10.1016/J.EJOR.2017.03.018.
- Idayani, D., Sari, L. D. K., & Munawwir, Z. (2019). Optimal control of procurement policy optimization with limited storage capacity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. doi: 10.1088/1755-1315/243/1/012044.

- Idayani, D. & Subchan, S. (2020). Optimal control of multi-supplier inventory management with lead time. *International Journal of Computing Science and Applied Mathematics*, 6(1), 23–32. doi: 10.12962/j24775401.v6i1.5040.
- Jackson, I., Tolujev, J., Tolujevs, J., & Kegenbekov, Z. (2020). Review of inventory control models: a classification based on methods of obtaining optimal control parameters. *Transport and Telecommunication*, 21(3),191–202. doi: 10.2478/ttj-2020-0015.
- Kanekiyo, H. T. & Agata, S. (2019). Optimal control in an inventory management problem considering replenishment lead time based upon a non-diffusive stochastic differential equation. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 13(1),1–13. doi: 10.1299/JAMDSM.2019JAMDSM0008.
- Naidu, D. S. (2002). *Optimal Control Systems*. CRC Presses LLC.
- Sethi, S. P. (2019). *Optimal control theory: application to management science and economics, 3rd edition*. Springer Science+Business Media, Inc.
- Sharma, S. (2006). *Applied nonlinear programming*. New Age International Publishers.
- Subchan, S. & Żbikowski, R. (2009). *Computational optimal control: tools and practice*. J. Wiley & Sons Ltd.
- Taleizadeh, A. A., Zarei, H. R., & Sarker, B. R. (2017). An optimal control of inventory under probabilistic replenishment intervals and known price increase. *European Journal of Operational Research*, 257(3),777–91. doi: 10.1016/J.EJOR.2016.07.041.
- Wagner, M. R. (2017). Robust inventory management: an optimal control approach. *Operations Research*, 66(2), 429–47. doi: 10.1287/OPRE.2017.1669.

ANALISIS KEKERABATAN VIRUS DEMAM BERDARAH MENGUNAKAN TRIBE MARKOV CLUSTERING DAN SPARSE MATRIX

ANALYSIS OF DANGUE VIRUS FAMILY USING TRIBE MARKOV CLUSTERING AND SPARSE MATRIX

Selly Anastassia Amellia Kharis

**Program Studi Matematika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi,
Universitas Terbuka
selly@ecampus.ut.ac.id**

ABSTRAK

Demam berdarah merupakan penyakit yang ditularkan oleh nyamuk yang telah menyebar dengan cepat di semua wilayah dalam 20 tahun terakhir, terutama di negara-negara tropis. Penyakit demam berdarah berkisar dari penyakit demam ringan hingga demam berdarah berat. Demam berdarah disebabkan oleh virus dari famili Flaviviridae dan genus Flavivirus. Ada 4 serotipe virus yang berbeda yang menyebabkan demam berdarah: DEN-1, DEN-2, DEN-3, dan DEN-4. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa beberapa gen terkait dapat meningkatkan risiko penyakit ini. Gen kandidat yang diperoleh dari beberapa penelitian ternyata terkait dalam jaringan besar Protein-Protein Interaction (PPI). Pemanfaatan teknologi dan analisis terhadap data yang sangat besar dan sering berubah-ubah (big data) seperti data tentang virus dengue merupakan bagian dari pemecahan masalah di era Society 5.0. Prediksi hubungan antara serotipe dengue akan membantu para ahli bioteknologi dan bioinformatika dalam menemukan antibiotik untuk dengue. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan jaringan cluster PPI virus dengue menggunakan Tribe Markov Clustering (T-MCL), yaitu algoritma yang memungkinkan pengelompokan yang efisien dan cepat dari setiap rangkaian sekuens protein yang berubah-ubah. Proses T-MCL dibangun menggunakan bahasa pemrograman R dan diterapkan pada jaringan interaksi protein-protein dari 26 data gen virus dengue yang diperoleh dari Virus Pathogen Database and Analysis Resource (ViPR) tahun 2010-2014. Sparse matrix diterapkan untuk menghemat penggunaan

memori dan mempercepat proses komputasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode T-MCL menghasilkan 7 kelompok dari 26 sekuens protein virus dengue dengan kelompok yang memiliki satu atau lebih pusat kelompok menggunakan matriks sparse.

Kata Kunci: demam berdarah, interaksi protein-protein, sparse matrix, tribe markov clustering.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi khususnya pada pengelolaan data besar (*big data*), *machine learning*, dan *artificial intelligence* telah mendorong perubahan perilaku manusia dan pemecahan masalah yang dihadapinya. Perkembangan ini diarahkan untuk mendukung sepenuhnya kebutuhan manusia (*humanized technology*) secara berkelanjutan yang melahirkan *Society 5.0* yang dicetuskan oleh Pemerintah Jepang. Seiring berkembangnya teknologi di beberapa cabang ilmu biologi pada *Society 5.0*, berbagai macam proyek seperti proyek *sequencing*, studi *microarray*, proyek pemetaan *interactome*, studi mengenai fungsi gen, struktur genomik, serta proyek lainnya menghasilkan *database* berskala besar (*big data*) yang terus bertambah dengan kecepatan yang cukup signifikan. Dalam bioinformatika, *database* yang dihasilkan tersebut diproses sehingga diperoleh gambaran dari berbagai proses biologis dan kerja dari berbagai sub-sistem yang terdapat pada tingkat molekular, sel, jaringan, bahkan dalam suatu organisme utuh. Kunci dari proses ini adalah bahwa fungsi seluler tidak bergantung pada DNA, RNA, protein, atau molekul-molekul tunggal, namun pada interaksi yang melibatkan berbagai tipe molekul seperti protein-protein (PPI, *protein-protein interaction*), protein DNA/RNA, protein metabolit, maupun interaksi genetis lainnya yang membentuk *network* yang rumit (Satuluri, Parthasarathy, & Ucar, 2010). Untuk itu, diperlukan adanya suatu metode untuk menyederhanakan bentuk dari jaringan interaksi tersebut sehingga memudahkan interpretasi terhadap interaksi-interaksi yang terjadi di dalamnya.

Metode-metode yang digunakan untuk menggali dan mengolah informasi dari data berskala besar antara lain aturan asosiasi (*association rule*), yaitu menemukan aturan-aturan dan keterkaitan satu dengan yang lain, dan pengelompokkan (*clustering*), yaitu mengelompokkan data

menjadi beberapa kelompok (*cluster*) berdasarkan kemiripan dan klasifikasi. Salah satu proses pengelompokan adalah pengelompokan graf yang merupakan pengelompokan simpul-simpul pada sebuah graf berdasarkan pada ada atau tidaknya hubungan antara simpul dan seberapa kuat hubungan yang terjadi antara satu simpul dengan simpul yang lainnya. Salah satu metode pengelompokan graf adalah *markov clustering*.

Markov Clustering Algoritm (MCL) merupakan metode yang dilakukan dengan beberapa iterasi (*bootstrapping*) dan memiliki faktor pengelembungan (*inflation*) yang mempengaruhi kepadatan (*granularity*) dari kelompok yang dihasilkan, dimana kelompok (*cluster*) tersebut setimbang dan non-hirarki (*flat*) (Dongen, 2000). Algoritma ini dikembangkan oleh Stijn van Dongen pada tahun 2000 dan telah diimplementasikan di berbagai bidang ilmu, salah satunya di bidang bioinformatik seperti pada jaringan interaksi protein, analisis famili protein dan gen dari spesies tunggal maupun antarspesies, analisis ruang sekuens, *orthologus groups*, protein kinase, protein tersekretasi, protein mata, elemen genetik yang bersifat *mobile*, dan penentuan fungsi protein. Selain itu, MCL juga banyak dipakai di bidang *corpus linguistic*, pencarian gambar yang bersifat *content-based*, analisis *peer-to-peer network*, dan analisis jejaring sosial (Dongen, 2008).

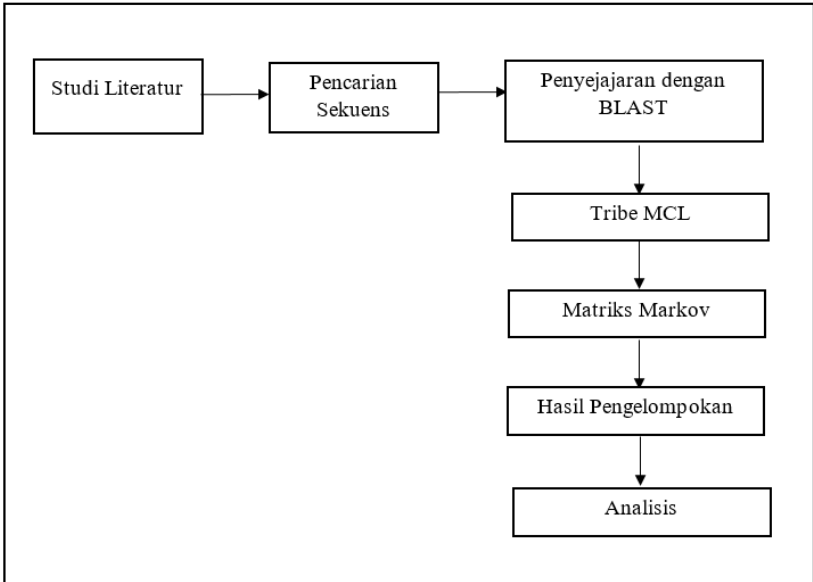
Beberapa faktor yang mendorong banyaknya penggunaan algoritma MCL meliputi kemampuan algoritma ini untuk menghasilkan *clustering non-hierarkis* yang setimbang (*well-balanced*), merupakan metode *bootstrapping*, memiliki parameter natural (*inflation*) yang dapat mempengaruhi glanuralitas dari *cluster* yang dihasilkan, dapat diimplementasikan dalam *sparse* graf/matriks yang berimplikasi pada skalabilitas yang baik, serta adanya hasil matematis yang dapat menjelaskan hubungan erat dari setiap iterasi proses MCL, interpretasi *cluster*, *inflation*, dan jumlah dari *cluster* yang dihasilkan (Dongen, 2008). Metode lain yang merupakan pengembangan dari MCL adalah *Tribe Markov Clustering*.

Dalam melakukan proses *clustering*, salah satu hal yang menjadi tujuan utama adalah meminimalisir jumlah *cluster* yang berukuran besar, sebab kompleks protein cenderung hanya memiliki sekitar 15-30 *node*. Serupa dengan itu, *output* berupa *singleton cluster* juga perlu diminimalisir jumlahnya, sebab *node* tunggal tidak mengandung cukup informasi yang bisa digunakan untuk mengidentifikasi interaksi dalam sebuah *network*. Pada bidang bioinformatika, data yang dikelompokkan biasanya berukuran

sangat besar. Selain itu, umumnya matriks representasi dari data tersebut merupakan *sparse* matriks dimana presentasi dari elemen bukan nol sangat kecil ($\leq 2\%$) (Vazquez, Ortega, Fernandez, & Garzon, 2010). Oleh karena itu, diperlukan komputasi untuk menyelesaikan program MCL dengan efisien.

Virus dengue merupakan salah satu virus yang mengalami mutasi dengan cepat. Selain banyak hidup di daerah tropis, virus dengue juga menyebabkan penyakit demam berdarah dengue. Virus dengue termasuk ke dalam family *Flaviviridae* dan memiliki 4 serotipe utama, yaitu: DEN-1, DEN-2, DEN-3, dan DEN-4. Virus dengue memiliki 10 macam protein penyusun virus, yaitu tiga protein *structural* (*C/protein capsid*, *M/protein membrane*, *E/protein envelope*) dan tujuh protein *non-structural* (NS1, NS2a, NS2b, NS3, NS4a, NS4b, NS5) (WHO, 2009). Mengingat besarnya sekuens virus dengue, maka perlu dilakukan pengelompokan. Berdasarkan hal tersebut, peneliti tertarik untuk mengelompokkan virus dengue menggunakan *Tribe Markov Clustering*. Hasil pengelompokkan tersebut diharapkan dapat digunakan untuk menganalisis struktur, fungsi, hubungan interaksi, dan peran virus dengue pada setiap organisme.

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur untuk mempelajari tentang bioinformatika, virus dengue, *protein interaction network*, penyejajaran sekuens, pengelompokan (*clustering*), matriks ketetanggaan dan metode *Tribe* MCL. Pengelompokan dengan algoritma *Tribe* MCL menggunakan program R berbasis *open source*. Secara umum skema penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Penelitian

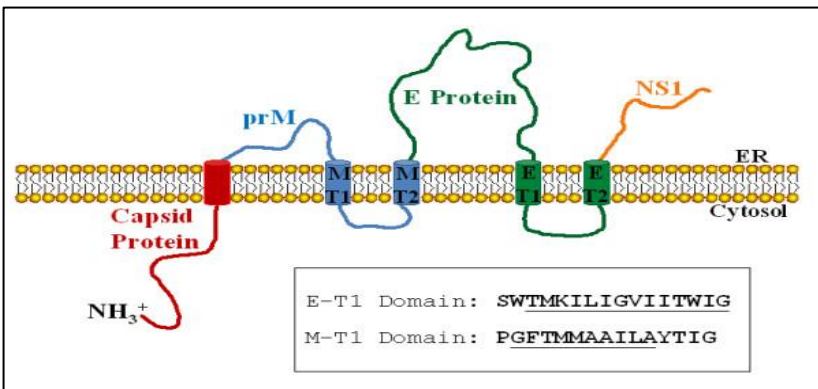
1. Virus Dengue

Virus dengue merupakan virus RNA rantai tunggal (mRNA) dan termasuk dalam famili *Flaviviridae* serta genus *Flavivirus*. Terdapat empat serotipe yang berbeda pada virus dengue yaitu DEN-1, DEN-2, DEN-3, dan DEN-4. Struktur antigen serotipe antara satu dengan yang lainnya sangat mirip namun antibodi terhadap masing-masing serotipe tidak dapat saling memberikan perlindungan silang. Variasi genetik yang berbeda tergantung waktu dan daerah penyebarannya menyangkut antar serotipe maupun dalam serotipe itu sendiri. Hal inilah yang menyebabkan variasi genetik pada sifat biologis dan antigenitasnya.

Serotipe virus dengue yang paling banyak ditemukan di Indonesia adalah DEN-2 dan DEN-3. Serotipe DEN-3 merupakan serotipe virus yang dominan menyebabkan kasus yang berat. Adanya perbedaan serotipe juga menyebabkan penderita demam berdarah yang satu menunjukkan gejala yang berbeda dengan penderita demam berdarah lainnya. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) memperkirakan bahwa 2,5 miliar orang beresiko DBD dengan 50 juta infeksi dengue di seluruh dunia setiap tahun. Sekitar

500.000 orang dengan DBD memerlukan rawat inap setiap tahun, di antaranya 2,5% meninggal (WHO, 2009).

Virus dengue yang genomnya mempunyai berat molekul 11 kD tersusun dari protein struktural dan nonstruktural. Protein struktural merupakan 25% dari total protein sedangkan protein nonstruktural merupakan 75% dari total protein. Protein struktural terdiri dari protein *envelope* (E), protein *pre-membran* (prM) dan protein *core* (C). Protein nonstruktural terdiri dari NS1, NS2a, NS2b, NS3, NS4a, NS4b, NS5. Urutan imunogenitas tertinggi dalam merangsang pembentukan antibodi di antara protein struktural adalah protein E, protein prM dan C. Sedangkan pada protein non-struktural yang paling berperan adalah protein NS1.



Sumber: Smith et al., 2011

Gambar 2. Struktur Virus Dengue

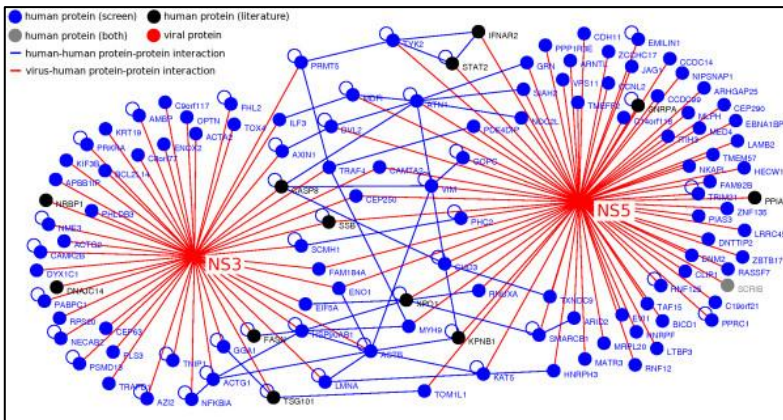
Protein C memiliki berat molekul 27,5 kD dan mempunyai daya imunogenitas paling rendah di antara protein struktural lainnya. Protein prM memiliki berat 35 kD adalah prekursor glikosilasi dari protein M. Protein prM paling banyak dijumpai pada virus yang belum dibebaskan sehingga lebih dikenal dengan protein intraseluler, sedangkan protein ekstraseluler dikenal dengan protein M (*membrane*). Antibodi dan prM dapat membuat imunitas yang protektif oleh netralisasi pelepasan virion yang berisi beberapa prM yang tidak pecah. Protein E memiliki berat molekul 52 kD mempunyai fungsi yang cukup dominan sebagai induksi antibody (WHO,2009).

NS1 merupakan glukoprotein dengan berat molekul 39 kD berfungsi dalam siklus kehidupan virus yang belum jelas diketahui. Pemeriksaan NS1 antigen dapat mempercepat orang yang terkena demam berdarah dapat dideteksi lebih awal, sehingga penderita tidak sampai akut. Protein NS2 dengan berat molekul 24 kDa memiliki dua protein (NS2 A dan NS2 B) yang diperlukan untuk proses pembentukan protein NS1. Fungsi dari protein NS4 A (16 kD) dan NS4 B (26 kD) belum diketahui, tetapi diperlukan untuk menghubungkan membrane dari NS3 dan NS5 selama sintesis (WHO, 2009).

Protein NS3 merupakan protein non struktural terbesar kedua dan berlokasi di dalam sitoplasma yang berhubungan dengan membrane. Protein NS3 memiliki berat molekul 69 kD merupakan enzim polipeptida multifungsional yang diperlukan dalam proses replikasi virus. Protein NS5 adalah protein non struktural yang memiliki berat molekul terbesar. Pada protein nonstruktural, protein NS1 diikuti NS3 adalah pembentuk antibodi tertinggi sedangkan protein NS5 tidak dapat membentuk antibodi.

2. Protein Interaction Network

Molekul-molekul penyusun sel harus melakukan berbagai jenis reaksi kimia yang penting bagi berlangsungnya kehidupan agar fungsi sel dapat berjalan dengan baik. Namun untuk melakukan reaksi-reaksi tersebut, molekul-molekul di dalam sel tidak dapat bekerja sendiri. Molekul-molekul seperti protein, DNA, dan RNA bekerja sama untuk melakukan fungsi seluler sehingga terbentuk suatu jaringan interaksi yang rumit seperti interaksi protein-protein, protein DNA/RNA, protein metabolit, dan interaksi genetis lainnya (Satuluri et al., 2010). Dalam setiap jaringan interaksi protein-protein yang terjadi, terdapat beberapa protein yang menjadi pusat interaksi. Protein yang menjadi pusat *cluster* biasanya merupakan protein yang memegang peranan penting dalam sebuah fungsi seluler.



Sumber: Le Breton et al., 2011

Gambar 3. Flavivirus NS3 dan NS5 *Proteins Interaction Network*

3. Penyejajaran Sekuens

Salah satu metode dasar dalam analisis sekuens adalah penyejajaran sekuens, yaitu proses membandingkan dua atau lebih sekuens-sekuens sehingga kemiripan antara sekuens yang satu dengan sekuens yang lainnya tampak signifikan. (Baxevanis & Oullette, 2001; Isaev, 2004). Proses penyejajaran sekuens memiliki tujuan untuk 1) mempelajari evolusi sekuens-sekuens nenek moyang, 2) memberikan hipotesis atas proses evaluasi yang terjadi pada sekuens, 3) menunjukkan posisi-posisi sekuens yang dipertahankan, dan 4) menyelidiki kemiripan sekuens-sekuens dalam basis data. Contoh penyejajaran dari dua sekuens yang berbeda dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 4.

```

<3> 701~724      AGCCTTGTCATCCGTATC-TTTCAA----
<4> 132~154     AGCCTTGTCATCCGTATC-TTTCA-----
<8> 264~288     -GCCTTGTCATCCGTATC-TTTCAACG--
<7> 70~95       --CCTTGTCATCCGTATC-TTTCAACGTG
<7> 344~366     --CCTTGTCATCCGTATC-TTTCAAC---
<0> 304~326     ---CTTGTCATCCGTATCTTTTCAAC---
<2> 482~497     ---CTTGTCATCCGTATC-T-----
<2> 522~537     ----TTGTCATCCGTATC-TT-----
<5> 440~461     -----GTCATCCGTATC-TTTCAACGTG
<6> 16~37        -----GTCATCCGTATC-TTTCAACGTG
<1> 910~925     -----CATCCGTATC-TTTCAA----
<6> 986~1000    -----CATCCGTATC-TTTCA-----
<1> 1051~1069   -----ATCCGTATC-TTTCAACGTG

<1> 28~68        AACCAAGCA-A-ACTTTTATCCATGGTCGTGGTACAGAGGGGTC
<4> 333~373     AACCAAGCA-A-ACTTTTATCCATGGTCGTGGTACAGAGGGGTC
<8> 154~193     AACCAAGCA-A-ACTTTTATCCATGGTCGTGGTACAGAGGGGT-
<6> 615~647     AACCAAGCAGA-ACTTTTATCCATGGTCGTGGTAC-----
<4> 502~533     AACCAAGCA-ACCCTTTTATCCATGGTCGTGGTA-----
<1> 844~872     AACCAAGCA-A-ACTTTTATCCATGGTCGTGG-----
<8> 194~220     -----A-ACTTTTATCCATGGTCGTGGTACAGA-----
<5> 451~480     -----CTTTCA-ACGTGGTCGTGGTACAAAGGGGTC

```

Sumber: Zhang & Waterman, 2004

Gambar 4. Penyejajaran Sekuens

Pada *GenBank* dari *National Center for Biotechnology Information* (NCBI) dengan situs <http://www.ncbi.nlm.nih.gov> dapat ditelusuri sekuens dari DNA dan protein. Format data dari sekuens DNA dan protein yang diperoleh dari basis data *GenBank* adalah format FASTA. Format FASTA mudah diproses oleh banyak perangkat lunak dan analisis sekuensnya tersedia pada banyak basis data sekuens secara langsung (*online*) (Baxevanis & Oullette, 2001; Bergeron, 2003; Isaev, 2004; Cristianini & Hahn, 2007).

Sebagai contoh format FASTA adalah sekuens protein hemagglutinin (HA) dari virus A/swine/Hubei/02/2008 (H1N1) yang diperoleh dengan penelusuran pada NCBI dengan nomor akses AFN06479, panjang nukleotidanya adalah 566 *aa* (*aa* = *amino acids*), dan sumbernya adalah protein hemagglutinin (HA) dari virus flu babi (*swine*) yang diisolasi di Hubei pada tahun 2008 seperti pada Gambar 5.

```

>gi|393192304|gb|AFN06479.1| hemagglutinin [Influenza A virus
(A/swine/Hubei/02/2008 (H1N1)) ]
MKAILLVLLYTFFTAANADTLCIGYHANNSTDTVDTVLEKNVTVTHSVNLEDRHNGKLCCKLRGVA
PLHLGKCNIAGWLLGNPECELLFTASSWSYIVETSNSDNGTCYPGDFINYEELREQLSSVSSFER
FEIFPKASSWPDHETNRGVTAACPYAGANSFYRNLIWLVKKNSYPKLSKSYVNNKEKEVLLVWG
IHHPTSTDDQQLYQADAYVVFVGS SKYKFKPEIATRPKVRGQAGRMNYYWTLVEPGDITTFE
ATGNLVVPRYAFAMKRGSGSGIISDTPVHDCNTTCQTPKGAINSLPFPQNIHPVTIGECPKYVK
STKLRMATGLRNI PSIQSRGLFGAIAGFIEGGWTGMIDGWYGYHHQNEQSGSYAADQKSTQNAID
GITNKVNSVIEKMNTOFTAVGKEFNHLEKRLLENLKKVDDGFLDWWTYNAELLVLENERLTLDYH
DSNVKNLYEKVRSQKNNAKEIIGNGCFEFYHKDDTCMESVKNGTDYDPKYSEBSKLNREEIDGV
KLESTRIYQILAIYSTVASSLVLLVSLGAI SFWMCNSGSLQCRIC

```

Sumber: Lv et al., 2008

Gambar 5. Format FASTA Sekuens Protein Hemagglutinin (HA) Virus
A/swine/Hubei/02/2008 (H1N1)

Penyejajaran sekuens dapat dilakukan secara global dan lokal dengan beberapa metode/algorithm yang dikemukakan oleh para ilmuwan. Pada tahun 1970, Saul Needleman dan Christian Wunsch mengenalkan algoritma *Needleman-Wunsch* (NW) untuk penyejajaran global. Kemudian pada tahun 1981, Temple Smith dan Michael Waterman mengenalkan algoritma *Smith-Waterman* (SW) untuk penyejajaran lokal. Algoritma NW dan SW merupakan penerapan program dinamik dan efektif untuk penyejajaran pasangan sekuens (Baxevanis & Oullette, 2001; Bergeron, 2003; Isaev, 2004).

Pada tahun 1990 Stephen Altschul, Warren Gish, Web Miller, Gene Myers dan David Lipman di NCBI mengenalkan dan mengembangkan BLAST (*The Basic Local Alignment Search Tool*) dengan menggunakan pendekatan heuristik sebagai aproksimasi algoritma Smith-Waterman. BLAST merupakan alat (*tools*) penting untuk penelitian genom yang memiliki karakter cepat dan akurat untuk menganalisis penyejajaran sekuens dengan meminimalkan ruang pencarian dan mampu mendeteksi daerah-daerah yang mirip dalam pasangan sekuens yang panjang sehingga diperoleh sekuens-sekuens yang mirip dan mencari penskoran yang tinggi dari penyejajaran sekuens antara sekuens *query* dan sekuens subjek pada basis data (Altschul et al., 1990)

BLAST merupakan perangkat lunak (*software*) berupa program yang sering digunakan dalam penyejajaran sekuens dan dapat diakses secara langsung di NCBI dengan situs <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>. Para ahli

komputasi telah menciptakan beberapa jenis program BLAST, yaitu: BLASTn, BLASTp, PSI-BLAST atau BLASTppp, BLASTx, TBLASTn, TBLASTx, dan Mega BLAST (Baxevanis & Oullette, 2001; Bergeron, 2003). Pada penelitian ini, proses penyejajaran sekuens-sekuens protein hemagglutinin (HA) dilakukan menggunakan BLASTp dengan hasilnya berupa ringkasan skor statistic, seperti *Max score*, *Total score*, *Query cover*, *E-value*, dan *Max ident*. Salah satu skor/nilai yang penting pada penyejajaran sekuens adalah nilai *E-value* (Altschul et al., 1990; Critianini & Hahn, 2007). Masing-masing sekuens akan disejajarkan antara sekuens yang satu dengan sekuens yang lain sehingga diperoleh nilai *E-value* sebanyak

$$C_r^n = \frac{n!}{r!(n-r)!} = \frac{n(n-1)}{2} \quad (1)$$

4. Graph Clustering

Graph clustering merupakan pengelompokan verteks-verteks pada sebuah graf berdasarkan pada ada tidaknya hubungan antar-verteks dan seberapa banyak hubungan yang terjadi antara satu verteks dengan verteks yang lain lain. *Markov Clustering Algorithm* (MCL) merupakan algoritma yang dibangun untuk menyelesaikan masalah *graph clustering*. MCL telah diimplementasikan pada berbagai bidang, termasuk bioinformatik, dalam hal ini pada jaringan interaksi protein (*PPI networks*). Beberapa keuntungan MCL adalah kemampuan untuk menghasilkan *cluster* yang setimbang dan *flat (nonhierarchic)*, merupakan metode *bootstrapping*, memiliki parameter natural yang mempengaruhi glanularitas dari *cluster* yang dihasilkan, implementasinya sesuai untuk graf/matriks *sparse*, serta adanya hasil matematis yang dapat menjelaskan hubungan erat dari setiap iterasi proses MCL, interpretasi *cluster*, *inflation*, dan jumlah dari *cluster* yang dihasilkan (Dongen, 2000).

5. Matriks Ketetanggaan (*Adjacency Matrix*)

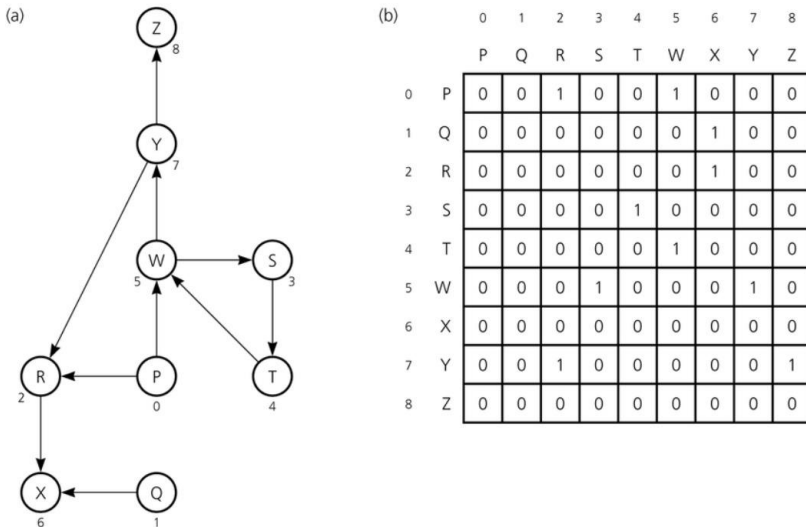
Salah satu cara merepresentasikan graf adalah dengan matriks ketetanggaan. Matriks ketetanggaan $A = (a_{ij})$ dari suatu graf adalah suatu matriks bujur sangkar berukuran $n \times n$ dengan $n = |V|$ yang entrinya merepresentasikan ada tidaknya busur yang menghubungkan dua simpul dengan

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{jika ada busur antara } x_i \text{ dan } x_j \\ 0, & \text{lainya} \end{cases}$$

dengan $i, j = 1, 2, \dots, n$ (2)

Baris dan kolom pada matriks merepresentasikan simpul pada graf. Jika graf merupakan graf sederhana, berarti graf tidak memiliki gelang dan busur ganda. Setiap $a_{ij} = 1$ merepresentasikan terdapat busur antara v_i dan v_j atau dengan kata lain kedua simpul bertetangga dan unsur-unsur matriks sama dengan 0 bila v_i dan v_j tidak bertetangga.

Berikut ini contoh matriks ketetangaan pada suatu graf.



Sumber: Carrano & Prichard, 2021

Gambar 6. Graf dan Matriks Ketetangaan

Gambar 6 menunjukkan suatu graf yang direpresentasikan dalam bentuk matriks (matriks ketetangaan). Pada gambar tersebut nilai 0 menandakan ketiadaan hubungan/interaksi dua protein yang bersesuaian dengan baris dan kolom sedangkan nilai 1 menandakan adanya hubungan/interaksi antarprotein.

6. Markov Clustering (MCL)

Berdasarkan Dongen (2000), terdapat tiga proses utama yang menjadi jantung dari algoritma MCL, yaitu ekspansi (*expand*), inflasi (*inflation*), dan pemotongan (*prune*). Berikut merupakan penjelasan dari setiap proses pada MCL.

a. Expand

Expand mensimulasikan *random walk (flow)* pada graf G . *Input* berupa matriks Markov M yang sesuai dengan graf G dan *output* berupa matriks M_{exp} dimana $M_{exp} = Expand(M) = M^p, p \in \mathbb{Z}^+$ adalah parameter ekspansi. M merupakan matriks *adjacency* dari graf G , sehingga bentuk M^p menyatakan probabilitas transisi dari sebuah *node* pada G ke *node* lainnya yang berjarak p dari *node* tersebut.

b. Inflate

Inflate memperkuat *flow* yang kuat, memperlemah *flow* yang lemah. Jika diberikan matriks $M \in \mathbb{R}^{m \times n}, M \geq 0, r \in \mathbb{R}, r > 0$, maka operator inflasi $\Gamma_r : \mathbb{R}^{m \times n}$ didefinisikan sebagai:

$$(\Gamma_r M)_{ij} = \frac{(M_{ij})^r}{\sum_{k=1}^m (M_{kj})^r}, i = 1 \dots m, j = 1 \dots n \quad (3)$$

Nilai r antara 0 dan 1 akan meningkatkan kehomogenan (keseragaman) dari matriks M , sedangkan nilai r antara 1 dan ∞ akan meningkatkan ketakseragaman dari M , dimana entri dengan nilai yang kecil akan semakin diperkecil dan entri dengan nilai yang besar akan semakin diperbesar. Nilai r yang negatif tidak digunakan sebab akan mengubah urutan dari entri-entri pada M , dimana entri bernilai kecil akan menjadi besar, dan sebaliknya. Hal ini akan berakibat pada rusaknya topologi graf, dimana daerah-daerah yang seharusnya padat dan memiliki satu atau lebih pusat *cluster* akan diubah menjadi daerah dengan densitas yang rendah.

c. Prune

Prune adalah penghapusan entri dari M dengan nilai yang dianggap cukup kecil pada setiap kolom, yaitu entri yang nilainya kurang dari *minval*, dimana *default minval* adalah 10^{-5} . Dengan melakukan proses *prune*, hubungan antar-*node* dengan busur yang memiliki probabilitas yang rendah

akan dipotong sehingga hanya tersisa beberapa *node* dengan tingkat ketertarikan (probabilitas) yang kuat.

Jika dilakukan operasi ekspansi dan inflasi secara bergantian, maka *edge* (busur, menyatakan probabilitas) yang menghubungkan dua buah *node* yang terletak pada *dense region* yang berbeda akan memiliki nilai probabilitas yang semakin kecil (Dongen, 2000). Hal ini sesuai dengan tujuan klusterisasi jaringan dimana daerah-daerah yang padat pada graf G akan terlepas satu sama lainnya, sehingga bisa meminimalisir terbentuknya pusat *cluster* yang menghubungkan dua daerah yang memiliki tingkat ketertarikan yang rendah. Proses tambahan yaitu *prune* digunakan untuk mempercepat konvergensi dari MCL, dimana entri dengan nilai yang sangat kecil (relatif terhadap *minval* yang dipilih) akan dijadikan nol, sehingga klusterisasi yang dilakukan menjadi lebih fokus kepada entri dengan nilai yang lebih besar.

Menurut Bustaman et al. (2012), tiap iterasi yang memuat proses ekspansi dan inflasi akan menghasilkan matriks idempoten, dimana iterasi akan berhenti saat dicapai kondisi idempoten dimana *global chaos* yang diperoleh kurang dari *threshold* minimum e , default $e = 10^{-3}$.

$$(chaos)_k = \max((\Gamma_r M)_{ik}, i=1..m - \sum_{i=1}^m ((\Gamma_r M)_{ij})^2) \quad (3)$$

Global chaos menyatakan tingkat perubahan nilai dari M yang dihasilkan pada sebuah iterasi MCL dibandingkan dengan iterasi sebelumnya, sehingga iterasi MCL akan dihentikan jika tidak terdapat perubahan yang signifikan. Algoritma MCL dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Algoritma MCL

Input: matriks <i>adjacency</i> A dari graf G
Step 1: tambahkan <i>self-loop</i> pada graf, $A = A + I$
Step 2: bentuk matriks Markov M dengan menormalisasi kolom dari matriks A
Step 3: ulangi step 4 sampai step 6
Step 4: $M = \text{Ekspansi}(M) := M^p$ dengan parameter ekspansi $p \in \mathbb{Z}$, default $p = 2$
Step 5: $M = \text{Inflasi}(M, r)$
Step 6: $M = \text{Prune}(M)$, $M_{ij} = 0$ if $M_{ij} < \text{minval}$ hingga <i>global chaos</i> matriks $M < \text{threshold } e$
Output: Matriks <i>clustering</i> M

7. Tribe Markov Clustering (Tribe MCL)

Algoritma *Tribe MCL* terdiri dari dua kegiatan utama, yaitu ekspansi (perluasan) dan inflasi (penggelembungan) yang bergantian diulang sampai konvergensi tercapai, yaitu matriks similar menjadi *invariant* selama siklus. Sama halnya dengan *Markov Clustering* konvensional, pada *Tribe MCL* juga terdapat penambahan gelung (*self-adding*). Berikut adalah langkah-langkah pada algoritma *Tribe MCL*

Tabel 2. Algoritma *Tribe MCL*

Input	: matriks yang terkait S_0 dari graf G (matriks simetri ini diperoleh dari nilai kesamaan antar sekuens protein (<i>E-value</i>) pada program BLASTp yang dapat direpresentasikan ke dalam bentuk graf terhubung yang menunjukkan adanya interaksi antar protein yang satu dengan yang lainnya)
Langkah 1	: tambahkan <i>self-loop</i> (gelung) $S = S_0 + I$
Langkah 2	: normalisasi matriks
Langkah 3	: lakukan ekspansi (perluasan)
Langkah 4	: lakukan inflasi (penggelembungan) dengan $r > 1$

Langkah 5	: <i>pruning</i> (pemangkasan), menghapus entri dari S yang nilainya dianggap terlalu kecil, $s_{ij}=0$ jika $s_{ij} \leq \text{minval}$ hingga konvergen menghasilkan matriks <i>idempotent</i> yang dicapai ketika <i>global chaos</i> matriks $S < \text{threshold } e$
Ulangi langkah 1 sampai 5	
Output	: matriks hasil pengelompokan

8. Format Penyimpanan Data *Sparse*

Sparse matrix merupakan matriks dengan persentase elemen tak nol yang rendah. Entri matriks *sparse* didominasi oleh elemen nol. Matriks jenis ini sering muncul dalam berbagai masalah nyata seperti pada bidang *image processing*, pemodelan ekonomi, teknik elektro, dinamika fluida, pemodelan elemen hingga, desain sirkuit elektronik, fisika plasma dan masalah lainnya di bidang komputasi saintifik. Jika matriks *sparse* disimpan dalam memori komputer layaknya menyimpan matriks padat, akan terjadi redundansi memori yang disebabkan oleh banyaknya entri nol yang disimpan. Untuk itu, diperlukan tipe penyimpanan khusus untuk matriks *sparse* sehingga penggunaan memori dapat optimal. Terdapat beberapa format penyimpanan data berupa matriks *sparse*, diantaranya format diagonal, COO, CSR, CSC, JAD, *Hybrid*, ELLPACK, dan ELLPACK-R.

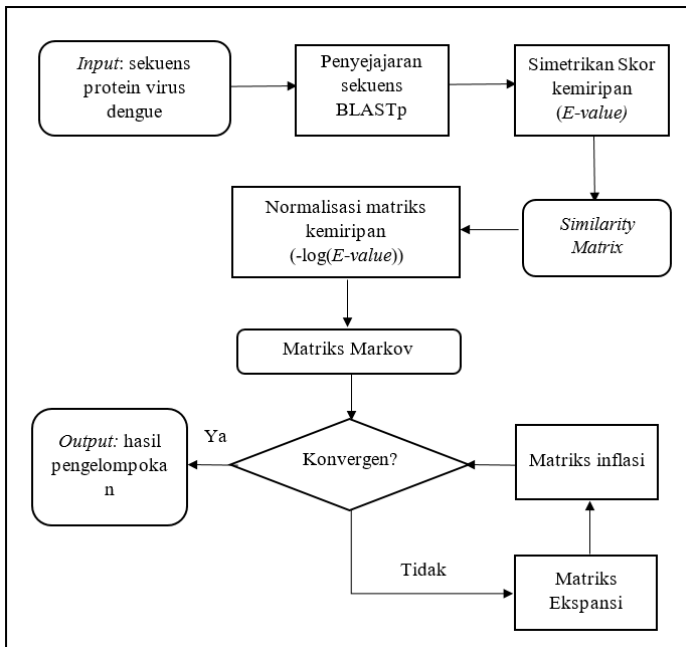
Format diagonal dibentuk dengan menggunakan dua buah *array*, yaitu *data* dan *offsets*. *Array data* berisi nilai-nilai bukan nol, sedangkan *array offset* berisi *offset* tiap diagonal yang dihitung dari diagonal utama dimana *offset* 0 diberikan untuk diagonal utama, *offset* > 0 untuk diagonal di atas diagonal utama, dan *offset* < 0 untuk diagonal di bawahnya. Keuntungan dari format data ini adalah indeks dari entri bukan nol dinyatakan secara implisit oleh posisinya pada kedua buah *array* serta semua akses memori ke *array* data berdekatan sehingga dapat meningkatkan efisiensi transaksi memori. Namun, format ini tidak efisien untuk menyelesaikan *matrix-vector multiplication* dengan pola *sparse* yang tersebar serta untuk matriks *sparse* dengan data yang terpusat di diagonal yang bersilangan dengan diagonal utama.

Coordinate Storage Format (COO) menggunakan tiga buah *array* untuk menyimpan data *sparse*. *Array* $A[](\text{float})$ berisi entri tak nol dan *array* $C[](\text{integer})$ dan $R[](\text{integer})$ masing-masing berisi indeks kolom dan baris yang bersesuaian dengan data pada *array* A . Format penyimpanan *Compressed Sparse Row* (CSR) merupakan salah satu format penyimpanan data *sparse* yang paling sering digunakan. Terdapat tiga buah *array* yang

digunakan pada format CSR, yaitu A[], C[], dan R_pt[]. Data yang disimpan di dalam *array* A dan C sama adalah entri tak nol dan indeks kolom, sedangkan R_pt menyimpan *pointer* yang menunjukkan posisi elemen pertama pada setiap baris. Format penyimpanan *Compressed Sparse Column* (CSC) memiliki struktur yang serupa dengan CSR namun *array* C dan R_pt diganti dengan R dan C_pt. Pada penyimpanan *Jagged Diagonal* (JAD) terdapat dua tahap yang dilakukan. Tahap pertama sama dengan CSR, sedangkan pada tahap kedua dilakukan permutasi baris dimana baris-baris dengan elemen yang lebih banyak ditempatkan di bagian atas dari matriks.

PEMBAHASAN

Proses pengelompokkan sekuens protein virus dengue dapat digambarkan melalui *flowchart* tahapan algoritma *Tribe* MCL seperti terlihat pada Gambar 7 berikut.



Sumber: Dongen, 2000

Gambar 7. Flow Chart Algoritma *Tribe* MCL

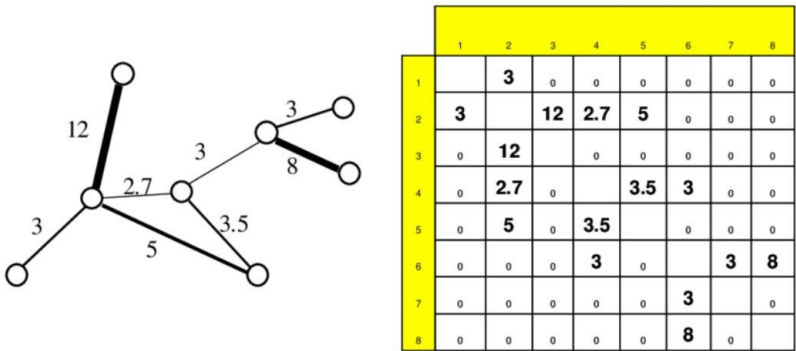
1. Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah nilai *E-value* sekuens protein virus-virus dengue yang merupakan tingkat kemiripan sekuens protein virus dengue. Nilai *E-value* diperoleh menggunakan program penjejajaran sekuens BLAST di *National Center for Biotechnology Information* (NCBI). NCBI menyediakan fasilitas BLASTn yaitu penjejajaran sekuens DNA dan BLASTp untuk sekuens protein. Penjejajaran dilakukan untuk mencari kemiripan sekuens protein virus dengue. Hasil penjejajaran diperoleh berbagai sekuens protein virus dengue lain dengan tingkat kemiripan berbeda.

Hasil penjejajaran dengan BLAST merupakan rangkuman informasi nilai kemiripan dari sekuens protein virus dengue yang meliputi: *Max score*, *Total score*, *Query coverage*, *E-value*, dan *Identity*. *Max score* adalah jumlah keselarasan semua segmen dari urutan *database* yang cocok dengan urutan asam amino. *Total score* menunjukkan keakuratan nilai penjejajaran sekuens berupa asam amino yang tidak diketahui dengan sekuens asam amino yang terdapat di dalam *genbank*. Semakin tinggi nilai skor yang diperoleh maka semakin tinggi tingkat homologi kedua sekuens. *Query coverage* adalah presentasi dari panjang asam amino yang selaras dengan *database* yang terdapat pada BLAST. *Identity* adalah nilai tertinggi dari presentasi identitas atau kecocokan antara sekuen *query* dengan sekuen *database* yang tersejajarkan.

Nilai *E-value* merupakan nilai dugaan yang memberikan ukuran statistik yang signifikan terhadap kedua sekuen. Nilai *E-value* yang semakin tinggi menunjukkan tingkat homologi antarsekuens semakin rendah, sedangkan nilai *E-value* yang semakin rendah menunjukkan tingkat homologi yang antar sekuens semakin tinggi. Nilai *E-value* bernilai 0.0 menunjukkan bahwa kedua sekuens tersebut identik. NCBI menggunakan *expect threshold* $1e-6$, sehingga sekuens dengan nilai *E-value* lebih dari $1e-6$ dianggap tidak memiliki kemiripan.

Setelah dilakukan penjejajaran, hasilnya menunjukkan bahwa nilai *E-value* terlalu kecil, dengan sekuens protein virus dengue gi: VIPR_ALG4_573592433_437_934 adalah $7e-107$. Untuk memudahkan dalam proses perhitungan maka nilai *E-value* dikonversi menjadi $-\log(E\text{-value})$. Sekuens protein akan memiliki nilai *E-value* 0.0 jika disejajarkan dengan dirinya, sehingga dalam perhitungan diberikan nilai 100. Dasar pembentukan matriks *adjacency* dengan menggunakan nilai *E-value* diperlihatkan pada Gambar 8.

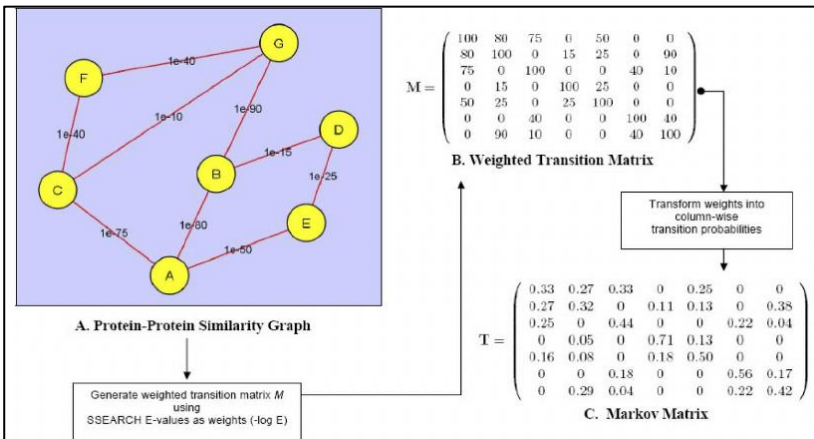


Sumber: Krueger, 2007

Gambar 8. Pembentukan Matriks Adjacency

2. Pengelompokan Menggunakan Tribe-MCL

Pengelompokan virus dengue diawali dengan pembentukan matriks Markov yang diilustrasikan pada Gambar 9.



Sumber: Bustamam, Burrage, & Hamilton, 2012

Gambar 9. Pembentukan Matriks Markov

Pada gambar di atas (A) menjelaskan suatu graf berbobot dengan 7 simpul berupa protein yang setiap busurnya berbobot nilai E -value, (B) menjelaskan M sebagai matriks yang menyatakan graf G dengan nilai E -value yang telah diubah ke dalam $-\log E$ -value yang dikenal sebagai matriks transisi, dan (C) merupakan matriks Markov T dari matriks M yang setiap entrinya diubah menjadi peluang transisi pada setiap kolomnya.

Pada penelitian ini pengelompokan dengan algoritma *Tribe-Markov Clustering* diambil dari sekuens protein yang bersenyawa dengan karbohidrat atau sering disebut glikoprotein. Interaksi protein-protein dari virus tersebut berupa graf G , dengan simpul yang menyatakan protein dan busur menyatakan kemiripan sejumlah sekuens dengan nilai E -value yang telah dikonversikan dalam bentuk $(-\log(E\text{-value}))$ untuk memudahkan perhitungan. Misalkan diberikan graf awal tujuh virus dengue dengan entri-entri nilai E -value yang kemudian dikonversikan dalam bentuk $-\log E$ -value sebagai berikut:

Matriks Nilai E -value:							
$\begin{pmatrix}$	0	0	$1E - 99$	0	0	0	0
	0	0	0	$2E - 138$	0	0	0
	$1E - 97$	0	0	$2E - 105$	0	$2E - 105$	0
	$1E - 100$	$2E - 89$	0	0	0	0	0
	0	$2E - 105$	$1E - 96$	0	0	0	0
	$2E - 81$	0	$7E - 83$	0	$2E - 115$	0	$2E - 142$
	$4E - 85$	$3E - 88$	0	0	$1E - 111$	$2E - 142$	0
$\left. \right)$							
Matriks Nilai E -value yang dikonversikan ke dalam bentuk $(-\log E$ -value):							
$\begin{pmatrix}$	0	0	99	0	0	0	0
	0	0	0	137,7	0	0	0
	97	0	0	104,7	0	104,7	0
	100	88,7	0	0	0	0	0
	0	104,6	96	0	0	0	0
	80,7	0	82,2	0	114,7	0	114,7
	84,4	87,5	0	0	111	141,7	0
$\left. \right)$							

Gambar 10. Konversi Nilai E -value

Misalkan S_0 menyatakan matriks yang menyatakan graf G , karena setiap simpul berelasi dengan dirinya sendiri maka pada setiap simpul dari graf ditambahkan gelang guna memperbesar peluang aliran informasi ke

masing-masing simpul dan dinyatakan dalam matriks $S_1 = S_0 + I$ dengan I matriks identitas. Gambar 11 menunjukkan penambahan gelang (*self-loop*) pada matriks S_0 .

$$\begin{pmatrix} 100 & 0 & 99 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 137,7 & 0 & 0 & 0 \\ 97 & 0 & 100 & 104,7 & 0 & 104,7 & 0 \\ 100 & 88,7 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 104,6 & 96 & 0 & 100 & 0 & 0 \\ 80,7 & 0 & 82,2 & 0 & 114,7 & 100 & 114,7 \\ 84,4 & 87,5 & 0 & 0 & 111 & 141,7 & 100 \end{pmatrix}$$

Gambar 11. Penambahan Gelang Matriks S_0

Setelah diperoleh matriks S_1 kemudian diubah menjadi matriks Markov S melalui proses normalisasi. Proses normalisasi juga dilakukan setelah proses pengelembungan. Pada penelitian ini dilakukan normalisasi kolom, pada entri pertama kolom pertama matriks S_1 yaitu 100 dibagi dengan jumlah semua entri pertama kolom pertama diperoleh 462,1, hasilnya adalah 0,216. Lakukan hal yang sama pada entri-entri selanjutnya dalam setiap kolom, sehingga diperoleh matriks hasil normalisasi yang diilustrasikan pada Gambar 12.

$$\begin{pmatrix} 0,216 & 0 & 0,262 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,262 & 0 & 0,402 & 0 & 0 & 0 \\ 0,210 & 0 & 0,265 & 0,306 & 0 & 0,302 & 0 \\ 0,216 & 0,233 & 0 & 0,292 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,275 & 0,255 & 0 & 0,307 & 0 & 0 \\ 0,175 & 0 & 0,218 & 0 & 0,352 & 0,289 & 0,534 \\ 0,183 & 0,230 & 0 & 0 & 0,341 & 0,409 & 0,466 \end{pmatrix}$$

Gambar 12. Matriks Hasil Normalisasi

Selanjutnya dilakukan proses ekspansi (perluasan) sehingga diperoleh matriks S seperti pada Gambar 13.

$$\begin{pmatrix} 0,102 & 0 & 0,126 & 0,080 & 0 & 0,079 & 0 \\ 0,087 & 0,163 & 0 & 0,223 & 0 & 0 & 0 \\ 0,220 & 0,071 & 0,191 & 0,170 & 0,106 & 0,167 & 0,161 \\ 0,110 & 0,129 & 0,057 & 0,179 & 0 & 0 & 0 \\ 0,534 & 0,156 & 0,146 & 0,188 & 0,094 & 0,077 & 0 \\ 0,232 & 0,219 & 0,256 & 0,067 & 0,392 & 0,368 & 0,403 \\ 0,196 & 0,261 & 0,224 & 0,092 & 0,407 & 0,309 & 0,435 \end{pmatrix}$$

Gambar 13. Matriks Hasil Ekspansi

Kemudian dilakukan proses inflasi (pengerembungan) pada matriks S guna memperkuat *flow* yang kuat dan memperlemah *flow* yang lemah. Nilai faktor pengerembungan (r) digunakan untuk mengontrol kepadatan kelompok. Matriks hasil inflasi terlihat pada Gambar 14.

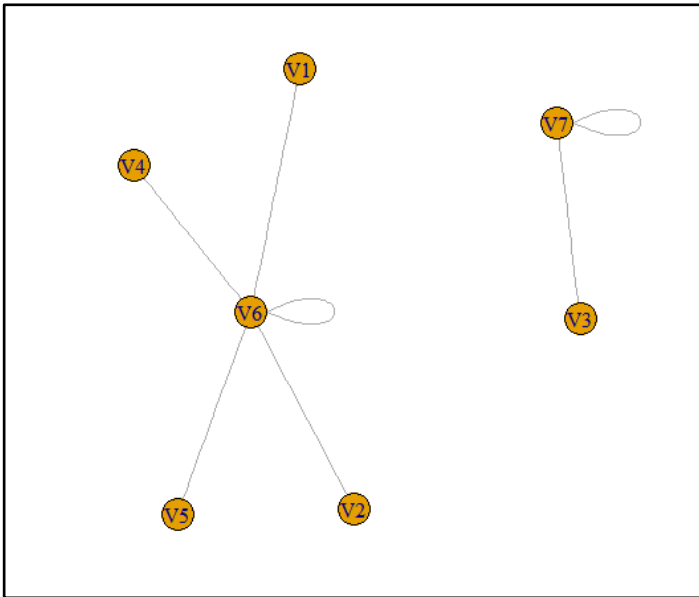
$$\begin{pmatrix} 0,065 & 0,037 & 0,062 & 0,049 & 0,045 & 0,058 & 0,052 \\ 0,048 & 0,055 & 0,024 & 0,083 & 0 & 0,007 & 0 \\ 0,166 & 0,143 & 0,169 & 0,143 & 0,162 & 0,169 & 0,168 \\ 0,055 & 0,048 & 0,035 & 0,079 & 0,006 & 0,018 & 0,009 \\ 0,095 & 0,092 & 0,079 & 0,121 & 0,055 & 0,064 & 0,055 \\ 0,291 & 0,310 & 0,323 & 0,259 & 0,373 & 0,351 & 0,365 \\ 0,281 & 0,315 & 0,309 & 0,266 & 0,361 & 0,332 & 0,350 \end{pmatrix}$$

Gambar 14. Matriks Hasil Proses Inflasi

Selain proses ekspansi dan inflasi yang terjadi pada setiap iterasi, terdapat proses *pruning* (pemangkasan). Pada proses ini entri matriks yang mendekati nol akan berubah menjadi nol. Proses ini bertujuan untuk mempercepat proses konvergensi dan menghasilkan matriks *idempotent*, dimana matriks yang dihasilkan tidak dapat berubah-ubah lagi. Kondisi *idempotent* ini diperoleh ketika *global chaos* kurang dari *threshold* minimum $e=10^{-3}$. Hasil pengelompokan dalam bentuk matriks dapat dilihat pada Gambar 15 dan kelompok graf pada Gambar 16.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Gambar 15. Matriks Hasil Pengelompokan



Gambar 16. Graf Hasil Pengelompokan

3. Sekuens Protein Virus Dengue

Data untuk penelitian ini adalah 26 sekuens protein virus dengue yang berada di Indonesia dari tahun 2010-2014 yang diambil dari ViPR, selanjutnya untuk mempermudah nama-nama sekuens protein virus dengue menggunakan kode dari 1 sampai 26 seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Sekuens Protein Virus Dengue

Kode	Identitas	Protein	Serotipe	Waktu Koleksi
1	gi: VIPR_ALG4_573592343_7574_10270	NS5	DEN 1	03/03/2010
2	gi: VIPR_ALG4_573592343_2420_3475	NS1	DEN 1	03/03/2010
3	gi: VIPR_ALG4_573592343_4520_6376	NS3	DEN 1	03/03/2010
4	gi: VIPR_ALG4_573592327_710_934	M	DEN 1	04/06/2010
5	gi: VIPR_ALG4_573592327_95_394	C	DEN 1	04/06/2010
6	gi: VIPR_ALG4_573592327_4520_6367	NS3	DEN 1	04/06/2010
7	gi: VIPR_ALG4_573592333_2420_3475	NS1	DEN 1	07/08/2010
8	gi: VIPR_ALG4_573592333_7574_10270	NS5	DEN 1	07/08/2010
9	gi: VIPR_ALG4_573592333_95_394	C	DEN 1	07/08/2010
10	gi: VIPR_ALG4_573592333_710_934	M	DEN 1	07/08/2010
11	gi: VIPR_ALG4_573592405_937_2421	E	DEN 2	03/04/2010
12	gi: VIPR_ALG4_573592405_712_936	M	DEN 2	03/04/2010
13	gi: VIPR_ALG4_573592405_97_396	C	DEN 2	03/04/2010
14	gi: VIPR_ALG4_573592407_712_936	M	DEN 2	03/29/2010
15	gi: VIPR_ALG4_573592407_97_396	C	DEN 2	03/29/2010
16	gi: VIPR_ALG4_573592407_3478_4131	NS2a	DEN 2	03/29/2010
17	gi: VIPR_ALG4_573592409_97_396	C	DEN 2	04/05/2010
18	gi: VIPR_ALG4_573592409_712_936	M	DEN 2	04/05/2010
19	gi: VIPR_ALG4_573592409_937_2421	E	DEN 2	04/05/2010
20	gi: VIPR_ALG4_573592409_4132_4521	NS2b	DEN 2	04/05/2010
21	gi: VIPR_ALG4_573592433_437_934	preM	DEN 3	03/22/2010
22	gi: VIPR_ALG4_573592433_710_934	M	DEN 3	03/22/2010
23	gi: VIPR_ALG4_573592433_3470_4123	NS2a	DEN 3	03/22/2010
24	gi: VIPR_ALG4_573592433_4124_4513	NS2b	DEN 3	03/22/2010
25	gi: VIPR_ALG4_573592433_6371_6751	NS4a	DEN 3	03/22/2010
26	gi: VIPR_ALG4_573592433_6821_7564	NS4b	DEN 3	03/22/2010

Hasil penelusuran di ViPR untuk kurun waktu dari tahun 2010-2014 tidak ditemukan sekuens protein virus dengue dengan serotipe DEN 4. Selain menggunakan waktu dan serotipe, data sekuens protein dengue yang digunakan berdasarkan pada protein penyusunnya.

4. Matriks Ketetangaan (*Adjacency*)

Matriks *input* pengelompokan sekuens protein virus dengue merupakan matriks *adjacency* dari graf interaksi sekuens protein. Interaksi protein dapat dilihat dari nilai *E-value*, dimana semakin kecil nilai *E-value* maka interaksinya semakin kuat. Untuk mendapatkan nilai *E-value* dilakukan penyejajaran sekuens protein melalui program BLAST. Nilai *E-value* adalah banyaknya penyejajaran yang berbeda, semakin rendah nilai *E-value* semakin signifikan tingkat kemiripannya. Nilai *E-value* diperoleh secara *online* menggunakan BLAST pada situs NCBI. Penyejajaran dilakukan dengan mengambil satu dari dua puluh enam sekuens protein virus dengue sebagai *global consensus* dari sekuens lainnya. Sekuens protein virus dengue yang dijadikan *global consensus* menunjukkan kolom matriks *adjacency*, sedangkan sekuens lainnya menjadi elemen penyusun kolom matriks tersebut.

Penelitian ini mengambil sekuens dengan identitas gi: VIPR_ALG4_573592343_7574_10270 sebagai *global consensus* pertama. Selanjutnya, hasil penyejajaran ini akan menjadi elemen penyusun kolom pertama matriks *adjacency*. Kemudian sekuens dengan identitas gi: VIPR_ALG4_573592343_2420_3475 sebagai *global consensus* kedua dan hasil penyejajaran ini akan menjadi elemen penyusun kolom kedua matriks *adjacency*. Demikian seterusnya sampai sekuens dengan identitas gi: VIPR_ALG4_573592433_6821_7564 sebagai *global consensus* kedua puluh enam. Matriks *adjacency* yang terbentuk memiliki ukuran 26 x 26 sesuai dengan banyaknya sekuens protein virus dengue. Nilai *E-value* dari hasil penyejajaran 26 sekuens protein virus dengue dengan ditunjukkan pada Tabel 4a sampai Tabel 4c.

Tabel 4a. Nilai *E-value* Sekuens Protein Virus Dengue Kolom 1-9

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
2	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
3	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-100	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
4	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
5	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-70
6	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-100	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
7	1.00E+00	1.00E-100	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
8	1.00E-100	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-70	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00
9	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-70	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00
10	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
11	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
12	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	3.00E-39	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
13	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	4.00E-50	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	4.00E-50
14	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-38	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
15	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.00E-50	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.00E-50
16	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
17	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.00E-50	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.00E-50
18	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-38	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
19	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
20	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
21	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.00E-44	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
22	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	3.00E-45	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
23	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
24	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
25	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	3.00E-45	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
26	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00

Tabel 4a merupakan nilai *E-value* hasil penyejajaran untuk sekuens dengan kode 1 sampai 9 dengan kedua puluh enam sekuens protein virus dengue. Kolom pertama menunjukkan nilai *E-value* hasil penyejajaran sekuens untuk kode 1 dengan kedua puluh enam sekuens protein virus dengue dan seterusnya sampai kolom kesembilan.

Tabel 4b. Nilai *E-value* Sekuens Protein Virus Dengue Kolom 10-18

	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
2	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
3	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
4	1.00E-100	1.00E+00	3.00E-39	1.00E+00	1.00E-38	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-38
5	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	4.00E-50	1.00E+00	2.00E-50	1.00E+00	2.00E-50	1.00E+00
6	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
7	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
8	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
9	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	4.00E-50	1.00E+00	2.00E-50	1.00E+00	2.00E-50	1.00E+00
10	0.00E+00	1.00E+00	3.00E-39	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-38
11	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
12	3.00E-39	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	3.00E-53	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	3.00E-53
13	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	5.00E-69	1.00E+00	5.00E-69	1.00E+00
14	1.00E-100	1.00E+00	3.00E-53	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	3.00E-54
15	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	5.00E-69	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	4.00E-70	1.00E+00
16	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
17	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	5.00E-69	1.00E+00	4.00E-70	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00
18	1.00E-38	1.00E+00	3.00E-53	1.00E+00	3.00E-54	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00
19	1.00E+00	1.00E-100	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
20	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
21	2.00E-44	1.00E+00	8.00E-37	1.00E+00	3.00E-36	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	3.00E-36
22	3.00E-45	1.00E-100	1.00E-37	1.00E+00	4.00E-37	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	4.00E-37
23	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	8.00E-62	1.00E+00	1.00E+00
24	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
25	1.00E-100	1.00E+00	1.00E-37	1.00E+00	4.00E-37	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	4.00E-37
26	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	8.00E-62	1.00E+00	1.00E+00

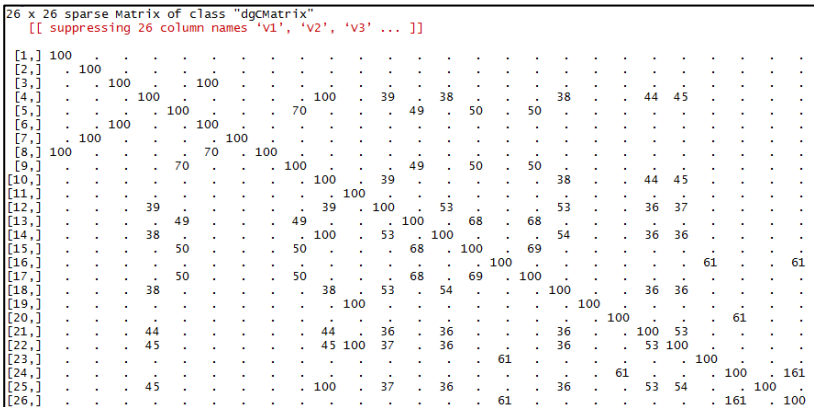
Tabel 4b merupakan nilai *E-value* hasil penyejajaran untuk sekuens untuk kode 11 sampai 18 dengan kedua puluh enam sekuens protein virus dengue. Kolom pertama menunjukkan nilai *E-value* hasil penyejajaran sekuens untuk kode 11 dengan kedua puluh enam sekuens protein virus dengue dan seterusnya sampai kolom kedelapan belas.

Tabel 4c. Nilai *E-value* Sekuens Protein Virus Dengue Kolom 19-26

	19	20	21	22	23	24	25	26
1	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
2	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
3	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
4	1.00E+00	1.00E+00	2.00E-44	3.00E-45	1.00E+00	1.00E+00	3.00E-45	1.00E+00
5	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
6	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
7	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
8	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
9	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
10	1.00E+00	1.00E+00	2.00E-44	3.00E-45	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
11	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
12	1.00E+00	1.00E+00	8.00E-37	1.00E-37	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-37	1.00E+00
13	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
14	1.00E+00	1.00E+00	3.00E-36	4.00E-37	1.00E+00	1.00E+00	4.00E-37	1.00E+00
15	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
16	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	8.00E-62	1.00E+00	1.00E+00	8.00E-62
17	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
18	1.00E+00	1.00E+00	3.00E-36	4.00E-37	1.00E+00	1.00E+00	4.00E-37	1.00E+00
19	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
20	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	5.00E-62	1.00E+00	1.00E+00
21	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	6.00E-54	1.00E+00	1.00E+00	6.00E-54	1.00E+00
22	1.00E+00	1.00E+00	6.00E-54	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-54	1.00E+00
23	1.00E+00	5.00E-62	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
24	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E-161
25	1.00E+00	1.00E+00	6.00E-54	1.00E-54	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00
26	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-161	1.00E+00	0.00E+00

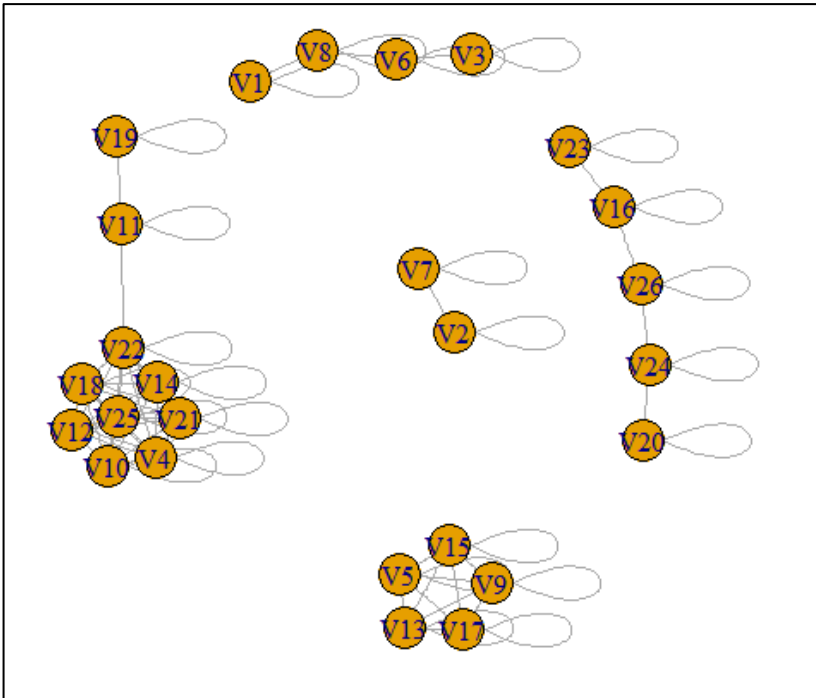
Tabel 4c merupakan nilai *E-value* hasil penyejajaran untuk sekuens untuk kode 19 sampai 26 dengan kedua puluh enam sekuens protein virus dengue. Kolom pertama menunjukkan nilai *E-value* hasil penyejajaran sekuens untuk kode 19 dengan kedua puluh enam sekuens protein virus

dengue dan seterusnya sampai kolom kedua puluh enam. Untuk mempermudah dalam proses komputasi maka nilai *E-value* yang terlalu kecil, seperti 2E-92 dan 6E-54 akan dikonversi dengan $-\log(E\text{-value})$ sehingga diperoleh 92 dan 53. Pada Gambar 17 ditampilkan matriks input dari 26 sekuens protein virus dengue setelah mengalami *self-loop*. Matriks input yang berupa matriks *adjacency* menyatakan ada atau tidaknya interaksi antar sekuens protein. *Self-loop* menunjukkan bahwa ada interaksi protein yang terjadi dengan dirinya sendiri. Untuk menghemat memori dan waktu perhitungan, matriks *adjacency* yang terbentuk dibuat dalam bentuk *sparse* seperti ditunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 17. *Adjacency Matrix* Virus Dengue dalam Bentuk *Sparse Matrix*

Matriks *adjacency* di atas merupakan representasi dari interaksi 26 protein sekuens virus dengue. Banyaknya kolom dan baris pada matriks menunjukkan banyaknya sekuens protein virus dengue, sehingga matriks di atas berukuran 26 x 26. Elemen-elemen penyusun matriks merupakan representasi dari interaksi yang terjadi antar sekuens protein virus dengue. Perbedaan nilai menunjukkan besar kecilnya interaksi yang terjadi antar sekuens tersebut. Interaksi sekuens protein virus dengue berdasarkan matriks *adjacency* di atas dapat digambarkan dengan graf interaksi seperti pada Gambar 18.



Gambar 18. Graf Interaksi 26 Protein Berdasarkan *Adjacency Matrix*

5. Hasil Pengelompokan

Algoritma *Tribe* MCL dengan format penyimpanan *sparse matrix* dijalankan dengan menggunakan program R dan didapat hasil bahwa matriks telah konvergen pada iterasi keenam puluh tujuh.


```

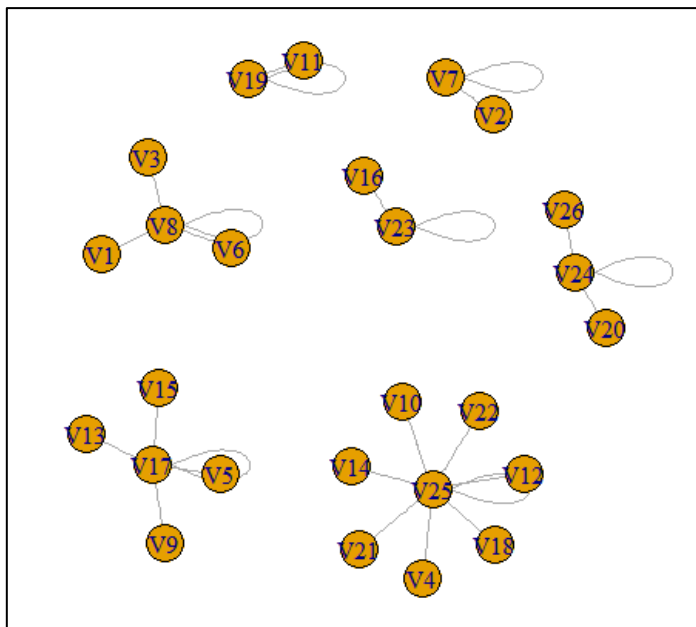
$Equilibrium.state.matrix
26 x 26 sparse Matrix of class "dgCMatrix"
  [[ suppressing 26 column names '1', '2', '3' ... ]]

1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
2 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
3 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
4 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
5 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
6 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
7 . 1 . . . . . 1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
8 1 . 1 . . . 1 . 1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
9 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
10 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
11 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
12 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
13 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
14 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
15 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
16 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
17 . . . . . 1 . . . . 1 . . . . 1 . 1 . 1 . . . . . . . . . . . . . . .
18 . . . . . . . . . . . . . . . 1 . . . . . . . . . . 1 . . . . . . . .
19 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1 . . . . . . . . . . 1 . . . .
20 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
21 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
22 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
23 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1 . . . . . 1 .
24 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1 . . 1 . 1 . 1
25 . . . 1 . . . . . . 1 . 1 . 1 . . . . . 1 . . 1 1 . 1 . 1 . 1 .
26 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
    
```

Gambar 19. Matriks Konvergen dengan *Tribe* MCL

Hasil pengelompokan dapat diperoleh dengan melihat baris-baris yang masih memiliki elemen tidak nol dengan pusat kelompok adalah diagonal utama. Baris-baris dengan elemen tidak nol pada Gambar 19 adalah baris ketujuh, kedelapan, ketujuh belas, kesembilan belas, kedua puluh tiga, kedua puluh empat, dan kedua puluh lima. Selanjutnya dapat diketahui bahwa pusat dari kelompok-kelompok yang dihasilkan adalah sekuens protein virus dengue 7, 8, 17, 19, 23, 24, dan 25. Anggota dari masing-masing kelompok dapat dilihat dari baris-baris tersebut secara keseluruhan.

Sebagai contoh, baris kedua puluh lima berisi dengan elemen tidak nol pada kolom 4, 10, 12, 14, 18, 21, dan 22. Hal ini menunjukkan bahwa diperoleh kelompok dengan pusat sekuens protein virus dengue 25 dan anggota-anggota kelompok adalah sekuens protein virus dengue 4, 10, 12, 14, 18, 21, dan 22. Jika menggunakan metode yang sama maka diperoleh 7 kelompok, seperti pada Gambar 20.



Gambar 20. Hasil Pengelompokan dengan *Tribe* MCL

KESIMPULAN

Penelitian ini mendapatkan kesimpulan bahwa metode *Tribe* MCL menghasilkan 7 kelompok dari 26 sekuens protein virus dengue dengan kelompok-kelompoknya mempunyai satu atau lebih pusat kelompok. Semakin banyak pusat kelompok berarti kelompok tersebut memiliki kepadatan yang tinggi. Kepadatan yang tinggi dapat dilihat dari banyaknya interaksi yang terjadi dalam kelompok tersebut. Kepadatan dalam jaringan cenderung membentuk kompleks protein yang berfungsi sebagai unit biologis tertentu. Hasil pengelompokan tersebut menunjukkan adanya hubungan kekerabatan pada sekuens protein virus dengue.

DAFTAR PUSTAKA

- Altschul, S. F., Gish, W., Miller, W., Myers, E. W., & Lipman, D. J. (1990). Basic local alignment search tool. *Journal of Molecular Biology*, 215 (3), 403-410.
- Baxevanis, A. D. & Ouellette, B. F. F. (2001). A practical guide to the analysis of genes and proteins. Vol.3, Second Edition. New York: John Wiley & Sons.
- Bergeron, B. P. (2003). *Bioinformatics Computing*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Bustamam, A., Burrage, K., & Hamilton, N. A. (2012). Fast paralel markov-clustering in bioinformatics using massively parallel computing on GPU with CUDA and ELLPACK R sparse format. *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, 9(3), 679-692.
- Carrano, F. & Prichard, J. (2021). Data abstraction and problem solving with Java: walls and mirrors. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/a-A-directed-graph-and-b-its-adjacency-matrix_fig2_239491573
- Cristianini, N. & Hahn, M. W. (2007). *Introduction to computational genomics - a case studies approach*. New York: Cambridge University Press.
- Dongen, S. V. (2000). *Graph clustering for graph by flow simulation (Thesis)*. Netherland: University of Utrecht.
- Dongen, S. V. (2008). Graph clustering for graph via discrete uncoupling process. *Journal SIAM*, 30 (1), 121-141.
- Isaev, A. (2004). *Introduction to mathematical method in bioinformatics*. Berlin: Springer.
- Le Breton, M., Meyniel-Schicklin, L., Deloire, A., Coutard, B., Canard, B., de Lamballerie, X.,...Davoust, N. (2011). Flavivirus NS3 and NS5 proteins interaction network: a high-throughput yeast two-hybrid screen. *BMC Microbiol*, 11:234. doi: 10.1186/1471-2180-11-234.

- Ly, C., Wang, D., Du, J., Meng, S., Wang, J., Shi, L., Wang, G., & Zhao, Y. (2008). Isolation and genetic characterization of swine influenza viruses from pigs in China. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/protein/afn06479>
- Krueger, A. (2007). Structures, processes, and clustering of complex networks. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/Example-visualization-of-a-weighted-graph-and-its-adjacency-matrix-As-the-graph-is_fig3_36449409
- Satuluri, V., Parthasarathy, S., & Ucar. (2010). Markov clustering of protein interaction networks with improved balance and scalability. *Proceedings of the First ACM International Conference on Bioinformatics and Computational Biology*, 247-56.
- Smith, K. M., Nanda, K., Spears, C. J., Ribeiro, M., Vancini, R., Piper, A.,...Hernandez, R. (2011). Structural mutants of dengue virus 2 transmembrane domains exhibit host-range phenotype. *Virology*, 8, 289. <https://doi.org/10.1186/1743-422X-8-289>.
- Vazquez, F., Ortega, Fernandez J. J., Garzon E. M. (2010). *Improving the performance of the sparse matrix vector product with GPUs*. 2010 10th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, 1146-1151. doi: 10.1109/CIT.2010.208.
- World Health Organization. (2009). *Dengue: guidelines for diagnosis, treatment, prevention and control*. Geneva: World Health Organization and the Special Programme for Research and Training in Tropical Diseases.
- Zhang, Y. & Waterman, M. S. (2004). An Eulerian path approach to local multiple alignment for DNA sequences. Retrieved from <https://www.pnas.org/content/102/5/1285>.

PENGGUNAAN AVERAGE - BASED FUZZY TIME SERIES CHEN UNTUK PREDIKSI JUMLAH MAHASISWA BARU DI FST UT

CHEN AVERAGE - BASED FUZZY TIME SERIES APPLICATION FOR PREDICTING THE NUMBER OF NEW STUDENTS OF FST UT

Lintang Patria

**Program Studi Sistem Informasi, Jurusan Teknik,
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
lintang@ecampus.ut.ac.id**

ABSTRAK

Dalam era society 5.0, yang menekankan antara keselarasan teknologi dengan pemecahan masalah yang terjadi di masyarakat maka data sudah selayaknya dapat diolah dan dianalisis. Data yang diolah akan menjadi informasi yang berharga bagi pengambil keputusan. Salah satu ilmu untuk mengolah data adalah peramalan. Peramalan berguna untuk memberikan solusi di masyarakat. Peramalan merupakan salah satu metode yang digunakan untuk memprediksi keadaan masa depan berdasarkan data masa lalu. Fuzzy time series merupakan konsep peramalan yang digunakan untuk meramalkan suatu keadaan, dengan menggunakan data historis yang ada berdasarkan kaidah pada himpunan kabur. Data historis tersebut diolah dan dieksplorasi sesuai dengan sifat, prinsip dan logika yang berlaku pada himpunan kabur. Artikel ini membahas mengenai fuzzy time series yang dikembangkan oleh Chen. Perhitungan panjang interval dihitung dengan menggunakan metode average-based. Metode fuzzy time series ini digunakan untuk meramalkan jumlah mahasiswa baru pada 7 program studi di Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Terbuka (FST UT). Tingkat akurasi prediksi dihitung berdasarkan nilai Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Penelitian ini menggunakan data mahasiswa baru FST UT mulai tahun 1984 sampai dengan tahun 2020. Hasil prediksi terbaik diperoleh pada program studi PWK. Hasil MAPE terburuk diperoleh pada program

studi Sistem Informasi. Secara umum, nilai MAPE menunjukkan bahwa metode ini bisa dipergunakan dalam prediksi jumlah mahasiswa baru FST UT dan menghasilkan peramalan dengan akurasi yang baik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat untuk mengetahui prediksi jumlah mahasiswa baru FST UT sehingga pimpinan pada FST UT dapat dengan tepat memprediksi kebutuhan pendukung proses pembelajaran pada FST UT.

Kata Kunci: *average - based, Chen, fuzzy, jumlah mahasiswa, peramalan, time series.*

PENDAHULUAN

Time series atau runtun waktu adalah salah satu bidang ilmu yang mempelajari atau mengamati hubungan data yang terjadi di masa lalu. Data dikumpulkan sepanjang waktu sesuai dengan kebutuhan, misal dengan satuan waktu jam, hari, minggu, bulan atau tahun. Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa pergerakan data pada masa lalu akan membentuk pola yang bisa dianalisa dan dieksplorasi untuk memprediksi kejadian di masa yang akan datang. Pola data menunjukkan suatu kecenderungan data dalam masa yang panjang. Pola ini bisa merupakan kenaikan ataupun penurunan. Penentuan metode yang optimal tergantung pada jenis pola. Pola pada data historis tersebut menjadi dasar pemilihan metode. Berbagai metode telah dikembangkan dengan harapan prediksi yang telah dihitung sesuai dengan data aktual. Terdapat beberapa metode untuk menghitung akurasi prediksi, salah satunya adalah metode yang menggunakan pendekatan *fuzzy set*.

Fuzzy set atau himpunan *fuzzy* atau himpunan kabur merupakan salah satu ilmu pengetahuan yang merupakan perluasan dari konsep himpunan yang kita kenal sehari-hari. Himpunan kabur dikembangkan oleh Lotfi Zadeh, seorang profesor pada Universitas California di Berkeley pada tahun 1965. Himpunan kabur merupakan perluasan dari himpunan sederhana, suatu himpunan yang biasa kita kenal. Pada himpunan sederhana, suatu obyek dengan hanya mempunyai dua kemungkinan, menjadi anggota suatu himpunan, atau bukan anggota himpunan. Himpunan usia adalah salah satu contoh himpunan kabur. Seseorang mempunyai derajat keanggotaan yang berbeda-beda, antara 0 dan 1, sesuai dengan usianya. Bahasa linguistik yang dipakai dalam mendefinisikan himpunan usia misalnya adalah muda, dewasa dan tua yang nantinya akan berkaitan dengan derajat keanggotaan

masing-masing obyek. Selama ini teori himpunan kabur mengalami perkembangan yang menarik, dan saat ini dipergunakan dalam berbagai disiplin ilmu, misal dalam sistem kendali, teknik sipil, teknik kimia, pengenalan pola, pengenalan suara, optimisasi, sistem pengolahan citra, peramalan, sistem pengambilan keputusan, ilmu kedokteran, ilmu lingkungan dan sebagainya. Dengan pendekatan kabur, hasil analisa dalam berbagai ilmu tersebut menjadi lebih realistik dan lebih mampu membuat ramalan yang semakin tepat.

Artikel ini akan membahas *fuzzy time series* yang dikembangkan oleh Chen. Modifikasi dilakukan pada metode perhitungan panjang interval, yaitu dengan menggunakan *average - based*. Peramalan menggunakan *fuzzy time series* dapat mengeksplorasi pola data yang lalu untuk memprediksi kejadian mendatang dengan mempergunakan berbagai sifat, prinsip dan logika dalam *fuzzy set* (himpunan kabur). *Fuzzy time series* adalah metode peramalan yang diperkenalkan oleh Song dan Chisom. Pada saat itu, mereka menggunakan model *time-invariant fuzzy time series* untuk meramalkan jumlah pendaftar di Universitas Alabama. Data jumlah mahasiswa baru pada Universitas Alabama dikumpulkan per tahun. Dengan menggunakan data historis tersebut, Song dan Chisom memprediksi jumlah mahasiswa pada tahun depannya. Hasil dari penelitian mereka menghasilkan *average forecasting error* (AFE) sebesar 4,37% dengan *error range* antara 0,2% sampai 8,28%. *Fuzzy time series* metode Chen mulai dipergunakan dan menjadi metode alternatif. Pada beberapa kasus, metode Chen menghasilkan akurasi yang lebih baik dibanding metode *time invariant*. Seiring dengan berjalannya waktu, beberapa peneliti melakukan modifikasi untuk menghasilkan akurasi yang lebih baik. Salah satu modifikasi yang dilakukan oleh Fauziah, Wahyuningsih, & Nasution, (2016) adalah dalam hal perhitungan panjang interval. Perhitungan panjang interval pada metode Chen ditentukan sendiri oleh peneliti, atau bisa menggunakan aturan Sturges. Xihao (2008) menggunakan metode *average-based* dalam perhitungan panjang interval dan menghasilkan akurasi yang baik. *Average-based* memperhitungkan nilai fluktuasi data historis yang didapat dari nilai absolut selisih dua data berurutan. Menurut Karmita (2018) panjang interval sangat berpengaruh dalam pembentukan himpunan kelas *fuzzy*. Himpunan kelas *fuzzy* ini merupakan dasar perhitungan *fuzzy relationship* dan akan memberikan dampak signifikan pada hasil peramalan *fuzzy time series*.

Dalam Era society 5.0, yang menekankan antara keselarasan teknologi dengan pemecahan masalah yang terjadi di masyarakat maka data sudah selayaknya dapat diolah dan dianalisis. Hasil analisis data tersebut menjadi informasi yang berharga bagi pengambil keputusan. Dengan adanya peramalan, masyarakat bisa merencanakan kegiatan dengan lebih baik. Artikel ini merupakan salah satu penerapan ilmu matematika dan statistika dalam bidang pendidikan. Dengan melakukan peramalan jumlah mahasiswa baru, maka program studi dapat mempersiapkan kebutuhan pendukung dalam proses pembelajaran.

1. Peramalan

Menurut Muhammad (2016) peramalan merupakan suatu teknik statistik yang menggunakan data pada masa lampau untuk memprediksi masa depan. Data yang ada dianalisis secara sistematis, terstruktur, pragmatis dan dieksplorasi dengan menggunakan suatu metode, kemudian dipergunakan untuk memprediksi kejadian di masa yang akan datang. Hasil prediksi yang dilakukan tersebut kemudian diukur akurasi dengan mempergunakan aturan yang berlaku. Peramalan sangat diperlukan sebagai dasar pengambilan keputusan dan merupakan hal yang penting dalam merencanakan kegiatan. Karena pentingnya suatu peramalan, maka peramalan dikatakan baik jika tingkat kesalahan prediksinya kecil. Oleh karena itu, tujuan dari peramalan adalah meminimalisir tingkat kesalahan prediksi. Dengan memilih metode yang paling sesuai untuk pola obyek yang diteliti, diharapkan kita mendapatkan cara perhitungan yang terstruktur dan menggunakan teknik analisa yang terarah dan mudah dilakukan. Dengan menggunakan metode tertentu, diharapkan nilai kesalahan dari suatu prediksi cukup kecil dan deviasi yang terjadi masih sesuai dengan aturan dalam peramalan.

Berdasarkan sifatnya, peramalan dibagi menjadi dua, yakni peramalan secara kualitatif dan peramalan secara kuantitatif. Peramalan secara kualitatif adalah peramalan yang menggunakan pendapat seseorang yang ahli dan dianalisis secara deskriptif. Biasanya peramalan metode kualitatif dilakukan karena tidak adanya data historis. Metode peramalan kualitatif ini sifatnya lebih subjektif dibandingkan dengan metode peramalan kuantitatif. Hal ini karena metode peramalan kualitatif sangat dipengaruhi oleh emosi, persepsi, sudut pandang, tingkat pendidikan, intuisi, keahlian seseorang yang berbeda beda dengan orang lain. Pengalaman pribadi masing masing

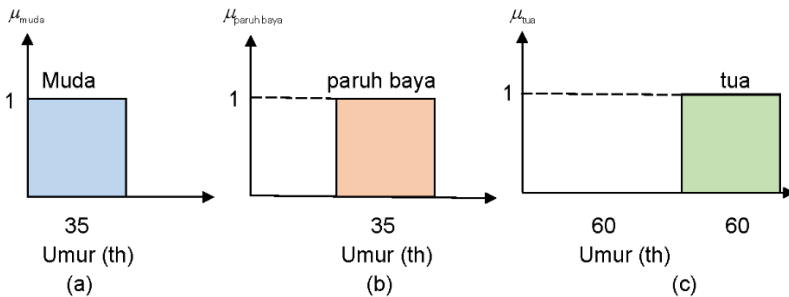
orang cenderung berbeda-beda sehingga hasil setiap orang akan berbeda. Peramalan kualitatif penting dilakukan untuk memperkirakan kebutuhan produk baru, peningkatan tampilan desain suatu produk, perubahan teknologi sesuai dengan perubahan sosial ekonomi masyarakat dan sebagainya. Contoh peramalan kualitatif adalah survei pasar, wawancara mendalam, observasi, diskusi dan pengumpulan opini dari suatu kelompok yang kritis dan relevan sesuai dengan topik peramalan.

Peramalan kuantitatif adalah peramalan yang menggunakan data masa lalu dalam bentuk angka. Data masa lalu dalam bentuk angka tersebut disusun menjadi data historis. Data historis tersebut kemudian diolah sesuai dengan metode yang dipilih. Metode kuantitatif dibagi menjadi 2 pendekatan, yaitu metode kausal (sebab akibat) dan *time series* (deret waktu). Metode kausal menggunakan hubungan sebab akibat. Beberapa pendekatan umum dari metode kausal adalah regresi dan korelasi, ekonometri, dan model *input-output*. Metode *time series* dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu pendekatan naif, pendekatan pergerakan rata-rata, pendekatan *exponential smoothing*, dll. Pendekatan naif memprediksi data yang akan datang hanya dengan data pada satu periode sebelumnya. Pendekatan rata-rata menggunakan beberapa data sebelumnya kemudian dirata-rata untuk menjadi perkiraan pada masa mendatang. Pendekatan *exponential smoothing* merupakan pendekatan rata-rata dengan pembobotan yang berupa *exponential*. Metode *time series* atau deret waktu merupakan metode peramalan yang menghubungkan variabel dependen (variabel yang dicari) dengan variabel independen atau variabel yang mempengaruhinya kemudian dihubungkan dengan variabel waktu yang dikehendaki. Variable waktu tersebut bisa dalam satuan hari, mingguan, bulanan atau tahunan. Data *time series* dipergunakan untuk memperkirakan atau meramalkan suatu kejadian di masa yang akan datang. Pola pada data *time series* dalam beberapa periode masa lampau biasanya akan kembali terulang pada masa kini. Kejadian dimasa yang akan datang juga sesuai pola data di masa lampau. Hasil peramalan tergantung pada metode yang dipergunakan. Pemilihan metode harus sesuai dengan jenis pola data. Pola data dapat dibedakan menjadi 4 jenis yaitu pola tetap atau horisontal, pola *trend*, pola siklis dan pola musiman. Justifikasi penentuan jenis metode yang digunakan berpengaruh terhadap hasil peramalan dan akurasi peramalan. Peneliti harus mempunyai intuisi dalam pemilihan metode peramalan.

2. Himpunan Fuzzy

Himpunan *fuzzy* atau himpunan kabur merupakan perluasan dari himpunan sederhana yang kita kenal sehari-hari. Contoh himpunan sederhana adalah himpunan wanita. Anggota himpunan wanita dapat kita definisikan dengan mudah. Derajat keanggotaannya adalah 0 dan 1.

Sebagai contoh perbedaan himpunan sederhana dan himpunan *fuzzy* misalnya terdapat variabel umur yang terdiri dari 3 kategori, yaitu muda, paruh baya dan tua. Dapat didefinisikan batasan dari kategori tersebut yaitu orang disebut muda jika usianya kurang dari 35 tahun, paruh baya jika usia antara 35 tahun sampai 60 tahun, dan tua jika usianya lebih dari 60 tahun. Derajat keanggotaan pada himpunan tersebut digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Himpunan: Muda, Paruh baya dan Tua

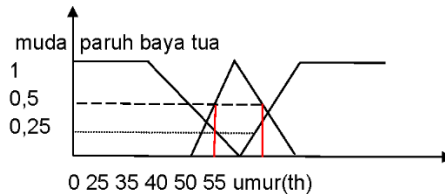
Keterangan:

Jika berumur 35 tahun, maka disebut bahwa muda. $\mu_{muda}[35th]=1$

Jika berumur 35 tahun lebih satu hari, maka termasuk paruh baya dengan derajat keanggotaan $\mu_{paruh\ baya}[35th+1hr]=1$, dan tidak muda dengan derajat keanggotaan $\mu_{muda}[35th+1hr]=0$

Terlihat himpunan sederhana untuk menyatakan umur tidak bisa dengan mudah menyesuaikan pada saat ada sedikit perbedaan. Untuk perbedaan kecil saja, bisa mengakibatkan perbedaan kategori yang sangat signifikan.

Logika pada himpunan *fuzzy* bisa mengatasi masalah tersebut. Seseorang bisa masuk dalam kelas himpunan *fuzzy* yang berbeda, dan derajat keanggotaannya sesuai dengan seberapa besar menjadi anggota himpunan *fuzzy* tersebut (Gambar 2).



Gambar 2. Himpunan Fuzzy untuk Umur

Pada Gambar 2, seseorang yang berumur 40 tahun termasuk himpunan muda dengan derajat keanggotaan $\mu_{muda}[40th] = 0,25$, dan dia juga termasuk dalam himpunan paruh baya dengan derajat keanggotaan $\mu_{paruhbaya}[40th] = 0,50$.

Terlihat bahwa himpunan *fuzzy* bisa menyesuaikan perhitungan sesuai bahasa linguistik yang kita pakai sehari-hari. Himpunan *fuzzy* bisa menyelesaikan masalah yang bersifat ambigu ataupun hal-hal yang didefinisikan secara tidak presisi atau tidak jelas.

Fungsi keanggotaan pada himpunan *fuzzy* biasanya berupa linier naik, linier turun, kurva segitiga, trapesium dan *sigmoid*. Fungsi keanggotaan bisa ditentukan sesuai dengan karakteristik permasalahan yang sedang dihadapi. Pada artikel ini, fungsi keanggotaan yang dipakai adalah fungsi kurva segitiga.

3. *Fuzzy Time Series*

Menurut Arga (1985) *fuzzy time series* merupakan konsep baru untuk peramalan dengan menggunakan logika *fuzzy*. Logika *fuzzy* menggunakan logika pada himpunan data pada masa lalu dan diolah dengan menggunakan nilai linguistik. Sistem peramalan dengan metode *fuzzy time series* dapat menggunakan pola dari data historis untuk memproyeksikan data yang akan datang. Proses perhitungannya menggunakan perhitungan matematika yang cukup mudah. Logika yang dipergunakan adalah perluasan logika pada himpunan secara umum.

Jika *universe of discourse* (U) merupakan himpunan semesta, $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_p\}$ maka suatu himpunan *fuzzy* A_i dari U dengan derajat keanggotaan akan dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$A_i = \sum_{l=1}^p \mu_{A(u_l)} / u_l = \mu_{A(u_1)} / u_1 + \mu_{A(u_2)} / u_2 + \dots + \mu_{A(u_p)} / u_p \quad (1)$$

Dimana $\mu_{A(u_i)}$ adalah derajat keanggotaan dari u_i dalam himpunan *fuzzy* A_i dimana $1 \leq i \leq p$ sedemikian sehingga $\mu_{A(u_i)} \in [0,1]$. Jika u_i adalah nilai keanggotaan dari A_i maka $\mu_{A(u_i)}$ adalah derajat keanggotaan u_i terhadap A_i , yang bisa didefinisikan oleh fungsi segitiga berikut.

$$\mu_{A(u_i)} = \begin{cases} 1 & \text{jika } i = j \\ 0,5 & \text{jika } i = j-1 \text{ atau } j+1 \\ 0 & \text{untuk yang lain} \end{cases} \quad (2)$$

Metode *average based fuzzy time series* Chen dimulai dengan pembentukan interval menggunakan *average based*, dimana panjang interval dihitung sesuai rata rata nilai absolut selisih dari masing masing data. Setelah panjang interval diketahui, dibuat suatu himpunan *fuzzy* sesuai dengan jumlah interval yang terbentuk. Kemudian dilakukan proses fuzzifikasi, yaitu pembentukan data historis menjadi himpunan *fuzzy*. Pergerakan data historis dalam himpunan *fuzzy* kemudian direlasikan sesuai variabel waktu, menjadi kumpulan *Fuzzy Logical Relationship* (FLR). FLR adalah relasi atau hubungan antar himpunan *fuzzy* sesuai data historis. FLR yang sama kemudian dikumpulkan menjadi satu grup yang disebut *Fuzzy Logical Relationship Group* (FLRG). FLRG yang terbentuk tersebut diolah dengan menggunakan aturan Chen dan dilakukan defuzzifikasi. Hasil defuzzifikasi kemudian dianalisa berdasarkan MAPE.

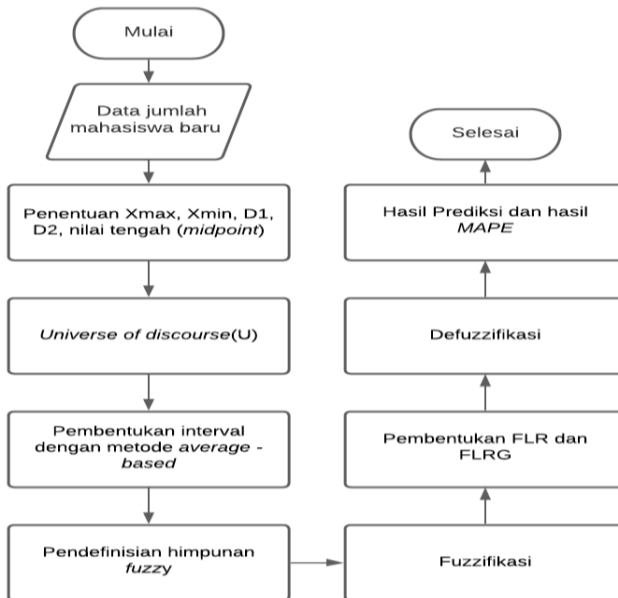
4. Data dan Metode yang Digunakan

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data mahasiswa baru 7 program studi pada FST UT dari tahun 1984 sampai dengan tahun 2020, sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Data Historis dan Program Studi yang Diteliti

No	Prodi	Data yang Diteliti	Jumlah Tahun
1	Matematika	1984-2020	37
2	Statistika	1984-2020	37
3	Biologi	2001-2020	20
4	Agribisnis	2014-2020	17
5	Teknologi Pangan	2002-2020	19
6	PWK	2010-2020	11
7	Sistem Informasi	2019-2020	2

Metode peramalan yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *average - based fuzzy time series* Chen dengan menggunakan MAPE sebagai metode untuk menghitung akurasi hasil prediksi. Skema perhitungan *average - based fuzzy time series* Chen dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Skema Perhitungan *Average - Based Fuzzy Time Series* Chen

Penjelasan skema perhitungan *average - based fuzzy time series* Chen:

- a. Data time series jumlah mahasiswa baru FST UT digunakan sebagai input pada metode *fuzzy time series* Chen

- b. Menentukan X_{max} , X_{min} , $D1$, $D2$, nilai tengah (*midpoint*)

X_{min} = Data minimum

X_{max} = Data maksimum

$D1$ dan $D2$ adalah bilangan positif sebarang dan ditentukan oleh peneliti. Biasanya nilai $D1$ dan $D2$ adalah bilangan yang memudahkan perhitungan himpunan semesta dari data historis yang terbentuk.

- c. Menentukan U yaitu *Universe of discourse* atau himpunan semesta data historis, yaitu

$$U = \{X_{min}-D1, X_{max}+D2\} \quad (3)$$

- d. Menurut Xihao dan Yimin (2008), *average-based* dimulai dengan menghitung semua nilai absolut selisih antara X_{t+1} dan X_t dimana $t=1, 2, \dots, n-1$. Nilai absolut tersebut dijumlahkan dan kita menggunakan rumus rata rata nilai selisih absolut seperti berikut.

$$Mean = \frac{\sum_{t=1}^n |X_{t+1} - X_t|}{n} \quad (4)$$

Dimana

Mean = nilai rata rata

N = jumlah data

X_t = data pada waktu ke- t

- 1) Kita kemudian menentukan panjang interval yang didapat dari nilai rata rata yang diperoleh dari persamaan (4) dengan menggunakan persamaan berikut.

$$I = \frac{Mean}{2} \quad (5)$$

Dimana I adalah panjang interval

- 2) Setelah mendapatkan panjang interval yang diperoleh dari persamaan (5), kita menentukan basis dari panjang interval yang sesuai dengan tabulasi basis. Secara umum panjang jangkauan dan basisnya ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2. Tabel Berbasis Interval

Jangkauan	Basis
0,1 - 1	0,1
1,1 - 10	1
11 - 100	10
101 - 1000	100
1001- 10000	1000

- 3) Panjang interval kemudian dibulatkan sesuai dengan basis interval
- 4) Jumlah interval (bilangan *fuzzy*) ditentukan dengan persamaan berikut.

$$p = \frac{(X_{\max} + D2 - X_{\min} + D1)}{I} \tag{6}$$

Dimana p adalah jumlah kelas

X_{\max} adalah nilai maksimal dari data historis

X_{\min} adalah nilai minimal dari data historis

$D1, D2$ adalah nilai positif yang ditentukan oleh peneliti

I adalah panjang interval

- e. Setelah mendapatkan jumlah interval, kita mendefinisikan himpunan *fuzzy* sesuai dengan jumlah kelas. Misal A_1, A_2, \dots, A_p adalah himpunan *fuzzy* yang mempunyai nilai linguistik, pendefinisian himpunan A_1, A_2, \dots, A_p pada semesta pembicaraan U adalah sebagai berikut

$$A_1 = 1/u_1 + 0,5/u_2 + 0/u_3 + \dots + 0/u_p$$

$$A_2 = 0,5/u_1 + 1/u_2 + 0,5/u_3 + \dots + 0/u_p$$

$$A_3 = 0/u_1 + 0,5/u_2 + 1/u_3 + 0,5/u_4 \dots + 0/u_p$$

....

....

....

$$A_p = 0/u_1 + 0/u_2 + 0/u_3 + \dots + 0,5/u_{p-1} + 1/u_p$$

Dimana $u_i (i=1,2,3,\dots,p)$ adalah elemen dari himpunan semesta U dan bilangan yang diberi simbol “/” menyatakan derajat keanggotaan $\mu_{A_i}(u_i)$ terhadap $A_i (i=1,2,3,\dots,p)$ dimana nilainya ialah 0, 0,5 atau 1.

- f. Data historis diklasifikasikan sesuai himpunan *fuzzy* pada langkah 5.
- g. Setelah mendapatkan himpunan *fuzzy*, kita membentuk FLR. FLR merupakan relasi *fuzzy* antara data pada tahun ke i dan data pada tahun ke j . Jika $F(t-1) = A_i$ dan $F(t) = A_j$, maka FLR yang terbentuk berupa $A_i \rightarrow A_j$. FLR merupakan relasi *fuzzy* antara data pada tahun ke i dan data pada tahun ke j . Setelah seluruh data historis diklasifikasikan menjadi FLR, dibentuk FLRG. FLRG adalah grup yang didapat dari FLR yang memiliki sisi kiri yang sama.
- h. Setelah mendapatkan FLRG, dilakukan defuzzifikasi sesuai dengan metode Chen. Menurut Fauziah et al., (2016) dan Rachmawati & Anifah (2019) pada *average - based fuzzy time series* Chen terdapat beberapa aturan peramalan yaitu:

Aturan 1.

Jika hasil fuzzifikasi pada tahun ke t adalah A_i dan tidak terdapat relasi logika *fuzzy*, misal jika $A_i \rightarrow \emptyset$, maka hasil peramalan F_{t+1} adalah m_i . m_i adalah nilai tengah u_i .

Aturan 2.

Jika hasil fuzzifikasi pada tahun ke t adalah A_i dan hanya terdapat satu FLR pada FLRG, misalnya jika $A_i \rightarrow A_j$, dimana A_i dan A_j adalah himpunan *fuzzy*, maka hasil peramalan F_{t+1} adalah m_j .

Aturan 3.

Jika hasil fuzzifikasi pada tahun ke t adalah A_i dan A_i memiliki beberapa FLR pada FLRG, misalnya jika $A_i \rightarrow A_{j_1}, A_{j_2}, \dots, A_{j_k}$, dimana $A_{j_1}, A_{j_2}, \dots, A_{j_k}$ adalah himpunan *fuzzy* dan nilai maksimum fungsi keanggotaan dari $A_{j_1}, A_{j_2}, \dots, A_{j_k}$ berada pada interval $u_{j_1}, u_{j_2}, \dots, u_{j_k}$ dan nilai tengah dari $u_{j_1}, u_{j_2}, \dots, u_{j_k}$ adalah $m_{j_1}, m_{j_2}, \dots, m_{j_k}$, maka hasil

$$\text{peramalan } F_{t+1} \text{ adalah } \frac{m_{j_1} + m_{j_2} + \dots + m_{j_k}}{k} \quad (7)$$

Dimana k adalah banyaknya jumlah nilai tengah (*midpoint*) . Untuk mencari nilai tengah m_i pada interval himpunan *fuzzy* dapat dipergunakan persamaan berikut:

$$m_i = \frac{\text{batas atas} + \text{batas bawah}}{2}$$

(8)

- i. Tingkat error dari prediksi atau MAPE dapat dihitung dengan rumus

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - p_i}{x_i} \right| \times 100\% \quad (9)$$

Dimana

x_i = data aktual pada tahun i

p_i = nilai peramalan pada tahun i

n = jumlah data

Berdasarkan Lewis (1982), nilai MAPE dapat diinterpretasikan atau ditafsirkan ke dalam 4 kategori yaitu:

- a. <10% = sangat akurat
- b. 10-20% = baik
- c. 20-50% = wajar
- d. >50% = tidak akurat

Nilai MAPE yang kecil menunjukkan bahwa prediksi yang dilakukan sangat akurat. Hasil suatu metode pendugaan mempunyai kemampuan peramalan sangat baik jika nilai MAPE < 10% dan mempunyai kemampuan pendugaan baik jika nilai MAPE diantara 10% dan 20%. Jika nilai MAPE lebih dari 50%, maka bisa disimpulkan bahwa metode peramalan yang dipakai tersebut ternyata tidak sesuai dengan data historis yang ada. Peneliti sebaiknya menggunakan metode peramalan yang lain.

PEMBAHASAN

1. Penggunaan *Average – Based Fuzzy Time Series* Chen pada Prediksi Mahasiswa Baru FST UT

a. *Average - based fuzzy time series* Chen pada Program Studi Matematika

Berdasarkan data jumlah mahasiswa baru program studi Matematika didapatkan $X_{min} = 35$ dan $X_{max} = 693$. Untuk mempermudah perhitungan, $D1$ dan $D2$ yang dipilih adalah $D1 = 5$ dan $D2 = 17$, sehingga himpunan semesta yang didapat adalah $U = [30,710]$.

Jumlah selisih data historis = 2397, dan berdasarkan persamaan (4), didapatkan nilai mean = 66,58. Dengan menggunakan persamaan (5), maka panjang interval = 33,29. Panjang interval yang telah dihitung kemudian dibulatkan sesuai dengan tabel basis interval, sehingga didapatkan panjang interval = 40. Jumlah interval (bilangan *fuzzy*) dihitung sesuai persamaan (6) dan menghasilkan $p = 17$. Dengan demikian, interval yang diperoleh sebanyak 17 interval, yaitu $[30,70]$, $[70,110]$, $[110,150]$, ..., $[630,670]$, $[670,710]$. Dapat didefinisikan A_1, A_2, \dots, A_{17} sebagai himpunan *fuzzy*.

Tahap fuzzifikasi dilakukan sesuai banyaknya interval yang terbentuk. *Fuzzy Logical Relationship* (FLR) didapat dengan memperhatikan hubungan *fuzzy* A_i dari tahun ke tahun untuk $1 \leq i \leq 17$. Langkah selanjutnya adalah membentuk *Fuzzy Logical Relationship Group* (FLRG), dengan cara mengelompokkan himpunan *fuzzy* yang memiliki *current state* sama lalu dikelompokkan menjadi satu group pada *next state* berdasarkan tabel FLR. Perhitungan FLRG untuk program studi Matematika dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. FLRG Program Studi Matematika

Group	FLRG	Group	FLRG
1	$A1 \rightarrow A1, A7, A17$	6	$A8 \rightarrow A7, A8, A9$
2	$A4 \rightarrow A4, A5, A16$	7	$A9 \rightarrow A6, A7$
3	$A5 \rightarrow A4, A5$	8	$A11 \rightarrow A10, A11$
4	$A6 \rightarrow A5, A7, A8$	9	$A17 \rightarrow A9$
5	$A7 \rightarrow A4, A6, A8, A11$		

Setelah itu, dilakukan proses defuzzifikasi nilai peramalan, yaitu dengan mencari nilai tengah setiap interval berdasarkan persamaan (8), dan menghitung nilai peramalan sesuai aturan defuzzifikasi yang telah dibahas. Dengan mempergunakan nilai tengah untuk masing-masing interval, maka defuzzifikasi dari FLRG ditampilkan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Hasil Defuzzifikasi Program Studi Matematika

Group	Defuzzifikasi	Group	Defuzzifikasi
1	A1→343	6	A8→330
2	A4→210	7	A9→270
3	A5→190	8	A11→430
4	A6→277	9	A17→370
5	A7→300		

Hasil peramalan mahasiswa baru program studi Matematika dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

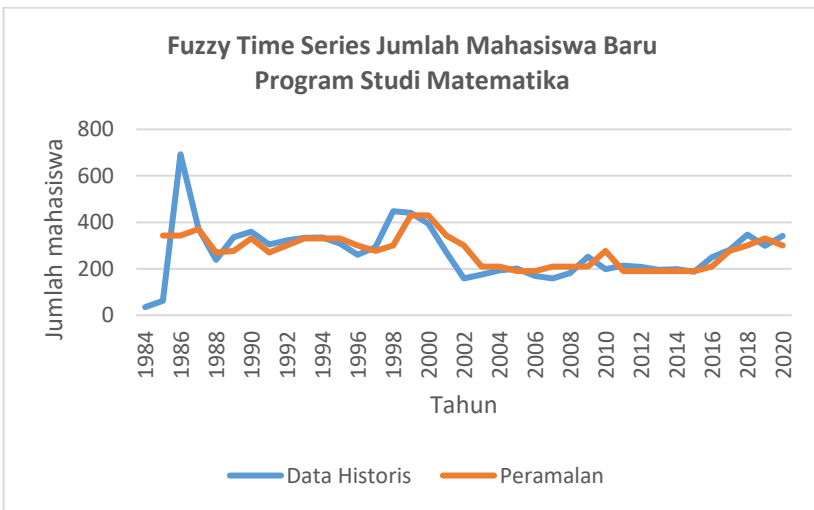
Tabel 5. Hasil Peramalan Program Studi Matematika

No	Tahun	Data Historis	Peramalan	No	Tahun	Data Historis	Peramalan
1	1984	35		20	2003	175	210
2	1985	62	343	21	2004	193	210
3	1986	693	343	22	2005	201	190
4	1987	373	370	23	2006	170	190
5	1988	239	270	24	2007	159	210
6	1989	336	277	25	2008	182	210
7	1990	359	330	26	2009	252	210
8	1991	305	270	27	2010	198	277
9	1992	322	300	28	2011	214	190
10	1993	333	330	29	2012	208	190
11	1994	335	330	30	2013	196	190
12	1995	308	330	31	2014	198	190
13	1996	260	300	32	2015	188	190
14	1997	294	277	33	2016	250	210

No	Tahun	Data Historis	Peramalan	No	Tahun	Data Historis	Peramalan
15	1998	448	300	34	2017	281	277
16	1999	441	430	35	2018	347	300
17	2000	394	430	36	2019	299	330
18	2001	272	343	37	2020	342	300
19	2002	158	300				

Pada Tabel 5, terlihat bahwa pada tahun 1985, data historis = 62 dan peramalan = 343. Data historis tersebut berbeda jauh dengan peramalan karena perbedaan yang signifikan antara data historis pada tahun 1985 dan tahun 1986. Pada tahun 1984 dan 1985, data historis termasuk himpunan *fuzzy* A1, sedangkan pada tahun 1986, data historis = 693 dan termasuk himpunan *fuzzy* A17. Hal ini yang menyebabkan nilai peramalan A1 = 343 .

Plot data historis dan hasil peramalan jumlah mahasiswa baru program studi Matematika digambarkan sebagai berikut.



Gambar 4. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi Matematika

Berdasarkan Gambar 4 dapat dibandingkan data historis dan data hasil peramalan jumlah mahasiswa baru program studi Matematika FST UT. Bentuk plot hasil peramalan terlihat mengikuti alur fluktuasi jumlah mahasiswa baru FST UT.

Tingkat *error* dari prediksi atau MAPE dihitung dengan rumus

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - p_i}{x_i} \right| \times 100\% \text{ dan menghasilkan nilai MAPE} = 9,85\%$$

Berdasarkan informasi bahwa FLR pada tahun 2019 ke 2020 adalah $A7 \rightarrow A8$, maka bisa diramalkan bahwa jumlah mahasiswa baru pada tahun 2021 adalah himpunan *fuzzy* $A8$ yang artinya terdapat 330 mahasiswa baru.

- b. Average - based fuzzy time series Chen pada Program Studi Statistika**
Langkah langkah perhitungan seperti pada bagian A, sehingga didapatkan $X_{min} = 70$ dan $X_{max} = 1904$. Untuk mempermudah perhitungan, $D1$ dan $D2$ yang dipilih adalah $D1 = 10$ dan $D2 = 6$, sehingga himpunan semesta yang didapat adalah $U = [60,1910]$. Dengan memperhitungkan selisih data historis, didapatkan nilai mean = 95,31. Kemudian dihitung panjang interval sesuai dengan persamaan (5), sehingga didapat $l = 47,65$. Panjang interval yang telah dihitung kemudian dibulatkan sesuai dengan tabel basis interval, sehingga kita dapatkan panjang interval = 50. Jumlah interval (bilangan *fuzzy*) dihitung sesuai persamaan (6) sehingga didapat $p = 37$, yang artinya kita memperoleh 37 interval, yaitu $[60,110]$, $[110,160]$, $[160,210]$, ..., $[1810,1860]$, $[1860,1910]$. Tahap fuzzifikasi dilakukan sesuai banyaknya interval yang terbentuk. Setelah itu, kita membentuk *Fuzzy Logical Relationship* (FLR) dengan memperhatikan hubungan *fuzzy* A_i dari tahun ke tahun untuk $1 \leq i \leq 37$. Selanjutnya dibentuk FLRG, yang hasilnya ditampilkan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. FLRG Program Studi Statistika

Group	FLRG	Group	FLRG
1	A1→A1,A2,A3	7	A7→A3,A6
2	A2→A1,A2,A3,A5	8	A8→A5
3	A3→A2,A3,A4,A5	9	A11→A8
4	A4→A3,A5	10	A12→A7
5	A5→A2,A4,A6,A11	11	A16→A12
6	A6→A8	12	A37→A16

Dengan mempergunakan nilai tengah untuk masing-masing interval, maka defuzzifikasi dari FLRG dapat dilihat pada Tabel 7 berikut:

Tabel 7. Hasil Defuzzifikasi Program Studi Statistika

Group	Defuzzifikasi	Group	Defuzzifikasi
1	A1→135	7	A7→260
2	A2→173	8	A8→285
3	A3→210	9	A11→435
4	A4→235	10	A12→385
5	A5→323	11	A16→635
6	A6→435	12	A37→835

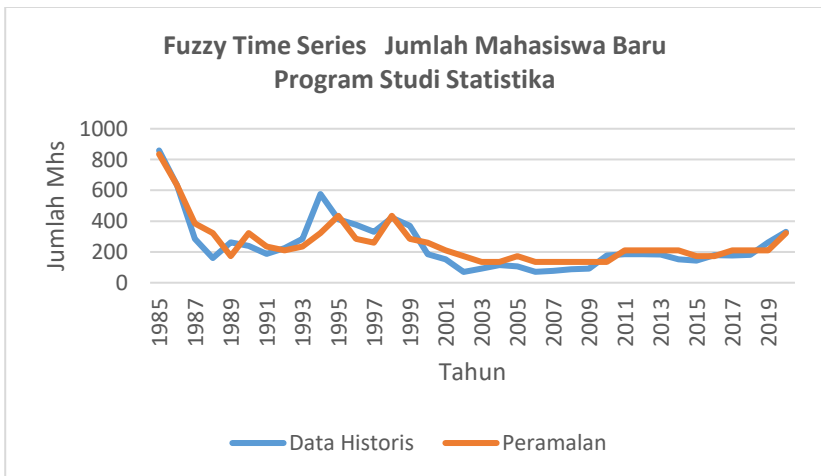
Hasil peramalan mahasiswa baru Program Studi Statistika FST dapat dilihat pada Tabel 8 berikut:

Tabel 8. Hasil Peramalan Program Studi Statistika

No	Tahun	Data Historis	Peramalan	No	Tahun	Data Historis	Peramalan
1	1984	1904		20	2003	92	135
2	1985	859	835	21	2004	114	135
3	1986	634	635	22	2005	106	173
4	1987	285	385	23	2006	71	135
5	1988	160	323	24	2007	76	135
6	1989	261	173	25	2008	88	135

No	Tahun	Data Historis	Peramalan	No	Tahun	Data Historis	Peramalan
7	1990	240	323	26	2009	92	135
8	1991	187	235	27	2010	176	135
9	1992	224	210	28	2011	185	210
10	1993	284	235	29	2012	185	210
11	1994	576	323	30	2013	184	210
12	1995	411	435	31	2014	152	210
13	1996	377	285	32	2015	144	173
14	1997	331	260	33	2016	179	173
15	1998	423	435	34	2017	177	210
16	1999	371	285	35	2018	180	210
17	2000	185	260	36	2019	262	210
18	2001	152	210	37	2020	331	323
19	2002	70	173				

Plot data historis dan hasil peramalan program studi Statistika digambarkan sebagai berikut.



Gambar 5. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi Statistika

Berdasarkan Gambar 5 dapat dibandingkan data historis dan data hasil peramalan jumlah mahasiswa baru program studi Statistika FST UT. Bentuk plot hasil peramalan terlihat mengikuti alur fluktuasi jumlah mahasiswa baru FST UT.

Tingkat *error* dari prediksi atau MAPE dihitung dengan rumus

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - p_i}{x_i} \right| \times 100\% \text{ dan menghasilkan nilai MAPE} = 11,85\%$$

Berdasarkan informasi bahwa FLR pada tahun 2019 ke 2020 adalah A5→ A6, maka bisa diramalkan bahwa jumlah mahasiswa baru pada tahun 2021 adalah A6 yang artinya 435 mahasiswa.

c. Average - based fuzzy time series Chen pada Program Studi Agribisnis

Berdasarkan data historis, didapatkan $X_{min} = 391$ dan $X_{max} = 1694$. Untuk mempermudah perhitungan, D1 dan D2 yang dipilih adalah D1 = 1 dan D2 = 16, sehingga himpunan semesta yang didapat adalah $U = [390,1710]$. Dengan memperhitungkan selisih data historis, didapatkan mean = 221,75. Kemudian dihitung panjang interval sesuai dengan persamaan (5), sehingga didapat nilai $l = 110,875$. Panjang interval yang telah dihitung kemudian dibulatkan sesuai dengan tabel basis interval, sehingga kita dapatkan panjang interval = 110. Jumlah interval (bilangan *fuzzy*), dihitung sesuai persamaan (6) dan menghasilkan $p = 12$, yang berarti terdapat 12 interval yang terbentuk, yaitu [390,500], [500,610], [610,720], ..., [1490,1600], [1600,1710].

Tahap fuzzifikasi dilakukan sesuai banyaknya interval. Berdasarkan FLR, kita mendapatkan FLRG untuk program studi Agribisnis yang dapat kita lihat pada Tabel 9 berikut:

Tabel 9. FLRG Program Studi Agribisnis

Group	FLRG	Group	FLRG
1	A1→A2	5	A5→A4
2	A2→A2,A3,A7	6	A6→A4
3	A3→A2,A3,A5	7	A7→A6,A7,A9
4	A4→A3,A4,A7	8	A12→A1

Dengan mempergunakan nilai tengah untuk masing masing interval, maka defuzzifikasi dari FLRG dapat dilihat pada Tabel 10 berikut:

Tabel 10. Hasil Defuzzifikasi Program Studi Agribisnis

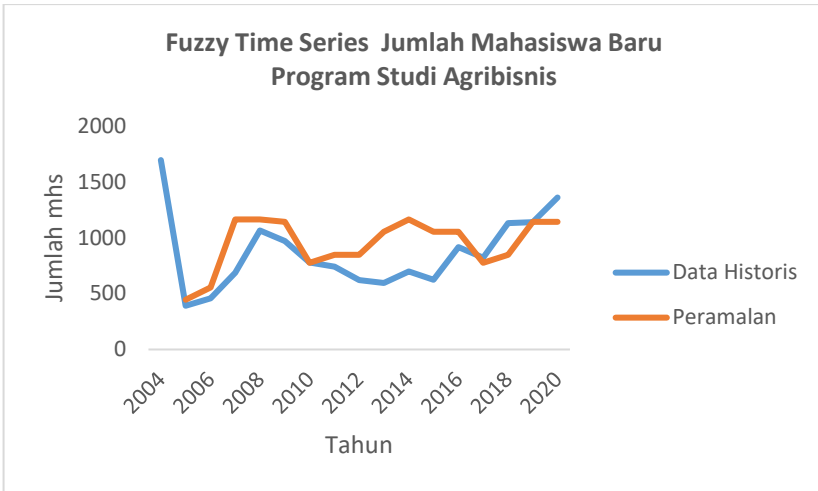
Group	Defuzzifikasi	Group	Defuzzifikasi
1	A1→555	5	A5→775
2	A2→1163	6	A6→775
3	A3→1053	7	A7→1142
4	A4→848	8	A12→445

Hasil peramalan mahasiswa baru Program Studi Agribisnis dapat dilihat pada Tabel 11 berikut.

Tabel 11. Hasil Peramalan Program Studi Agribisnis

No	Tahun	Data Historis	Peramalan	No	Tahun	Data Historis	Peramalan
1	2004	1694		10	2013	596	1053
2	2005	391	445	11	2014	697	1163
3	2006	457	555	12	2015	624	1053
4	2007	686	1163	13	2016	916	1053
5	2008	1065	1163	14	2017	820	775
6	2009	970	1142	15	2018	1130	848
7	2010	777	775	16	2019	1139	1142
8	2011	741	848	17	2020	1360	1142
9	2012	621	848				

Plot data historis dan hasil peramalan program studi Agribisnis digambarkan sebagai berikut.



Gambar 6. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi Agribisnis

Berdasarkan Gambar 6 dapat dibandingkan data historis dan data hasil peramalan jumlah mahasiswa baru program studi Agribisnis. Bentuk plot hasil peramalan terlihat mengikuti alur fluktuasi jumlah mahasiswa baru program studi Agribisnis.

Tingkat *error* dari prediksi atau MAPE dihitung dengan rumus

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - p_i}{x_i} \right| \times 100\% \text{ dan menghasilkan nilai MAPE} = 4,57\%$$

Berdasarkan informasi bahwa FLR pada tahun 2019 ke 2020 adalah A7→ A9, maka bisa diramalkan bahwa jumlah mahasiswa baru pada tahun 2021 adalah A9 yang artinya 1325 mahasiswa.

d. Average - based fuzzy time series Chen pada program studi Biologi

Berdasarkan data historis, kita mendapatkan $X_{\min} = 28$ dan $X_{\max} = 299$. Untuk mempermudah perhitungan, D1 dan D2 yang dipilih adalah D1 = 8 dan D2 = 1, sehingga himpunan semesta yang didapat adalah $U = [20,300]$. Dengan memperhitungkan selisih data historis, didapatkan mean = 22,37. Panjang interval sesuai dengan persamaan (5), sehingga didapat $l = 11,18$. Panjang interval yang telah dihitung kemudian dibulatkan sesuai dengan tabel basis interval, sehingga kita dapatkan

panjang interval = 20. Jumlah interval (bilangan *fuzzy*), dihitung sesuai persamaan (6) yang menghasilkan $p = 14$. Dengan demikian, interval yang diperoleh sebanyak 14 interval, yaitu [20,40], [40,60], [60,80], ..., [260,280], [280,300].

Tahap fuzzifikasi dilakukan sesuai banyaknya interval yang terbentuk. Setelah kita mendapatkan FLR, kita menghitung FLRG seperti ditampilkan pada Tabel 12 berikut.

Tabel 12. FLRG Program Studi Biologi

Group	FLRG	Group	FLRG
1	A1→A2	7	A7→A8
2	A2→A3,A5	8	A8→A9
3	A3→A3,A4	9	A9→A11
4	A4→A2,A6	10	A11→A12
5	A5→A6	11	A12→A14
6	A6→A4,A6,A7		

Dengan mempergunakan nilai tengah untuk masing masing interval, maka defuzzifikasi dari FLRG dapat dilihat pada Tabel 13 berikut:

Tabel 13. Hasil Defuzzifikasi Program Studi Biologi

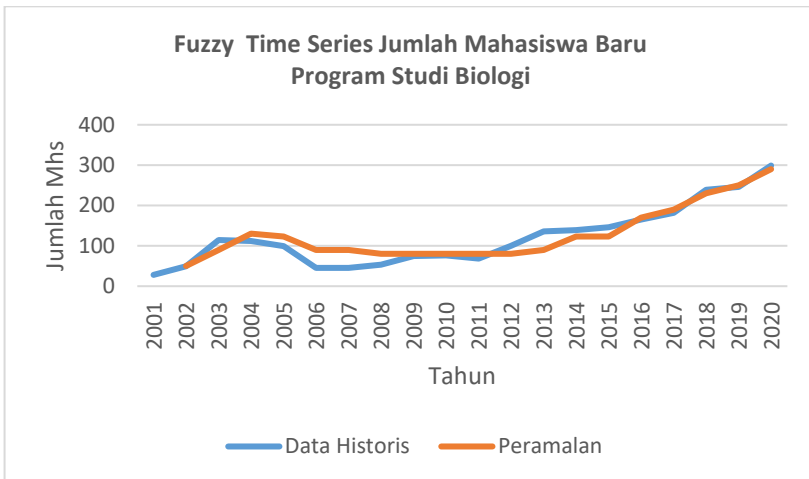
Group	Defuzzifikasi	Group	Defuzzifikasi
1	A1→50	7	A7→170
2	A2→90	8	A8→190
3	A3→80	9	A9→230
4	A4→90	10	A11→250
5	A5→130	11	A11→290
6	A6→123		

Hasil peramalan mahasiswa baru Program Studi Biologi dapat dilihat pada Tabel 14.

Tabel 14. Hasil Peramalan Program Studi Biologi

No	Tahun	Data Historis	Peramalan	No	Tahun	Data Historis	Peramalan
1	2001	28		11	2011	68	80
2	2002	49	50	12	2012	100	80
3	2003	114	90	13	2013	136	90
4	2004	112	130	14	2014	139	123
5	2005	99	123	15	2015	146	123
6	2006	45	90	16	2016	165	170
7	2007	45	90	17	2017	182	190
8	2008	53	80	18	2018	239	230
9	2009	75	80	19	2019	246	250
10	2010	76	80	20	2020	299	290

Plot data historis dan hasil peramalan program studi Biologi digambarkan sebagai berikut:

**Gambar 7.** Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi Biologi

Berdasarkan Gambar 7 dapat dibandingkan data historis dan data hasil peramalan jumlah mahasiswa baru program studi Biologi. Bentuk plot hasil peramalan terlihat mengikuti alur fluktuasi jumlah mahasiswa baru program studi Biologi.

Tingkat *error* dari prediksi atau MAPE dihitung dengan rumus

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - p_i}{x_i} \right| \times 100\% \text{ dan menghasilkan nilai MAPE} = 4,4\%$$

Berdasarkan informasi bahwa FLR pada tahun 2019 ke 2020 adalah A12→ 14, maka bisa diramalkan bahwa jumlah mahasiswa baru pada tahun 2021 adalah A14 yang artinya 290 mahasiswa.

e. Average - based fuzzy time series Chen pada Program Studi Teknologi Pangan (TP)

Dengan menggunakan data historis program studi TP, sehingga kita mendapatkan Xmin = 1 dan Xmax = 622. Untuk mempermudah perhitungan, D1 dan D2 yang dipilih adalah D1 = 1 dan D2 = 18, sehingga himpunan semesta yang didapat adalah U = [0,640]. Dengan memperhitungkan selisih data historis, kita mendapatkan mean = 37,72. Panjang interval dihitung sesuai dengan persamaan (5), sehingga didapat l = 18,86. panjang interval yang telah dihitung kemudian dibulatkan sesuai dengan tabel basis interval, sehingga kita dapatkan panjang interval = 20. Jumlah interval (bilangan *fuzzy*) dihitung sesuai persamaan (6), didapat p = 32, sehingga interval yang diperoleh sebanyak 32 interval, yaitu [0,20], [20,40], [40,60], ..., [620,640].

Tahap fuzzifikasi dilakukan sesuai banyaknya interval yang terbentuk. Kita melakukan perhitungan FLR dan akhirnya kita mendapatkan FLRG sebagai berikut: yang dapat dilihat pada Tabel 15.

Tabel 15. FLRG Program Studi TP

Group	FLRG	Group	FLRG
1	A1→A1,A2	5	A5→A4,A5
2	A2→A3	6	A13→A14
3	A3→A3,A4	7	A14→A13,A22
4	A4→A5	8	A22→A22,A32

Dengan mempergunakan nilai tengah untuk masing-masing interval, maka defuzzifikasi dari FLRG dapat dilihat pada Tabel 16 berikut:

Tabel 16. Hasil Defuzzifikasi Program Studi TP

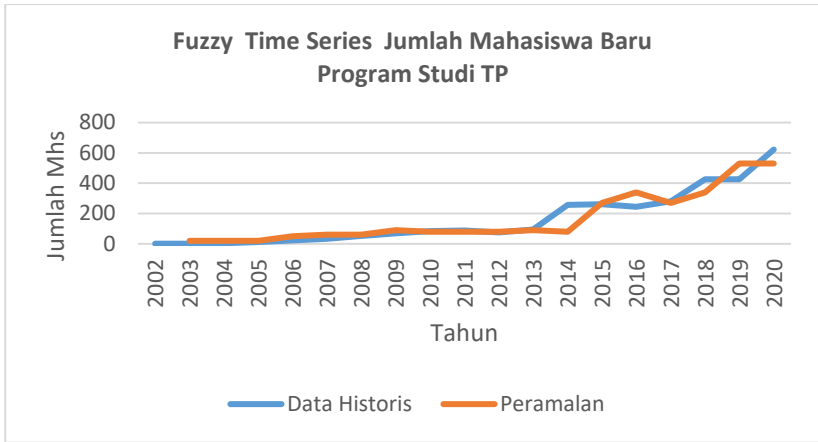
Group	Defuzzifikasi	Group	Defuzzifikasi
1	A1→20	5	A5→80
2	A2→50	6	A13→270
3	A3→60	7	A14→340
4	A4→90	8	A22→530

Hasil peramalan mahasiswa baru program studi TP dapat dilihat pada Tabel 17 berikut.

Tabel 17. Hasil Peramalan Program Studi TP

No	Tahun	Data Historis	Peramalan	No	Tahun	Data Historis	Peramalan
1	2002	1		11	2012	75	80
2	2003	1	20	12	2013	94	90
3	2004	3	20	13	2014	258	80
4	2005	13	20	14	2015	261	270
5	2006	23	50	15	2016	245	340
6	2007	33	60	16	2017	280	270
7	2008	53	60	17	2018	425	340
8	2009	70	90	18	2019	426	530
9	2010	84	80	19	2020	622	530
10	2011	88	80				

Plot data historis dan hasil peramalan program studi TP digambarkan sebagai berikut.



Gambar 8. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi TP

Berdasarkan Gambar 8 dapat dibandingkan data historis dan data hasil peramalan jumlah mahasiswa baru program studi TP. Bentuk plot hasil peramalan terlihat mengikuti alur fluktuasi jumlah mahasiswa baru program studi TP.

Tingkat *error* dari prediksi atau MAPE dihitung dengan rumus

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - p_i}{x_i} \right| \times 100\% \text{ dan menghasilkan nilai MAPE} = 29,6\%.$$

Hasil peramalan pada program studi TP paling tidak akurat dibandingkan dengan program studi lain. Hal ini karena perbandingan x_{max} dan x_{min} sangat besar. Berdasarkan informasi bahwa FLR pada tahun 2019 ke 2020 adalah $A22 \rightarrow A32$, maka bisa diramalkan bahwa jumlah mahasiswa baru pada tahun 2021 adalah $A32$ yang artinya 630 mahasiswa.

f. Average - based fuzzy time series Chen pada Program Studi Perencanaan Wilayah Kota (PWK)

Berdasarkan data historis, kita mendapatkan $X_{min} = 9$ dan $X_{max} = 519$. Untuk mempermudah perhitungan, $D1$ dan $D2$ yang dipilih adalah $D1 = 9$ dan $D2 = 1$, sehingga himpunan semesta yang didapat adalah $U = [0,520]$. Dengan memperhitungkan selisih data historis, kita

mendapatkan mean = 75,4. Panjang interval dihitung sesuai dengan persamaan (5), sehingga didapat $l = 37,7$. Panjang interval yang telah dihitung kemudian dibulatkan sesuai dengan tabel basis interval, sehingga kita dapatkan panjang interval = 40. Jumlah interval (bilangan *fuzzy*), yang dihitung dengan persamaan (6): menghasilkan $p = 13$. Dengan demikian, interval yang diperoleh sebanyak 13 interval, yaitu $[0,40]$, $[40,80]$, $[80,120]$, ..., $[440,480]$, $[480,520]$.

Tahap fuzzifikasi dilakukan sesuai banyaknya interval yang terbentuk. Hasil fuzzifikasi dilanjutkan dengan pembentukan FLR dan FLRG. Perhitungan FLRG untuk program studi PWK dapat dilihat pada Tabel 18.

Tabel 18. FLRG Program Studi PWK

Group	FLRG	Group	FLRG
1	A1→A2,A6	5	A6→A5,A8
2	A2→A1	6	A8→A8,A11
3	A3→A6	7	A11→A13
4	A5→A3		

Dengan mempergunakan nilai tengah untuk masing-masing interval, maka defuzzifikasi dari FLRG dapat dilihat pada Tabel 19 berikut:

Tabel 19 Hasil Defuzzifikasi Program Studi PWK

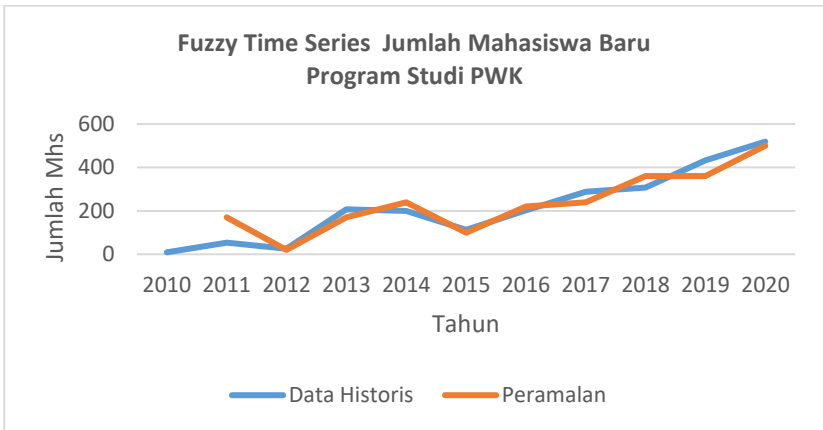
Group	Defuzzifikasi	Group	Defuzzifikasi
1	A1→170	5	A6→240
2	A2→20	6	A8→360
3	A3→220	7	A11→500
4	A5→100		

Hasil peramalan mahasiswa baru program studi PWK dapat dilihat pada Tabel 20 berikut.

Tabel 20. Hasil Peramalan Program Studi PWK

No	Tahun	Data Historis	Peramalan	No	Tahun	Data Historis	Peramalan
1	2010	9		7	2016	202	220
2	2011	54	170	8	2017	288	240
3	2012	26	20	9	2018	308	360
4	2013	207	170	10	2019	433	360
5	2014	200	240	11	2020	519	500
6	2015	113	100				

Plot data historis dan hasil peramalan program studi PWK digambarkan sebagai berikut.



Gambar 9. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi PWK

Berdasarkan Gambar 9 dapat dibandingkan data historis dan data hasil peramalan jumlah mahasiswa baru program studi PWK. Bentuk plot hasil peramalan terlihat mengikuti alur fluktuasi jumlah mahasiswa baru PWK.

Tingkat *error* dari prediksi atau MAPE dihitung dengan rumus

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - p_i}{x_i} \right| \times 100\%$$

dan menghasilkan nilai MAPE = 3,5%

Berdasarkan informasi bahwa FLR pada tahun 2019 ke 2020 adalah A11→ A13, maka bisa diramalkan bahwa jumlah mahasiswa baru pada tahun 2021 adalah A13 yang artinya 500 mahasiswa.

g. Average - based fuzzy time series Chen pada Program Studi Sistem Informasi

Program studi ini baru dibuka pada tahun 2019, sehingga datanya hanya ada 2 tahun. Langkah-langkah perhitungan seperti pada bagian A, sehingga didapatkan Xmin = 1344 dan Xmax = 2350 . Untuk mempermudah perhitungan, D1 dan D2 yang dipilih adalah D1 = 44 dan D2 = 450, sehingga himpunan semesta yang didapat adalah U = [1300,2800]. Dengan memperhitungkan selisih data historis, kita mendapatkan mean = 1006. Kemudian kita menghitung panjang interval sesuai dengan persamaan (5), sehingga didapat l = 503. Panjang interval yang telah dihitung kemudian dibulatkan sesuai dengan tabel basis interval, sehingga kita dapatkan panjang interval = 500. Kemudian kita tentukan jumlah interval (bilangan *fuzzy*), yang dihitung sesuai persamaan (6), sehingga didapat p = 3, sehingga interval yang diperoleh sebanyak 3 interval, yaitu [1300,1800], [1800,2300], [2300,2800].

Tahap fuzzifikasi dilakukan sesuai banyaknya interval yang terbentuk. Membentuk *Fuzzy Logical Relationship Group* (FLRG). Dengan mempergunakan nilai tengah untuk masing masing interval, maka defuzzifikasi dari FLRG dapat dilihat pada Tabel 21 berikut:

Tabel 21. Hasil Defuzzifikasi Program Studi Sistem Informasi

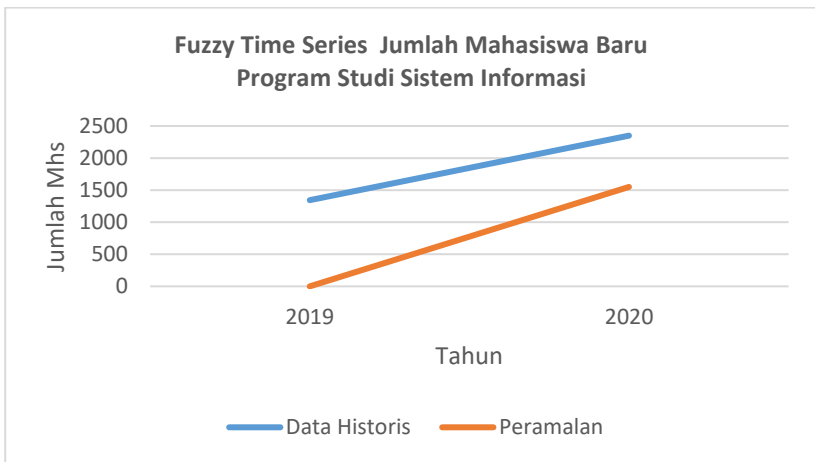
Group	Hasil Defuzzifikasi
1	A1→1550

Hasil peramalan mahasiswa baru program studi Sistem Informasi dapat dilihat pada Tabel 22 berikut.

Tabel 22. Hasil Peramalan Program Studi Sistem Informasi

No	Tahun	Jumlah Mhs	Peramalan
1	2019	1344	
2	2020	2350	1550

Plot data historis dan hasil peramalan program studi Sistem Informasi digambarkan sebagai berikut:



Gambar 10. Plot Data Historis dan Hasil Peramalan Program Studi Sistem Informasi

Berdasarkan Gambar 10 dapat dibandingkan data historis dan data hasil peramalan jumlah mahasiswa baru program studi Sistem Informasi. Bentuk plot hasil peramalan kurang akurat karena hanya ada 2 data.

Tingkat *error* dari prediksi atau MAPE dihitung dengan rumus

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - p_i}{x_i} \right| \times 100\% \text{ dan menghasilkan nilai MAPE} = 34\%$$

Nilai MAPE pada program studi Sistem Informasi cukup besar dan tidak akurat dalam melakukan prediksi. Hal ini dikarenakan data yang tersedia hanya selama 2 tahun.

Dari pemaparan diatas, kita bisa merangkum perbandingan akurasi peramalan tiap program studi dalam Tabel 23 berikut.

Tabel 23. Akurasi Peramalan Program Studi

No	Program Studi	Jumlah data historis	X_{\min}	X_{\max}	Akurasi
1	Matematika	37	35	693	9,85
2	Statistika	37	70	1904	11,85
3	Agribisnis	17	391	1694	4,57
4	Biologi	20	28	299	4,4
5	ITP	19	1	622	29,6
6	PWK	11	9	519	3,5
7	Sistem Informasi	2	1344	2350	34

Keterangan:

X_{\min} = jumlah mahasiswa baru yang paling sedikit dalam data historis

X_{\max} = jumlah mahasiswa baru yang paling banyak dalam data historis

Dari Tabel 23 tersebut kita menyimpulkan bahwa jumlah data historis, perbandingan yang signifikan antara X_{\min} dan X_{\max} mempengaruhi nilai akurasi. Pola data dalam tiap program studi juga sangat mempengaruhi nilai akurasi. Pola data pada program studi yang cenderung naik terus akan mendapatkan nilai akurasi yang baik dibandingkan dengan program studi yang jumlah mahasiswanya berfluktuasi naik dan turun. Program studi PWK mempunyai nilai MAPE yang kecil karena pola datanya cenderung meningkat di tiap tahun. Demikian juga dengan program studi Biologi dan program studi Agribisnis. Program studi TP mempunyai nilai MAPE yang tinggi karena data historis pada tahun pertama = 1 yang menyebabkan nilai MAPE menjadi tinggi. Hal ini karena nilai MAPE dihitung dengan persamaan (9) dan tergantung dengan data historis. Program studi Sistem Informasi mempunyai MAPE yang tinggi karena keterbatasan jumlah data historis. Karakteristik pola data masing masing program studi mempengaruhi

keakuratan peramalan. Hal ini sesuai dengan Rachim et al., (2020) yang menyatakan bahwa pemilihan metode harus mempertimbangkan pola data.

Hasil peramalan yang telah didapat bisa dipergunakan untuk persiapan proses pembelajaran di FST UT. Dengan adanya peramalan jumlah mahasiswa baru, seluruh program studi di FST UT bisa memperkirakan jumlah kebutuhan pencetakan bahan ajar, jumlah kelas dan jumlah tutor tutorial online, serta jumlah bahan pendukung pembelajaran lainnya.

KESIMPULAN

Average-based fuzzy time series Chen dapat dipergunakan untuk menghitung prediksi jumlah mahasiswa baru pada FST UT. Metode perhitungannya tidak rumit, hanya menggunakan aritmetika biasa dengan menggunakan Excell. Dalam penelitian ini, nilai MAPE terendah diperoleh untuk program studi PWK dan nilai MAPE tertinggi diperoleh program studi Sistem Informasi. Secara umum metode ini akurat, kecuali untuk program studi Sistem Informasi. Penelitian ini perlu dilanjutkan dengan metode lain misalnya *time invariant fuzzy time series* atau dengan menggunakan *higher order fuzzy time series*. Peramalan ini diharapkan dapat memberikan informasi kepada program studi untuk mempersiapkan bahan pendukung pembelajaran, misalkan persiapan bahan ajar dan persiapan jumlah kelas tutorial *online*, persiapan tutor pada tutorial *online* sesuai dengan kebutuhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arga, W. (1985). *Analisa runtun waktu teori dan aplikasi*. Yogyakarta: BPFE
- Chen, S. M. (1996). Forecasting enrollments based on fuzzy time series - fuzzy sets and systems. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 81, 311-319.
- Fauziah N., Wahyuningsih S., & Nasution Y. (2016). Peramalan menggunakan fuzzy time series chen (studi kasus: curah hujan di Samarinda). *Jurnal Statistika*, 4 (2), 52 – 61.
- Rachim F., Tarno T., & Sugito S. (2019). Perbandingan fuzzy time series dengan metode Chen dan metode S. R. Singh (studi kasus: nilai impor di Jawa Tengah periode Januari 2014 – Desember 2019). *Jurnal Gaussian*, 9(3), 306-315.
- Karmita S., Bramanto A., Gaffar, A. F., & Wiguna A, (2018). Prediksi jumlah mahasiswa baru menggunakan fuzzy time series – time invariant, *Prosiding Seminar Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi*, Vol 3, no 1, Maret 2018, 208 – 214.
- Lewis C. D. (1982). *Industrial and business forecasting methods: a practical guide to exponential smoothing and curve fitting*. London: Butterworth Scientific.
- Muhammad. (2016). Sebaran dan peramalan mahasiswa baru pendidikan matematika Universitas Muhammadiyah Purwokerto dengan metode time invariant fuzzy time series. *Matematika Jurnal*, 3 (2), 48 – 58.
- Rachmawati M., & Anifah L. (2019). Prediksi curah hujan menggunakan metode averaged based dan high order fuzzy time series di Bandar Udara Juanda. *JIEET*: 3 (1), 11 - 15 .
- Song & Chissom (1994). Forecasting enrollment with fuzzy time series – part II. *Fuzzy Set and System*, 62, 1-8.
- Xihao S., & Yimin L. (2008). Average based fuzzy time series models for forecasting shanghai compound index. *Word Journal of Modelling and Simulation*, 4, 104 – 111.



02

FOOD SECURITY AND HEALTH



**Mohamad Rajih Radiansyah
Athiefah Fauziyyah
Dini Nur Hakiki
Eko Yuliasuti Endah Sulistyawati**

.....
Peran *Computer Vision* dalam
Produksi Pangan dan Lingkungan Berkelanjutan

**Athiefah Fauziyyah
Dini Nur Hakiki
Eko Yuliasuti Endah Sulistyawati
Mohamad Rajih Radiansyah**

.....
Potensi Minuman Tradisional Indonesia
sebagai Produk Pangan Fungsional di Era *Society 5.0*

**Dini Nur Hakiki
Athiefah Fauziyyah
Eko Yuliasuti Endah Sulistyawati
Mohamad Rajih Radiansyah**

.....
Bligo (*Benincasa hispida*): Potensi dan Pengembangan Riset
sebagai Pangan Fungsional dan Produk Bernilai Tambah

PERAN COMPUTER VISION DALAM PRODUKSI PANGAN DAN LINGKUNGAN BERKELANJUTAN

COMPUTER VISION ROLE IN FOOD PRODUCTION AND SUSTAINABILITY

M. Rajih Radiansyah¹, Athiefah Fauziyyah², Dini Nur Hakiki³,
Eko Yuliasuti⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan Pertanian,
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
ing-mohamad@ecampus.ut.ac.id

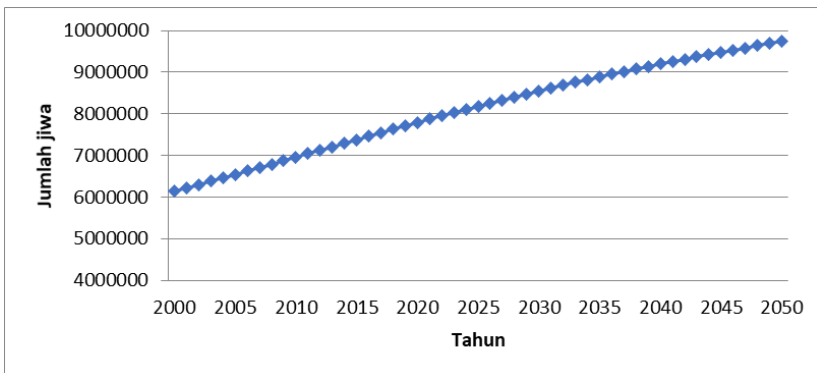
ABSTRAK

Artikel ini membahas tentang computer vision dan bagaimana perannya di era produksi yang berkelanjutan. Telah diketahui bahwa populasi manusia akan terus meningkat sehingga produksi pangan harus dapat menyeimbangkannya. Sejak awal budidaya pangan, teknologi berperan besar dalam produksi dan pengolahannya. Pada era Society 5.0, teknologi AI, robot dan mesin kerap digunakan dalam pengembangan produksi pangan yang berkelanjutan. Computer vision bukanlah hal yang baru, namun perkembangan teknologi ini kerap diantisipasi sebagai cara mengolah pangan yang cepat dan hemat. Teknologi ini dimanfaatkan sebagai metode analisa kualitas suatu pangan secara visual. Penerangan, kamera, color space dan teknik pengolahan gambar menjadi unsur-unsur yang penting dalam perancangan suatu sistem computer vision. Computer vision telah digunakan untuk menganalisis buah-buahan, sayuran dan bahan pangan lainnya. Computer vision diantisipasi dapat membangun masa depan yang lebih ramah lingkungan dan industri pangan yang berkelanjutan.

Kata Kunci: *computer vision, sustainability, machine learning, color space.*

PENDAHULUAN

Produksi pangan yang berkelanjutan (*sustainable*) merupakan topik hangat di industri pangan. Pada tahun 2050 yang akan datang, diprediksi bahwa populasi manusia akan mencapai lebih dari 9 milyar jiwa (FAO, 2009) (Gambar 1). Pertumbuhan populasi menyebabkan tantangan bagi industri pangan untuk dapat menyeimbangkan pertumbuhan populasi dengan memberikan nutrisi yang cukup dengan harga yang pantas. Kelangkaan pangan dapat menyebabkan malnutrisi, pertumbuhan tubuh yang terhambat dan risiko lebih pada penyakit kronis bagi anak-anak dan orang dewasa (Hartline-Grafton, 2017). FAO, dalam publikasi *The State of Food Security and Nutrition of the World 2021*, menyebutkan bahwa pada tahun 2020 saja ada sekitar 720 sampai 811 juta manusia di dunia mengalami kelaparan. Kelangkaan pangan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor dimulai dari pertumbuhan populasi yang berlebih, infrastruktur yang tidak memadai dan instabilitas lingkungan dikarenakan bencana, pandemik, dan perang (Breene, 2016). Dengan pertumbuhan global yang sangat cepat, terdapat ancaman yang dapat mempengaruhi ketahanan pangan di berbagai negara.



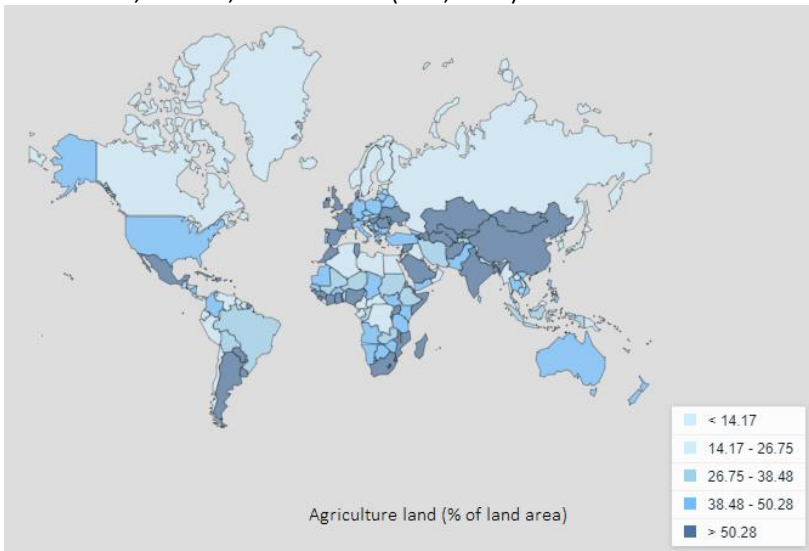
Sumber: FAO,2019

Gambar 1. Prediksi Pertumbuhan Populasi Dunia 2000- 2050

Ketahanan pangan (*food security*), seperti yang didefinisikan oleh *United Nations' Committee on Food Security* (CFS), adalah konsep dimana semua manusia memiliki akses kepada pangan yang bernutrisi, aman dan cukup, yang memenuhi kebutuhan nutrisi dan preferensi pangan untuk menjalani kehidupan yang aktif dan sehat (FAO, 2012). Ketahanan pangan memiliki 4 pilar yang penting yaitu: ketersediaan (*availability*), stabilitas (*stability*), utilisasi (*utilization*), dan aksesibilitas (*accessibility*) (Ashby, Kleve, McKechnie, & Palermo, 2016). Ketersediaan merujuk pada sumber pangan yang konsisten dan dapat diandalkan dengan kualitas yang baik untuk kehidupan yang aktif dan sehat. Kerawanan pangan (*food insecurity*) dapat berupa musiman maupun jangka panjang. Maka dari itu, stabilitas pangan itu penting bagi ketahanan pangan, dimana pangan tetap bisa diakses walau ada perubahan kondisi. Utilisasi mengacu pada konsumsi pangan yang sesuai dengan kebutuhan fisiologis, psikologis dan kultural seorang individu dan aksesibilitas berupa usaha yang dibutuhkan untuk menyediakan pangan tersebut, baik secara fisik, seperti transportasi, maupun ekonomi. Untuk menjaga agar kerawanan pangan tidak terjadi, maka syarat ketersediaan, aksesibilitas dan utilisasi pangan perlu dipenuhi dan stabil, tidak terpengaruhi oleh perubahan harga, kondisi dan lingkungan. Oleh karena itu, produksi pangan harus dapat berkembang untuk menghindari kerawanan pangan tersebut.

Pada tahun 2015, United Nations mencetuskan 17 sasaran yang disebut dengan *Sustainable Development Goals* (SDG) (United Nations, t.t.). Sasaran-sasaran tersebut dicetuskan sebagai upaya mempromosikan kemakmuran dan menjaga lingkungan secara global. *Sustainable development* merupakan ide yang paling ditekankan dalam peng gagasan ini. Menurut *UN World Commission on Environment and Development* (1987), *Sustainable development* adalah perkembangan yang memenuhi kebutuhan sekarang tanpa membahayakan kebutuhan generasi yang akan datang. Dalam produksi pangan dan pertanian, kebutuhan untuk menjadi lingkungan berkelanjutan itu sangat penting. Dengan bertambahnya populasi manusia yang sangat pesat, lahan untuk bertanam dan memproduksi makanan semakin menyempit. Dalam produksi pangan, tantangan terdapat pada sumber daya alam, seperti lahan dan yang makin berkurang dan tidak dapat mengimbangi pertumbuhan populasi manusia (Schneider et al., 2011). Berbagai ancaman seperti *climate change*, konflik dan resesi ekonomi juga dapat mengancam ketahanan pangan tersebut.

Ditambah dengan kebutuhan pangan yang akan naik dengan bertambahnya populasi manusia, maka industri pangan harus berkembang ke arah yang lebih produktif tetapi tanpa mengorbankan lingkungan dan alam sekitar. Perkembangan inovatif dalam produksi pangan diperlukan untuk mempertahankan ketahanan pangan. Produksi pangan yang berkelanjutan akan berkontribusi pada 4 pilar ketahanan pangan: ketersediaan, aksesibilitas, utilisasi, dan stabilitas (FAO, 2021).



Sumber: The World Bank, 2018

Gambar 2. Penggunaan Lahan Dunia untuk Agrikultur pada Tahun 2018

Produksi pangan yang berkelanjutan merupakan produksi pangan yang berusaha untuk memaksimalkan luaran produksi dengan meminimalisir kehilangan produksi dan kerusakan lingkungan. FAO mengatakan bahwa ada 5 prinsip dalam *sustainability* dalam pangan dan pertanian. Prinsip-prinsip tersebut adalah meningkatkan produktivitas, lapangan kerja dan penambahan nilai dalam sistem pangan, melindungi dan meningkatkan sumber daya alam, memperbaiki komunitas dan ekosistem serta mengadaptasikan kebijakan kepada tantangan baru (FAO, 2021). Penggunaan lahan merupakan pengukuran yang penting dalam menilai produktivitas dari sebuah industri pertanian maupun pangan diikuti oleh

tenaga kerja dan modal (FAO, 2017). Tetapi menurut WWF, pertanian telah memakai 50% dari lahan bumi yang dapat dihuni (WWF, 2020). Penggunaan lahan dunia diilustrasikan pada Gambar 2. Penggunaan lahan pertanian, baik untuk pangan berupa tanaman maupun ternak, bervariasi pada berbagai wilayah. Mulai dari 10 persen penggunaan lahan di daerah sub sahara hingga 80 persen di kebanyakan daerah lainnya (Ritchie & Roser, 2019). Kondisi tersebut mengharuskan produksi pangan dapat berkembang dengan efisien guna memenuhi tuntutan pasar tanpa mengorbankan sumber daya secara berlebihan.

Berbagai inovasi di bidang pangan terus mengalami perkembangan untuk menghadapi tuntutan pasar dan untuk mempercepat produksi pangan. Ada berbagai cara yang dipakai untuk melakukan praktek produksi berkelanjutan. Salah satu inovasi tersebut adalah dengan menggunakan otomatisasi dalam produksi pangan. Di masa yang akan datang, mesin produksi pangan yang sekarang digunakan akan digantikan dengan mesin yang memanfaatkan otomatisasi dan *artificial intelligence*. Penerapan otomatisasi berdampak pada bagaimana produksi dilakukan, tenaga kerja, manajemen energi dan lingkungan (Soltau, 2016). Namun, otomatisasi produksi pangan mempunyai tantangan tersendiri. Dibandingkan dengan industri lain, industri pangan mempunyai banyak variabel dalam bentuk bahan baku dengan perbedaan ukuran, bentuk dan berat yang mempersulit kelancaran produksi (Hoden, 2011). Maka patut dipertanyakan bagaimana industri pangan dapat mengoptimisasikan proses ini secara baik. Teknologi otomatisasi yang dimanfaatkan ini dapat menjadi cara menghadapi masa depan yang lebih baik.

1. Sejarah Produksi Pangan

Industri pangan merupakan industri yang terus berkembang dari waktu ke waktu. Penggunaan alat dan mesin bukanlah hal yang baru. Dimulai dari penanaman tanaman pangan berupa benih, hingga tersaji ke meja makan, alat dan mesin digunakan untuk berbagai tahap dalam pengolahan pangan. Manusia merubah pola hidup dari seorang pemburu menjadi petani atau peternak sekitar 11000 tahun sebelum masehi. Awal masa pertanian ditandai dengan budidaya tanaman gandum dan sereal di Syria dan tanaman padi di Cina. Budidaya hewan ternak pertama diperkirakan muncul di daerah Timur Tengah sekitar 10000 tahun yang lalu (National Geographic

Society, 2019). Sejak masa itu, manusia telah menggunakan alat untuk melakukan budidaya tanaman pangan dan pengolahan pangan (Janick, 2002).

Pemanfaatan teknologi juga sangat berperan pada perkembangan pengolahan pangan dan pertanian. Di mulai dari abad pertengahan, alat pembajak tanah mulai digunakan pada lahan pertanian seperti terlihat pada Gambar 3. Teknik bertani dan teknologi baru mulai bermunculan pada abad tersebut. Inovasi seperti rotasi tanaman panen di Eropa dan teknologi seperti penggiling bertenaga air di Timur Tengah mulai dikembangkan (Lobb, 2021). Perubahan besar di bidang pangan dan pertanian terjadi ketika masa revolusi industri dimulai. Revolusi industri merupakan perkembangan teknologi yang merubah cara pangan diolah dari secara manual menjadi menggunakan mesin.



Sumber: Anonymous, 1851

Gambar 3. Ilustrasi Pembajakan Tanah oleh Petani di Mongolia

2. Revolusi Industri Pangan

Revolusi Industri merupakan perubahan besar dalam sejarah manusia. Berbagai industri mengalami modifikasi dalam menangani produknya. Mulai sekitar abad ke 18 hingga sekarang, telah terjadi beberapa revolusi industri yang kerap merubah gaya hidup manusia. Revolusi industri dimulai pada sekitar pada tahun 1760, dimana mesin mulai menggunakan tenaga air atau uap (*steam*) (Hudson, 2014). Jideani et al. (2020) mengatakan ada 4 masa dimana revolusi industri terjadi. Penggunaan air atau uap pada mesin ini disebut dengan revolusi industri pertama. Masa ini adalah waktu dimana mesin digunakan untuk kepentingan pabrik. Penggunaan batu bara menggeser sektor pertanian dan mengangkat sektor industri mesin dan manufaktur sebagai penghasil utama masyarakat di Eropa pada masa itu. Namun, perkembangan ini menyebabkan timbulnya ide-ide baru dalam cara mengolah dan mengawetkan pangan. Dimulai dari teknik preservasi makanan menggunakan gelas yang dicetuskan oleh Nicholas Appert untuk memenangkan hadiah uang dari Napoleon (Featherstone, 2012). Lalu penemuan seperti penggiling bertenaga uap, pasteurisasi, pendingin dan timbangan mulai bermunculan.

Revolusi industri kedua ditandai dengan munculnya penggunaan energi listrik dan bahan bakar minyak pada mesin. Alat yang dulunya menggunakan uap atau air mulai diganti dengan oli atau listrik yang lebih efisien dan cepat. Pada permulaan abad ke 20, mesin-mesin inovasi seperti *freeze dryer*, *drum dryer*, dan *pasteurizer* mulai digunakan dalam proses pembuatan makanan olahan. Mesin-mesin ini menggunakan oli atau listrik sebagai sumber energinya. Lalu revolusi industri ketiga terjadi pada sekitar tahun 1960 dimana internet dan teknologi informasi berperan dalam proses pengolahan makanan walau masih terbatas. Pada masa ini, yang disebut masa *digital revolution*, komputer mulai mengambil alih peran manusia dalam operasi mesin. Pengembangan teknologi seperti *high-temperature short-time pasteurizer*, mesin pengemasan dan mesin refrigerasi yang lebih baik membuat produksi pangan lebih mudah dan dapat bertahan lebih lama (Jideani et al., 2020).

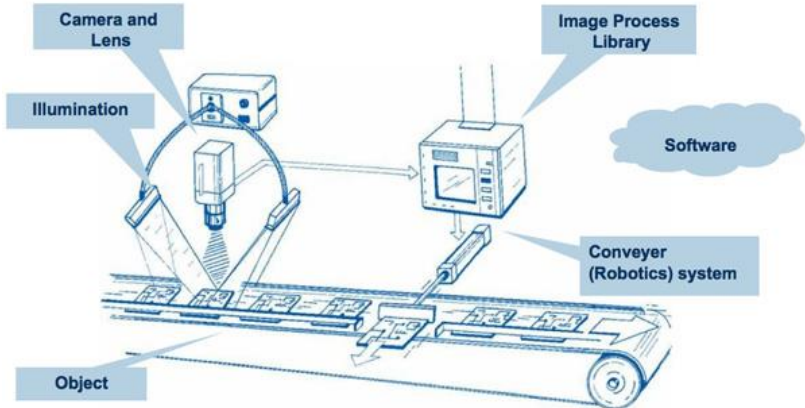
Revolusi industri yang keempat adalah era yang berbasis otomatisasi dan teknologi informasi. Mulai dari abad ke 21, Peran teknologi semakin besar dalam berbagai industri. Penggunaan *artificial intelligence*, internet, bioteknologi, *blockchain* dan robot mengubah cara membudidayakan dan

mendistribusikan pangan. Pengaplikasian robot untuk panen merupakan salah satu contoh inovasi di masa revolusi industri keempat (Pultarova, 2017). Suatu penelitian mencoba menggunakan robot untuk menggantikan berbagai pekerjaan manual untuk mengatasi *bottleneck* proses (Accorsi et al., 2019). Penelitian lain juga menggunakan otomatisasi untuk memotong salad untuk menghemat waktu dan menjaga kualitas (Guillaume, Balerin, & Bourely, 1992). Otomatisasi juga dimanfaatkan di berbagai bagian industri pangan seperti roti, susu, permen dan berbagai jenis daging (Caldwell, Davis, Moreno Masey, & Gray, 2009). *World Economic Forum* (2018) menyebutkan ada beberapa teknologi yang berpotensi dalam industri pangan untuk mentransformasi industri tersebut menjadi lebih berkelanjutan, seperti: pemanfaatan *blockchain* untuk *traceability* makanan yang dapat mereduksi kehilangan pangan; Penggunaan *big data* untuk meningkatkan produksi dan keuntungan petani dan peternak; Rekeyasa makanan yang dikhususkan untuk penderita obesitas; serta penggunaan teknologi *computer vision*, *machine learning* dan AI yang dapat dimanfaatkan untuk keamanan dan analisa kualitas pangan. Harapan dari inovasi-inovasi ini adalah agar bisa mendukung keinginan dunia terhadap terciptanya industri yang lebih sehat, efisien dan berkelanjutan. *Computer vision*, terutama, merupakan salah satu teknologi yang dimanfaatkan sebagai metode mencapai target berkelanjutan yang ditetapkan oleh lembaga dunia seperti FAO.

3. **Computer Vision**

Computer vision (CV) adalah proses dimana mesin seperti komputer digital secara otomatis memproses sebuah gambar dan melaporkan isi dari gambar tersebut (Snyder & Qi, 2017). *Machine vision*, *image understanding*, dan *high level image processing* merupakan nama lain dari metode ini. CV mengenali suatu pola di dalam gambar dan menginterpretasikannya dalam bentuk data dari gambar tersebut. Saat ini, aplikasi *computer vision* di dalam industri semakin banyak digunakan. Metode ini diterapkan di berbagai macam bidang baik untuk pertanian dan produksi pangan, industri robotik, inspeksi barang manufaktur dan kontrol kualitas suatu barang (Cubero et al., 2011). CV juga digunakan untuk mendeteksi penyakit dan cacat pada daging ayam dan buah apel (Chen et al., 2002). Aplikasi yang menggunakan metode ini pada produksi pangan banyak terletak pada inspeksi produk, terutama

produk sayuran dan buah-buahan (Saldaña, Siche, Luján, & Quevedo, 2013). Contoh skematis sebuah sistem *computer vision* pada suatu proses produksi dapat dilihat di gambar 3. Gambar tersebut menunjukkan sistem *line* produksi yang menggunakan sistem *computer vision* untuk menyeleksi produk.



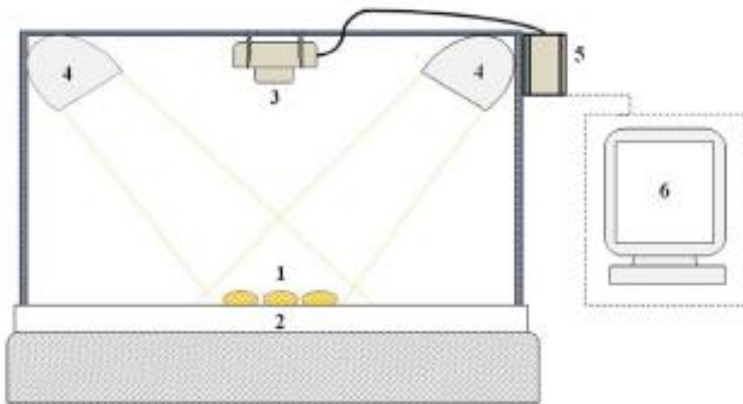
Sumber: European Editors, 2012

Gambar 4. Contoh Rancangan Sistem *Computer Vision* pada Suatu *Line* Produksi

CV berfungsi menyederhanakan proses pemeriksaan kualitas pada suatu produk. Inspeksi dengan menggunakan CV memberikan fleksibilitas dan repetisi yang stabil dengan biaya yang relatif rendah. Inspeksi manual menggunakan manusia mempunyai kekurangan, dimana inspeksi manusia bersifat subjektif dalam mengidentifikasi faktor kualitas seperti warna, rasa dan tekstur (Patel, Kar, Jha, & Khan, 2012). Akan tetapi, CV juga memiliki kekurangan di industri pangan terutama dalam menseleksi kualitas bahan baku. Bahan baku pangan sangat bervariasi dalam hal warna, tekstur, bentuk dan ukurannya. Buah yang baru matang bisa secara kualitas berbeda dengan buah yang sudah lebih lama matang. Faktor luar seperti temperatur dan humiditas dapat juga mengubah bentuk dan warna sayuran atau buah-buahan. Identifikasi objek asing pada produk juga penting agar kualitas produk luarannya tidak menurun (Saldaña et al., 2013). Agar sebuah sistem CV dapat berjalan dengan baik, kualitas gambar yang dihasilkan harus dapat

memberikan informasi yang cukup. Untuk itu, peralatan pengambilan gambar, terutama kamera dan penerangan, harus memadai.

Sistem sebuah CV pada umumnya mempunyai 5 komponen yaitu: penerangan, kamera, penangkap data gambar (*image capture board*), *software* dan *hardware* komputer yang dipakai (Patel et al., 2012). Produk yang ingin dianalisa akan ditempatkan di sebuah wadah atau *conveyer* dimana lampu akan meneranginya. Kemudian gambar diambil dan kemudian diproses oleh program komputer yang kebanyakan berbasis *software* berhak cipta seperti MATLAB atau Visual C++ (Vithu & Moses, 2016). Dalam pengambilan data, kamera, penerangan dan latar belakang merupakan hal yang sangat menentukan dalam pembuatan data yang baik dan valid. Rangkaian dasar sebuah sistem CV dapat dilihat pada Gambar 4 dan contoh rangkaian sederhana sebuah sistem CV terdapat pada gambar 5.



Sumber: Vithu & Moses, 2016.

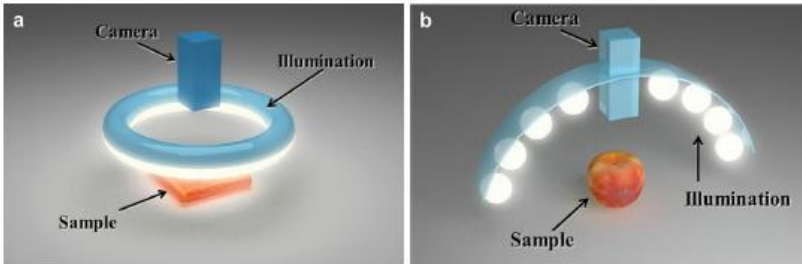
Gambar 5. Rangkaian dasar sebuah sistem CV: (1) Sampel; (2) Alas/wadah sampel dengan latar belakang yang sesuai; (3) Kamera; (4) Sumber cahaya; (5) *Image capture board*; (6) Komputer



Gambar 6. Sistem CV Statis Berupa Kotak 70 m³ dengan Penerangan Lampu *Fluorescent*, Kamera Canon dan Wadah untuk Sampel.

4. Penerangan

Penerangan (*Illumination*) yang baik merupakan hal penting dalam sistem CV untuk dapat bekerja dengan baik. Tujuan dari desain penerangan adalah menciptakan keadaan yang konsisten untuk menghilangkan variasi dalam pengambilan gambar, sehingga dapat menghasilkan penerangan yang menyeluruh dan menghilangkan *noise* (cacat pada gambar). Pada CV, jenis sumber cahaya yang digunakan dapat beragam, seperti: lampu pijar (*incandescent*), lampu berpendar (*fluorescent*), halogen, LED atau Xenon. Selain jenis sumber cahaya, ada dua hal penting lainnya pada konfigurasi cahaya CV, yaitu terkait posisi pencahayaan dan bentuk dari cahaya yang disinarkan. Untuk posisi pencahayaan, dapat berupa *back lighting* atau *front lighting*, sedangkan untuk bentuk cahaya yang disinarkan dapat berupa *pointed lighting* atau *diffused lighting* tergantung kebutuhan penggunaan CV. Sebagaimana yang dilaporkan Patel et al., (2012), bahwa untuk sampel yang berbeda membutuhkan jenis dan konfigurasi cahaya yang berbeda pula. Jenis lampu yang sering dipakai dalam sistem CV adalah lampu pijar dan lampu berpendar. Konfigurasi cahaya yang sering digunakan adalah dalam bentuk ring dan difusi (Wu & Sun, 2013). Contoh konfigurasi dapat dilihat pada Gambar 6. Latar belakang juga perlu diperhatikan dalam merancang sistem CV demi menghasilkan data gambar yang baik, tidak menghasilkan bayangan dan mendapatkan kontras warna yang baik (Guevara-Hernandez & Gomez-Gil, 2011).



Sumber: Wu & Sun, 2013

Gambar 7. Konfigurasi Iluminasi Sistem CV: (a) *Ring Illuminator*;
(b) *Diffuse Illuminator*

5. Kamera

Kamera digunakan sebagai pengambil gambar untuk diproses oleh perangkat *software*. Kamera digital menangkap cahaya yang dipantulkan oleh sampel menjadi sebuah data yang bisa diproses. Secara umum, kamera berbasis sensor CCD (*Charged Coupled Device*) merupakan pilihan populer pada penggunaan sistem CV (Cubero et al., 2011). Namun kamera berbasis sensor CMOS (*complementary metal-oxide-semi conductor*) mulai banyak digunakan untuk menggantikan kamera berbasis sensor CCD dalam perancangan sistem CV. Perbedaan pada kedua jenis kamera tersebut, terdapat pada kualitas gambar yang dihasilkan dan harganya. CMOS lebih murah tetapi kurang sensitif dibandingkan kamera CCD. Sensor CCD diisi secara pasif dan setiap pixel gambar terproses secara berurut, sehingga gambar lebih seragam dan berkualitas. Sedangkan kamera sensor CMOS menciptakan gambar digital secara tidak sinkronis (Fernandes, Dórea, & Rosa, 2020). Kamera CCD lebih sering digunakan karena gambar yang dihasilkan lebih detail. Namun sejalan dengan waktu, kamera CMOS akan dapat menyaingi kamera CCD dalam kualitas gambar yang dihasilkan dan harga yang kompetitif (Waltham, 2013).

6. Pengolahan Gambar

Untuk mendapatkan hasil analisa yang valid, maka gambar hasil tangkapan kamera, diolah menggunakan *software* tertentu. Cara memproses suatu gambar dapat dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu *low*

(rendah), *mid* (tengah) dan *high* (tinggi) *level image processing*. Pengolahan gambar level rendah meliputi proses pengambilan gambar dan *pre-processing*. Level tengah meliputi membuat segmentasi dan merepresentasikan gambar sedangkan level tinggi meliputi merekognisi dan mengintrepertasikan gambar (Patel et al., 2012). Pengolahan dan analisis gambar adalah kunci terpenting dalam CV. Pengolahan gambar dilakukan agar gambar yang telah diperoleh dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut yang bisa menghasilkan informasi kuantitatif yang berpengaruh pada penentuan keputusan. Gambar yang diperoleh, selanjutnya diproses melalui metode pengolahan gambar seperti segmentasi, perubahan ukuran dan *filtering* (Patel et al., 2012; Vithu & Moses, 2016). Dalam menganalisa gambar, analisa warna merupakan salah satu cara untuk mengolah data.

7. Analisis Warna

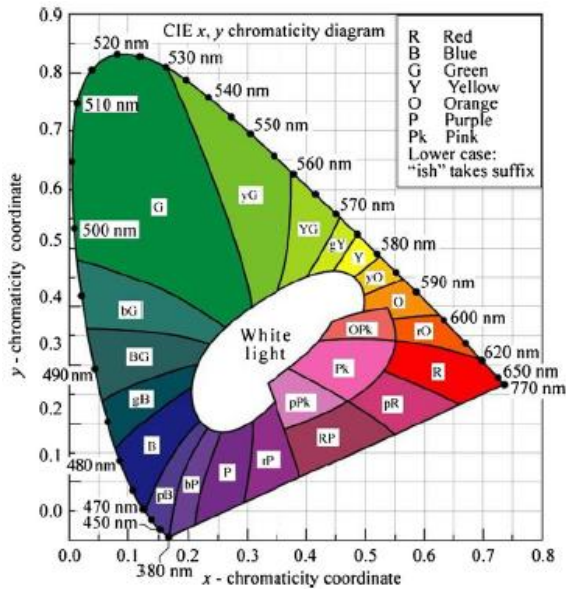
Warna merupakan salah satu atribut kualitas pada produk makanan. Tekstur, bentuk, ukuran dan warna merupakan aspek-aspek penting dalam penilaian kualitas. Aspek lain seperti kilat dan keseragaman juga memberikan persepsi berbeda pada setiap pangan (Hutchings, 1999). Warna merupakan hal termudah bagi konsumen untuk mengevaluasi kualitas suatu produk sebelum mengkonsumsinya (M Markovic, Ilic, Markovic, Simonovic, & Kosanic., 2013). Konsumen acapkali mengaitkan rasa, keamanan, ketahanan, nutrisi dan kepuasan terhadap suatu produk pangan dengan warna. Hal ini dijelaskan oleh Kang, East, & Trujillo,, (2008) bahwa warna suatu bahan pangan terkait erat dengan sifat fisik, kimia dan sensori suatu produk. Warna juga bisa merubah persepsi rasa pada produk pangan (Garber, Hyatt, & Starr, 2000), karena warna merupakan indikator kualitas yang kuat. Karakter bahan pangan inilah yang dibaca dalam sistem CV untuk menganalisa kualitas secara non-destruktif.

Kolorimetri adalah ilmu dalam pengukuran warna secara kuantitatif. Hal ini digunakan di dalam industri dan penelitian untuk memberikan angka kepada warna dan menandakan perbedaan warna pada dua hal yang mungkin sepiantas terlihat sama. Kolorimetri berbasis pada persepsi manusia terhadap warna. Kolorimetri menggunakan spektroskopi untuk menganalisa suatu warna. Warna merupakan cahaya yang terpantulkan oleh suatu objek. Cahaya yang terpantulkan mempunyai panjang gelombang yang berbeda-beda. Mata manusia mempunyai reseptor untuk tiga warna primer: merah,

biru, hijau dan campuran dari tiga warna tersebut. Ketika mata menerima cahaya yang terpantul suatu alas, reseptor warna tersebut memberikan signal ke otak memberikan sensasi yang beragam. Menurut *Commission Internationale de l'Eclairage's* (CIE), komisi internasional dalam penerangan, ketiga reseptor ini disebut dengan *tristimulus values* yang diwakili dengan symbol X (merah), Y (hijau) dan Z (biru). Sensasi-sensasi yang dialami saat mata menangkap cahaya adalah kecerahan (*Lightness*), putih-gelap (*brightness*), *hue*, *chroma* dan saturasi (Pathare, Opara, & Al-Said, 2013).

Untuk menganalisa warna, berbagai sensasi yang dialami manusia harus dapat dikuantifikasi dan mempunyai suatu standar. *Color space* merupakan representasi warna dan kombinasinya dalam bentuk angka. Metode inilah yang dapat menspesifikasi warna dan menunjukkannya secara visual. Dalam kolorimetri, penghitungan kuantitatif warna ini adalah dengan menggunakan model seperti RGB, XYZ, CIE L*a*b* dan CIE L*c*h (Gilchrist & Nobbs, 2017). Mereka merupakan contoh beberapa sistem *color space* yang populer digunakan dalam analisa warna.

RGB merupakan singkatan dari ketiga warna primer, *red* (merah), *green* (hijau) dan *blue* (biru). RGB merupakan salah satu *color space* yang pertama dirumuskan. Pada tahun 1931, CIE menciptakan *color space* tersebut bernama CIE RGB (Smith & Guild, 1931). Dari eksperimennya, Smith dan Guild (1931) memetakan warna dan mengklasifikasinya ke dalam sebuah diagram Yxy. Contoh diagram dapat dilihat di Gambar 7. Namun RGB memiliki kelemahan berupa ketergantungan terhadap parameter dan alat yang digunakan (*device-dependent*) maka CIE XYZ yang merupakan derivasi dari CIE RGB dengan memfaktorkan pencahayaan (*luminescence*). Perubahan ini juga menghilangkan ketergantungan pada alat (*device-independent*).

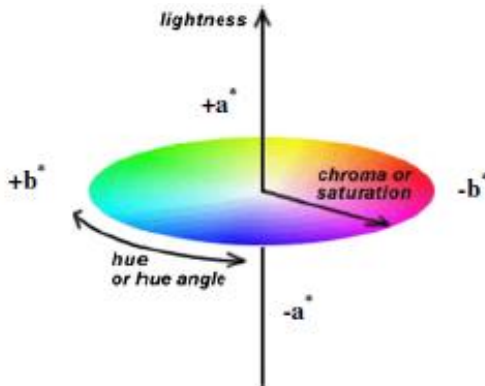


Sumber: Pathare et al., 2013

Gambar 8. Diagram Kromasitas Yxy

Color space CIE LAB merupakan perkembangan dari sistem CIE XYZ. Sistem ini didefinisikan oleh CIE pada tahun 1976 dan sejak itu digunakan pada berbagai industri untuk kontrol dan manajemen warna (Konika Minolta, 2018). *Color space* CIE LAB menggunakan 3 parameter yaitu L^* , a^* dan b^* . L mengindikasikan kecerahan (*lightness*) yang menandakan terang dan gelap suatu warna. Parameter ini berkisar dari 0 (gelap) ke 100 (terang). Parameter a dan b merupakan parameter yang menunjukkan warna titik yang diukur. Kedua parameter ditandai oleh tanda positif (+) dan negatif (-). Parameter a merupakan kontribusi warna dari hijau ($-a^*$) ke merah ($+a^*$) sedangkan b merupakan kontribusi warna dari biru ($-b^*$) ke kuning ($+b^*$) (Li & Jain, 2015). CIE $L^*c^*h^\circ$ juga mempunyai konsep yang sama. Parameter a^* dan b^* digabungkan menjadi 2 parameter baru yaitu *chroma* (c^*) dan *hue* (h°). *Chroma* adalah saturasi suatu intensitas atau kepekatan warna dari cerah hingga kelam. Semakin pekat suatu warna, maka parameter chroma akan semakin tinggi. *Hue* adalah atribut kualitatif yang membedakan warna.

Dalam diagram *color space* CIE LCH, hue dijelaskan dalam bentuk sudut derajat (Pathare et al., 2013). Representasi kedua konsep ini dapat dilihat di Gambar 8.



Sumber: Pathare et al., 2013

Gambar 9. Diagram CIE LAB dan LCH untuk parameter *lightness* (L^*), *green – red* (a^*), *blue – yellow* (b^*), *chroma* (c^*) dan *hue* (h°).

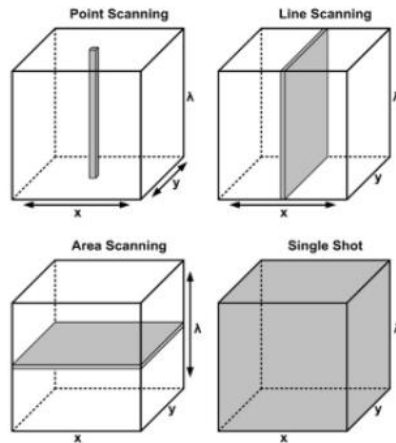
Color space yang juga sering digunakan dalam CV adalah sistem HSI (*hue-saturation-intensity*) dan variasinya, HSV (*hue-saturation-value*), HSB (*hue-saturation-brightness*) dan HSL (*hue-saturation-lightness*). Sistem HSI membedakan informasi warna dengan intensitasnya. *Hue* menggambarkan warna basis dan *saturation* menggambarkan kemurnian warna. Jumlah cahaya disebut dengan *intensity*, yaitu kecerahan warna (Cheng, Jiang, Sun, & Wang, 2001). Dalam aplikasi CV, *color space* yang digunakan dapat beragam. RGB, CIE LAB dan HSI beserta variasinya sering digunakan dalam aplikasi CV. *Color space* RGB digunakan karena kamera biasa dapat dengan mudah mengambil parameter warna RGB. Namun, RGB dianggap tidak linear dan tergantung pada jenis kamera yang digunakan. HSI dan variasinya juga tidak linear, tetapi mudah dimengerti HSI dan CIE LAB dapat menghilangkan faktor cahaya yang biasa mengganggu analisa warna. CIE LAB banyak digunakan apabila aplikasi diperlukan untuk meniru persepsi mata manusia (Boriero, 2011). Dengan menggunakan warna sebagai parameter, CV bisa membaca perbedaan produk serta menganalisa atribut warna dari produk pangan. CV dapat digunakan sebagai alat pengukur kualitas yang non destruktif.

8. Hyperspectral Imaging (HI)

Di masa yang akan datang, kebutuhan untuk analisa produk yang non destruktif akan semakin dicari, salah satunya dengan menggunakan CV. Namun CV masih mempunyai beberapa kekurangan, karena CV hanya menganalisa secara eksternal melalui warna. Kualitas seperti komposisi kimia suatu produk tidak dapat dianalisa. Sistem CV juga tidak efektif pada produk dengan warna terlalu mirip (Sun, 2010). Metode pengambilan gambar dan spektroskopi yang merupakan dasar dari CV mempunyai kendalanya tersendiri pada pengambilan data yang lebih spesifik. Oleh karena itu, teknik pengambilan gambar melalui *spectral imaging* mulai diintegrasikan ke teknologi CV.

Spectral imaging adalah pengambilan gambar yang menggunakan gelombang pada spektrum elektromagnetik yang berbeda dibandingkan menggunakan kamera biasa (RGB). Contoh dari gelombang yang dipakai adalah infrared, ultraviolet maupun x-ray. HI itu sendiri merupakan penggabungan antara *spectral imaging* dengan fotografi digital. HI mempunyai beberapa keuntungan seperti non-destruktif, cepat ketika sudah terkalibrasi, dapat menganalisa secara kualitatif dan kuantitatif serta dapat menghemat waktu dan biaya ketika sudah teratur dengan baik. Tetapi kekurangan HI adalah dalam jumlah data yang diambil bisa berlebih dan akan memakan waktu. Analisa data juga sulit dikarenakan menganalisa berbagai macam gelombang elektromagnetik yang bisa menyebabkan *overlap* data (Wu & Sun, 2013).

Dalam aplikasinya, HI mengambil data yang berupa kotak hiperspektral (*3D hyperspectral Cube*). Kotak hiperspektral ini adalah susunan gambar (*image*) yang didapat melalui pengukuran berberapa gelombang elektromagnetik yang berbeda. HI mengambil data per pixel melalui 4 metode yaitu pada satu poin (*point scan*); pada satu baris (*line scan*); pada satu area (*area scan*) atau secara keseluruhan (*single shot*). Gambaran metode ini dapat dilihat pada Gambar 9. Simbol x dan y menunjukkan data dimensi spasial sedangkan λ merupakan dimensi spektral. Analisa data dilakukan dengan spektral atau spasial. Untuk mekanisme deteksi ini, sebuah desain HI harus memiliki sumber cahaya, *wavelength disperser*, yang memilah cahaya menjadi gelombang-gelombang yang berbeda serta *area detector* seperti kamera CCD atau CMOS (Wu & Sun, 2013).



Sumber: Wu & Sun, 2013

Gambar 10. Empat Metode Analisa HI

9. Aplikasi *Computer Vision* di Era Sekarang

Pada masa revolusi industri keempat dan menuju yang kelima, penggunaan AI, *machine learning* dan *computer vision* akan semakin banyak ditemui. Dengan menggunakan robot dan *deep learning logarithm*, maka industri pangan dapat meraih berbagai kesempatan dan memperluas ruang suksesnya. Istilah *precise agriculture* akan terus didengar dengan seingusnya perkembangan teknologi pada industri pangan (Kakani, Nguyen, Kumar, Kim, & Pasupuleti, 2020).

Computer vision digunakan untuk menganalisa berbagai macam pangan seperti sereal, buah-buahan dan sayuran. Penelitian dalam analisa kemurnian dan warna beras yang menggunakan *machine vision* (Ansari et al., 2021; Chen et al., 2019) dan penggunaannya dalam klasifikasi maturitas kelapa sawit (Septiarini et al., 2021) telah dilakukan. Penggunaan *machine vision* juga telah diterapkan pada buah-buahan seperti jeruk (Cubero et al., 2014), mangga (Kang et al., 2008) dan strawberi (Liming & Yanchao, 2010). Sementara *computer vision* telah digunakan dalam industri ternak seperti mengukur berat pada ayam potong (Nyalala et al., 2021) bahkan dalam mengukur makanan yang telah diproses, seperti perhitungan distribusi

topping dari inspeksi kualitas pizza (Sun, 2000). Penelitian kualitas dengan menggunakan CV juga sudah dilakukan pada keju, mie dan berbagai produk pangan olahan (Patel et al., 2012). Dalam skala industri, proses aplikasi CV disebut dengan *optical sorting*, yaitu pemilahan produk otomatis menggunakan sensor dan kamera (Edwards, 2004).

Penelitian juga telah dilakukan terhadap aplikasi *hyperspectral imaging* (HI). Wu dan Sun (2013) melakukan beberapa penelitian aplikasi HI tersebut seperti kesegaran ikan dan ayam, cacat pada buah sitrus dan apel serta pengukuran gula pada melon. Selain itu penerapan HI telah dilakukan pada sereal seperti pada klasifikasi biji gandum (Wu & Sun, 2013). Dapat disimpulkan bahwa dengan teknik HI, teknologi CV mempunyai kegunaan yang akan terus berkembang hingga memenuhi standar yang telah ditetapkan oleh industri pangan.

KESIMPULAN

Seiring waktu berjalan, pemimpin dunia berharap industri-industri akan mencari cara untuk menjaga kelestarian bumi ini. Industri seperti pangan berharap agar teknologi dapat menjadi jawaban dari masalah itu, tidak hanya dari segi lingkungan juga dalam segi keuntungan. *Computer vision* mempunyai banyak potensi yang dapat diaplikasikan pada industri pangan. Saat ini, teknologi ini sudah dipakai oleh berbagai industri. Industri pangan memanfaatkannya dalam menginspeksi kualitas produk pangan secara visual. Diharapkan dengan perkembangan teknologi dan inovasi dalam bidang teknologi, juga meningkatnya aksesibel informasi dan teknologi, *computer vision*, *hyperspectral imaging* beserta teknologi baru lainnya (seperti robot dan *machine learning*), dapat mencapai era dunia yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Kerjasama oleh berbagai pihak dan penelitian lebih lanjut dalam berbagai aspek industri akan membangun teknologi *computer vision* untuk terus berkembang dan mencapai kualitas yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Accorsi, R., Tufano, A., Gallo, A., Galizia, F. G., Cocchi, G., Ronzoni, M., Abbate, A., & Manzini, R. (2019). An application of collaborative robots in a food production facility. *Procedia Manufacturing*, *38*, 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.044>
- Anonymous. (1851). *English: "Tartar Agriculturalist": A Mongolian farmer using an ox to pull a scratch plow (ard)*. Travels in Tartary, Thibet, and China during the Years 1844–5–6. Retrieved from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TTC_Vol_I_098_Tartar_Agriculturalist.png
- Ansari, N., Ratri, S. S., Jahan, A., Ashik-E-Rabbani, M., & Rahman, A. (2021). Inspection of paddy seed varietal purity using machine vision and multivariate analysis. *Journal of Agriculture and Food Research*, *3*, 100109. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100109>
- Ashby, S., Kleve, S., McKechnie, R., & Palermo, C. (2016). Measurement of the dimensions of food insecurity in developed countries: A systematic literature review. *Public Health Nutrition*, *19*(16), 2887–2896. <https://doi.org/10.1017/S1368980016001166>
- Boriero, P. (2011, Mei 2). *Machine vision in color*. Quality Magazine. Retrieved from <https://www.qualitymag.com/articles/90626-machine-vision-in-color?v=preview>
- Caldwell, D. G., Davis, S., Moreno Masey, R. J., & Gray, J. O. (2009). Automation in food processing. Dalam S. Y. Nof (Ed.), *Springer Handbook of Automation* (hlm. 1041–1059). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78831-7_60
- Chen, S., Xiong, J., Guo, W., Bu, R., Zheng, Z., Chen, Y., Yang, Z., & Lin, R. (2019). Colored rice quality inspection system using machine vision. *Journal of Cereal Science*, *88*, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.05.010>
- Cheng, H. D., Jiang, X. H., Sun, Y., & Wang, J. (2001). Color image segmentation: Advances and prospects. *Pattern Recognition*, *34*(12), 2259–2281. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(00\)00149-7](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(00)00149-7)

- Cubero, S., Aleixos, N., Albert, F., Torregrosa, A., Ortiz, C., García-Navarrete, O., & Blasco, J. (2014). Optimised computer vision system for automatic pre-grading of citrus fruit in the field using a mobile platform. *Precision Agriculture*, 15(1), 80–94. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9324-7>
- Cubero, S., Aleixos, N., Moltó, E., Gómez-Sanchis, J., & Blasco, J. (2011). Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables. *Food and Bioprocess Technology*, 4(4), 487–504. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0411-8>
- Edwards, M. (2004). *Detecting foreign bodies in food*. UK:Elsevier.
- European Editors. (2012). *Machine vision system* [Image]. Retrieved from https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/01/Machine_Vision_System.jpg
- FAO. (2009). *How to feed the world in 2050*. Retrieved from http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf
- FAO. (2012). Committee on world food security. *CFS 2012/39 FINAL REPORT*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/mf115e/mf115e.pdf>
- FAO. (2017). Productivity and efficiency measurement in agriculture *global strategy to improve agricultural and rural statistics*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/ca6428en/ca6428en.pdf>
- FAO. (2019, Desember 16). *FAOSTAT*. Food and Agriculture Organization of The United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/OA>
- FAO. (2021). *Sustainable food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of The United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/sustainability/background/en/>
- FAO. (2021). *Sustainable food and Agriculture*. Food and Agriculture Organization of The United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/sustainability/en/>

- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO. (2021). *The state of food security and nutrition in the world 2021*. Retrieved from <https://doi.org/10.4060/cb4474en>
- Featherstone, S. (2012). A review of development in and challenges of thermal processing over the past 200years—A tribute to Nicolas Appert. *Food Research International*, 47(2), 156–160. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.04.034>
- Fernandes, A. F. A., Dórea, J. R. R., & Rosa, G. J. de M. (2020). Image analysis and computer vision applications in animal sciences: an overview. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 551269. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.551269>
- Breene, K. (2016, Januari 18). *Food security and why it matters*. World Economic Forum. Retrieved from <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/food-security-and-why-it-matters/>
- Garber, L. L., Hyatt, E. M., & Starr, R. G. (2000). The effects of food color on perceived flavor. *Journal of Marketing Theory and Practice*, 8(4), 59–72.
- Gilchrist, A., & Nobbs, J. (2017). Colorimetry, theory. Dalam J. C. Lindon, G. E. Tranter, & D. W. Koppenaal (Ed.), *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Third Edition)* (hlm. 328–333). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803224-4.00124-2>
- Guevara-Hernandez, F., & Gomez-Gil, J. (2011). A machine vision system for classification of wheat and barley grain kernels. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(3), 672–680. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110903-140-10>
- Guillaume, S., Balerin, S., & Bourelly, A. (1992). *An application of on-line vision in food industry: Robotic trimming of salads*. 61. Retrieved from <https://hal.inrae.fr/hal-02578192>
- Hartline-Grafton, H. (2017). *The impact of poverty, food insecurity and poor nutrition on health and well being*. 14. Retrieved from <https://frac.org/wp-content/uploads/hunger-health-impact-poverty-food-insecurity-health-well-being.pdf>

- Hoden, P. (2011, September 6). *Automation in the food industry*. New Food Magazine.
<https://www.newfoodmagazine.com/article/5424/automation-in-the-food-industry/>
- Hudson, P. (2014). *The industrial revolution*. UK: Bloomsbury Publishing.
- Janick, J. (2002). Ancient egyptian agriculture and the origins of horticulture. *Acta Horticulturae*, 582, 23–39.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.582.1>
- Jideani, A., Mutshinyani, A., Maluleke, N., Mafukata, Z., Sithole, M., Lidovho, M., Ramatsetse, E., & Matshisevhe, M. (2020). Impact of industrial revolutions on food machinery—an overview. *Journal of Food Research*, 9, 42. <https://doi.org/10.5539/jfr.v9n5p42>
- Kakani, V., Nguyen, V. H., Kumar, B. P., Kim, H., & Pasupuleti, V. R. (2020). A critical review on computer vision and artificial intelligence in food industry. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100033>
- Kang, S. P., East, A. R., & Trujillo, F. J. (2008). Colour vision system evaluation of bicolour fruit: A case study with ‘B74’ mango. *Postharvest Biology and Technology*, 49(1), 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.12.011>
- Konika Minolta. (2018, September 14). What is CIE 1976 lab color space? *Color, light, and display measuring instruments*. Retrieved from <https://sensing.konicaminolta.asia/what-is-cie-1976-lab-color-space/>
- Li, S. Z., & Jain, A. K. (Ed.). (2015). *Encyclopedia of biometrics* (2 ed.). Springer US. Retrieved from <https://www.springer.com/gp/book/9781489974877>
- Liming, X., & Yanchao, Z. (2010). Automated strawberry grading system based on image processing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71, S32–S39. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.09.013>
- Lobb, R. L. (2021.). *Food Production, History of* | *Encyclopedia.com*. Food Production, History of. Retrieved from

<https://www.encyclopedia.com/food/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/food-production-history>

Markovic, I., Ilic, J., Markovic, D., Simonovic, V., & Kosanic, N. (2013). Color measurement of food products using CIE L*a*b* and RGB color space. *Journal of Hygenic Engineering and Design*, 4.

National Geographic Society. (2019, Agustus 19). *The development of agriculture*. National geographic society. Retrieved from <http://www.nationalgeographic.org/article/development-agriculture/>

Nyalala, I., Okinda, C., Kunjie, C., Korohou, T., Nyalala, L., & Chao, Q. (2021). Weight and volume estimation of poultry and products based on computer vision systems: A review. *Poultry Science*, 100(5), 101072. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101072>

Patel, K. K., Kar, A., Jha, S. N., & Khan, M. A. (2012). Machine vision system: A tool for quality inspection of food and agricultural products. *Journal of Food Science and Technology*, 49(2), 123–141. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0321-4>

Pathare, P., Opara, U., & Al-Said, F. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food and Bioprocess Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>

Pultarova, T. (2017, September 29). *Robotic farm completes 1st fully autonomous harvest*. Livescience.Com. Retrieved from <https://www.livescience.com/60567-robotically-tended-farm-completes-first-harvest.html>

Ritchie, H., & Roser, M. (2019, September). *Land use*. Our world in data. Retrieved from <https://ourworldindata.org/land-use>

Saldaña, E., Siche, R., Luján, M., & Quevedo, R. (2013). Review: Computer vision applied to the inspection and quality control of fruits and vegetables. *Brazilian Journal of Food Technology*, 16, 254–272. <https://doi.org/10.1590/S1981-67232013005000031>

Schneider, U. A., Havlík, P., Schmid, E., Valin, H., Mosnier, A., Obersteiner, M., Böttcher, H., Skalský, R., Balkovič, J., Sauer, T., & Fritz, S. (2011). Impacts of population growth, economic development, and technical

- change on global food production and consumption. *Agricultural Systems*, 104(2), 204–215. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.11.003>
- Septiarini, A., Sunyoto, A., Hamdani, H., Kasim, A. A., Utaminingrum, F., & Hatta, H. R. (2021). Machine vision for the maturity classification of oil palm fresh fruit bunches based on color and texture features. *Scientia Horticulturae*, 286, 110245. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110245>
- Smith, T., & Guild, J. (1931). The C.I.E. colorimetric standards and their use. *Transactions of the Optical Society*, 33(3), 73–134. <https://doi.org/10.1088/1475-4878/33/3/301>
- Snyder, W. E., & Qi, H. (2017). *Fundamentals of computer vision* (1 ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316882641>
- Soltau, F. (2016). Automation and artificial intelligence – what could it mean for sustainable development? *Brief for GSDR – 2016 Update*, 4.
- Sun, D.W. (2000). Inspecting pizza topping percentage and distribution by a computer vision method. *Journal of Food Engineering*, 44(4), 245–249. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00024-8)
- Sun, D.W. (2010). *Hyperspectral imaging for food quality analysis and control*. Elsevier.
- The World Bank. (2018). *Agricultural land (% of land area) | Data*. Retrieved from <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.ZS?end=2018&start=2018&type=shaded&view=map&year=2018>
- United Nations. (1987). *Report of The World Commission on Environment and Development: our common future*. Retrieved from <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- United Nations. (t.t). *The 17 goals*. United Nations | Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development. Retrieved from <https://sdgs.un.org/goals>

- Vithu, P., & Moses, J. A. (2016). Machine vision system for food grain quality evaluation: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.011>
- Waltham, N. (2013). CCD and CMOS sensors. Dalam M. C. E. Huber, A. Pauluhn, J. L. Culhane, J. G. Timothy, K. Wilhelm, & A. Zehnder (Ed.), *Observing photons in space: a guide to experimental space astronomy* (hlm. 423–442). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7804-1_23
- World Economic Forum. (2018). *Innovation with a Purpose: The role of technology innovation in accelerating food systems transformation*. 42.
- Wu, D., & Sun, D.W. (2013). Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review — Part II: Applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 19, 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.04.016>
- Wu, D., & Sun, D.W. (2013). Colour measurements by computer vision for food quality control – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 29(1), 5–20. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.08.004>
- Wu, D., & Sun, D.W. (2013). Hyperspectral imaging technology: a nondestructive tool for food quality and safety evaluation and inspection. Dalam S. Yanniotis, P. Taoukis, N. G. Stoforos, & V. T. Karathanos (Ed.), *Advances in Food Process Engineering Research and Applications* (hlm. 581–606). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7906-2_29
- WWF. (t.t.). *Sustainable production*. WWF. Retrieved from https://wwf.panda.org/discover/our_focus/food_practice/sustainable_production/

POTENSI MINUMAN TRADISIONAL INDONESIA SEBAGAI PRODUK PANGAN FUNGSIONAL DI ERA SOCIETY 5.0

THE POTENCY OF INDONESIAN TRADITIONAL BEVERAGES AS FUNCTIONAL FOOD PRODUCTS IN THE SOCIETY 5.0 ERA

**Athiefah Fauziyyah¹, Dini Nur Hakiki², Eko Yuliasuti³,
M. Rajih Radiansyah⁴**

**^{1,2,3,4} Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan Pertanian,
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
athiefah.fauziyyah@ecampus.ut.ac.id**

ABSTRAK

Artikel ini bertujuan untuk membahas berbagai jenis minuman tradisional Indonesia yang berpotensi sebagai pangan fungsional. Minuman tradisional Indonesia telah diteliti memiliki kandungan senyawa antioksidan yang bermanfaat untuk tubuh. Beberapa minuman tradisional tersebut antara lain wedang uwuh, kahwa daun, bir pletok, jamu, loloh dan teh talua. Bahan baku wedang uwuh dan bir pletok terdiri dari jahe, secang, cengkeh, gula dan lain-lain. Adanya senyawa gingerol pada jahe, brazilin pada kayu secang dan eugenol pada cengkeh berkontribusi terhadap adanya kandungan antioksidan pada minuman tersebut. Pada kahwa daun, komposisi utama berupa daun kopi robusta. Pada daun tersebut telah diteliti beberapa senyawa yang memberikan efek antioksidan antara lain: xanthone, uric acid, xanthosine, caffeine, 3-methylxanthine, 7-methylxanthosine, theobromine, theophylline, caffeic acid dan xanthine. Pada salah satu jenis jamu, yaitu jamu kunir asem, senyawa antioksidan didapatkan dari senyawa curcumin pada kunyit. Pada minuman loloh tibah, kandungan fenolik pada buah mengkudu memiliki aktivitas sebagai antioksidan. Sedangkan pada teh talua, senyawa catechin (C), gallocatechin (GC), epicatechin (EC), epigallocatechin (EGC), epicatechin-3-gallate (ECG), dan epigallocatechin-3-gallate (EGCG) pada teh berkontribusi terhadap adanya aktivitas antioksidan. Beberapa upaya untuk mempertahankan minuman tradisional

di tengah gempuran berbagai produk minuman modern pada Era Society 5.0 antara lain pengembangan teknologi pengolahan minuman tradisional yang praktis dan tahan lama, pengembangan riset tentang kandungan senyawa psikoaktif dan reformulasi komposisi gula pada minuman tradisional.

Kata Kunci: *minuman tradisional, antioksidan, pangan fungsional.*

PENDAHULUAN

Pandemi covid 19 yang terjadi sejak dua tahun lalu berdampak terhadap kesadaran diri masyarakat untuk mengubah gaya hidup menjadi lebih sehat. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan mengkonsumsi pangan yang diyakini memberikan efek kebugaran untuk tubuh. Ben Hassen, El Bilali, & Allahyari (2020) melaporkan bahwa terjadi perubahan gaya hidup yang lebih positif selama pandemi covid dengan meningkatnya konsumsi pangan sehat sekitar 15-16% pada masyarakat Qatar. Virus COVID-19 yang menyerang manusia dapat menurunkan beberapa fungsi metabolisme tubuh. Manusia berbondong-bondong mencari alternatif pangan yang tidak hanya memenuhi kebutuhan gizi pokok secara umum, namun juga bisa memberikan efek positif untuk memperkuat daya tahan tubuh ketika masa pandemi. Di dunia pangan, pangan sehat ini biasa disebut sebagai pangan fungsional.

Para ahli pangan fungsional di Indonesia mendefinisikan pangan fungsional adalah pangan yang memberikan efek fungsional tertentu yang bermanfaat untuk kesehatan manusia. Pangan fungsional adalah pangan, bukan suplemen, kapsul ataupun serbuk obat. Pangan fungsional merupakan pangan yang biasa dikonsumsi sebagai bagian dari pola makan harian yang dapat meningkatkan fungsi fisiologis atau dapat mengurangi risiko sakit pada manusia (P3FNI, 2019).

Sudah banyak kategori produk yang dikembangkan sebagai pangan fungsional. Salah satu produk pangan fungsional adalah jenis minuman fungsional. Jenis minuman fungsional ini sebenarnya sudah menjadi kearifan lokal tersendiri di Indonesia. Indonesia kaya akan sumber bahan pangan yang dipercaya memiliki khasiat kesehatan. Salah satu olahan dari sumber bahan pangan tersebut dibuat menjadi jenis minuman tradisional. Resep turun-temurun mengenai minuman tradisional banyak yang masih digunakan hingga sekarang. Beberapa jenis minuman tradisional yang

terkenal antara lain wedang uwuh, wedang secang, bandrek, bir pletok, kawa daun, dan lain-lain. Jenis minuman ini biasanya memiliki komposisi dari berbagai bahan herbal yang telah ada di sekitar masyarakat. Bahan herbal alami memiliki kandungan senyawa antioksidan yang dapat menunjang daya tahan tubuh. Beberapa penelitian telah melaporkan adanya potensi aktivitas antioksidan pada minuman tradisional Indonesia karena memiliki senyawa bioaktif yang berperan sebagai antioksidan.

Antioksidan adalah senyawa yang dapat menghambat radikal bebas. Adanya radikal bebas dalam tubuh merupakan salah satu faktor yang menurunkan status kesehatan. Radikal bebas ini sifatnya berbahaya karena tidak stabil dan sangat reaktif karena dapat mengikat pasangan elektronnya hingga terbentuk radikal baru yang merusak sel tubuh. Menurut Embuscado (2015), radikal baru yang terbentuk akan bereaksi dengan molekul lain pada organ tubuh seperti reseptor ion, enzim dan DNA yang akan menyebabkan karsinogenesis dan mutagenesis. Dengan mengonsumsi minuman tradisional yang memiliki senyawa antioksidan inilah, diharapkan dapat menghindari efek negatif karena adanya radikal bebas.

Di sisi lain, era Society 5.0 sudah di depan mata. Society 5.0 pertama kali dicetuskan oleh Perdana Menteri Jepang, Shinzo Abe pada Januari 2019 di Forum Ekonomi Dunia. Secara umum, Era Society 5.0 menyempurnakan era revolusi industri 4.0 yang menitikberatkan pada perkembangan teknologi kecerdasan buatan yang sangat pesat. Society 5.0 menawarkan masyarakat yang berpusat pada manusia yang menjadi pusat keseimbangan antara kemajuan ekonomi dengan penyelesaian masalah sosial. Hal ini yang melahirkan konsep Pangan 5.0. Menurut Widianarko (2019) di Era Pangan 5.0, konsumen tidak hanya menikmati sajian produk yang lezat, aman, bergizi, indah dan unik saja, namun juga akan menuntut aspek ketenangan pikiran, keadilan perdagangan, bebas dari beban lingkungan dan lain sebagainya. Hal inilah yang bisa menjadi peluang sekaligus tantangan minuman tradisional masih bisa tetap *survive* di tengah gempuran produk minuman modern lainnya.

Pada makalah ini akan membahas mengenai berbagai minuman tradisional Indonesia yang berpotensi sebagai pangan fungsional dan bagaimana peluang serta tantangannya dalam menghadapi era Society 5.0.

PEMBAHASAN

1. Perkembangan Pangan Fungsional

Pada tahun 1984, Jepang memperkenalkan konsep pangan fungsional yang terkenal dengan sebutan FOSHU. Istilah ini dalam bahasa Inggris merupakan singkatan dari *Food For Special Health Uses* yang artinya pangan yang dikhususkan untuk kesehatan. Di tahun tersebut, sebagian orang tua di Jepang memiliki faktor risiko terhadap peningkatan penyakit seperti diabetes, hipertensi, osteoporosis, kanker dan penyakit kardiovaskuler. Oleh karenanya, Pemerintah Jepang berinisiatif membuat proyek penelitian yang berfokus mengenai pangan fungsional. Proyek penelitian ini merupakan proyek penelitian pangan fungsional yang pertama kali dilakukan di dunia dengan melibatkan berbagai latar belakang ilmuwan yang terdiri dari ilmu kedokteran, ilmu gizi, psikologi dan farmakologi (Yamada, Sato-Mito, Nagata, & Umegaki, 2008).

Di Indonesia, perkembangan penelitian mengenai pangan fungsional sudah banyak dilakukan. Hal ini disebabkan karena begitu banyaknya sumber daya alam lokal yang dapat dijadikan sebagai pangan fungsional. Banyaknya penelitian mengenai pangan fungsional ini melahirkan organisasi para ahli pangan fungsional di Indonesia yang dinamakan P3FNI (Perhimpunan Pegiat Pangan Fungsional dan Nutrasetikal Indonesia). Secara khusus, para ahli pangan fungsional Indonesia mendefinisikan pangan fungsional sebagai pangan yang bentuknya segar maupun olahan, mempunyai kandungan yang bermanfaat yang dapat meningkatkan fungsi fisiologis tertentu, atau dapat mengurangi risiko sakit, yang mana klaim tersebut dapat dibuktikan dengan kajian ilmiah, serta harus menunjukkan manfaat dari pangan tersebut dengan jumlah yang biasa dikonsumsi sebagai pola makan harian (P3FNI, 2019).

Berdasarkan definisi tersebut, dapat kita ambil poin beberapa syarat pangan bisa dikatakan menjadi pangan fungsional diantaranya adalah (i) pangan dapat meningkatkan fungsi kesehatan, (ii) harus dapat dibuktikan dengan penelitian empiris (iii) pangan dan komponen harus sesuai dengan pola makan harian, (iv) pangan tersebut harus dikonsumsi dengan cara dan asupan yang normal, (v) pangan tersebut bentuknya merupakan sistem pangan, bukan serbuk, kapsul atau tablet.

Regulasi mengenai pangan fungsional sudah diatur oleh Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) selaku badan pengawas makanan di Indonesia sejak 2005. Hal ini tertuang dalam Peraturan Kepala BPOM HK.00.05.52.0685/2005 mengenai Ketentuan Pokok Pengawasan Pangan Fungsional dan Peraturan Kepala BPOM HK 03.1.23.11.11.09909/2011 mengenai Pengawasan Klaim Dalam Label dan Iklan Pangan. Akan tetapi pada frasa pangan fungsional dihapus di aturan BPOM terbaru yang tertuang dalam Peraturan Kepala BPOM No.13/2016 Tentang Pengawasan Klaim pada Label dan Iklan Pangan Olahan dan Peraturan Kepala BPOM No 1/2018. BPOM mendefinisikan pangan fungsional sebagai Pangan Olahan yang mengandung satu atau lebih komponen pangan yang berdasarkan kajian ilmiah mempunyai fungsi fisiologis tertentu di luar fungsi dasarnya, terbukti tidak membahayakan dan bermanfaat bagi kesehatan (BPOM, 2011). Pada 2016, frasa pangan fungsional tidak lagi digunakan karena belum ada konsensus internasional mengenai pangan fungsional. Secara khusus, pada Peraturan Kepala BPOM NO 13 tahun 2016 menggantikan istilah pangan fungsional menjadi pangan ber 'klaim'. Definisi klaim adalah segala bentuk pernyataan yang memberikan informasi, menyarankan atau secara tidak langsung menyatakan karakteristik tertentu pangan yang berhubungan dengan asal usul, kandungan gizi, sifat, produksi, pengolahan, komposisi atau faktor mutu lainnya (BPOM, 2016).

2. Senyawa Antioksidan untuk Kesehatan

Salah satu senyawa pada pangan yang dapat memberikan efek kesehatan pada tubuh adalah antioksidan. Secara umum, antioksidan merupakan senyawa yang bisa memperlambat atau menghambat adanya reaksi autooksidasi radikal bebas dalam oksidasi lipida (Shahidi & Ambigaipalan, 2015).

Antioksidan bekerja dengan cara memberikan satu elektronnya kepada senyawa yang bersifat oksidan sehingga aktivitas senyawa oksidan tersebut dapat dihambat. Menurut Embuscado (2015), berdasarkan mekanisme kerjanya, tipe antioksidan dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

- a. Antioksidan sebagai penangkap radikal, yakni senyawa yang dapat memberikan atom hidrogen atau elektron ke senyawa radikal yang menghambat laju reaksi pembentukan radikal bebas pada tahap propagasi.

Contoh senyawa: BHA (*butylated hydroxyanisole*), BHT (*butylated hydroxytoluene*), *propyl galate*, tokoferol dan senyawa fenol pada tumbuhan.

- b. Antioksidan sebagai agen pengkelat, yakni senyawa antioksidan yang dapat mengikat logam sehingga dapat mencegah adanya radikal bebas. Contoh senyawa: fosfat, asam sitrat dan EDTA (*ethylenediaminetetraacetic*).
- c. Antioksidan sebagai penangkap oksigen, yakni senyawa antioksidan yang dapat bereaksi dengan senyawa oksigen sehingga membuat sistem menjadi lebih stabil. Contoh senyawa: sulfit, asam askorbat, asam eritrobat dan palmitat.

Pertama kali antioksidan diaplikasikan dalam bahan pangan pada tahun 1930 (Grettie 1933 dalam Nahas, 2014). Saat itu, senyawa *guaiac gum* ditambahkan pada pangan sebagai antioksidan untuk menstabilkan lemak babi. Pada abad 20 pertengahan, penelitian mengenai senyawa antioksidan sintesis komersial semakin meningkat. Salah satu penemuannya adalah mengenai penggunaan senyawa BHT dan BHA pada pangan. Senyawa ini masih sering digunakan hingga saat ini sebagai senyawa antioksidan sintetis. Maraknya penggunaan antioksidan sintetis tidak menyurutkan minat konsumen terhadap antioksidan alami. Hal ini disebabkan karena pemahaman konsumen yang menganggap antioksidan alami lebih aman dan sehat.

Antioksidan secara alami dapat berasal dari makanan. Senyawa antioksidan alami di dalam makanan dapat berasal dari: (a) Senyawa antioksidan yang memang dari awal sudah ada dalam makanan. Contoh: makanan yang berasal dari buah dan sayuran yang mempunyai banyak kandungan senyawa flavonoid dan karotenoid yang mempunyai kemampuan menetralkan radikal bebas. (b) Senyawa antioksidan yang diisolasi dari bahan alami lalu ditambahkan ke produk pangan sebagai BTP atau bahan tambahan pangan. (c) Senyawa antioksidan yang timbul akibat reaksi selama proses pengolahan. Contoh: senyawa melanoidin yang muncul akibat reaksi maillard pada *roasting* kopi memiliki kemampuan sebagai antioksidan (Sandrasari, 2009).

Sumber antioksidan alami bisa didapatkan dari tumbuhan. Isolasi senyawa antioksidan telah dilakukan pada beberapa bagian tanaman seperti pada akar, kayu, kulit kayu, daun, bunga, serbuk sari dan biji. Beberapa

senyawa alami yang dapat melakukan aktivitas antioksidan contohnya polifenol yang terdiri dari asam fenolat, vitamin A dan vitamin C dan karotenoid yang terdiri dari senyawa xantofil dan karoten. Berbagai senyawa tersebut telah diteliti terdapat pada berbagai tanaman rempah. Tabel 1 menunjukkan senyawa dalam rempah yang berperan sebagai antioksidan.

Tabel 1. Sumber Antioksidan Berbagai Tanaman Herbal

Bahan	Nama Latin	Senyawa Antioksidan
Rosemary	<i>Rosemarinus officinalis</i>	<i>Carnosol, carnosic acid, rosmanol, rosmadial, diterpenes (epirosmanol, isorosmanol, rosmaridiphenol, rosmariquinone, rosmarinic acid)</i>
Sage	<i>Salvia officinalis L.</i>	<i>Carnosol, carnosic acid, rosmanol, rosmadial, methyl and ethyl esters of carnosol, rosmarinic acid</i>
Oregano	<i>Origanum vulgare</i>	<i>Rosmarinic acid, caffeic acid, protocatechuic acid, 2-caffeoyloxy-3-[2-(4-hydroxybenzyl)-4,5-dihydroxy] phenylpropionic acid; flavonoids – apigen, eriodictyol, dihydroquercetin, dihydrokaemperol; cavacrol, tymol</i>
Jahe	<i>Zingiber officinale</i>	<i>Gingerol, shogaol, zingerone</i>
Kunyit	<i>Curcuma domestica L.</i>	<i>Curcumins, 4-hydroxycinnamoyl methane</i>
Cengkeh	<i>Eugenia caryophyllata</i>	<i>Phenolic acids (gallic acid), flavonol glucosides, phenolic volatile oils (eugenol, acetyl eugenol, isoeugenol), tannins</i>

Sumber: Embuscado, 2015

3. Potensi Minuman Tradisional sebagai Pangan Fungsional

Indonesia kaya akan kearifan lokal berupa minuman tradisional. Hampir di tiap pulau di Indonesia memiliki kekhasan mengenai jenis minuman tradisional. Minuman tradisional dibuat dari resep warisan leluhur yang bahan bakunya berasal dari bahan alam yang mudah ditemukan oleh

masyarakat setempat. Beberapa jenis minuman tradisional Indonesia, komposisi penyusun dan daerah asal pembuatannya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Jenis Minuman Tradisional Indonesia

Nama Minuman	Asal	Komposisi	Referensi
Wedang Jahe	Jawa Tengah, Jawa Timur	Jahe, gula merah, merica, pandan	Koswara & Diniari, 2015
Wedang Uwuh	Daerah Istimewa Yogyakarta, Jawa Tengah	Jahe, cengkeh, kayu secang, pandan, gula batu	Herdiana, Utami, & Anandito, 2014
Wedang Secang	Jawa Tengah	Jahe, Secang, Gula	Nirmagustina Zulfahmi, & Oktafrina, 2011
Bandrek	Jawa Barat	Jahe, cabai jawa, kelapa serut, lada hitam,	Faridah, Yasni, Suswantinah, & Wuri, 2013
Bir Pletok	DKI Jakarta	Jahe, sereh, cengkeh, kayumanis, pala, kapulaga, pandan, secang, gula pasir, gula merah, garam dan air	Ishartani, Khasanah, & Kawiji, 2012; Muliani, 2017
Loloh	Bali	Terbuat dari satu atau beberapa bahan alam seperti mengkudu, kunyit, daun kecem-cem dan lain-lain	Pratiwi, Suter, Widpradnyadewi, & Wiadnyani, 2019
Jamu	Jawa Tengah dan DIY	Terbuat dari satu atau beberapa bahan alam seperti: kunyit, jahe, beras kencur, temu-lawak dan lain-lain	Purwaningsih, 2013; Jailil, 2019
Teh Talua	Sumatera Barat	Daun teh dan kuning telur	Novra & Ariani, 2020, Yenrina et al., 2016
Kahwa Daun	Sumatera Barat	Daun kopi	Novita et al., 2018; Asmira, Nurhamidah, & Analdi, 2020; Defri, 2021

Pada Tabel 2, dapat kita lihat bahwa sebagian besar komposisi bahan baku penyusun minuman tradisional terdiri dari bahan alam seperti jahe, secang, kayu manis, cengkeh dan bahan alam lainnya. Penggunaan bahan baku tersebut dipercaya dapat meningkatkan status kesehatan oleh masyarakat setempat. Hal ini bukanlah mitos belaka. Beberapa penelitian telah dikembangkan untuk meneliti khasiat dari beberapa minuman tradisional Indonesia. Sejarah dan potensi minuman tradisional sebagai pangan fungsional dapat dijelaskan sebagai berikut.

a. Wedang Uwuh

Wedang uwuh merupakan minuman tradisional berbahan dasar rempah alami yang berwarna merah dan memiliki rasa manis pedas. Pada mulanya, minuman ini banyak ditemukan di sekitar Makam Raja Kraton Yogyakarta di lereng perbukitan Imogiri yang dibangun tahun 1632. Minuman ini disajikan untuk para raja dan keluarga yang sedang berziarah di makam leluhur. Seiring berjalannya waktu, orang yang berziarah tidak hanya dari kalangan raja, namun juga masyarakat umum. Lambat laun, wedang uwuh menjadi minuman favorit para peziarah hingga akhirnya sekarang menjadi buah tangan wisatawan yang berkunjung ke Imogiri, Bantul. Secara bahasa, wedang uwuh terdiri dari kata '*wedang*' yang berarti minuman, dan '*uwuh*' yang berarti sampah. Penamaan uwuh/sampah ini dikarenakan komposisi penyusunnya terdiri dari beberapa daun, ranting dan serutan kayu yang sekilas terlihat seperti sampah. Ramuan asli penyusun minuman ini awalnya hanya terdiri dari jahe, daun kayu manis, cengkeh, daun pala dan gula. Produsen saat ini menambahkan komponen serutan kayu secang agar membuat tampilan minuman menjadi warna merah sehingga lebih menarik (PDN, 2012). Wedang uwuh yang banyak di pasaran saat ini terdiri dari jahe, serutan kayu secang, daun cengkeh, daun kayu manis, cengkeh, kayu manis dan gula batu.

Di pasaran, wedang uwuh sering dijadikan oleh-oleh khas Bantul yang dikemas pada pack kecil dalam kemasan plastik atau kertas. Penikmat wedang uwuh cukup memasukkan bahan rempah tersebut ke dalam gelas, kemudian diseduh dengan air hangat. Wedang uwuh yang terdiri dari rempah alami diyakini dapat meningkatkan daya tahan tubuh karena kandungan antioksidannya yang tinggi. Adanya kandungan antioksidan pada

wedang uwuh disebabkan karena bahan penyusunnya yang terdiri dari jahe, secang, cengkeh, kayu manis yang sudah terbukti memiliki kandungan senyawa fenolik yang memiliki khasiat sebagai antioksidan. Senyawa yang berkontribusi terhadap adanya antioksidan pada wedang uwuh diantaranya adalah senyawa *gingerol*, *zingerone*, *shogaol* pada jahe, *eugenol* pada cengkeh dan *brazilin* pada secang (Embuscado, 2015; Nirmal et al., 2015; Fauziyyah, 2018). Penelitian mengenai wedang uwuh siap minum yang diberi perlakuan suhu pemanasan 65°C-85°C melaporkan bahwa minuman tersebut memiliki aktivitas antioksidan sebesar 13,720%-30,473% pada penghambatan radikal bebas DPPH (Herdiana, Utami, & Anandito, 2014).

b. Kahwa Daun

Kahwa daun merupakan minuman khas Sumatera Barat yang berasal dari daun kopi. Kahwa daun memiliki warna coklat agak hitam dan beraroma seperti kopi Masyarakat minang meyakini kahwa daun memiliki efek kesehatan. Penamaan kahwa berasal dari bahasa arab yang artinya air seduhan daun kopi (Novita, Kasim, Anggraini, & Putra, 2018a). Secara teknis, adanya kahwa daun ini meningkatkan nilai ekonomis daun kopi. Pada awalnya daun kopi hanya dibuang begitu saja karena dapat mengganggu pertumbuhan buah kopi. Pada pembudidayaan kopi, agar perkembangan buah lebih cepat dan besar, dilakukan pemangkasan daun tanaman kopi (*pruning*). Pada mulanya, petani menganggap limbah daun kopi tidak mempunyai nilai ekonomis sehingga hanya dianggap sampah. Namun beberapa masyarakat di Sumatera Barat berinovasi dengan mengolah daun kopi varietas *robusta* (*Coffea canephora*) menjadi sebuah minuman fungsional dengan nama Kahwa Daun (Defri, 2021).

Proses pembuatan minuman kahwa daun bisa menggunakan tiga cara: (1.) Melalui penyeduhan: yakni daun kopi diseduh dengan air panas bersuhu sekitar 90°C, (2.) Melalui pemasakan, yaitu dengan cara air dan daun kahwa dimasak secara bersamaan sampai mendidih, (3.) Melalui pelarutan yakni dengan cara air dimasak sampai mendidih pada suhu 100°C kemudian daun kopi dimasukkan dan dibiarkan mendidih selama 3-5 menit (Novita, Kasim, Anggraini, & Putra, 2018b).

Kahwa daun memiliki nilai total fenol sebesar 86,99-975,38 mg/L. Adanya kandungan total fenol ini yang berkontribusi terhadap adanya aktivitas antioksidan. Minuman khas Sumatera Barat ini memiliki nilai aktivitas antioksidan dengan nilai inhibisi 51-80% terhadap aktivitas DPPH

pada konsentrasi 50 μM . Variasi kisaran nilai total fenol dan aktivitas antioksidan disebabkan oleh faktor perbedaan cara waktu dan suhu ketika ekstraksi (Novita et al., 2018b). Kahwa daun memiliki kandungan senyawa yang berperan sebagai antioksidan. Senyawa tersebut antara lain *xanthone*, *uric acid*, *xanthosine*, *caffeine*, *3-methylxanthine*, *7-methylxanthosine*, *theobromine*, *theophylline*, *caffeic acid* dan *xanthine* (Defri, 2021).

c. Bir Pletok

Bir pletok merupakan minuman tradisional khas Betawi. Minuman ini tidak mengandung alkohol walaupun mengandung kata 'bir'. Kata *bi'run* atau bir berasal dari kata *abyar* yang memiliki arti sumber mata air. Sedangkan arti kata pletok memiliki beberapa versi. Versi pertama menjelaskan bahwa bir dibuat dari bambu, tempatnya ditutup. Ketika akan dituangkan akan berbunyi 'pletok'. Versi kedua menjelaskan bahwa bunyi pletok berasal dari suara bir pletok yang dicampur es batu dalam teko yang dikocok. Versi terakhir menjelaskan bahwa buah secang yang menua akan berwarna hitam dan dibuang bijinya. Ketika dipukul akan menimbulkan suara pletok (Giyatmi, 2018).

Komposisi minuman bir pletok terdiri dari jahe, sereh, cengkeh, kayu manis, pala, kapulaga, pandan, secang, gula pasir, gula merah, garam dan air. Proses pembuatan bir pletok diawali dengan pembersihan bahan-bahan yang dibutuhkan. Kemudian jahe dibakar lalu digeprek. Selanjutnya, semua rempah dimasukkan dalam air yang mendidih selama 15 menit. Setelah perebusan dilakukan penyaringan. Hasil penyaringan ditambah dengan daun pandan dan gula. Lakukan proses perebusan kembali hingga mendidih dilanjutkan dengan penyaringan kedua. Hasil rebusan dapat disaring dan siap untuk dikonsumsi. Nilai aktivitas antioksidan minuman bir pletok instan berkisar antara 3,78-26,01% DPPH/mg sampel dan bir pletok sirup sebesar 5,25-13,26 %DPPH/mg sampel (Ishartani, Khasanah, & Kawiji, 2012). Bir pletok berkarbonasi memiliki rasa pedas, beraroma jahe dan berwarna merah agak kecoklatan (Kholishoh, Ulfiasari, Kurniawan, & Muflihati, 2019).

d. Jamu

Minuman jamu sering ditemukan di daerah Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah. Jamu berasal dari kata *djamoe* yang merupakan gabungan kata dari *djampi* dan *oesada*. *Djampi* artinya doa dan *oesada* artinya husada atau kesehatan. Penggunaan herbal untuk jamu

tertulis dalam prasasti sejak abad 5 M. Relief penggunaan jamu terdapat di Candi Borobudur, Candi Prambanan dan Candi Penataran pada abad 8-9 Masehi. Istilah 'djamoë' dipakai sejak abad 15-16 M yang tertulis dalam primbon di Kartosuro. Deskripsi jamu secara rinci terdapat pada serat centini yang ditulis oleh Kanjeng Gusti Adipati Anom Mangkunegoro III tahun 1810-1823. Pada tahun 1850 R. Atmasupana II menulis sekitar 1734 ramuan jamu (Purwaningsih, 2013).

Bahan baku jamu terdiri dari berbagai bahan rempah seperti kunyit, jahe, beras kencur dan temulawak. Di Yogyakarta, salah satu jamu yang terkenal adalah jamu kunir asem. Jamu kunir asem merupakan produk jamu yang bahan bakunya terdiri dari kunyit dan asam. Secara empiris, jamu kunir asem dipercaya dapat melancarkan peredaran darah, melancarkan buang air besar dan meningkatkan daya tahan tubuh (Jalil et al., 2021). Adanya senyawa kurkumin pada kunyit dapat berperan sebagai antioksidan (Mishra & Palanivelu, 2008). Selain itu, terdapat juga jamu beras kencur. Jamu beras kencur merupakan ramuan yang terbuat dari beras (*Oryza Sativa*) dan kencur (*Kaempferia galanga L.*). Jamu beras kencur diyakini dapat memperlancar peredaran darah, menghilangkan rasa lelah, mempercepat luka akibat persalinan dan menyegarkan badan (Jalil, 2019). Pada minuman jamu yang berbahan baku jahe, temulawak, kunyit dan beras kencur memiliki kapasitas penangkapan radikal bebas (antioksidan) sekitar 40-55% (Septiana, Samsi, & Mustaufik, 2017). Dari ketiga bahan tersebut, minuman jamu yang berbahan baku temulawak memiliki nilai kapasitas penangkapan radikal yang paling tinggi. Adanya senyawa fenolik pada jamu memberikan efek antioksidan pada minuman (Septiana et al., 2017).

e. Loloh

Loloh merupakan minuman khas Bali yang terdiri dari satu atau kombinasi dari berbagai tanaman herbal. Ada sekitar 17 jenis minuman tradisional yang ada di Bali diantaranya adalah loloh cem-cem, loloh tibah, loloh telang, loloh kunyit, loloh buah plum, loloh tempuyung dan lain-lain (Pebiana, Puspasar, Dewi, & Arnyana, 2020). Penamaan jenis loloh berasal dari bahan baku yang digunakan. Beberapa jenis loloh yang telah populer dipasarkan adalah loloh tibah dan loloh cem-cem.

Bahan utama loloh tibah adalah mengkudu (*Morinda citrifolia L.*) dalam Bahasa Bali disebut tibah. Loloh tibah dibuat dengan cara mengekstrak buah

mengkudu dengan air dan diberi penambahan gula, asam, garam, terasi dan cabai untuk meningkatkan cita rasa. Aroma khas mengkudu dihilangkan dengan cara meremas buah dengan garam, kemudian dicuci, selanjutnya ditambahkan dengan gula, terasi, asam dan cabai lalu diekstrak dengan air lalu disaring. Loholoh cem-cem terbuat dari ekstrak daun kecem-cem (*Spondias pinnata* (L.f) Kurz). Proses pembuatannya pertama-tama, campuran daun cem-cem dengan air (20%) dihaluskan, kemudian disaring. Filtrat yang dihasilkan diberi perlakuan penambahan sirup gula dan serutan kelapa muda sebagai bahan pengisi (Pratiwi et al., 2019). Penjual lohoh di Bali memproduksi lohoh dengan teknologi sederhana tanpa pasteurisasi. Penjual lohoh mengolah lohoh pada malam atau pagi hari sebelum dipasarkan.

Tanaman mengkudu telah diidentifikasi memiliki 160 senyawa di antaranya adalah senyawa fenolik, alkaloid dan asam-asam organik. Daun muda, kuliat akar dan kulit batang dari tanaman cemcem mengandung flavonoid, saponin dan tannin (Gupta Roy, Nigam, & Mukherjee, 2010). Adanya senyawa-senyawa tersebut berkontribusi terhadap adanya aktivitas antioksidan (Embuscado, 2015). Loholoh cem-cem yang disimpan pada suhu kamar (28-30°C) selama 12 jam memiliki kandungan vitamin C sebesar 19,35mg/100 g dan lohoh tibia sebesar 10,20 mg/100 g (Pratiwi et al., 2019).

f. Teh Talua

Teh talua merupakan minuman khas dari Minangkabau, Sumatera Barat. Menurut Novra & Ariani (2020), ada banyak versi yang menjelaskan mengenai sejarah teh talua. Versi pertama menjelaskan bahwa teh talua sudah ada sejak zaman tanam paksa pada masa penjajahan. Saat itu, pemerintah Belanda melarang penduduk untuk menikmati hasil panen berupa kopi dan teh karena harga jual relatif tinggi. Sebagai penggantinya, penduduk mengambil bagian pangkal tanaman pada teh yang merupakan sisa dari pemotongan teh dan menyatukan serbuk kasar teh yang tidak laku dijual. Teh sisa ini ditambahkan dengan telur ayam dan gula lalu dikocok. Versi kedua menjelaskan bahwa teh talua sudah sejak lama dijadikan minuman untuk kalangan menengah ke atas karena dianggap sebagai minuman yang dapat memperbaiki gizi. Biasanya teh talua disajikan untuk para perantau yang sedang pulang kampung halaman. Versi ketiga menjelaskan bahwa pada masa pembangunan jam gadang di bukit tinggi, bangunan didirikan dengan cara mencampur putih telur dan semen, sisa

telur berupa bagian kuning telur ditambahkan pada formulasi minuman untuk pekerja bangunan karena bisa menambah energi.

Teh talua terbuat dari campuran teh, kuning telur, jeruk nipis, gula pasir dan sedikit garam. Cara pembuatannya adalah pertama kuning telur dan gula dicampur dan diaduk menggunakan seikat lidi kelapa. Pengadukan dilakukan hingga adonan mengembang. Setelah itu ditambahkan cairan teh panas di atas adonan. Telur yang digunakan dapat menggunakan telur itik atau telur ayam kampung. Teh talua biasa disajikan dalam tampilan '*ba lenggek*' dalam bahasa Minangkabau. *Ba lenggek* artinya bertingkat, tingkatan dapat terdiri dari dua sampai lima tingkat (Novra & Ariani, 2020).

Secara empiris teh talua mempunyai khasiat sebagai penambah tenaga, menjaga kesehatan mata dan dapat memenuhi kebutuhan asupan vitamin pada tubuh (Novra & Ariani, 2020). Kandungan senyawa pada teh antara lain *catechin (C)*, *gallo catechin (GC)*, *epicatechin (EC)*, *epigallocatechin (EGC)*, *epicatechin-3-gallate (ECG)*, dan *epigallocatechin-3-gallate (EGCG)*. Senyawa-senyawa tersebut yang berkontribusi terhadap adanya aktivitas antioksidan pada minuman (Yenrina, Permata, Rasjmida, & Tayandi, 2016).

4. Peluang dan Tantangan Minuman Tradisional di Era Society 5.0

Saat ini, berbagai jenis minuman kekinian dapat mudah kita jumpai. Minuman kekinian ini sering dipasarkan di mall, supermarket dan beberapa *booth* di pinggir jalan. Pemasaran minuman kekinian ini tidak hanya ada di dunia nyata, namun juga ada di dunia maya. Tak jarang, beberapa iklan di dunia maya memunculkan produk minuman kekinian ini sebagai bahan *endorse* oleh artis atau muncul sebagai iklan di tengah penayangan video online. Perkembangan teknologi yang sangat pesat menjadi salah satu pemicu munculnya berbagai produk minuman modern ini. Beberapa contoh minuman kekinian yang sering kita jumpai antara lain minuman boba, *thai tea*, *buble tea*, soju dan lain-lain. Sebelum datangnya minuman kekinian, minuman berkarbonasi juga sudah cukup menguasai pasar Indonesia. Hampir di setiap warung, restoran, depot dan pedagang kaki lima menjual minuman berkarbonasi '*made in america*' ini. Veronica & Ilmi (2020) melaporkan bahwa 483 dari 540 atau sekitar 89,4% mahasiswa di Depok dan Jakarta menyatakan suka dengan salah satu jenis minuman kekinian berbahan boba. Selain itu, pada tahun 2010-2014 terjadi peningkatan

konsumsi minuman berkarbonasi sebanyak 85,6% (Mutaqin, 2018). Jika hal ini terus dibiarkan, minuman tradisional akan kehilangan martabatnya sebagai minuman khas kebanggaan Indonesia. Pengembangan minuman tradisional agar tetap terus *survive* di era society 5.0 harus perlu diupayakan. Beberapa upaya yang bisa dilakukan untuk meningkatkan kewibawaan minuman tradisional Indonesia di tengah gempuran produk minuman modern antara lain sebagai berikut.

a. Teknologi Pengolahan untuk Minuman Praktis dan Tahan Lama

Andriyanty (2019) melaporkan bahwa produk makanan dan minuman dengan kemasan dan penyajian yang menarik akan meningkatkan peluang pembelian produk dalam negeri sebesar 2,207 kali. Peluang ini yang harus bisa ditangkap oleh produsen minuman tradisional. Selama ini, produksi minuman tradisional kebanyakan masih menggunakan skala rumah tangga, dimana produksi pembuatan minuman tradisional masih menggunakan teknologi sederhana. Hal ini tidak lepas dari budaya asal usul lahirnya minuman tradisional tersebut. Penyajian minuman tradisional biasa dilakukan dalam gelas, cangkir atau teko yang asal usulnya erat dengan sejarah minuman tradisional tersebut. Namun, untuk meningkatkan daya saing minuman tradisional, khususnya kepada konsumen generasi muda, teknologi penyajian minuman yang praktis, menarik dan memiliki umur simpan yang lama bisa untuk diupayakan.

Minuman tradisional yang ada selama ini bisa diinovasikan dalam bentuk minuman siap saji (*ready to drink*) yang dikemas dalam botol gelas, plastik atau karton laminasi. Teknologi pembuatan minuman tradisional dapat ditambahkan dengan teknologi modern yang dapat mempertahankan daya simpan seperti teknologi UHT, pasteurisasi dan lain-lain. Tentunya, segala teknologi yang digunakan ini jangan sampai menghilangkan kekhasan asli minuman tradisional. Aplikasi teknologi modern pada minuman tradisional sudah dilakukan oleh beberapa negara. Contohnya adalah perkembangan thai tea di Indonesia. Thai tea adalah minuman khas Thailand yang sangat sering kita temui di Indonesia. Thai tea memiliki gerai minuman dan produk minuman siap saji yang telah dijual di berbagai supermarket. Dengan kemasan botol yang praktis, thai tea dengan mudah menjangkau pasar konsumen Indonesia. Inovasi serupa sangat mungkin dilakukan oleh produk minuman tradisional Indonesia. Bukan hal yang tidak mungkin jika 5 sampai 10 tahun ke depan produk wedang uwuh, bandrek,

kawa daun, coro, teh talua dalam botol siap saji bisa dengan mudah kita temui di supermarket dan mudah dijangkau oleh konsumen.

b. Pengembangan Riset tentang Senyawa Psikoaktif pada Minuman Tradisional

Menurut Widianarko (2019) di era Society 5.0, konsumen tidak hanya menikmati sajian produk yang aman, lezat, indah, bergizi dan unik saja, namun juga akan menuntut aspek ketenangan pikiran. Pangan yang tidak hanya memberikan efek kesehatan bagi tubuh namun juga memberikan efek menenangkan jiwa ini bisa digali dalam minuman tradisional. Aspek ketenangan pikiran ini yang bisa didapatkan dalam kandungan minuman tradisional. Gómez-Pinilla (2008) menyatakan bahwa terdapat beberapa zat gizi pada pangan yang berpengaruh pada proses kognitif dan emosi seseorang. Fenomena ini sebenarnya sudah sering kita temukan. Contohnya, ketika seseorang mengkonsumsi kopi, tubuh akan bereaksi dengan menghilangkan rasa kantuk dan pada sebagian orang, kopi dapat membantu mutu kognisi sehingga dapat lebih fokus dalam melakukan pekerjaan. Hal ini dikarenakan senyawa kafein pada kopi yang terbukti dapat mempengaruhi kualitas psikologi tubuh. Contoh lainnya adalah pada konsumsi coklat. Sebagian orang merasa setelah mengkonsumsi coklat dapat membuat *mood* menjadi bagus. Penelitian sejauh ini menyatakan bahwa kandungan teobromin pada coklat dapat mendukung pelepasan hormon dopamine yang merupakan hormon positif yang dapat memberikan perasaan rileks dan bahagia (Wijaya, 2021).

Penelitian mengenai senyawa psikoaktif pada senyawa bahan alam telah dilakukan, di antaranya adalah penelitian tentang karakterisasi ekstrak andaliman. Geraniol dan Linalool pada ekstrak andaliman diketahui memiliki efek neurofisiologis yang dapat memberikan sensasi relaks. Panelis yang diberi bau-bauan berupa bau geraniol dan linalool memberikan efek berupa ritme fluktuasi frekuensi gelombang alpha frontal kanan yang mengalami peningkatan secara signifikan dan teratur. Gejala ini menunjukkan bahwa panelis merasakan sensasi gairah yang lebih rendah dan suasana tubuh menjadi rileks (Wijaya, Napitupulu, Karnady, & Indariani, 2019; Wijaya, 2021).

Penelitian untuk menggali senyawa psikoaktif pada bahan penyusun minuman tradisional sangat menarik untuk dilakukan. Hal ini dapat menjadi nilai tambah minuman tradisional sebagai minuman yang tidak hanya memberikan efek kesehatan secara jasmani namun juga rohani.

Harapannya, minuman tradisional Indonesia yang berbahan baku alam ini menjadi *trend setter* dalam pengembangan minuman psikoaktif yang sangat bermanfaat di era Society 5.0.

c. Reformulasi Gula pada Komposisi Minuman Tradisional

Diabetes menjadi penyakit tidak menular yang banyak menyerang penduduk dunia. Organisasi *International Diabetes Federation (IDF)* menyatakan sekitar 463 juta orang pada usia 20-79 tahun menderita diabetes pada tahun 2019 atau linier dengan nilai prevalensi sebesar 9,3% dari total penduduk dunia pada usia rata-rata yang sama. Di Indonesia, sebanyak 10,7 juta jiwa menderita diabetes. Angka ini membuat Indonesia menjadi negara ketujuh dengan jumlah penderita diabetes terbanyak di dunia. Diabetes menjadi penyebab utama penyakit jantung, kebutaan dan gagal ginjal (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2020). Konsumsi gula erat kaitannya dengan penyakit diabetes. Di sisi lain, seperti paparan pada Tabel 2., banyak minuman tradisional Indonesia yang menggunakan gula sebagai bahan baku. Hal ini menjadi pedang bermata dua bagi penikmat minuman tradisional. Di satu sisi, minuman tradisional sehat karena kaya akan antioksidan, di sisi lain kandungan gula pada komposisinya dapat meningkatkan resiko diabetes.

Di Indonesia, beberapa industri mengaplikasikan pemanis sintesis pada produk pangannya. Contohnya adalah penambahan sakarin dan siklambat. Pemanis sintesis ini bermanfaat untuk penderita diabetes karena nilai kalori yang lebih rendah dibandingkan pemanis dari gula tebu. Namun, di era Society 5.0, konsumen akan cenderung lebih memilih bahan-bahan alami pada produknya. Baru-baru ini makin marak penelitian mengenai pemanis alami yang memiliki nilai kalori lebih rendah yakni dengan menggunakan daun stevia. Nilai kalori rendah pada stevia disebabkan karena penggunaannya yang lebih sedikit dibandingkan gula sukrosa. Hal ini disebabkan karena tingkat kemanisan stevia 300 kali lipat dari gula sukrosa. Manfaat stevia lainnya di antara lain mencegah karies gigi, non karsinogenik, mencegah obesitas, menurunkan hipertensi serta mengandung protein, vitamin, kalsium dan mineral lain yang menguntungkan untuk tubuh (Raini & Isnawati, 2012).

Pengembangan dan penelitian untuk menggunakan jenis gula yang sesuai agar terhindar dari risiko diabetes perlu dilakukan. Perlu ditentukan tentang apa dan berapa jumlah pemanis yang ditambahkan pada minuman

tradisional dengan analisis yang komprehensif. Hal ini dilakukan agar manfaat dari minuman tradisional bisa sempurna terserap oleh manusia. Konsumen, khususnya dengan faktor risiko diabetes yang tinggi, tidak akan lagi takut dengan bahaya gula pada minuman tradisional. Ke depan, kampanye mengenai konsumsi minuman tradisional bisa menjadi lebih massif dan bisa menyasar banyak pihak karena begitu banyaknya keunggulan minuman kebanggaan Indonesia ini.

KESIMPULAN

Pangan fungsional telah menjadi kebutuhan yang *urgent* di Era Society 5.0. Konsumen tidak hanya menuntut pangan yang enak dan aman saja, namun juga sehat. *Mindset* mengenai pangan akan menjadi naik tingkat, tidak hanya mengenyangkan dan bergizi, namun juga sehat dan menenangkan diri. Peluang ini yang bisa ditangkap pada minuman tradisional kita. Indonesia memiliki kearifan lokal berupa minuman tradisional. Berbagai minuman tradisional Indonesia, memiliki komposisi dari bahan alam. Beberapa penelitian mengungkapkan bahwa senyawa antioksidan banyak ditemukan di berbagai jenis minuman tradisional Indonesia. Di tengah gempuran minuman kekinian, perlu dilakukan upaya untuk mempertahankan kewibawaan minuman tradisional Indonesia. Upaya tersebut antara lain (1) Menciptakan teknologi yang dapat membuat minuman tradisional menjadi lebih praktis, menarik dan memiliki umur simpan yang lama, (2) Perlu dilakukan penelitian yang komprehensif mengenai kandungan senyawa psikoaktif pada minuman tradisional, (3) Perlu dilakukan reformulasi gula pada komposisi minuman tradisional Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Andriyanty, R. (2019). Pilihan konsumen muda terhadap produk makanan dan minuman dalam negeri. *Jurnal Mediastima*, 25 (2), 205–223.
- Asmira, S., Nurhamidah, N., & Analdi, A. (2020). Aktivitas antioksidan dan total fenol pada kopi kawa daun yang berpotensi sebagai alternatif pangan fungsional. *SCIENTIA: Jurnal Farmasi dan Kesehatan*, 10(2), 200–207. <https://doi.org/10.36434/scientia.v10i2.234>
- Ben Hassen, T., El Bilali, H., & Allahyari, M. S. (2020). Impact of Covid-19 on food behavior and consumption in Qatar. *Sustainability*, 12(17), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su12176973>
- BPOM. (2005). Peraturan Kepala Badan Pengawasan Obat dan Makanan nomor HK 00.05.52.0685 tentang ketentuan pokok pengawasan pangan fungsional. Jakarta: Badan Pengawas Obat dan Makanan Republik Indonesia.
- BPOM. (2011). Peraturan Kepala Badan Pengawas Obat dan Makanan Republik Indonesia Nomor HK.03.1.23.11.11.09909 tentang pengawasan klaim dalam label dan iklan pangan olahan. Jakarta: Badan Pengawas Obat dan Makanan Republik Indonesia.
- BPOM. (2016). Peraturan BPOM Nomor 13 Tahun 2016 tentang pengawasan klaim pada label dan iklan pangan olahan. Jakarta: Badan Pengawas Obat dan Makanan Republik Indonesia.
- BPOM. (2018). Peraturan BPOM Nomor 1 tahun 2018 tentang pengawasan pangan olahan untuk keperluan gizi khusus. Jakarta: Badan Pengawas Obat dan Makanan Republik Indonesia.
- Defi, I. (2021). Karakterisasi fisikokimia dan sensori minuman kawa daun secara in vitro dan in silico (*thesis dissertation*). Retrieved from <https://repository.ipb.ac.id/jspui/handle/123456789/106307><https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/95378?show=full>
- Embuscado. (2015). Spices and herbs: natural sources of antioxidants- a mini review. *Journal of Functional Foods*, 18, 811-819.

- Faridah, D. N., Yasni, S., Suswantinah, A., & Wuri, A. G. (2013). Chemical and microbiological characterization of instan bandrek and nutmeg syrup (*Myrfstica fragrans*). *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 18(1), 43–48.
- Fauziyyah, A. (2018). Interaksi aktivitas antioksidan dan uji kestabilan dari ekstrak air jahe, secang dan cengkeh. (Thesis Dissertation). Retrieved from <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/95378?show=full>
- Giyatmi. (2018). Ensiklopedia produk pangan Indonesia Jilid 2: Bir pletok. Bogor: PATPI bekerjasama dengan IPB Press.
- Gómez-Pinilla, F. (2008). Perspectives brain foods : the effects of nutrients on brain function. *Nature Reviews Neuroscience*, 9, 568–578.
- Grettie, D.P. (1933). Gum guaiac-a new antioxidants for oil and fats. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 10: 126-127 dalam Nahas RI. (2012). Natural antioxidants as food and beverage ingredients. Woodhead Publishing Limited. pp: 100-120.
- Gupta, V. K., Roy, A., Nigam, V. K., & Mukherjee, K. (2010). Antimicrobial activity of spondias pinnata resin. *Journal of Medicinal Plants Research*, 4(16), 1656–1661. <https://doi.org/10.5897/JMPR10.182>
- Herdiana D.D., Utami R., & Anandito, R. B. K. (2014). Kinetika degradasi termal aktivitas antioksidan pada minuman tradisional. *Jurnal Teknosains Pangan*, 3(3), 44–53.
- Ishartani, D., Khasanah, L. U., & Kawiji. (2012). Produksi bir pletok kaya antioksidan. *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian*, 5(2), 32–39.
- Jalil, M. (2019). Pemanfaatan *Curcuma longa* dan *Kaempferia galanga* sebagai bahan pembuatan jamu “ Beras Kencur ” bagi ibu pasca persalinan. *Seminar Nasional Pendidikan Biologi Dan Saintek*, (April), 167–173.
- Jalil, M., Purwanto, A., Daryono, B. S., Kurniawan, F. Y., Tropika, D. B., Kunci, K. (2021). Jamu kunir asem: Tinjauan etnomedisin oleh peramu jamu jawa di Yogyakarta. *Jurnal Jamu Indonesia*, 6, 8–15.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2020). Tetap produktif, cegah dan atasi diabetes mellitus. Jakarta: Pusat Data Dan Informasi Kementerian Kesehatan RI.

- Kholishoh, S. N., Ulfiasari, R., Kurniawan, N., & Muflihati, I. (2019). Karakterisasi minuman bir pletok berkarbonasi dengan perbedaan komposisi jenis rimpangnya. *Pasundan Food Technology Journal*, 6(3), 159–166.
- Koswara, S., & Diniari, A. (2015). Peningkatan mutu dan cara produksi pada industri minuman jahe merah instan di Desa Benteng, Ciampea, Bogor. *Jurnal Ilmiah Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1, 149–161.
- Mishra, S., & Palanivelu, K. (2008). The effect of curcumin (turmeric) on Alzheimer's disease: An overview. *Annals of Indian Academy of Neurology* 1, 1–5.
- Muliani, L. (2017). Mempromosikan bir pletok sebagai minuman khas betawi melalui penyajian sebagai welcome drink. *Majalah Ilmiah Bijak*, 14(2), 219–235. <https://doi.org/10.31334/bijak.v14i2.19>
- Mutaqin, Z. (2018). Dinamika aspek kesehatan dan ekonomi dalam kebijakan pengendalian minuman berkarbonasi di Indonesia. *Quality Jurnal Kesehatan*, 1(1), 26–37.
- Nahas RI. (2012). Natural antioxidants as food and beverage ingredients. Woodhead Publishing Limited. pp: 100-120
- Nirmagustina, D. E., Zulfahmi, & Oktafrina. (2011). Sifat organoleptik dan kandungan total fenol minuman rempah tradisional (minuman secang). *Jurnal Teknologi Industri Dan Hasil Pertanian*, 16(1), 22–33.
- Nirmal, N. P., Rajput, M. S., Prasad, R. G. S. V., & Ahmad, M. (2015). Brazilin from *Caesalpinia sappan* heartwood and its pharmacological activities: A review. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 8(6), 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2015.05.014>
- Novita, R., Kasim, A., Anggraini, T., & Putra, D. P. (2018a). Kahwa daun: traditional knowledge of a coffee leaf herbal tea from West Sumatera, Indonesia. *Journal of Ethnic Foods*, 5, 286–291. <https://doi.org/10.1016/j.jef.2018.11.005>
- Novita, R., Kasim, A., Anggraini, T., & Putra, D. P. (2018b). Survei proses pembuatan minuman kahwa daun di Propinsi Sumatera Barat,

- Indonesia. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, 22(1), 32-36.
<https://doi.org/10.25077/jtpa.22.1.32-36.2018>
- Novra, E., & Ariani, S. (2020). Teh talua, daya tarik wisata Sumatera Barat. *Jurnal Penelitian Dan Kajian Ilmiah Menara ILMU*, 15 (1), 33–41.
- P3FNI. (2019, January 17). Retrieved from <http://p3fni.org/apa-itu-pangan-fungsional/>
- PDN. (2012). Arah kebijakan 2012: Potensi dan sasaran strategisnya. DITJEN PDN/MJL/01/2012
- Pebiana, N.P.N., Puspasar, Y.D., Dewi, R.M., & Arnyana, I.B.P. (2020). Kajian etnobotani loloh dan the herbal lokal sebagai penunjang ekonomi kreatif masyarakat Desa Tradisional Penglipuran Kabupaten Bangli-Bali. *Jurnal Pendidikan Biologi Undiksha*, 7(2), 54-65.
- Pratiwi, I.D.P.K., Suter, I. K., Widpradnyadewi, P. A. S., & Wiadnyani, A. A. I. S. (2019). Perubahan fisiko-kimiawi dan mikrobiologis minuman tradisional bali (loloh) selama penyimpanan. *Agritech*, 39(1), 70-77.
<https://doi.org/10.22146/agritech.17261>
- Purwaningsih, E. H. (2013). Jamu, obat tradisional asli Indonesia: Pasang surut pemanfaatannya di Indonesia. *EJournal Kedokteran Indonesia*, 1(2). <https://doi.org/10.23886/ejki.1.2065.85-89>
- Raini, M., & Isnawati, A. (2012). Kajian: Khasiat dan keamanan stevia sebagai pemanis pengganti gula. *Media of Health Research and Development*, 21(4), 145–156. <https://doi.org/10.22435/mpk.v21i4Des.50>.
- Sandrasari, D.A. (2009). Kapasitas antioksidan dan hubungannya dengan nilai total fenol ekstrak sayuran indigenous (Thesis Dissertation). Retrieved from <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/43910>
- Septiana, A. T., Samsi, M., & Mustaufik, M. (2017). Pengaruh penambahan rempah dan bentuk minuman terhadap aktivitas antioksidan berbagai minuman tradisional Indonesia. *Agritech*, 37(1), 7-14.
<https://doi.org/10.22146/agritech.17001>
- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects - A review.

- Journal of Functional Foods*, 18, 820–897.
<https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.018>
- Veronica, M.T., Ilmi, I.M.B. (2020). Minuman kekinian di kalangan mahasiswa Depok dan Jakarta. *Indonesian Jurnal of Health Development*, 2(2), 83–91.
- Widianarko, B. (2019, Juni 21). Tantangan industri pangan 5.0. Retrieved from <https://news.unika.ac.id/2019/06/tantangan-industri-pangan-5-0/>
- Wijaya, C. H., Napitupulu, F. I., Karnady, V., & Indariani, S. (2019). A review of the bioactivity and flavor properties of the exotic spice “andaliman” (*Zanthoxylum acanthopodium* DC.). *Food Reviews International*, 35(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/87559129.2018.1438470>
- Wijaya, C.H. (2021, Maret 1). Pangan fungsional psikoaktif: peluang masa depan. *Food Review*. XVI (3). 21-27
- Yamada, K., Sato-Mito, N., Nagata, J., & Umegaki, K. (2008). Health claim evidence requirements in Japan. *Journal of Nutrition*, 138(6). <https://doi.org/10.1093/jn/138.6.1192s>
- Yenrina, R., Permata, D. A., Rasjmida, D., & Tayandi, R. (2016). In vitro protein digestibility and physical properties of instant teh talua dried by spray dryer. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 6(1), 84–87. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.6.1.674>

**BLIGO (*Benincasa hispida*): POTENSI DAN
PENGEMBANGAN RISET SEBAGAI PANGAN
FUNGSIONAL DAN PRODUK BERNILAI TAMBAH**

***BLIGO (Benincasa hispida): POTENTIAL AND
RESEARCH DEVELOPMENT AS FUNCTIONAL FOOD
AND VALUE ADDED PRODUCTS***

Dini Nur Hakiki¹, Athiefah Fauziyyah², Eko Yuliasuti³, M.Rajih Radiansyah⁴
^{1,2,3,4} Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan Pertanian,
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
dini-hakiki@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

*Dalam era society 5.0 yang menekankan aspek keselarasan antara kebutuhan pangan dengan resolusi permasalahan sosial, diperlukan riset-riset terkait pengembangan produk pangan yang mengarah ke kesejahteraan dan kesehatan manusia. Artikel ini bertujuan untuk membahas potensi bligo dan pengembangan riset komoditas bligo. Tulisan ini merupakan kombinasi dari kajian/studi pustaka yang membahas mengenai potensi bligo dan riset produk turunan bligo yang telah dikembangkan oleh Prodi Teknologi Pangan, FST UT. Bligo (*Benincasa hispida*) merupakan jenis tanaman cucurbitaceae atau labu-labuan yang tumbuh subur di daerah tropis. Tanaman bligo walau dapat tumbuh subur di Indonesia namun belum banyak dibudidayakan dan hanya menjadi tanaman liar di pekarangan. Buah bligo terdiri dari beberapa bagian yaitu daging buah, kulit, biji, dan pulp. Bagian-bagian tersebut memiliki kandungan nutrisi yang penting bagi tubuh dan berbagai manfaat untuk kesehatan tubuh seperti antioksidan, antibakteri, antidiare, anti kompulsif, dan obat lambung. Beberapa penelitian yang ada tentang potensi bligo sudah dilaksanakan baik secara *in vivo* maupun *in vitro*. Riset pengembangan produk yang telah dilakukan berasal dari kulit dan daging buah bligo. Pada daging buah bligo dimanfaatkan sebagai food bar sedangkan kulit bligo dilakukan karakterisasi senyawa penting dalam bligo. Produk food bar bligo dikembangkan sebagai pangan darurat di kala kondisi*

bencana. Karakterisasi senyawa penting dalam kulit bligo bertujuan untuk pengembangan produk lebih lanjut.

Kata Kunci: *benincasa, bligo, kundur, pangan fungsional.*

PENDAHULUAN

Bligo (*Benincasa hispida*) merupakan jenis tanaman *cucurbitaceae* atau labu-labuan yang tumbuh subur di daerah tropis. Di beberapa negara, nama lain tanaman ini antara lain Kundur (Malaysia), Dōngguā (China), Kondol (Filiphina), Benicasa (Italia), Bhuru Kolu (Gujarati), dan Voksagurk (Denmark). Ketika matang, bligo akan diselimuti lapisan lilin berwarna putih pada seluruh permukaan kulit buahnya sehingga tanaman ini dikenal juga dengan nama *winter melon, ash gourd, ash white gourd pumpkin, white pumpkin, gourdmelon, tallow gourd, wax gourd* (Zaini, Anwar, Hamid, & Sari, 2011; APEEC, 2013). Di beberapa daerah di Indonesia seperti di Pulau Jawa bligo sering disebut dengan Blonceng atau Kundur, Kundia Batang di Sumatera, dan Kundur di Maluku. Berdasarkan bentuk buah, panjang, lebar, dan kulit buahnya, bligo memiliki 16 cultivar (Marr, Xia, & Bhattarai, 2007). Buahnya ada yang berbentuk bulat, lonjong, dan oval. Di Pulau Jawa sering ditemukan varietas yang berbentuk oval dengan panjang kurang lebih 40 cm dan diameter 30 cm.

Di beberapa negara Asia, buah bligo banyak dimanfaatkan baik sebagai makanan maupun obat. Buah bligo digunakan untuk campuran sup yang dinamakan *tralach* di Kamboja, *bí ao* di Vietnam, *sabaw* di Filiphina, *Kubhindo* di Nepal. Di Tiongkok, buah bligo diolah menjadi manisan yang dinamakan *tang kwee*, yang berarti labu musim sejuk. Di Malaysia, manisan buah bligo dikenal sebagai *candied fruit winter melon*. Di India Utara dan Pakistan dijadikan gula-gula yang disebut 'petha'. Di India Selatan dijadikan bahan tambahan masakan Kari (*curries*). Bisa juga dijadikan campuran es buah apalagi yang telah dijadikan manisan. Di China dan Taiwan, bligo diolah menjadi minuman yang dikenal dengan *winter tea melon tea* (Agroindonesia, 2020). Bligo juga dimanfaatkan sebagai pengobatan ayurveda. Pengobatan yang berasal dari India ini merupakan rangkaian penyembuhan dengan menggabungkan gaya hidup dan pengobatan tradisional untuk menekankan pada konsep keseimbangan antara tubuh, pikiran, hati, dan lingkungan. Di India, bligo lebih dikenal dengan nama

kushmanda yang digunakan terutama untuk kerusakan sistem saraf dan epilepsi (Meghashree , Shanta, & Bath, 2017; Zaini et al., 2011).

Di Indonesia, tanaman bligo sudah jarang ditemui dan umumnya dibiarkan tumbuh liar di pekarangan. Buahnya kerap dijual di pasar tradisional di daerah tertentu dan sudah sangat jarang ditemui di kota-kota besar. Buah bligo belum banyak dimanfaatkan. Rasa buah yang tawar dan sedikit langu menjadi salah satu kendalanya. Sejauh ini, buah bligo paling sering digunakan sebagai bahan pembuatan manisan bligo atau blonceng.

Sejalan dengan konsep *society 5.0* yang menekankan aspek keselarasan antara perkembangan teknologi, kemajuan ekonomi dengan permasalahan sosial yang ada di masyarakat, maka diperlukan kajian dan riset terkait pengembangan produk pangan yang mengarah kepada kesejahteraan dan kesehatan manusia. Bligo yang selama ini belum banyak dimanfaatkan, perlu dikaji dan diteliti. Tulisan ini merupakan kombinasi dari kajian/studi pustaka yang membahas mengenai potensi bligo dan riset produk turunan bligo yang telah dikembangkan. Data potensi bligo yang digunakan berasal dari karya tulis yang telah dipublikasikan di jurnal ilmiah sehingga tulisan ini dapat menjadi referensi bagi para peneliti yang ingin melakukan penelitian lebih lanjut terkait bligo. Dalam tulisan ini juga disampaikan riset yang telah dikembangkan dalam pemanfaatan bligo.

PEMBAHASAN

1. Karakteristik Bligo

Bligo termasuk dalam divisi *Magnoliopsida* yang merupakan tanaman berbunga dan termasuk famili *Cucurbitaceae* seperti tanaman labu kuning, mentimun, melon (Tabel 1). Tanaman *Cucurbitaceae* mempunyai ciri-ciri, yaitu berupa terna annual (tumbuhan batang lunak), memiliki daun tunggal, berlekuk sampai menjari majemuk, menjalar dengan menggunakan sulur-sulur atau alat pembelit yang merupakan metamorfosis cabang, dahan, atau daun penumpu (Sitorus, Rugayah, & Zidni, 2019).

Tabel 1. Taksonomi Tanaman Bligo

Kingdom	<i>Plantae</i>
Subkingdom	<i>Tracheobionta</i>
Superdivision	<i>Spermatophyta</i>
Division	<i>Magnoliophyta</i>
Class	<i>Magnoliopsida</i>
Subclass	<i>Dilleniidae</i>
Order	<i>Violales</i>
Family	<i>Cucurbitaceae</i>
Genus	<i>Benincasa savi</i>
Species	<i>Benincasa hispida (Thunb.)Cogn</i>

Sumber: USDA, 2009

Dibanding dengan tanaman *Cucurbitaceae* lainnya, bligo ini termasuk tanaman yang lebih mudah tumbuh (Zaini et al., 2011). Bligo dapat tumbuh baik ditanam di atas tanah ataupun menggunakan lanjaran (Gambar 1. Tanaman ini tahan terhadap kekeringan dan relatif sedikit hama yang menyerang. Buah bligo dapat tumbuh sekitar 6-9 minggu sejak dari munculnya bunga atau membutuhkan 2-3 bulan sejak biji ditanam.

**Gambar 1.** Tanaman Bligo Tumbuh di Lanjaran







Saat masih muda, buah bligo berwarna hijau muda dan memiliki bulu-bulu halus di permukaannya kulitnya, namun lama kelamaan bulu tersebut akan menghilang dan muncul lapisan lilin berupa serbuk putih yang menyelimuti seluruh permukaan kulit buah (Gambar 2). Semakin tua umur bligo maka serbuk putih tersebut akan semakin banyak dan kulit bligo akan menjadi semakin keras. Lapisan lilin yang menyelimuti bligo ini berguna untuk melindungi bligo dari serangan mikroorganisme sehingga buah bligo dapat disimpan dalam waktu lama. Bila tidak ada luka pada kulit buah, maka bligo dapat disimpan dalam waktu beberapa bulan bahkan hingga satu tahun (Morton, 1971). Di China, bligo disimpan dalam jangka waktu yang lama untuk cadangan makanan saat musim dingin yaitu sebagai bahan baku pembuatan sup yang dapat menghangatkan badan saat musim dingin tiba (APEEC, 2013).



Gambar 2. Bentuk Buah Bligo

Buah bligo terdiri dari beberapa bagian yaitu daging buah, kulit, biji, dan pulp. Tabel 2 menyajikan persen rendemen dari yang paling besar, berturut-turut yaitu daging buah (73,61%), kulit (15,93%), pulp (8,02%), dan terakhir biji (2,45%). Daging buah yang matang akan berwarna putih, kenyal, dan berair. Ketebalan daging mencapai 2-5 cm. Semakin lama penyimpanan bligo, daging buah akan kehilangan airnya dan menjadi semakin menyusut. Hal ini berpengaruh ke berat bligo selama penyimpanan yang terus menurun walau dari luar penampakan buah tidak berubah layaknya buah segar.

Tabel 2. Bagian dan Rendemen Buah Bligo

Penampakan bligo utuh	Penampakan per bagian	Komponen	% Rendemen
 		Daging buah	73,61
		Kulit	15,93
		Pulp	8,02
		Biji	2,45

Saat buah dibelah pada bagian tengah daging buah terdapat biji dan pulp. Pada buah yang segar pulp bligo cenderung berlendir. Pulp memiliki aroma yang harum dan manis. Di dalam pulp terdapat biji yang terperangkap di dalamnya. Biji bligo berwarna putih hingga kekuning-kuningan dengan panjang 1,5 cm dan lebar 0,5-0,8 cm bergantung varietasnya. Semakin matang buah bligo maka warna biji semakin kekuningan (Raveendra & Martin, 2006).

Bligo sangat berpotensi dibudidayakan di Indonesia. Tanaman ini relatif tahan terhadap kekeringan dan serangan hama sehingga berpotensi dibudidayakan di lahan marginal atau non produktif yang banyak tersebar di Indonesia. Selain itu, karakteristik bligo juga dapat ditanam menggunakan lanjaran, membuat penanamannya tidak membutuhkan banyak tempat.

Daun bligo yang lebar yang merambat melalui lanjaran, dapat berfungsi sebagai naungan atau teduhan dari terik sinar matahari. Hal ini tentunya dapat menjadi solusi menanam di lahan terbatas seperti di perkampungan padat penduduk, gedung perkantoran, atau kawasan industri. Penanaman bligo dapat menjadi alternatif penyediaan ruang terbuka hijau di kota-kota besar.

Tak hanya sebagai naungan, bligo juga menghasilkan buah yang dapat dikonsumsi oleh masyarakat, namun sayangnya rasa buah yang tawar dan sedikit langu menjadi salah satu kendala dalam pemanfaatan buah bligo. Sejauh ini, bligo paling banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan manisan atau yang dikenal dengan manisan blonceng. Penambahan gula pada manisan memberikan rasa manis yang lebih disukai daripada dikonsumsi segar. Belum banyaknya informasi tentang khasiat bligo membuat masyarakat belum banyak yang memanfaatkan bligo baik itu daging buahnya, biji, kulit, dan pulpnya.

2. Potensi Daging Buah Bligo

Berdasarkan bentuknya, buah bligo memiliki beberapa tipe yaitu bulat (panjang 20-40 cm), bujur (panjang 35-70cm), dan oval (panjang 25-50 cm). Di China, buah bligo berukuran lebih besar dengan panjang dapat mencapai 80-100 cm (APEEC, 2013). Buah yang muda berasal dari putik yang membesar, berwarna hijau muda dan kulitnya berbulu tajam. Buah yang telah matang akan diselimuti lapisan lilin berupa serbuk-serbuk putih pada seluruh permukaan kulit dan ditandai dengan tangkai buah yang telah kering berwarna kecoklatan.

Telah banyak penelitian yang dilakukan untuk mengetahui kandungan nutrisi maupun senyawa penting yang terkandung dalam buah bligo. Buah bligo sangat baik bagi tubuh dan bermanfaat bagi kesehatan. Hal ini dikarenakan bligo mengandung beberapa nutrisi seperti lipid, protein, karbohidrat, serat, mineral dan vitamin. Bligo efektif melawan diabetes, penyakit yang berhubungan dengan hati, keputihan dan demam (Samad et al., 2012).

Kandungan nutrisi dalam bligo ditunjukkan pada Tabel 3. Sebagian besar kandungan nutrisi bligo merupakan air yang berkisar antara 94-96,8%. Kadar air sering dihubungkan dengan indeks kestabilan khususnya pada saat disimpan. Semakin sedikit kandungan air pada bahan makanan, maka kemungkinan rusaknya oleh mikroba semakin kecil. Semakin tinggi kadar air

dalam suatu bahan pangan, daya simpan serta kualitas bahan pangan tersebut semakin rendah (Winarno, 2004). Buah bligo utuh memiliki umur simpan yang relatif lama. Bila tidak ada luka, buah bligo dapat disimpan beberapa bulan bahkan setahun pada kondisi kering atau dingin namun apabila buah bligo sudah dipotong hanya memiliki umur simpan 2-3 hari (Sreenivas , Rekha, Singhal, Lele, 2011).

Kandungan karbohidrat, protein, dan lemak buah bligo relatif sedikit, namun mineral penting yang baik untuk tubuh seperti potasium dan kalsium relatif banyak terkandung dalam buah bligo. Kedua mineral ini sangat bermanfaat dalam menjaga keseimbangan elektrolit cairan tubuh (MacWilliam, 2005).

Tabel 3. Kandungan Nutrisi pada Buah Bligo
(per 100 g berat yang dapat dimakan)

Kandungan	China	Malaysia	Australia	USDA	Indonesia
Air	96,7	94,50	96,8	96,10	94,00
Protein (g)	0,40	0,50	0,30	0,40	0,40
Karbohidrat (g)	2,56	4,00	1,10	3,00	4,7
Fiber (g)	0,58	0,50	1,50	0,50	1,3
Lemak (g)	0,00	0,20	0,00	0,20	0,20
Kadar Abu (g)	0,27	0,30	0,30	0,30	0,70
Vitamin C (mg)	1,35	68,00	27,00	13,00	1,00
Thiamin (mg)	NA	0,02	0,02	0,04	0,10
Riboflavin (mg)	0,02	0,31	0,05	0,11	0,03
Niacin (mg)	0,46	0,20	0,40	0,40	0,40
Natrium (Na)	0,14	2,00	1,00	6,00	2
Potasium (K) (mg)	81,86	131,00	77,00	111,00	200,00
Kalsium (Ca) (mg)	23,32	11,0	5,00	19,00	3
Zat Besi (Fe) (mg)	0,49	0,20	0,30	0,40	0,5
Referensi	Mingyu et al., 1997	Tee, et al., 1997	Wills et al., 1995	Morton, 1971	Panganku.org

Sumber: Zaini et al., 2011; panganku.orang, n.d.

Penelitian terkait senyawa penting yang terdapat dalam bligo telah dilakukan baik secara *in vitro* maupun *in vivo*. Penelitian secara *in vitro* yang telah dilakukan Nadhiya, HariPriya, & Vijayalakshmi(2014) menunjukkan bahwa ekstrak bligo memiliki kandungan fenol, flavonoid, tanin, saponin, terpenoids, dan alkaloid yang berpotensi sebagai antioksidan. Lebih lanjut

isolasi dan identifikasi senyawa kimia buah bligo menggunakan kromatografi gas-spektrometri massa berhasil mengidentifikasi senyawa tridekananitril, pentadekananitril, dan heptadekananitril (Suryanti, Surya, & Musmuallim, 2018). Du, Zhang, & Ito (2005) melaporkan ekstrak buah bligo dengan menggunakan *high-speed countercurrent chromatography* (HSCCC) mendeteksi adanya tiga komponen fenolik yang berpotensi sebagai antioksidan yaitu astilbin, katekin, dan naringenin. Selain itu ekstrak buah bligo juga mengandung asam askorbat yang merupakan sumber antioksidan yang bagus untuk tubuh (Fatariah, Tengku, & Rosli, 2015).

Huang, Huang, Tso, Tsai, & Chang (2004) melaporkan daging buah bligo menunjukkan adanya penghambatan enzim *angiotensin-converting enzyme* (ACE). Penghambatan aktivitas ACE dikarenakan adanya kandungan fenolik yang tinggi pada bligo sehingga berpotensi memberikan efek farmakologis dalam pengobatan tekanan darah tinggi.

Mubarak, Sartini, & Purnawanti (2018) meneliti potensi bligo sebagai antibakteri *Salmonella typhi*. Bligo telah dipercaya oleh masyarakat dapat mengobati demam tifoid. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ekstrak buah bligo dengan konsentrasi etanol 70% memiliki daya hambat yang baik terhadap bakteri *Salmonella typhi*. Sama halnya dengan penelitian Darmayani et al. (2021) yang menunjukkan bahwa ekstrak etanol buah kundur memiliki aktivitas penghambatan terhadap pertumbuhan bakteri *S. typhi* dengan konsentrasi hambat minimum 800 g / ml.

Penelitian secara *in vivo* terhadap buah bligo juga telah banyak dilakukan. Shetty et al. (2008) melaporkan adanya penurunan yang nyata pada kerusakan pada lambung tikus dengan penambahan ekstrak buah bligo. Bligo telah terbukti mengandung zat aktif tertentu seperti terpen, flavanoid C-glikosida dan sterol yang berfungsi sebagai antioksidan yang dapat menghambat cedera mukosa lambung. Hal ini juga didukung dengan penelitian Grover, Adiga, Vats, & Rathi. (2001) bahwa ekstrak bligo memiliki kemampuan sebagai obat alami untuk tukak lambung. Dalam studi ini membandingkan metode ekstraksi dengan berbagai pelarut dan menunjukkan hasil bahwa ekstrak bligo menggunakan alkohol dapat menurunkan luka pada lambung tikus dibanding dengan kontrol.

Mathad et al. (2005) melaporkan ekstrak metanol buah bligo menunjukkan adanya aktivitas penghambatan yang signifikan terhadap diare pada tikus. Terjadi penurunan frekuensi defekasi yang signifikan bila dibandingkan dengan tikus yang tidak diberi perlakuan/kontrol.

Girdhar, Wanjari, Prajapati, & Girdhar (2010) menemukan bahwa ekstrak metanol buah bligo menunjukkan sifat anti-kompulsif dalam tes *marble burying behaviour* pada tikus. Gangguan kompulsif sendiri merupakan suatu kondisi yang ditandai dengan adanya pengulangan pikiran yang kompulsif, dimana penderitanya membutuhkan banyak waktu dan dapat menyebabkan *distress* yang cukup besar. Adanya triptofan pada buah bligo kemungkinan bertanggung jawab dalam meningkatkan biosintesis serotonin yang memfasilitasi efek anti-kompulsif.

3. Potensi Kulit Bligo

Bligo memiliki keunikan tersendiri terutama pada bagian kulitnya dimana akan muncul serbuk-serbuk putih seiring dengan tingkat kematangannya. Bersamaan dengan munculnya serbuk putih ini, kulit bligo akan menjadi semakin tebal sehingga dapat mencegah serangan mikroorganisme dan memperpanjang umur simpan bligo. Sayangnya pemanfaatan kulit bligo belum banyak, baru sebatas dijadikan pakan ternak. Kulit bligo dicampur dengan pakan ternak lainnya untuk dijadikan palet, pakan ternak domba (APEEC, 2013).

Berdasarkan kandungan nutrisinya, kulit bligo bila dibandingkan dengan daging buah bligo, lebih banyak mengandung protein (3,60 gr/100g), kalsium (692 mg/100 g), dan zat besi (17,06 mg/100 g). Nagarajaiiah dan Prakash (2014) membandingkan kandungan nutrisi kulit beberapa jenis tanaman *cucurbitacea* yaitu bligo, labu siam (*Sechium edule*), dan oyong (*Luffa acutangula*). Hasilnya menunjukkan kulit bligo memiliki nilai serat pangan, kandungan zat besi, kalsium pada bligo lebih tinggi dibanding dengan kulit labu siam dan oyong.

Penelitian terkait senyawa penting dalam kulit bligo ini belum banyak dilakukan dan sebagian besar masih dalam kajian *in vitro*. Rana dan Sutee (2012) melakukan skrining fitokimia untuk menyelidiki potensi antioksidan dari ekstrak air dan metanol kulit bligo menggunakan metode DPPH. Ekstrak kulit bligo menunjukkan potensi yang signifikan. Pengukuran aktivitas penangkapan radikal DPPH ditemukan 87,87% pada konsentrasi $100\mu\text{g}/\text{mL}^{-1}$ dan 86,5% pada konsentrasi $100\mu\text{g}/\text{mL}^{-1}$. Menurut Abdullah, Kamarudin, Samicho, Aziman, & Zulkifli (2012) dibandingkan dengan bagian lain seperti daging buah dan biji, kandungan total fenol kulit buah adalah paling kecil yaitu 74,83 GAE/g. Sama halnya dengan kandungan total fenol, aktivitas antioksidan kulit menggunakan DPPH juga memiliki nilai yang

rendah. Hakiki, Fauziyyah, & Wijanarti (2021) melaporkan aktivitas antioksidan pada kulit bligo termasuk dalam kelas medium dengan nilai IC_{50} 6,91 mg/ml. Selain itu kandungan gula yang terdapat dalam kulit bligo juga telah diteliti oleh Kumar, Mythily, Chandraju, & Rasayan(2012). Penelitian tersebut melaporkan bahwa jenis gula yang terdeteksi pada ekstrak metanol kulit bligo menggunakan *thin layer chromatography*, berupa galaktosa, glukosa, xylosa, dan sorbosa.

4. Potensi Biji Bligo

Biji bligo berpotensi digunakan sebagai obat. Telah dilaporkan bahwa ekstrak biji bligo dapat mencegah tukak lambung dan memperlancar sekresi lendir sehingga dapat digunakan sebagai ekspektoran (Kim dan Shin, 1999; Grover et al., 2000). Ekstrak biji dari bligo menunjukkan efek penghambatan pada sekresi histamin dan efek antitumor dengan meningkatkan reaksi imun (Yoshizumi et al., 1998). Gill, Dhiman, Bajwa, Sharma, & Sood (2010) meneliti potensi anti-inflamasi dari biji bligo. Adanya aktivitas antioksidan pada biji bligo kemungkinan bertanggung jawab terhadap pengurangan peradangan pada edema kaki tikus. Efek anti inflamasi berhubungan dengan senyawa bioaktif terpenoid yang terkandung pada biji bligo (Shetty et al., 2008).

Huang et al. (2004) melaporkan aktivitas antioksidan yang berbeda pada berbagai bagian bligo seperti kulit, biji dan pulp, dan biji memiliki aktivitas antioksidan yang paling tinggi. Sejalan dengan penelitian tersebut, Abdullah et al. (2012) juga melaporkan kandungan total fenol dan aktivitas antioksidan pada biji paling tinggi dibandingkan dengan pulp dan kulitnya. Samad et al. (2012) juga melaporkan bahwa kandungan fenol dan flavonoid biji bligo sebesar $81,3 \pm 1,4$ μ g gallic acid/g dan $486,8 \pm 4,1$ μ g katekin/g bahan kering.

Penelitian Sharma, Hirday, & Nilesh (2014) berhasil menemukan hispidalin yang merupakan peptida bioaktif dalam ekstrak biji bligo. Peptida ini bersifat amfipatik yang memiliki efek penghambatan yang luas dan kuat terhadap berbagai patogen bakteri dan jamur. Efek penghambatannya ini bahkan setara dengan obat antibakteri dan antijamur komersial. Hispidalin pada konsentrasi 40 g/mL dalam ekstrak biji bligo menunjukkan aktivitas penangkal radikal bebas DPPH 70,8% dan penghambatan peroksida lipid 69,5%. Hispidalin dalam biji bligo ini menunjukan potensi yang besar sebagai antimikroba dan antioksidan.

Ekstrak biji bligo juga mengandung banyak asam lemak tidak jenuh dan asam amino esensial. Ekstrak biji bligo dengan pelarut etanol 99,5% digunakan untuk mengidentifikasi kandungan asam lemak. Hasilnya sekitar 75% didominasi asal lemak tidak jenuh dalam bentuk asam lemak esensial linoleat (LA) dan linolenat (ALA). Telah diketahui bahwa asam linoleat berperan penting dalam mencegah banyak penyakit sedangkan asam linolenat merupakan prekursor asam eicosapentaenoic (EPA) dan docosahexaenoic acid (DHA) yang berperan penting dalam perkembangan otak. Asam lemak esensial ini tidak dapat disediakan oleh tubuh sehingga harus dipenuhi dari makanan (Mandana et al., 2012). Sew, Zaini, Anwar, Hamid, & Saari (2010) juga melaporkan bahwa minyak pada biji bligo mengandung proporsi asam lemak esensial, asam linoleat (C18:2-6) yang tinggi sebesar 67,37% dari total asam lemak.

Komposisi asam amino dari berbagai bagian buah bligo (pulp, biji dan kulit) juga telah dipelajari oleh Mingyu et al. (1995). Hasil penelitian menunjukkan bahwa total protein (5714.017 mg/100g) dan asam amino bebas (264.366 mg/100g) paling tinggi terdapat dalam biji. Jenis asam amino yang paling banyak ditemukan dalam biji bligo seperti aspartat, glutamat, dan arginin.

Dari hasil riset-riset di atas, bligo berpotensi memiliki berbagai khasiat yang berpengaruh terhadap kesehatan. Riset-riset tersebut juga tidak hanya dilakukan secara *in vitro* namun juga sudah dilakukan uji secara *in vivo* terutama pada bagian daging buah dan biji bligo. Kedepan perlu dilakukan uji klinis untuk memperkuat khasiat dalam bligo. Belum banyak riset yang menggali potensi dari kulit bligo, sehingga masih sangat terbuka peluang untuk diteliti.

5. Riset Pemanfaatan Bligo Sebagai Pangan Fungsional di Indonesia

Melihat potensi buah bligo yang tidak hanya memberikan nutrisi bagi tubuh namun berpengaruh terhadap kesehatan tubuh, maka bligo berpotensi dikembangkan sebagai pangan fungsional. Menurut BPOM (2011), pangan fungsional adalah pangan olahan yang mengandung satu atau lebih komponen pangan, yang berdasarkan kajian ilmiah mempunyai fungsi fisiologis tertentu di luar fungsi dasarnya, terbukti tidak membahayakan dan bermanfaat bagi kesehatan. Pangan fungsional dikonsumsi sebagaimana layaknya makanan atau minuman, mempunyai karakteristik sensori berupa penampakan, warna, tekstur dan cita rasa yang

dapat diterima oleh konsumen. Pangan fungsional tidak memberikan kontraindikasi dan efek samping terhadap metabolisme zat gizi lainnya jika digunakan dalam jumlah yang dianjurkan. Meskipun mengandung senyawa yang bermanfaat bagi kesehatan, pangan fungsional tidak berbentuk kapsul, tablet, atau bubuk yang berasal dari senyawa alami. Beberapa fungsi fisiologis yang diharapkan dari pangan fungsional antara lain adalah: pencegahan dari timbulnya penyakit, meningkatnya daya tahan tubuh, regulasi kondisi ritme fisik tubuh, memperlambat proses penuaan, dan menyehatkan kembali (*recovery*). Contoh komponen bioaktif yang ada dalam pangan fungsional antara lain antioksidan, serat pangan, pati resisten, inulin, fruktooligosakarida (FOS), PUFA, probiotik, prebiotik, asam lemak [Mono *unsaturated fatty acids* (MUFA), *Poly unsaturated fatty acids* PUFA]], flavonoid (Suter, 2013; Winarti & Nurdjanah, 2005).

Beberapa riset terkait pengembangan produk turunan bligo di Indonesia telah dilakukan seperti diolah sebagai minuman bligo dan olahan pangan. Alsuhendra, ridawati, & Mardianty (2014) membuat produk minuman sari buah bligo dengan cara mengekstrak buah bligo menggunakan air. Ekstraksi buah bligo dengan menggunakan 3 metode perbandingan persen buah bligo dan air (100%:0%) ;(75%:25%) dan (50%:50%). Produk minuman yang dihasilkan selanjutnya ditentukan nilai pH dan kadar kalium, serta daya terima panelis secara organoleptik. Nilai pH dalam rentang 2,96-2,99, kadar kalium tertinggi pada konsentrasi 100%:0% sebesar 1,882 mg/kg, dan panelis lebih menyukai konsentrasi 75%:25% terhadap aroma, rasa, dan warna.

Aini (2016) mengembangkan produk sari buah bligo dengan variabel jenis penstabil (CMS, pektin, dan gum arab), konsentrasi sukrosa (7%, 8%, dan 9%) dan suhu pasteurisasi yang berbeda (70, 80, dan 90°C). Penstabil CMC memiliki hasil terbaik untuk kestabilan bligo, pemanasan sari bligo pada suhu pasteurisasi 70°C memiliki kandungan vitamin C paling tinggi sebesar 60,167 vitC/100 ml, dan konsentrasi sukrosa 9% paling disukai panelis dari segi rasa dan aroma.

Modifikasi sari buah menjadi minuman probiotik dikembangkan oleh Patty, Watuguly, & Tuapattinaya (2021). Pembuatan minuman probiotik ini dilakukan dengan menambahkan sari buah bligo dengan $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ sebanyak 0,2% dan glukosa 5%. Selanjutnya dipasteurisasi dengan suhu 60°C selama 30 menit, diinokulasi dengan *L. Plantarum* 4% (v/v) dan diinkubasi pada suhu 37°C. Amanda (2017) membuat minuman fermentasi sari buah

bligo dengan cara menambahkan sari buah bligo dengan susu skim, gula, kemudian diinokulasi *Streptococcus thermophilus* dan *Lactobacillus plantarum*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi 10% gula, 5% susu skim, dan konsentrasi bakteri 3% dianggap sebagai formulasi terbaik dengan total *titrable acidity* 0,89%, pH 3,97, dan IC50 16,41%. Di pasaran juga sudah ditemukan produk kemasan *winter melon tea* atau seduhan buah bligo.

Beberapa riset mengenai produk pangan dari bligo telah dilakukan. Sari (2016) mengembangkan nata dari buah bligo atau disebut juga dengan nata de bligo. Proses pembuatannya diawali dengan pembuatan sari buah terlebih dahulu. Setelah itu ditambahkan sukrosa, urea, dan asam cuka dilakukan perebusan hingga mendidih, dituangkan dalam loyang kemudian segera ditutup dengan kertas koran yang telah dijemur di bawah sinar matahari. Setelah dingin, ditambahkan bibit nata sebanyak 10% lalu difermentasi selama 12, 14, dan 16 hari. Formulasi terbaik yaitu nata yang menggunakan formula gula pasir/sukrosa 10% dan urea 0,5% dengan lama fermentasi 16 hari. Kadar serat tertinggi pada nata de bligo adalah 1,09%.

Yulia, Handayani, & Juliani(2020) membuat *fruit leather* atau daging buah yang telah dihancurkan dan dikeringkan pada 50-60°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbandingan konsentrasi buah bligo dan nanas 80%:20% dan konsentrasi gula 30% menghasilkan *fruit leather* dengan mutu terbaik.

Berbagai penelitian bligo yang telah dilakukan di Indonesia menunjukkan bahwa penelitian bligo masih dalam tahap pengembangan formulasi produk. Kedepan, bila produk tersebut ingin dikembangkan sebagai pangan fungsional maka perlu dilakukan penelitian yang mendalam terkait komponen bioaktif, khasiat, keamanan, sampai uji farmakologi dan uji klinisnya. Penelitian yang mendalam dan komprehensif terhadap berbagai komponen ini untuk membuktikan klaim manfaat bligo.

6. Riset bligo yang telah dilakukan di Program Studi Teknologi Pangan UT

Potensi riset bligo masih sangat terbuka lebar. Riset-riset dasar terkait kandungan nutrisi dan senyawa penting yang berpengaruh terhadap kesehatan sudah banyak diteliti baik dalam daging, kulit, dan biji bligo. Riset-riset ini selanjutnya dapat dijadikan dasar dalam pengembangan produk turunan bligo.

Riset terkait pengembangan produk turunan bligo di Indonesia, lebih banyak berfokus pada daging buah sebagai produk minuman, seperti sari buah dan minuman fermentasi. Riset terkait pemanfaatan bligo menjadi produk makanan masih terbatas. Daging buah bligo yang mengandung banyak manfaat ini perlu dikembangkan menjadi produk yang memiliki umur simpan lebih lama, praktis dibawa, dan memiliki nilai manfaat yang lebih luas untuk masyarakat.

Selain itu, riset mengenai kulit bligo belum banyak dilakukan. Riset-riset kulit bligo masih di tataran uji in vitro. Kulit bligo memiliki potensi sebagai antioksidan namun belum ada riset terkait senyawa-senyawa yang berperan sebagai antioksidan tersebut. Keberadaan serbuk putih yang akan muncul saat bligo matang, juga belum banyak dibahas. Serbuk putih ini diduga berhubungan dengan penebalan dan pengerasan kulit bligo yang perlu dilakukan kajian lebih lanjut. Semua bagian bligo memiliki potensi untuk diteliti lebih lanjut.

Didasari adanya potensi manfaat semua bagian bligo serta peluang-peluang penelitian bligo, Program Studi Teknologi Pangan FST UT melakukan riset *multiyears* terkait bligo. Riset telah dilakukan mulai tahun 2019 hingga saat ini. Riset ini memfokuskan pada pemanfaatan buah dan kulit bligo. Buah bligo dikembangkan sebagai pangan darurat dalam bentuk *food bar*; sedangkan penelitian kulit bligo dilakukan untuk mengidentifikasi senyawa-senyawa penting yang terdapat di dalam bligo. Identifikasi ini selanjutnya dijadikan dasar untuk pengembangan produk lebih lanjut.

a. Pembuatan *food bar* bligo untuk pangan darurat

Tanaman bligo memiliki karakteristik dapat tumbuh dengan mudah di lingkungan tropis. Perawatan tanaman bligo juga relatif mudah dan tahan dengan serangan hama. Selain itu bligo juga dapat disimpan dalam jangka waktu yang lama hingga setahun. Dengan karakteristik tersebut, maka bligo berpotensi dikembangkan sebagai pangan darurat atau yang dikenal dengan *Emergency Food Product* (EFP), sebuah produk pangan olahan yang didesain khusus untuk memenuhi kebutuhan pangan manusia dalam keadaan tidak normal, seperti misalnya keadaan pasca bencana atau peperangan.

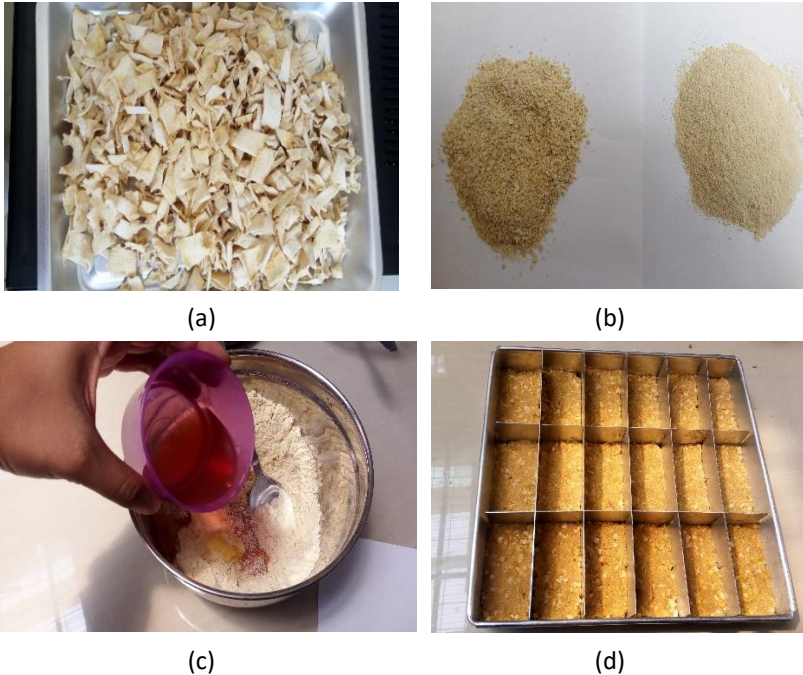
Dalam kondisi bencana yang kerap terjadi di Indonesia, kebutuhan pangan yang bergizi, mudah dikonsumsi dan dapat memenuhi kebutuhan harian merupakan kebutuhan yang harus didapatkan oleh pengungsi. Pangan darurat dirancang dengan tujuan dapat memenuhi kebutuhan

energi harian manusia sebanyak 2100 kkal dan dapat dikonsumsi oleh segala usia sehingga angka kematian dapat dikurangi dan bisa menjadi sumber nutrisi harian selama lima belas hari pasca bencana (IOM, 1995). Lebih lanjut, kandungan energi sebanyak 2100 kkal terdiri dari 35-45% lemak, 10-15% protein, dan 40- 50% karbohidrat.

Menurut Ekafitri dan Faradilla (2011) pada dasarnya produk pangan darurat dapat diproduksi dari komoditas apa saja. Namun idealnya pangan darurat diproduksi dari bahan-bahan yang dapat dengan mudah dihasilkan oleh negeri sendiri. Bentuk pangan darurat dapat berupa *food bar*, yaitu produk pangan padat yang berbentuk batang dan merupakan campuran dari berbagai bahan yang digabungkan menjadi satu dengan bantuan pengikat. Pengikat dalam *bars* dapat berupa sirup, nougat, karamel, coklat, dan lain-lain. Bentuk *bars* dipilih karena kemudahan dalam konsumsi.

Pengembangan bligo menjadi *food bar* untuk pangan darurat diawali dengan proses pembuatan tepung bligo terlebih dahulu. Bligo ditimbang berat awalnya, dikupas kulitnya dan dibuang bijinya. Setelah itu bligo diparut dan diblanching selama 5 menit. Parutan bligo dikeringkan dalam oven selama 11 jam pada suhu 70°C. Parutan bligo yang sudah kering kemudian dihancurkan menggunakan blender dan disaring menggunakan ayakan 60 mesh hingga menjadi tepung (Gambar 3). Tepung bligo yang dihasilkan kemudian dilakukan analisis proksimat.

Tepung bligo yang menjadi bahan baku *food bar* selanjutnya dicampur dengan beberapa bahan seperti margarin, gula, susu dan tepung kedelai menggunakan mixer hingga terbentuk adonan yang menyatu. Formulasi yang digunakan yaitu proporsi tepung bligo:tepung kedelai yaitu 50:50; 70:30 ; dan 30: 70. Adonan kemudian ditempatkan dalam loyang yang telah dioles minyak dan dipanggang dalam oven bersuhu 120°C selama 45 menit (Gambar 3). Dari penelitian ini didapatkan data mengenai kandungan proksimat tepung dan *food bar* bligo dan nilai kekerasan produk.



Keterangan: a) Parutan kering buah bligo, b) Tepung bligo, c) Pencampuran bahan, d) Penampakan *food bar* Bligo

Gambar 3. Proses Pembuatan *Food Bar* Bligo

Hasil analisis proksimat menunjukkan bahwa kadar air tepung bligo sebesar 10,60%, kadar abu 11,45%, karbohidrat sebesar 65,52%, protein 11,69%, dan lemak 1,03%. Kandungan gizi paling tinggi pada tepung bligo adalah karbohidrat. Bila dibandingkan dengan kandungan karbohidrat dari bahan pangan lain yang biasa digunakan sebagai bahan baku *food bar*, maka kandungan karbohidrat pada bligo (65,52%) sebanding dengan nilai karbohidrat pada tepung kacang hijau 62,11%, tepung pisang 81,13%, tepung ubi ungu 81,22%, dan beras 88,11%.(Fauziyyah & Hakiki, 2021).

Dari analisis proksimat *food bar* bligo menggunakan 3 formulasi tersebut maka *food bar* F2 dengan proporsi tepung bligo dan tepung kedelai sebesar 70:30 merupakan perlakuan yang paling mendekati syarat pangan darurat yaitu dengan kadar karbohidrat, protein dan lemak berturut-turut

43,21%, 13,65%, dan 16,64%. (Tabel 4). Dilihat dari nilai kekerasannya, ketiga perlakuan memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibanding produk *cookies*. Nilai kekerasan paling tinggi pada F1 sebesar 31240,7 gf, kemudian F2 sebesar 22294,3 gf dan F3 sebesar 18298,7 gf. Nilai kekerasan ini lebih tinggi dibanding dengan produk *cookies*. Pada produk pangan darurat, diinginkan produk yang relatif tahan terhadap tekanan karena berhubungan dengan proses distribusi bantuan pada keadaan darurat.

Tabel 4. Kandungan Gizi *Food Bar* Bligo

Kandungan Gizi (%)	Proporsi tepung bligo:tepung kedelai pada <i>food bar</i> bligo			Standar (Zoumas, 2002)
	F1 50:50	F2 70:30	F3 30:70	
Karbohidrat	35,57	43,21	32,09	40-50%
Protein	17,15	13,65	20,69	35-45%
Lemak	22,86	16,64	23,37	10-15%

Sumber: Fauziyyah & Hakiki, 2021

Riset ini kedepan perlu dilakukan penambahan bahan baku lain agar dapat memenuhi syarat ideal pangan darurat terutama nilai protein dan lemak. Selain itu untuk pengembangan *food bar* bligo sebagai pangan darurat juga perlu dilakukan pendugaan umur simpan untuk mengetahui daya tahan *food bar* ini.

b. Karakterisasi senyawa dalam kulit bligo

Pengolahan daging buah bligo menjadi berbagai produk olahan akan menyisakan kulit bligo sebagai limbah yang jumlahnya mencapai 15-16,8% dari total berat bligo utuh. Sejauh ini belum ada pemanfaatan kulit bligo dan hanya digunakan sebagai pakan ternak. Inovasi pengolahan limbah kulit bligo perlu dilakukan agar dapat menjadi suatu produk yang bernilai tambah.

Sebelum melakukan pengembangan produk perlu dilakukan karakterisasi terlebih dahulu senyawa penting yang ada dalam kulit bligo. Karakterisasi awal dilakukan dengan analisis aktivitas antioksidan dan skrining fitokimia secara kualitatif senyawa golongan alkaloid, flavonoid,

saponin, tanin, dan polifenol. Analisis aktivitas antioksidan dilakukan dengan uji DPPH. Karakterisasi yang dilakukan dengan menggunakan LC-MS. Sample yang digunakan berupa kulit bligo yang dikering-anginkan selama 5 hari pada suhu ruang. Kulit bligo yang sudah kering kemudian dihaluskan hingga ukuran 60 mesh.

Hasil uji antioksidan menunjukkan bahwa kulit bligo memiliki aktivitas antioksidan kelas medium dengan nilai IC50 6,91 mg/mL. Aktivitas antioksidan kulit bligo masih lebih rendah dibandingkan dengan asam askorbat sebesar IC50 6,1 µg/mL, Trolox 5,89 µg/mL, ekstrak daun kelor 49,30 µg/mL, dan ekstrak kulit pohon Kendal (*Cordia dichotoma*) 28 µg/mL. Potensi inhibisi ekstrak kulit bligo masih dapat ditingkatkan dengan optimasi jenis pelarut dan metode ekstraksi (Hakiki et al., 2021).

Dari hasil skrining fitokimia yang ada dalam kulit bligo menggunakan analisis kualitatif LC-MS terdapat 36 senyawa dalam kulit bligo, namun 5 senyawa yang dominan adalah *adenosine*; *polydatin*; *7-(4-Hydroxy-3-methoxyphenyl)-1-(4-hydroxyphenyl)-4E,6E-heptadien-3-one*; *moracin C*; dan *kushenol*. (Hakiki et al., 2021). Polydatin telah banyak dipelajari karena memiliki kemampuan antioksidan dan antiinflamatori. Morasin C telah diketahui memiliki aktivitas biologis sebagai antioksidan dan antiinflamatori. Kushenol S merupakan senyawa flavonoid dengan sub grup flavanon. Kushenol S memiliki aktivitas antioksidan dan antimikrobia yang dapat menghambat pertumbuhan *Staphylococcus aureus* dan *Bacillus subtilis* setelah 48 jam (Jayalakshmi & Devika, 2019; Lanzilli et al., 2012). Potensi antioksidan yang terdapat polydatin dan kushenol yang terdapat pada kulit bligo dapat diteliti lebih lanjut untuk dikembangkan sebagai pangan fungsional. Perlu dilakukan penelitian secara in vitro untuk melihat efektivitas dari masing-masing senyawa yang dihasilkan.

Hasil dari penelitian aktivitas antioksidan dan skrining fitokimia ini akan dijadikan dasar pengembangan produk. Produk yang dipilih kemudian dilanjutkan dengan beberapa perlakuan optimasi sehingga *output* jangka panjang bisa menghasilkan prototipe produk pangan yang siap dipasarkan. Kedepan juga akan dilakukan riset mengenai karakterisasi serbuk putih yang terdapat pada kulit bligo yang telah matang.

KESIMPULAN

Selama ini bligo belum banyak dibudidayakan di Indonesia dan dibiarkan tumbuh liar di pekarangan padahal bligo memiliki berbagai manfaat. Buah bligo terdiri dari beberapa bagian yaitu daging buah, kulit, biji, dan pulp. Bagian-bagian tersebut memiliki kandungan nutrisi yang penting bagi tubuh dan berbagai manfaat untuk kesehatan tubuh seperti antioksidan, antibakteri, anti kompulsif, antidiare, obat lambung, dan lainnya. Beberapa penelitian yang ada tentang potensi bligo sudah dilaksanakan baik secara *in vivo* maupun *in vitro*.

Riset pengembangan produk yang telah dilakukan di Prodi Teknologi Pangan, FST UT berasal dari kulit dan daging buah bligo. Pada daging buah bligo dimanfaatkan sebagai *food bar* sedangkan kulit bligo dilakukan karakterisasi senyawa penting dalam bligo. Produk *food bar* bligo dikembangkan sebagai pangan darurat di kala kondisi bencana. Karakterisasi senyawa penting dalam kulit bligo bertujuan untuk pengembangan produk lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, U., Kamarudin, W.S.S.W., Samicho, Z., Aziman, N., & Zulkifli, K.S., (2012). Evaluation of in-vitro antioxidant and antimicrobial activities of the various parts of *Benincasa hispida*. *International Journal Of Pharmtech Research*, 4(4), 1367-1376.
- Agroindonesia. (2020). Waluh bligo, tanaman unik dan sehat. Retrieved from <http://agroindonesia.co.id/2020/11/waluh-bligo-tanaman-unik-dan-sehat/>
- Aini, N. (2016). Karakteristik minuman sari buah bligo (*Benincasa hispida*) dengan penambahan sukrosa pada suhu pasteurisasi yang berbeda. (Skripsi). Retrieved From <Http://Repository.Unpas.Ac.Id/26915/1/Artikel.Pdf>.
- Alsuhendra, Ridawati, & Mardianty, I. (2014). Pengaruh proses ekstraksi terhadap nilai pH, kandungan kalium, dan daya terima sari buah bligo (*Benincasa hispida*). Jakarta (ID): Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta. Retrieved From: <http://repository.ut.ac.id/2345/1/alsuhendra2014.pdf>
- Amanda, A. (2017). Pemanfaatan bakteri asam laktat dalam pembuatan minuman fermentasi sari buah beligo (*Benincasa hispida*) (Skripsi). Retrived from <http://repository.uph.edu/1380/>
- APEEC. (2013). *Kundur (Benincasa hispida sp)*. Malaysia: Pusat Pengembangan Keusahawanan dan Pemajuan Profesional Universitas Putra Malaysia. Retrieved from: <http://docplayer.net/52328593-Kundur-benincasa-hispida-sp-cetakan-pertama-2013-pusat-pengembangan-keusahawanan-dan-pemajuan-profesional-apeec-universiti-putra-malaysia.html>
- BPOM. [Badan Pengawas Obat dan Makanan]. (2011). Pengawasan klaim dalam label dan iklan pangan olahan. Retrieved from https://standarpangan.pom.go.id/dokumen/peraturan/2011/2011-HK.03.1.23.11.11.09909-Pengawasan_Klaim_dalam_Label_dan_Iklan_Pangan_Olahan.pdf

- BSN. [Badan Standarisasi Nasional]. (1995). SNI 01-3719-1995. (Standar Nasional Indonesia). Minuman Sari Buah.
- Darmayani, S., Alaydrus, S., Yunus, R., Yuniarty, T., Dewi, N.P., Rosanty, A., & Supiati. (2021). Antibacterial activities test of ethanol extract of Kundur Fruit (benincasa hispida Thunb cogn) obn Salmonella typhi bacteria. *Journal of physic: Proceedings*. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1899/1/012028/pdf>.
- Du, Q., Zhang, Q., & Ito, Y. (2005). Isolation and identification of phenolic compounds in the fruit of Benincasa hispida by HSCCC. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*, 28, 137-144.
- Ekafitri, R., & Faradilla, R.H.F. (2011). Pemanfaatan komoditas Lokal sebagai bahan baku pangan darurat. *Jurnal Pangan*, 20(2), 153-161
- Fatariah, Z., Tengku Z. T. Y., & Rosli, W. (2015). Ascorbic acid quantification in benincasa hispida fruit extracted using different solvents. *International Food Research Journal*, 22(1), 208-212.
- Fauziyyah, A., & Hakiki D.N. (2021). Potensi foodbar bligo sebagai produk pangan darurat. *Jurnal Gizi Dan Pangan Soedirman*, 5(1), 33-45
- Gill, N.S., Dhiman, K. , Bajwa, J., Sharma, P., & Sood, S. (2010). Evaluation of free radical scavenging, anti-inflammatory and analgesic potential of *Benincasa hispida* seed extract. *International Journal of Pharmacology*, 6: 652-657.
- Girdhar, S.,Wanjari, M. M., Prajapati, S. K., & Girdhar, A. (2010). Evaluation of anti-compulsive effect of methanolic extract of Benincasa Hispida Cogn. Fruit In Mice. *Acta Poloniae Pharmaceutica-Drug Research*, 67(1), 417-421.
- Grover, J. K., Adiga, G., Vats, V., & Rathi, S. S. (2001). Extracts of Benincasa Hispida prevent development of experimental ulcers. *Journal Of Ethnopharmacology*, 78(1), 159-164.
- Grover, J.K., Rathi, S.S., & Vats, V. (2000). Preliminary study of fresh juice of Benincasa Hispida on morphine addiction in mice. *Fitoterapia* 71(6), 707-709.

- Hakiki, D.N., Fauziyyah, A., & Wijanarti, S. (2021). Aktivitas antioksidan dan screening fitokimia kulit bligo (*Benincasa hispida*). *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 17(1), 27. <https://doi.org/10.20961/alchemy.17.1.38675.27-36>
- Huang, H. Y., Huang, J. J., Tso, T. K., Tsai, Y. C., & Chang, C. K. (2004). Antioxidant and angiotension-converting enzyme inhibition capacities of various parts of *Benincasa Hispida* (Wax Gourd). *Nahrung*, 48, 230–233.
- IOM (Institute of Medicine). (1995). Estimated mean per capita energy requirements for planning energy food and rations. Washington, DC.: National Academy Press.
- Jayalakshmi, P. & Devika, P.T. (2019). Assessment of in vitro antioxidant activity study of Polydatin. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8, 55–58.
- Kim, Y.J, & Shin, M.G. (1999). Mucolytic effects of various parts of fructus *Benincasa* extracts in the rat trachea. *J. Korean Med. Soc.* 209(1), 165–176.
- Kumar, C.R., Mythily, S., Chandraju, S, & Rasayan, J. (2012). Extraction and mass characterization of sugars from ash gourd peels (*Benincasa Hispida*). *Chem*, 5(3), 280-285.
- Lanzilli, G., Cottarelli, A., Nicotera, G., Guida, S., Ravagnan, G., & Fuggetta, M.P. (2012). Anti-inflammatory Effect of resveratrol and polydatin by in Vitro IL-17 modulation. *Inflammation*, 35, 240–248. doi: 10.1007/s10753-011-9310-z
- Macwillian, L. D. (2005). Comparative guide to nutritional supplements (Pp. 31–32). USA: Northern Dimensions Publishing.
- Mandana, B., Russly, A. R., Farah, S. T., Noranizan, M. A., Zaidul, I. S., & Ali, G. (2012). Antioxidant activity of winter melon (*Benincasa Hispida*) seeds using conventional soxhlet extraction technique. *International Food Research Journal*, 19(1), 229-234.

- Marr, K. L., Xia, Y. -M., & Bhattarai, N. K. (2007). Allozymic, morphological, phenological, linguistic, plant use, and nutritional data of *Benincasa hispida* (Cucurbitaceae). *Economic Botany*, 61, 44–59.
- Mathad, V.S.T.B., Chandanam, S., Setty, S.R.T., Ramaiyan, D., & Veranna, B, Babu A., & Lakshminarayanasetry, V. (2005). Antidiarrheal evaluation of *Benincasa hispida* (thunb) Cogn fruit extract. *Iranian Journal of Pharmaceutical and Therapeutics*, 4, 24-27.
- Meghashree, B.M., Shanta, T., & Bath, S. (2017). Comparative pharmacognostical and histochemical studies on *Benincasa hispida* (thunb) Cogn- Fruit and Seed. *International Journal of Herbal Medicine*, 5(4), 17-24. Retrieved from <https://www.florajournal.com/archives/2017/vol5issue4/PartA/6-1-31-640.pdf>
- Mingyu, D., Mingzhang, L., Qinghong, Y., Weiming, F., Jianxiang,X., & Weiming, X.. (1995). A study on *Benincasa Hispida* contents effective for protection of kidney. *Jiangsu J. Agric. Sci.*,11, 46-52.
- Morton, J.F. (1971). The wax gourd, a year-round florida vegetable with unusual keeping quality. *Proceeding Of The Florida State Horticultural Society*, 84,104-109.
- Mubarak F, Sartini, S., & Purnawanti, D. (2018). Effect Of ethanol concentration on antibacterial activity of bligo fruit extract (*Benincasa Hispida Thunb*) to *Salmonella Typhi*. *Indonesian Journal of Pharmaceutical Science and Technol*og, 5(3), 76-81.
- Nadhiya, K., Haripriya, D., & Vijayalakshmi, K. (2014). Pharmacognostic and preliminary phytochemical analysis on *Benincasa Hispida* fruit. *Asian Journal Pharmaceutical Clinical Research*, 7(1), 98-101.
- Nagarajaiah S.B, Prakash J. (2014). Chemical composition and bioactive potential of dehydrated peels of *Benincasa Hispida*, *Luffa Acutangula*, And *Sechium Edule*. *Journal Of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 21(1), 193–202.
- Rana, S. & Suttee, A. (2012). Phytochemical investigation and evaluation of free radical scavenging potential of *Benincasa hispida* peel extracts.

- International Journal of Current Pharmaceutical Review and Research*, 3, 43–46.
- Raveendra, R., K., & Martin, P. (2006). Ethnomedicinal plants. Agrobios. India: Jodhpur.
- Panganku.org. (n.d.). Data komposisi pangan Indonesia. Retrieved from <https://www.panganku.org/id-ID/beranda>.
- Patty, R.J., Watuguly, T.W., & Tuapattinaya, P.M. (2021). Analisis kadar vitamin C pada minuman probiotik buah bligo. *Biopendix Jurnal Biologi Pendidikan dan Terapan*, 7(2), 160-166.
- Samad, N.B., Debnath T., Jin H.L., Lee, B.R., Park, P.J., Lee S.Y., & Lim B.O. (2012). Antioxidant activity of Benincasa hispida seeds. *Journal of Food Biochemistry*, 37(4), 388-395.
- Sari, N.L. (2016). Formulasi pembuatan nata de bligo. Retrived from [http://journal.kelitbanganwonogiri.org/index.php/inisiasi/article/view File/38/36](http://journal.kelitbanganwonogiri.org/index.php/inisiasi/article/view/File/38/36)
- Sreenivas, K.M., Rekha, S., Singhal, S. & Lele, S.S. (2011). Chemical pretreatments and partial dehydration of ash gourd (Benincasa Hispida) pieces for preservation of its quality attributes. *Food Science And Technology*, 44 (10), 2281-2284.
- Sew, C. C., Zaini, N. A. M., Anwar, F., Hamid, A. A. & Saari, N. (2010). Nutritional composition and oil fatty acids of kundur [Benincasa Hispida (Thunb.) Cogn.] Seed. *Pakistan Journal Of Botany*, 42(5), 3247–3255.
- Sharma, S., Hirday, N.V., & Nilesh, K.S. (2014). Cationic bioactive peptide from the seeds of Benincasa Hispida. *International Journal Of Peptides*, 1-12. Retrieved from <https://www.hindawi.com/journals/ijpep/2014/156060/>
- Shetty, B.V., Arjuman, A., Jorapur, A., Samanth, R., Yadav, S.K., Valliammai, N., Tharian A.D., Sudha, K., & Rao, G.M. (2008). Effect of extract of Benincasa Hispida on oxidative stress in rats with indomethacin induced gastric ulcers. *Indian J Physiol Pharmacol*, 52(2), 178-182.

- Sitorus, R.E., Rugayah, & Zidni, I.N. (2019). Manajemen herbarium dan pengenalan jenis Cucurbitaceae yang jarang ditemukan di Sumatera. *Jurnal Biologica Samudra*, 1(2), 48-55.
- Suryanti, V, Soerya, D.M, & Musmuallim, M. (2018). Identifikasi senyawa kimia dalam buah kundur (*Benincasa hispida* (Thunb) Cogn.) dengan kromatografi Gas-Spektrometer Massa (KG-SM). *Alchemy Jurnal Penelitian Kimia*, 14(1), 84-94.
- Suter, I.K. (2013). Pangan fungsional dan prospek pengembangannya. Seminar Sehari Pentingnya Makanan Alamiah (Natural Food) Untuk Kesehatan Jangka Panjang. Ikatan Keluarga Mahasiswa (IKM). Denpasar: Politeknik Kesehatan Denpasar. Retrieved from https://repositori.unud.ac.id/protected/storage/upload/repositori/ID3_19501231197602100323091304927makalah-gizi.pdf
- Tee, E. S., Noor, M. I., Azudin, M. N., & Idris, K. (1997). Nutrient composition of Malaysian foods (Komposisi zat dalam makanan Malaysia). Malaysian Food Composition Database Programme (Pp. 46–47). (4th Ed.). Kuala Lumpur: Institute For Medical Research. Retrieved from <http://www.nutriscene.org.my/books/Tee%20et%20al%201997%20-%20Nutr%20Comp%20of%20Malaysian%20Foods.pdf>
- USDA. [United States Department Of Agriculture]. (2009). Natural resources conservation services. Retrieved from <http://Plants.Utda.Gov/Java/NameSearch>
- Wills, R. B. H., Wong, A. W. K., Scriven, F. M., & Greenfield, H. (1984). Nutrient composition of chinese vegetables. *Journal Of Agriculture And Food Chemistry*, 32, 413–416.
- Winarno, F.G. (2004). Kimia Pangan dan Gizi. Jakarta: PT.Gramedia Pustaka Utama.
- Winarti, C. & Nurdjanah, N. 2005. Peluang tanaman rempah & obat sebagai sumber pangan fungsional. *Jurnal Litbang Pertanian*, 24(2), 47 -55.
- Yoshizumi, S., Murakami, T., Kadoya, M., Matsuda, H., Yamahara, J. & Yoshikawa, M. (1998). Histamine release inhibitors from wax gourd, the fruits of *Benincasa Hispida* Cogn. *Yakugaku Zasshi Medicinal Foodstuffs*, 118, 188–192.

- Yulia, R., Handayani, N., & Juliani. (2020). Pengaruh buah kundur (*Benincasa hispida*) dan buah nanas (*Ananans comosus L.Merr*) rasio serta konsentrasi gula terhadap mutu fruit leather. *Serambi Engineering*, 5(2), 995-1002.
- Zaini, N.A.M., Anwar, F., Hamid, A.A., & Saari, N. (2011). Kundur [*Benincasa hispida* (Thunb.) Cogn.]: A potential source for valuable nutrients and functional foods. *Food Research International*, 44, 2368-2376.



03

BIODIVERSITY FOR SUSTAINABLE ENVIRONMENT

**Diki
Mutimanda Dwisatyadini**

Perubahan Genetika Mikroba pada Keadaan Mikrogravitasi
dan Radiasi Ion dalam Penerbangan di Angkasa Luar

**Diki
Cut Meutia Fajrina
Fikri Nashrullah**

Hibridisasi dan Introgresi pada Paus Biru
(*Balaenoptera musculus*) dan Pengaruhnya terhadap Konservasi

Venty Fitriany Nurunisa

Tantangan dan Implementasi Inovasi Nilai
dalam Pengembangan Agribisnis untuk Masyarakat 5.0

**Sri Yuniati Putri Koes Hardini
Iman Rahayu Hidayati Soesanto**

Performa dan Tingkat Kesehatan Ayam Pedaging yang
Dipelihara dengan Kandang Intensif dan Kandang Umbaran

**Adhi Susilo
Tejo Susanto
Nurhidayat**

Pengaruh Kompos Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Kotoran Sapi
dengan PGPR terhadap Produksi Pakchoi di Tanah Latosol

**Timbul Rasoki
Ana Nurmalia
Lina Asnamawati**

Analisis Konversi Lahan Kelapa Sawit ke Lahan Padi Sawah

**I Gede Wyana Lokantara
Farisa Maulinam Amo
Erika Pradana Putri
Ulul Hidayah**

Analisis dan Strategi Pengembangan Manajemen Kota
Berbasis *Smart City* di Kabupaten Kendal

**PERUBAHAN GENETIKA MIKROBA PADA KEADAAN
MIKROGRAVITASI DAN RADIASI ION DALAM
PENERBANGAN DI ANGKASA LUAR**

**GENETIC MUTATION OF MICROBES
IN MICROGRAVITY AND IONIC RADIATION
IN SPACEFLIGHT**

Diki¹, Mutimanda Dwisatyadini²

^{1,2}Program Studi Biologi, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi,
Universitas Terbuka

dikinian@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Penerbangan angkasa luar dapat menyebabkan penurunan kekebalan imunitas tubuh di antara para astronot. Hal ini dikarenakan perubahan yang terjadi pada bakteri flora yang ada pada saluran cerna, hidung, dan pernapasan, yang menyebabkan peningkatan risiko infeksi kepada para astronot. Lingkungan penerbangan angkasa luar juga dapat mempengaruhi kerentanan mikroorganisme di dalam pesawat ruang angkasa terhadap antibiotik, komponen kunci dari peralatan medis yang diterbangkan, dan dapat mengubah karakteristik virulensi bakteri dan mikroorganisme lain yang mencemari struktur stasiun angkasa luar internasional dan platform penerbangan lainnya. Ulasan ini akan mempertimbangkan dampak mikrogravitasi dan radiasi ion terhadap lingkungan penerbangan angkasa luar, seperti perubahan sel bakteri yang berpotensi menyebabkan infeksi serius yang mungkin muncul selama misi ke objek astronomi di luar orbit Bumi yang rendah. Tulisan ini diharapkan dapat mendukung kajian mengenai kualitas hidup para astronot dalam paradigma science for society 5.0. Selain itu, diharapkan bahwa tulisan ini dapat bermanfaat dalam mendorong potensi industri dalam konsep revolusi industri 4.0.

Kata Kunci: kontaminasi, mikrogravitasi, bakteri, radiasi ion, gen.

PENDAHULUAN

Salah satu bagian dari biodiversitas adalah keanekaragaman mikroorganisme. Mikroorganisme memiliki ciri berupa kemampuan untuk hidup di sekitar manusia dan bahkan di dalam tubuh manusia. Pengaruh mikroorganisme sangat penting bagi suatu penerbangan antariksa. Pada penerbangan antariksa, para astronot hidup berdekatan dalam ruangan tertutup, dengan pilihan pengobatan yang terbatas, dan transmisi mikroba yang dapat meningkat dalam keadaan mikrogravitasi (Mahnert et al., 2021). Mikroorganisme akan menjadi komponen yang harus diperhatikan, karena mikroorganisme dapat melekat pada teknologi angkasa luar, seperti pesawat ruang angkasa atau pakaian antariksa, pada bahan organik, dan bahkan pada kita (mikrobioma manusia). Kita perlu memiliki pemahaman yang jelas tentang betapa berbahayanya mikroorganisme yang berada di tubuh atau di lingkungan sekitar, mengingat selama misi angkasa luar, akses astronot ke bantuan medis dan obat-obatan akan sangat terbatas. Kemajuan teknologi diperlukan untuk menjamin keberhasilan dan pengurangan segala kemungkinan risiko kesehatan dan lingkungan bagi para astronot, serta lokasi yang sedang dieksplorasi (Simoes & Antunes, 2021).

Resistensi antimikroba (AMR) merupakan masalah kesehatan global (Urbaniak et al., 2018). Sebagai upaya meminimalkan ancaman ini terhadap astronot yang mungkin kekebalannya terganggu yang akan berdampak pada risiko yang lebih besar terkena infeksi antimikroba patogen resisten, studi komprehensif "resistome" *International Space Station* (ISS) dilakukan. Penelitian ini menggunakan teknik *Whole Genome Sequencing* (WGS) dan uji resistensi antibiotik difusi disk, yaitu 9 organisme tingkat 2 keamanan hayati diisolasi dari ISS dinilai resistensi antibiotiknya. Analisis molekuler gen *antimicrobial resistance* (AMR) dari 24 sampel permukaan yang dikumpulkan dari ISS selama 3 peristiwa pengambilan sampel yang berbeda selama rentang satu tahun dianalisis dengan Ion AmpliSeq™ dan metagenomik. Hasil uji difusi cakram menunjukkan bahwa *Enterobacter galur bugandensis* dan *Staphylococcus haemolyticus* menjadi resisten terhadap semua 9 antibiotik yang diuji. Ion AmpliSeq™ mengungkapkan bahwa 123 gen AMR ditemukan, dengan gen yang bertanggung jawab untuk resistensi beta-laktam dan trimetoprim menjadi yang paling melimpah dan tersebar luas. Gen yang terlibat dalam resistensi antimikroba telah diperiksa

untuk pertama kalinya pada ISS dengan menggunakan berbagai metode. Informasi ini dapat mengarah pada strategi mitigasi untuk menjaga kesehatan astronot dalam waktu lama, selama durasi misi ruang angkasa dan ketika tidak dapat kembali ke Bumi untuk perawatan (Urbaniak et al., 2018).

Hasil penelitian tersebut juga didukung hasil penelitian Sielaff et al. (2019) yang mengungkapkan beragam populasi bakteri dan jamur pada permukaan lingkungan ISS berubah dari waktu ke waktu tetapi tetap serupa di antara lokasi. Organisme dominan terkait dengan mikrobioma manusia dan mungkin termasuk patogen oportunistik. Studi ini memberikan katalog komprehensif pertama dari bakteri dan jamur total dan utuh/layak yang ditemukan pada permukaan dalam sistem ruang tertutup dan dapat digunakan untuk membantu mengembangkan langkah-langkah keamanan yang memenuhi persyaratan NASA untuk tempat tinggal manusia di angkasa luar. Adapun populasi bakteri dan jamur yang dapat dibudidayakan berkisar antara 10⁴ hingga 10⁹ CFU/m² tergantung pada lokasi dan terdiri dari berbagai filum bakteri (*Actinobacteria*, *Firmicutes*, dan *Proteobacteria*) dan jamur (*Ascomycota* dan *Basidiomycota*). Hasil sekuensing amplicon mendeteksi lebih banyak filum bakteri jika dibandingkan jamur dengan analisis berbasis kultur. Perubahan jumlah bakteri dan jamur (dengan kultur dan qPCR) diamati dari waktu ke waktu tetapi tidak di seluruh lokasi. Komposisi komunitas bakteri berubah dari waktu ke waktu, tetapi tidak di seluruh lokasi, sementara komunitas jamur tetap sama antara pengambilan sampel dan lokasi. Tidak ada perbedaan yang signifikan dalam komposisi dan kekayaan komunitas setelah perlakuan sampel propidium monoazide, menunjukkan bahwa DNA yang dianalisis diekstraksi dari organisme yang utuh/layak. Selain itu, sekitar 46% bakteri utuh/layak dan 40% jamur utuh/layak dapat dibiakkan.

Stasiun Angkasa Luar Internasional (International Space Station/ISS) telah bertindak sebagai observatorium mikroba selama 10 tahun terakhir, meneliti adaptasi dan kemampuan bertahan hidup mikroorganisme yang terpapar kondisi ruang angkasa. Adaptasi ini dapat menguntungkan atau merugikan anggota kru dan pesawat ruang angkasa. Oleh karena itu, menjadi penting untuk mengidentifikasi dampak dari dua kondisi stres utama, yaitu mikrogravitasi dan radiasi ion (Bijlani, Stephens, Singh, Venkateswaran, & Wang, 2021; Moreno-Villanueva, Wong, Lu, Zhang, & Wu, 2017). Simon, Smarandache, Lancu, & Pascu (2021) menyatakan bahwa

radiasi ion dan mikrogravitasi di angkasa luar mempengaruhi tidak hanya manusia dan mikroorganisme, tapi juga stabilitas berbagai jenis obat yang digunakan. Hal ini akan mempengaruhi kesehatan manusia, yaitu astronot yang melakukan perjalanan di kendaraan angkasa luar. Penerbangan angkasa luar dapat mengalami penurunan kompetensi kekebalan imun tubuh di antara kru dan kemungkinan dapat menyebabkan perubahan yang merusak komposisi flora bakteri pada saluran cerna, hidung, dan pernapasan dari tubuh Astronot, yang menyebabkan peningkatan risiko infeksi pada diri Astronot (Taylor, 2015). Kondisi ini dapat berdampak pada Astronot yang mengalami stress karena permasalahan manusia yang rentan terkena infeksi mikroba patogen dalam penerbangan angkasa luar, permasalahan diet tinggi zat besi yang dijalankan oleh para Astronot, serta permasalahan posisi Astronot yang berada dalam ruang tertutup selama misi penerbangan angkasa luar (Siddiqui, Akbar, & Khan, 2021).

Manfaat mempelajari mikroorganisme di angkasa luar diantaranya berupa produksi metabolit sekunder. Selain itu kita dapat mempelajari batas atas biosfer dan kemungkinan transportasi mikroorganisme antarplanet. Berdasarkan penelitian Horneck, Klaus, & Mancinelli (2010) yang dilakukan dalam eksperimen simulasi ruang dan laboratorium, menghasilkan respon mikroorganisme (virus, sel bakteri, spora bakteri dan jamur, dan lumut kerak) cenderung dapat tumbuh dan berkembang biak di lingkungan penerbangan angkasa luar terhadap faktor ruang tertentu seperti keadaan mikrogravitasi, radiasi kosmik galaksi, radiasi UV matahari, dan ruang hampa udara. Pada penelitian ini ditemukan bahwa radiasi UV matahari ekstraterestrial adalah faktor ruang yang paling merusak. Di antara semua organisme yang diuji, hanya lumut (*Rhizocarpon geographicum* dan *Xanthoria elegans*) yang mempertahankan viabilitas penuh setelah 2 minggu di angkasa luar. Menggunakan filter optik dan spora *Bacillus subtilis* sebagai dosimeter UV biologis, ditemukan bahwa lapisan ozon saat ini mengurangi efektivitas biologis UV matahari hingga 3 kali lipat. Jika terlindung dari sinar UV matahari, spora *B. subtilis* mampu bertahan di angkasa luar hingga 6 tahun, terutama jika tertanam dalam tanah liat atau bubuk meteorit (meteorit buatan). Data mendukung kemungkinan transfer antarplanet mikroorganisme dalam meteorit, yang disebut hipotesis lithopanspermia (Horneck et al., 2010).

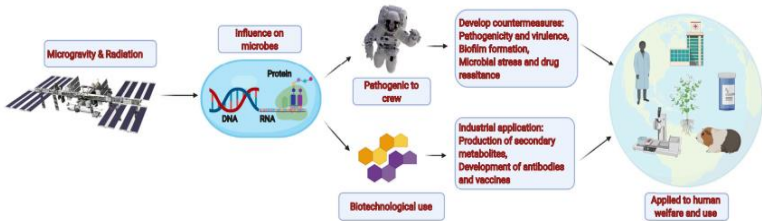


Figure 2. A brief overview of the need to study microbes on the ISS
The figure has been generated using BioRender (<https://biorender.com/>).

Sumber: Bijlani et al., 2021

Gambar 1. Manfaat Studi tentang Mikroorganisme di Angkasa Luar

Tulisan ini merupakan studi literatur yang akan membahas mengenai berbagai penelitian yang dilakukan, baik mengenai bakteri, jamur dan virus yang hidup dalam penerbangan di pesawat atau stasiun angkasa luar, serta pengaruh mikrogravitasi dan radiasi ion, dan perubahan yang terjadi pada mikroorganisme yang hidup di stasiun angkasa luar. Inovasi pengetahuan baru dan teknologi dari eksplorasi ruang angkasa, telah berkontribusi pada banyak aspek yang beragam pada kehidupan sehari-hari manusia. Hal ini dapat mewujudkan pemanfaatan konsep *Science for Society 5.0* pada kehidupan manusia.

PEMBAHASAN

1. Mikrogravitasi dan Radiasi Ion

Mikrogravitasi (*microgravity*) adalah kondisi dimana nilai percepatan gravitasi bumi (g) sangat kecil yaitu dalam orde mikro atau 10^{-6} dari nilai g. Nilai g dari satu tempat ke tempat lain adalah berbeda-beda tergantung ketinggian dan kondisi geologinya. Nilai g adalah satuan percepatan rata-rata gravitasi bumi yang menunjukkan rata-rata percepatan yang dihasilkan medan gravitasi pada permukaan bumi (permukaan laut). Medan gravitasi adalah suatu ruang dimana sebuah benda bermassa mengalami gaya gravitasi. Pada fisika, nilai percepatan gravitasi standar atau nilai g pada permukaan Bumi (permukaan laut) didefinisikan sebagai $9,80 \text{ m/s}^2$. Efek dari mikrogravitasi dapat dilihat ketika astronot dan benda-benda melayang di ruang angkasa. Di angkasa luar benda berat dapat bergerak dengan mudah,

sebagai contoh astronot dapat memindahkan peralatan berat ratusan kilogram dengan ujung jari mereka (NASA, 2012).

Radiasi terjadi ketika energi melakukan usaha melewati media atau melewati ruang, dan kesudahannya diserap oleh benda lain. Radiasi dapat berupa radiasi ionisasi (misalnya sebagaimana terjadi pada senjata nuklir, reaktor nuklir, dan zat radioaktif), tetapi juga bisa berarti radiasi elektromagnetik (yaitu gelombang radio, cahaya inframerah, cahaya tampak, sinar ultra violet, radiasi sinar X, maupun radiasi akustik). Penyebab terjadinya radiasi adalah adanya energi yang terpancar, yaitu luar dalam garis lurus ke segala arah dari suatu sumber (WHO, 2016). Radiasi ionisasi adalah jenis radiasi yang memiliki energi yang cukup untuk mengionisasi partikel. Secara umum, hal ini melibatkan sebuah elektron yang terlempar dari cangkang atom elektron yang akan memberikan muatan (positif). Hal ini sering mengganggu dalam sistem biologi dan bisa mengakibatkan mutasi dan kanker. Jenis radiasi umumnya terjadi di limbah radioaktif peluruhan radioaktif dan sampah. Jenis utama radiasi adalah alfa, beta, dan sinar gamma (WHO, 2016).

Kontaminasi mikroba pada pesawat ruang angkasa dapat diminimalkan bergantung pada teknik dan budaya yang menunjukkan rendahnya kontaminasi mikroba pada bagian pesawat angkasa luar. Penelitian secara komprehensif mengenai kontaminasi mikroba dari penjelajahan Mars Curiosity mengungkapkan bahwa lebih dari 350 strain yang berbeda terhindar dari dekontaminasi bakteri di ruangan bagian dalam pesawat angkasa luar. Hal ini dikarenakan banyak kontaminan tersebut tahan terhadap suhu ekstrim dan kerusakan yang dimediasi ultraviolet-C. Meskipun ekstrofil lingkungan dapat memungkinkan menjadi ancaman bagi infrastruktur pesawat ruang angkasa melalui biofouling, tetapi tidak menimbulkan risiko kesehatan bagi kru (Siddiqui et al., 2021).

Zea et al. (2016) mengamati perubahan perilaku bakteri di angkasa luar berdasarkan kajian genetika molekuler. Beberapa perubahan yang sudah diketahui misalnya berkurangnya kepekaan bakteri terhadap antibiotik dan meningkatnya virulensi. Selain itu, diketahui bahwa bakteri mengalami peningkatan fase lag selama kurva pertumbuhan dan mengalami penambahan lapisan biofilm dalam keadaan mikrogravitasi. Untuk mengetahui perubahan perilaku bakteri berdasarkan aktivitas gen, maka diadakan penelitian dengan membandingkan kultur bakteri di Bumi dan di stasiun angkasa luar ISS. Dilakukan dengan menambahkan antibiotik pada

kultur *Echerichia coli*. Penelitian ini untuk mengamati perkiraan meningkatnya aktivitas gen yang mengatur respons terhadap kelaparan (karena berkurangnya glukosa) dan meningkatnya reaksi asam. Kemudian dilakukan pengamatan terhadap ekspresi mRNA. Hasil pengamatan berupa kultur yang berada di stasiun angkasa luar yang dibandingkan dengan hasil kultur yang berada di Bumi. Hasil pengamatan di stasiun angkasa ISS menunjukkan adanya 81 gen yang mengalami peningkatan ekspresinya, dan dari 81 gen tersebut terdapat 15 gen yang mengalami peningkatan ekspresi sebesar 10 kali lipat.

Gen *thiEFGHS* yang menunjukkan peningkatan ekspresi adalah gen yang berperan dalam menghasilkan thiamine. Thiamine diperlukan untuk metabolisme karbohidrat, maka meningkatnya produksi thiamine ini menunjukkan bahwa bakteri tersebut mengalami kelaparan yaitu kekurangan senyawa karbon. Selain gen *theEFHES*, gen lain yang mengalami peningkatan produksi adalah gen *hdeABD*. Gen *hdeABD* berfungsi untuk mengatasi keadaan asam. Karena itu, dua keadaan yang terjadi pada saat bakteri *E. coli* berada di angkasa luar adalah kelaparan dan meningkatnya suasana asam. Adanya keadaan yang membuat sel bakteri *E. coli* mengalami kelaparan dan kekurangan karbon diduga membuat sel mencari sumber lain untuk senyawa karbon selain glukosa. Hal ini diperkuat dengan meningkatnya gen *malE* yang berfungsi menghasilkan protein *malE*, yaitu protein yang membantu masuknya maltose melalui membrane sel bagian dalam. Selain *malE*, gen lain yang juga membantu masuknya maltose dan juga ikut meningkat ekspresinya dalam penerbangan angkasa luar adalah gen *lamB*. Gen *lamB* menghasilkan protein *lamB* yang mengatur masuknya maltosa melalui membrane sel bagian dalam. Adanya upaya bagi sel untuk mencari sumber karbon selain glukosa ini menunjukkan bahwa sel bakteri itu dalam keadaan kelaparan.

Sumber karbon yang ada pada larutan hanya glukosa, sedangkan maltosa tidak terdapat pada media pertumbuhan bakteri. Namun karena kekurangan sumber karbon, gen bakteri bereaksi dan menghasilkan senyawa yang dapat membantu penyerapan sumber karbon alternatif. Gen lain yang meningkat ekspresinya adalah gen yang membantu masuknya berbagai molekul melalui membrane sel, contohnya gen *malK*, *oppAB*, *oppCDF*, *ompC*, *ompF*, *dps*, *crp*, *glnG*, dan *nac*. Gen *oppAB*, *oppCDF*, *ompC*, dan *ompF* menghasilkan protein yang membantu masuknya oligopeptide ke dalam sel. Gen *crp* berfungsi pada sel yang mengalami kekurangan glukosa.

Beberapa gen yang mengalami peningkatan ekspresi ini juga merupakan tanda bahwa sel dalam keadaan kekurangan senyawa karbon.

Meningkatnya ekspresi gen yang mengatur operon *trpABCDE* akan meningkatkan produksi asam asetat. Penelitian tersebut juga menunjukkan peningkatan produksi asam asetat pada bakteri. Diketahui juga bahwa 88% gen yang mengatur perubahan glukosa menjadi asam asetat menjadi aktif selama bakteri berada di keadaan mikrogravitasi. Akibatnya, produksi asam asetat akan meningkat dan pH menjadi turun. Peristiwa ini dapat berguna dalam proses bioteknologi (Zea et al., 2016).

Perubahan patogenitas bakteri dalam pencernaan juga dilaporkan oleh Bryan et al. (2021) dari pengamatan yang juga dilakukan di stasiun ISS. Penelitian itu dilakukan pada bakteri *Enterococcus faecalis*, suatu bakteri patogen yang dapat mengakibatkan infeksi pencernaan. Penelitian ini penting karena perubahan sifat patogenitas itu dapat mempengaruhi kesehatan astronot. Sebagaimana diketahui, selama penerbangan di angkasa luar, astronot mengalami stres berupa keadaan mikrogravitasi, stres fisiologis, perubahan pola waktu aktivitas, serta perubahan nutrisi, yang diperkirakan akan mempengaruhi kondisi tubuhnya. Penelitian itu dilakukan untuk mengetahui aktivitas gen pada bakteri tersebut selama berada di angkasa luar.

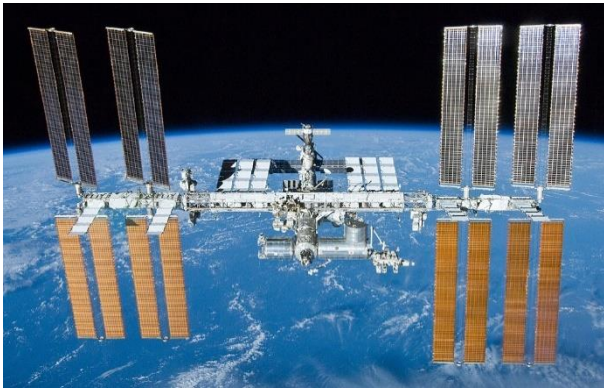
Pengamatan pada genom bakteri itu untuk mengetahui gen resistensi terhadap antibiotika, bakteriofage, plasmid, dan sifat virulensinya. Salah satu hasil pengamatannya adalah adanya strain bakteri *E. faecalis* yang memiliki kekebalan terhadap tetrasiklin. Strain ini diketahui memiliki gen *tetW/N/W*, suatu gen yang mengatur kekebalan terhadap tetrasiklin. Temuan ini penting karena ini berarti ada strain *E. faecalis* yang memiliki kekebalan terhadap suatu antibiotik dan dapat menyebarkan kekebalan ini kepada strain bakteri lainnya.

2. Mikroba pada Penerbangan dan Stasiun Angkasa Luar

Penerbangan angkasa luar dilakukan dalam pesawat angkasa luar dan stasiun angkasa luar. Stasiun angkasa luar yang sekarang beroperasi adalah *International Space Station (ISS)* yang dibangun oleh badan angkasa luar dari beberapa negara, seperti Amerika Serikat, Rusia, Jepang, Kanada, dan gabungan negara Eropa. Stasiun ISS mulai beroperasi pada tahun 2001. Stasiun ISS berada pada ketinggian 400 km dari permukaan Bumi. ISS mengelilingi Bumi dalam waktu 93 menit. Beberapa penelitian tentang

mikrogravitasi juga dilakukan di Bumi dengan menggunakan simulasi mikrogravitasi (Acres, Youngapelian, & Nadeau, 2021).

Dalam satu hari, ISS mengelilingi Bumi sebanyak 15,5 kali (Simoes & Antunes, 2021). Di stasiun ISS, astronot tinggal selama beberapa bulan. Sebagaimana ditulis oleh Bijlani et al. (2021) dan Siddiqui et al. (2021), kehidupan astronot di ISS dipengaruhi oleh mikrogravitasi dan radiasi ion. Selain di stasiun angkasa luar ISS, penelitian juga dilakukan di pesawat space shuttle milik Amerika Serikat dan simulasi mikrogravitasi. Berbeda dengan penerbangan stasiun angkasa luar ISS yang dapat dilakukan astronot selama beberapa bulan, penerbangan dengan pesawat space shuttle hanya berlangsung dalam beberapa hari.



Sumber: Bijlani et al., 2021

Gambar 2. Stasiun *International Space Station* (ISS)

Bakteri diketahui dapat hidup dalam ruangan pesawat angkasa luar, di dalam tubuh astronot, bahkan ada bakteri yang dapat hidup di angkasa luar. Sebagai contoh, *Escherichia coli* merupakan bakteri yang biasa ditemukan dalam saluran pencernaan manusia (mikrobiom). Astronot yang terbang ke angkasa luar diamati memiliki populasi bakteri *E. coli* yang tetap berkembang biak. Diduga bahwa bakteri *E. coli* dapat hidup dan berkembang biak tanpa ada pengaruh yang signifikan dari keadaan mikrogravitasi (Nandhini, Ramesh, & Monisha, 2021).

Mikrobiom adalah mikroorganisme yang hidup di tubuh manusia, termasuk astronot yang sedang berada di pesawat angkasa luar. Voorhies et al. (2019) mengamati mikrobiom yang ada pada astronot selama enam bulan berada di stasiun ISS. Mikrobiom yang diamati adalah yang berada di hidung, lidah, kulit, dan saluran pencernaan astronot. Sampel diambil sebanyak sepuluh kali dari sejak sebelum, selama, dan sesudah penerbangan. Hasil penelitian menunjukkan adanya perubahan keanekaragaman mikrobiom selama penerbangan angkasa luar.

Pengamatan pada mikoba di saluran pencernaan menunjukkan peningkatan kesamaan jenis mikroba di saluran pencernaan antar astronot. Beberapa faktor diperkirakan ada hubungannya dengan meningkatnya kesamaan mikroba usus pada para astronot. Salah satu faktor adalah kondisi fisiologis astronot seperti stres, perubahan sistem imun, atau mikrogravitasi. Selain itu, diperkirakan karena pilihan makanan para astronot relatif lebih seragam dibanding pilihan makanan selama di Bumi (Voorhies et al., 2019). Penelitian Voorhies et al. (2019) juga menunjukkan adanya peningkatan bakteri yang berkaitan dengan reaksi peradangan. Selama pengamatan, terjadi peningkatan populasi bakteri *Fusicatenibacter*, *Pseudobutyvibrio*, *Akkermansia* dan *Parasutterella*, yang disertai peningkatan kadar sitokin. Bakteri *Parasutterella* sering dikaitkan dengan terjadinya radang usus. Bakteri *Fusicatenibacter*, *Pseudobutyvibrio*, dan *Akkermansia* yang mempunyai sifat anti peradangan terlihat menurun kelimpahan relatifnya. Selain itu, ditemukan juga peningkatan signifikan kadar sitokin yang bersifat pro-inflamasi seperti Interleukin-8, (IL-8) dan Interleukin-1 beta. Karena itu Voorhies et al. (2019) menyarankan agar astronot mengkonsumsi minuman probiotik untuk menjaga agar mikrobiom dalam ususnya selalu bersifat baik dan meningkatkan sistem imunitas tubuh.

Studi lain yang dilakukan oleh Sielaff et al. (2019) mengadakan pengamatan atas bakteri dan jamur yang hidup di delapan tempat di stasiun angkasa luar ISS selama tiga kali penerbangan dalam jangka waktu 14 bulan. Metode pengamatan adalah dengan kultur dan qPCR, menunjukkan bahwa umumnya mikroba yang hidup di ISS adalah terdiri atas bakteri dan jamur. Filum bakteri yang didapat yaitu *Actinobacteria*, *Firmicutes*, dan *Proteobacteria*. Adapun filum jamur yang ditemukan adalah *Ascomycetes* dan *Basidiomycetes*. Pada tingkat genus, yang ditemukan adalah bakteri dari genus *Staphylococcus* (26% total isolate yang diidentifikasi), *Pantoea* (23%),

dan *Bacillus* (11%). Pada tingkat spesies, ditemukan bahwa *Staphylococcus aureus* sebanyak 10%, sedangkan *Pantoea conspicua* dan *Pantoea gaviniae* masing-masing sebanyak 9%. Jamur yang ditemukan didominasi oleh *Rhodotorula mucilaginosa* dari famili *Sporidiobolaceae* (41% dari 81 isolat jamur yang diisolasi) dan *Penicillium chrysogenum* (15% dari 81 isolat fungi). Studi Sielaff et al. (2019) ini juga menyebutkan adanya dua bakteri patogen, yaitu *Klebsiela pneumonia* dan *Serratia marcescens*. Ini menandakan pentingnya penelitian tentang kemungkinan adanya penularan penyakit pada astronot, terutama karena di angkasa luar terjadi pengurangan sistem imunitas astronot. Penelitian ini dapat diprioritaskan pada metabolisme dan perkembangbiakan bakteri tersebut.

Bakteri dari genus *Mycobacterium* juga ditemukan di stasiun angkasa luar. Sebelum dioperasikannya stasiun angkasa luar ISS, bakteri *Mycobacterium* juga pernah ditemukan di stasiun angkasa luar Salyut dan Mir milik Rusia serta stasiun angkasa luar Skylab milik Amerika Serikat. *Mycobacterium* termasuk bakteri yang dapat menyebabkan penyakit pada manusia dan mencakup penyakit yang sulit disembuhkan. Karena itu, penelitian tentang golongan bakteri ini juga perlu dilakukan di masa depan (Simoes & Antunes, 2021).

Selain pada bakteri dan jamur, perubahan populasi virus juga ditemukan pada astronot. Virus Varicella-Zoster meningkat dari 41% di space shuttle menjadi 65% dalam penerbangan ISS. Virus Epstein-Barr meningkat dari 82% menjadi 96%, dan virus citomegalo meningkat dari 47% menjadi 61%. Penerbangan pada *space shuttle* berlangsung selama 10-16 hari sedangkan penerbangan di stasiun ISS berlangsung selama lebih dari 180 hari. Lamanya penerbangan di stasiun ISS dibanding penerbangan dengan *space shuttle* menunjukkan bahwa semakin lama waktu penerbangan angkasa luar, makin meningkat populasi virus pada tubuh manusia (Rooney, Crucian, Pierson, Laudenslager, & Mehta, 2019).

Virus Herpes terdapat pada 70-95% manusia di seluruh dunia. Virus ini pada umumnya bersifat laten atau dorman ketika masuk ke dalam tubuh manusia. Namun pada saat tubuh manusia mengalami stress atau penurunan fungsi imun, virus herpes menjadi reaktif. Pada penelitian Rooney et al. (2019) ditemukan adanya luka kulit pada astronot yang selesai melakukan penerbangan. Hal ini ditemukan peningkatan hormon yang berhubungan dengan stress seperti kortisol, dehidroepiandrosteron, epinefrin, dan norepinefrin. Karena itu adanya peningkatan populasi virus di

tubuh manusia yang berada di angkasa luar pada waktu lama, diduga dapat berpengaruh pada kesehatan manusia.

Infeksi secara litik menyebabkan kematian sel karena pelepasan virus yang menyebabkan lesi atau lubang. Pada kultur sel, infeksi HSV-1 ditandai dengan adanya plak yang disebabkan kematian sel (Singh, Preiksaitis, Ferenczy, & Romanowski, 2005). Infeksi laten adalah kemampuan dari HSV-1 untuk menetap di sistem saraf dan bertahan dari sistem imun dengan cara membuat genom sirkular yang dapat diaktifkan kembali sehingga menyebabkan episode berulang dari pelepasan virus pada kulit. Rekuren infeksi HSV-1 ditunjang juga oleh kemampuan untuk menghindari sistem kekebalan tubuh, yaitu dengan adanya ekspresi host shutoff protein, penghambatan presentasi antigen pada sel yang terinfeksi, dan pengikatan dengan kaskade komplemen untuk menghambat pembentukan *membrane attack complex*. Pada infeksi HSV-1, metode masuknya HSV-1 ke dalam sel dan penyebaran sel ke sel merupakan salah satu faktor yang menentukan keberhasilan infeksi selain penghindaran sistem imun (Irianti, Fitriana, Arifianti, Rahmasari, 2020).

Penelitian tentang virus juga dilakukan oleh Mehta (2017) tentang virus EBV yang dalam kondisi laten. Virus EBV laten diamati dalam penerbangan angkasa luar yang dilakukan selama 180 hari di ISS. Virus yang diamati adalah Epstein-Barr virus (EBV), varicella-zoster virus, herpes simplex virus type 1, dan cytomegalovirus. Selain itu penelitian ini mengamati 23 astronot yang terdiri atas 18 pria dan lima wanita. Sebagai pembanding adalah astronot yang melakukan penerbangan selama 10-16 hari. Semua peserta mengalami uji IgG dengan ELISA untuk EBV, CMV, VZV, dan HSV-1. Hasil penelitian Mehta (2017) menunjukkan bahwa terjadi reaktivasi yang meningkat pada virus Epstein-Bar, varicella-zoster virus, dan cytomegalovirus pada penerbangan yang lama. Walaupun demikian, tidak ditemukan adanya reaktivasi pada herpes simplex virus type 1, herpes simplex virus type 2, dan human herpes virus 6. Penelitian tentang reaktivasi virus menunjukkan bahwa keadaan mikrogravitasi memungkinkan terjadinya penurunan sistem imun astronot dan reaktivasi sejumlah virus. Mehta (2017) menganjurkan vaksinasi VZV bagi astronot sebelum melakukan penerbangan angkasa luar pada waktu lama. Vaksinasi diperlukan untuk mencegah reaktivasi virus, terutama karena sistem imun astronot mengalami penurunan selama dalam penerbangan angkasa luar yang berlangsung lama.

Berbanding terbalik dengan Proyek Stasiun Angkasa Luar Tiongkok “Tiangong” menurut Hong pada tahun 2018. Stasiun ini mengadopsi dukungan kehidupan regenerasi yang terwujud pada sistem untuk mewujudkan daur ulang sumber daya. Sistem pendukung kehidupan regeneratif termasuk elektrolit, produksi oksigen, penghilangan karbon dioksida regeneratif, melacak penyerapan gas berbahaya, pengumpulan air kondensat dan pengobatan, pengumpulan dan pengobatan urin. Stasiun ini menerapkan kontrol terpadu dari komposisi gas, tekanan, suhu, dan kelembaban di dalam kabin, serta manajemen pemulihan air, kontrol mikrobiologi, dan limbah manajemen. Stasiunnya juga dilengkapi dengan sejumlah kehidupan non-daur ulang, serta sistem asuransi untuk pemeliharaan dan pemeliharaan darurat.

3. Perubahan Populasi dan Keragaman Mikrobiota

Tubuh manusia memiliki lebih dari 1000 spesies bakteri. Semakin banyak jenisnya, semakin tinggi tingkat kesehatan manusia (Hanski et al., 2012). Selama penerbangan angkasa luar, terjadi perubahan jumlah dan keragaman bakteri mikrobiota. Voorhies & Lorenzi (2016) memeriksa sampel kotoran astronot, ditemukan adanya peningkatan jumlah mikroba tertentu sedangkan diversitas mikroba menurun. Bakteri yang bertambah jumlahnya selama penerbangan adalah *Serratia marcescens* dan *Staphylococcus aureus*. *S. aureus* merupakan suatu jenis bakteri yang bersifat patogen. Kedua jenis bakteri itu ditemukan dapat berpindah dari satu orang ke orang lain selama penerbangan di angkasa luar. Penelitian Voorhies & Lorenzi (2016) ini belum mengamati pengaruh perubahan mikrobioma usus terhadap kesehatan. Mikrobioma perut mempengaruhi pencernaan, metabolisme, dan imunitas. Selain itu, mikrobioma juga menyebabkan perubahan pada tulang, otot dan otak. Menurut Siddiqui et al. (2021), terjadi perubahan komposisi dan fungsi mikroba usus manusia selama dalam penerbangan ISS.

Penelitian Aunins et al. (2018) menguji pengaruh antibiotika gentamicin terhadap kultur *E. coli* di stasiun ISS. Hasilnya menunjukkan bahwa setelah 49 jam dalam situasi tanpa bobot di angkasa luar, *E. coli* menunjukkan ketahanan yang lebih tinggi terhadap antibiotik dibanding ketika diamati di Bumi. Ditemukan juga adanya perubahan ekspresi 63 gen dalam menghadapi peningkatan konsentrasi antibiotik. Selain itu, ditemukan adanya peningkatan hasil ekspresi 50 gen yang berkaitan dengan stress. Gen

untuk operon *thi* dan operon *trp* termasuk dalam gen yang mengatur ketahanan terhadap gentamicin. Gen untuk *thi* termasuk gen yang mengatur ketahanan terhadap kekurangan nutrisi. Gen untuk operon *trp* mengatur sintesis asam amino secara umum. Diperkirakan gen *trp* ini mengatur ketahanan terhadap kurangnya asam amino pada keadaan mikrogravitasi.

Perubahan virulensi bakteri juga terjadi dalam penerbangan angkasa luar. Acres et al. (2021) mengamati chemotaxis dan motilitas bakteri *E. coli* dalam simulasi mikrogravitasi. Penelitian ini mengamati regulasi ekspresi gen yang mengatur motilitas atau pergerakan bakteri. Ekspresi gen itu dipengaruhi oleh gen lain yang menghasilkan protein berupa faktor transkripsi, maka perubahan ekspresi gen dalam keadaan tersebut akan mempengaruhi bakteri. Salah satu gen yang diamati adalah gen *hfq*. Gen *hfq* menghasilkan protein yang berperan sebagai post-transcriptional faktor. Protein mengatur penggabungan antara sRNA dengan mRNA. Gen *hfq* bersifat global regulator dan dapat mempengaruhi virulensi bakteri *S. typhimurium*. Disimpulkan adanya pengurangan ekspresi gen *hfq* pada bakteri *E. coli* dengan simulasi mikrogravitasi.

4. Efek dan Dampak Paparan Angkasa Luar pada Manusia

Penerbangan angkasa luar dan tinggal di stasiun angkasa luar memberikan dampak tersendiri pada tubuh manusia. Seperti pada mikroba, manusia juga terpapar pada berbagai perubahan mental lingkungan yang tidak bersahabat selama penerbangan angkasa luar. Itu termasuk variasi gravitasi (dari mikrogravitasi) untuk periode hiper-gravitasi, yang terjadi selama peluncuran dan pendaratan. Paparan radiasi akut dan kronis menimbulkan gejala seperti stres psikologis, hilangnya siklus nycthemeral, gangguan ritme sirkadian normal, mengalami paparan suhu ekstrem, variabel medan magnet, dan kondisi hiperkapnia. Pada misi perjalanan angkasa luar yang lebih lama, gejala yang ditimbulkan yakni gangguan tidur, perubahan mental, perubahan kekuatan otot, serta perubahan fisiologi endokrin yang menginduksi perubahan kadar hormon dan metabolisme, dan juga menyebabkan pergeseran mikrobioma dalam tubuh astronot dan kru. Pada tingkat molekuler dapat terjadi perubahan stres oksidatif, kerusakan DNA, disregulasi mitokondria, epigenetik (termasuk regulasi gen), dan panjang telomer. Stresor penerbangan angkasa luar mempengaruhi

banyak sistem fisiologis dan secara langsung dan tidak langsung berdampak pada sistem kekebalan (Simoes & Antunes, 2021).

Risiko infeksi serius bagi awak pesawat angkasa luar akan timbul saat melakukan perjalanan melampaui *Low Earth Orbit* (LEO) menuju angkasa luar. Kemampuan astronot untuk mengobati infeksi dalam perjalanan angkasa luar, mungkin dapat dikompromikan oleh perubahan fisiologi manusia dan fenotipe bakteri yang diinduksi oleh sifat unik dari lingkungan penerbangan angkasa luar. Kerentanan patogen oportunistik terhadap antibiotik konvensional dapat berubah karena pengaruh mikrogravitasi dan perubahan virulensi karakteristik bakteri terhadap tubuh astronot (Taylor, 2015).

5. Pengaruh Radiasi Ion

Radiasi ion merupakan salah satu ancaman lain bagi makhluk hidup selain gravitasi. Radiasi ion meningkat di luar wilayah magnetosfir yang mengelilingi Bumi (Moreno-Villanueva et al., 2017). Bakteri yang hidup di pesawat angkasa luar dan di stasiun angkasa luar akan mengalami stress yang dapat mengakibatkan kematian bakteri tersebut. Kerusakan DNA dapat terjadi akibat radiasi ion di angkasa luar. Walaupun terjadi kerusakan DNA, ada bakteri yang memiliki kemampuan untuk memperbaiki DNA nya sehingga dapat tetap hidup. Kawaguchi et al. (2020) meneliti lapisan bakteri *Deinococcus radiodurans* selama 3 tahun di stasiun ISS. Bakteri tersebut ditempatkan pada pellet yang berada di luar stasiun ISS. Pellet adalah lembaran aluminium dengan lekukan yang masing-masing berukuran lebar 2 mm. Sampel yang digunakan adalah *D. radiodurans*, *D. aerius*, dan ada satu sampel berupa *D. radiodurans mutan* yang tidak memiliki gen untuk perbaikan DNA. Semua sampel dalam keadaan kering. Ada tiga jenis ketebalan sampel bakteri, yaitu 100 μm -, 500- μm dan 1000- μm . Sampel diletakkan di bagian luar stasiun ruang angkasa ISS sehingga terkena pengaruh angkasa luar. Setelah sampel selesai ditempatkan di lokasi pengamatan selama 3 tahun, sampel dibawa ke laboratorium.

Sampel bakteri dikultur, dilakukan qPCR, dan analisis *pulsedfield gel electrophoresis* (PFGE). Sampel bakteri *D. radiodurans* yang bersifat mutan adalah strain KH311, strain recA, dan strain UVS78. Strain KH311 mengalami mutasi pada gen pprA, sehingga tidak memiliki *condensed nucleoid-dependent end joining* (CNDEJ). Strain recA mengalami mutasi pada gen recA, sehingga tidak memiliki *extended synthesis-dependent strand*

annealing (ESDSA) dan *homologous recombination* (HR). Strain UVS78 mengalami mutasi pada gen *uvrA* dan *uvdE*, sehingga tidak memiliki *nucleotide excision repair* (NER) dan *UV-damage excision repair* (UVER). Hasil pengamatan menunjukkan adanya bakteri yang dapat hidup setelah terpapar di angkasa luar selama tiga tahun. Ada perbedaan hasil antara *D. radiodurans* dan *D. aereus* berdasarkan ketebalannya.

Penelitian ini juga menunjukkan terjadinya kerusakan DNA pada bakteri tersebut. Hasil analisis DNA menunjukkan bahwa jumlah salinan (*copy number*) gen *rpoB* pada sampel *D. radiodurans* dengan ketebalan 100 μm adalah lebih rendah 100 kali dibanding kontrol yang ada di Bumi. Rendahnya keberadaan gen *rpoB* ini menunjukkan bahwa kerusakan DNA yang terjadi pada bakteri banyak terjadi dan itulah penyebab kematian bakteri. Makin tipis penyebaran bakteri di permukaan aluminium itu menyebabkan semakin banyaknya kerusakan DNA dan kematian bakteri, walaupun masih ada bakteri *D. radiodurans* yang hidup pada ketebalan 100 μm . Kerusakan DNA yang teramati pada penelitian Kawaguchi et al. (2020) adalah *double strand break* (DSB).

Kerusakan berupa DSB dapat disebabkan karena radiasi ion maupun oleh kekeringan. Kedua keadaan itu terjadi ketika bakteri ditempatkan di luar stasiun angkasa luar ISS. Umumnya DSB terjadi setelah sampel terpapar di angkasa luar selama satu tahun. Walaupun terpapar kondisi angkasa luar dan terjadi DSB, sampel *D. radiodurans* masih memiliki daya hidup setelah tiga tahun, khususnya sampel dengan ketebalan 500-1000- μm . Adanya kemampuan bakteri *D. radiodurans* untuk hidup selama tiga tahun di angkasa luar menandakan bahwa kemampuan memperbaiki DSB cukup tinggi, pada bakteri mengalami kerusakan DNA diperbaiki oleh gen *uvrA* dan gen *uvdE*. Sifat ini juga disertai kemampuan pemotongan DNA untuk perbaikan akibat kerusakan (Kawaguchi et al., 2020). Selain pengamatan pada bakteri, ada juga pengamatan terhadap spora bakteri. Bakteri dalam keadaan spora akan memiliki ketahanan untuk hidup dalam kondisi yang merugikan bakteri yang berada dalam keadaan non spora. Penelitian ini penting karena diduga ada spora bakteri yang dapat bertahan hidup tidak hanya di dalam pesawat angkasa luar, tetapi juga di luar pesawat angkasa.

Penelitian tersebut didukung dengan penelitian Chiang et al. (2019) mengenai strain bakteri *Bacillus pumilus* SAFR-032 yang berada di ISS selama 18 bulan. Bakteri *Bacillus pumilus* dikenal sebagai bakteri yang memiliki sifat tahan sinar UV dan tahan terhadap beberapa teknik sterilisasi.

Berdasarkan penelitian itu didapatkan 60% dari protein yang biasa dihasilkan *B. pumilus* SAFR-032. Protein yang dapat meningkatkan ekspresinya dalam keadaan mikrogravitasi adalah protein UspA. Protein ini berguna untuk melindungi bakteri dari pengaruh lingkungan, misalnya radiasi ultraviolet. Penelitian Chiang et al. (2019) didukung oleh penelitian Ott et al. (2019) terkait bakteri *Deinococcus radiodurans* pada suasana mikrogravitasi. Percobaan ini dilakukan dengan peralatan simulasi mikrogravitasi untuk meniru suasana di angkasa luar yang tanpa bobot. Metabolit dan protein diekstraksi dan diukur dengan metode mass-spectrometri. Hasilnya adalah terdapat peningkatan kadar protein yang berperan dalam mengatasi stres dan protein yang berperan dalam replikasi DNA. Salah satu contoh adalah protein DnaX. Protein DnaX merupakan bagian dari enzim DNA *polymerase* yang berperan dalam replikasi DNA. Protein lain yang meningkat produksinya dalam keadaan mikrogravitasi adalah PolA, yaitu protein yang berperan dalam perbaikan molekul DNA. Protein ini berguna dalam perbaikan DNA seperti yang terkena radiasi ion di angkasa luar.

Bakteri yang hidup di angkasa luar juga ditemukan dalam bentuk debu kosmos (*cosmic dust*). Grebennikova et al. (2018) mengumpulkan debu kosmos yang ada di bagian luar stasiun ISS dari tahun 2013 sampai tahun 2017. Hasil pengamatan itu dikumpulkan dan diamati dengan PCR, elektroforesis DNA, dan analisis filogenetik. Prosedur pengumpulan sampel dan analisis dilakukan secara cermat untuk menghindari kontaminasi dari bakteri yang ada di Bumi. Hasil analisis DNA dan filogenetik menunjukkan bahwa bakteri tersebut adalah dari genus *Mycobacterium* dan *Delftia*. Penelitian itu juga dilanjutkan dengan membandingkan genom bakteri dari sampel angkasa luar itu dengan sampel dari laut wilayah Rusia, yang hasilnya menunjukkan adanya persamaan antara sampel dari angkasa luar dengan sampel di laut itu. Menurut Grebennikova et al. (2018), hasil ditemukannya bakteri dari debu kosmos itu memunculkan dua alternatif tentang asal mula bakteri tersebut. Yang pertama yaitu bakteri itu berasal dari Bumi yang terbawa hingga ketinggian orbit ISS yaitu 400 km. Yang kedua yaitu bakteri itu berasal dari angkasa luar. Alternatif pertama mensyaratkan adanya perpindahan bakteri dari stratosfer ke ionosfer, yang belum dapat dijelaskan mekanismenya.

Penelitian Kawaguchi et al. (2020), Ott et al. (2019), Chiang et al. (2019), dan Grebennikova et al. (2018) ini menunjukkan bahwa ada kemungkinan perpindahan mikroba melalui angkasa luar yang dalam keadaan mikrogravitasi, penuh radiasi ion, dan tanpa oksigen dalam waktu bertahun-tahun. Perpindahan mikroorganisme di angkasa luar ini merupakan bagian dari teori panspermia (Wickramasinghe, Wickramasinghe, & Steele, 2018; Steele, 2020). Panspermia merupakan teori yang menyatakan bahwa perpindahan mikroorganisme melalui benda antariksa seperti komet atau meteorit merupakan bahan pembawa materi kehidupan yang dapat mempengaruhi biodiversitas. Salah satu dasar bagi panspermia adalah hasil pengamatan astronomi dengan teleskop inframerah. Pada pengamatan itu, ditemukan adanya rantai karbon. Hasil pengamatan itu menunjukkan adanya molekul organik di komet seperti yang ditemukan di komet 67P/C-G di tahun 2015. Penemuan itu dilanjutkan dengan adanya asam amino glisin dan oksigen di komet yang sama. Adanya senyawa karbon, oksigen, dan air merupakan tanda awal tentang adanya kehidupan (Wickramasinghe et al., 2018; Steele, 2020).

6. Manfaat Studi tentang Mikroorganisme pada Kondisi Mikrogravitasi

Pengetahuan yang didapat dari studi tentang mikroorganisme di angkasa luar dapat diterapkan pada berbagai bidang. Penerapan pengetahuan ini dapat meliputi bidang kesehatan, misalnya dengan diketahuinya berbagai jenis bakteri yang berubah sifat patogenitasnya. Astronot akan mendapat berbagai cara pencegahan dari kemungkinan adanya penyakit menular selama dalam perjalanan di angkasa luar yang cukup lama. Di bidang industri, adanya penelitian tentang metabolisme bakteri dapat berguna untuk mengetahui cara memproduksi metabolit sekunder yang lebih efisien (Bijlani et al., 2021).

Sejumlah bakteri dapat menghasilkan lebih banyak metabolit sekunder tertentu dalam kondisi mikrogravitasi. Penelitian menunjukkan bahwa fungi *Humicola fuscoatra* dalam penerbangan pesawat *Space Shuttle* menghasilkan antibiotika jenis monarden yang lebih banyak daripada dalam kultur di Bumi. Pada media tumbuh T8, penambahan produksi antibiotika tersebut di angkasa luar dapat meningkat hingga 30% dibanding kultur di bumi. Pada media tumbuh PG produksi antibiotika meningkat hingga 190% (Lam et al., 1998). Penelitian lain dilakukan pada fungi *Aspergillus fumigatus* yang memproduksi antibiotika fumigaclavine A. Dibanding kelompok

control yang ada di Bumi, kultur *A. fumigatus* yang ada di stasiun angkasa luar ISS menunjukkan hasil yang lebih tinggi (Knox et al., 2016). Kultur *Aspergillus niger* di stasiun ISS menghasilkan senyawa pyranonigrin yang lebih tinggi sebesar 6000% dibanding kultur yang ada di Bumi (Romsdahl, Blachowicz, Chiang, Venkateswaran, & Wang, 2020). Di masa depan, ada kemungkinan bahwa produksi metabolit sekunder seperti itu dapat dilakukan di angkasa luar, apabila sudah dapat dilakukan secara ekonomis. Pengembangan dalam bidang bioteknologi dan penelitian tentang biologi penerbangan angkasa luar sangat penting untuk memahami konsep *science for society* 5.0. Kita dapat memahami konsep bagaimana sistem kehidupan makhluk hidup di angkasa luar, termasuk kesehatan manusia yang dapat dipengaruhi oleh penerbangan angkasa luar dan eksplorasi ruang angkasa.

KESIMPULAN

Pentingnya pemahaman tentang perubahan sifat mikroorganisme sangat berguna pada bidang industri maupun kesehatan. Perubahan sifat mikroorganisme di angkasa luar dapat berguna bagi manusia, misalnya dengan dihasilkannya metabolit sekunder dengan jumlah yang lebih tinggi dibandingkan produksi di bumi. Selain itu, perubahan sifat mikroorganisme seperti berupa perubahan patogenitas maupun reaktivasi virus, perlu menjadi perhatian bagi kesehatan astronot, terutama bagi astronot yang bertugas dalam waktu lama. Untuk itu perlu adanya metode sterilisasi kendaraan angkasa luar sebelum keberangkatan sehingga dapat mendukung terwujudnya *science for society* 5.0 dalam peningkatan kesehatan para astronot dengan memobilisasi potensi pengembangan bioteknologi.

DAFTAR PUSTAKA

- Acres, J. M., Youngapelian, M. J., & Nadeau, J. (2021). The influence of spaceflight and simulated microgravity on bacterial motility and chemotaxis. *Npj Microgravity*, 7(1), 1-21. <https://doi.org/10.1038/s41526-021-00135-x>
- Aunins, T. R., Erickson, K. E., Prasad, N., Levy, S. E., Jones, A., Shrestha, S., & Chatterjee, A. (2018). Spaceflight modifies *Escherichia coli* gene expression in response to antibiotic exposure and reveals role of oxidative stress response. *Frontiers in Microbiology*, 9(3), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00310>
- Bijlani, S., Stephens, E., Singh, N.K., Venkateswaran, K., & Wang, C.C.C., (2021). Advances in space microbiology. *Journal iScience*, 24(5), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102395>
- Bryan, N.C., Lebreton, F., Gilmore, M., Ruvkun, G., Zuber, M.T., & Carr, C.E. (2021). Genomic and functional characterization of *Enterococcus faecalis* isolates recovered from the international space station and their potential for pathogenicity. *Front. Microbiol*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.515319>
- Chiang, A.J., Malli Mohan, G.B., Singh, N.K., Vaishampayan, P.A., Kalkum, M., & Venkateswaran, K. (2019). Alteration of proteomes in firstgeneration cultures of *Bacillus pumilus* spores exposed to outer space. *mSystems*, 4(4), e00195-19. <https://doi: 10.1128/mSystems.00195-19>
- Grebennikova, T. V., Syroeshkin, A. V., Shubralova, E. V., Eliseeva, O. V., Kostina, L. V., Kulikova, N. Y., ... & Tsygankov, O. S. (2018). The DNA of bacteria of the world ocean and the earth in cosmic dust at the international space station. *The Scientific World Journal*, 2018, 7360147, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2018/7360147>
- Hanski, I., von Hertzen, L., Fyhrquist, N., Koskinen, K., Torppa, K., Laatikainen, T., ...Haahtela, T. (2012). Environmental biodiversity, human microbiota, and allergy are interrelated. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(21), 8334-8339.

- Hong, Y. (2018). The "Tiangong" Chinese space station project. 5(2): 278–283. <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2018202>
- Horneck, G., Klaus, D.M., & Mancinelli, R.L. (2010). Space microbiology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 74(1), 121-156. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00016-09>
- Irianti, M.I., Fitriana, W., Arifianti, A.E., & Rahmasari, R. (2020). Herpes simplex virus tipe 1: prevalensi, infeksi dan penemuan obat baru. *Jurnal Ilmu Kefarmasian*. 13 (1), 21-26.
- Kawaguchi, Y., Shibuya, M., Kinoshita, I., Yatabe, J., Narumi, I., Shibata H, ... Yamagishi, A. (2020). DNA damage and survival time course of Deinococcal cell pellets during 3 years of exposure to outer space. *Front. Microbiol*, 11, 2050. doi: 10.3389/fmicb.2020.0205.
- Knox, B.P., Blachowicz, A., Palmer, J.M., Romsdahl, J., Huttenlocher, A., Wang, C.C.,...Venkateswaran, K. (2016). Characterization of *Aspergillus fumigatus* isolates from air and surfaces of the international space station. *mSphere*, 1, e00227–16. doi: 10.1128/mSphere.00227-16
- Lam, K.S., Mamber, S.W., Pack, E.J., Forenza, S., Fernandes, P.B., & Klaus, D.M. (1998). The effects of space flight on the production of monorden by *Humicola fuscoatra* WC5157 in solid-state fermentation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 49(5),579-83. doi: 10.1007/s002530051216
- Mahnert, A., Verseux, C., Schwendner, P., Koskinen, K., Kumpitsch, C., Blohs, M., ... Billi, D. (2021). Microbiome dynamics during the HI-SEAS IV mission, and implications for future crewed missions beyond Earth. *Microbiome*, 9, 27. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00959-x>
- Mehta (2017). Latent virus reactivation in astronauts on the international space station. *npj Microgravity*, 3, 11 ; doi:10.1038/s41526-017-0015-y
- Moreno-Villanueva, M., Wong, M., Lu, T., Zhang, Y., Wu, H. (2017). Interplay of space radiation and microgravity in DNA damage and DNA damage response. *npj Microgravity*. 3:14. doi:10.1038/s41526-017-0019-7
- Nandhini, B., Ramesh, A., & Monisha, M. (2021). An Overview of astrobiology and microbial survival in space. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 6(3). ISSN No:-2456-2165

- NASA (2012). What Is Microgravity? Retrieved from <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-microgravity-58.html>
- Ott, E., Fuchs, F. M., Moeller, R., Hemmersbach, R., Kawaguchi, Y., Yamagishi, A., & Milojevic, T. (2019). Molecular response of *Deinococcus radiodurans* to simulated microgravity explored by proteometabolomic approach. *Scientific Reports*, 9, 18462. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54742-6>
- Romsdahl, J., Blachowicz, A., Chiang, Y.M., Venkateswaran, K., & Wang, C.C.C. (2020). Metabolomic analysis of *Aspergillus niger* isolated from the international space station reveals enhanced production levels of the antioxidant pyranonigrin. *Front. Microbiol*, 11 (931). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00931>
- Rooney, B.V., Crucian, B.E., Pierson, D.L., Laudenslager, M.L., & Mehta, S.K. (2019). Herpes virus reactivation in astronauts during spaceflight and its application on earth. *Front. Microbiol.*, 10 (16). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00016>
- Siddiqui, R., Akbar, N., & Khan, N. A. (2021). Gut microbiome and human health under the space environment. *Journal of Applied Microbiology*, 130 (1),14–24. <https://doi.org/10.1111/jam.14789>
- Sielaff, A.C., Urbaniak, C., Mohan, G.B.M., Stepanov, V.G., Tran, Q., Wood, J.M., ... Karouia, F., (2019). Characterization of the total and viable bacterial and fungal communities associated with the International Space Station surfaces. *Microbiome*, 7(50),1-21. <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0666-x>
- Simoës, M.F., & Antunes, A. (2021). Microbial pathogenicity in space. *Journal Pathogens MDPI*, 10(4), 450. <https://doi.org/10.3390/pathogens10040450>
- Simon, Á., Smarandache, A., Iancu, V., & Pascu, M. L. (2021). Stability of antimicrobial drug molecules in different gravitational and radiation conditions in view of applications during outer space missions. *Molecules*, 26(8), 2221.

- Singh, A., Preiksaitis, J., Ferenczy, A., & Romanowski, B. (2005). The laboratory diagnosis of herpes simplex virus infections. *Canadian J of Infect Diseases and Med Microbiol*, 16(2), 92-8. doi: 10.1155/2005/318294.
- Steele, E. J. (2020). Introduction—Panspermia, 2020. *Advances in Genetics*, 106, 1-4. <https://doi:10.1016/bs.adgen.2020.04.001>
- Taylor, P.W. (2015). Impact of space flight on bacterial virulence antibiotic susceptibility. *Journal Infection and Drug Resistance*, 8, 249-262. <https://doi.org/10.2147/IDR.S67275>
- Urbaniak, C., Sielaff, A.C., Frey, K.G., Allen, J.E., Singh, N., Jaing, C., ... Venkateswaran, K. (2018). Detection of antimicrobial resistance genes associated with the International Space Station environmental surfaces. *Scientific Reports*, 8 (814), 1-13. <https://doi:10.1038/s41598-017-18506-4>
- Voorhies, A.A., & Lorenzi, H.A. (2016). The challenge of maintaining a healthy microbiome during long-duration space missions. *Front Astron Space Sci*, 3, 23. <https://doi.org/10.3389/fspas.2016.00023>
- Voorhies, A.A., Ott, C.M., Mehta, S., Pierson, D.L., Crucian, B.E., Feiveson, A., ... Torralba, M. (2019). Study of the impact of long-duration space missions at the International Space Station on the astronaut microbiome. *Sci Rep*, 9, 9911. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46303-8>
- WHO (2016). Ionizing radiation, health effects and protective measures. Retrieved from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>
- Wickramasinghe, N. C., Wickramasinghe, D. T., & Steele, E. J. (2018). Comets, enceladus and panspermia. *Astrophysics and Space Science*, 363(12), 1-7. doi:10.1007/s10509-018-3465-0
- Zea, L., Prasad, N., Levy, S. E., Stodieck, L., Jones, A., & Shrestha, S. (2016). A molecular genetic basis explaining altered bacterial behavior in space. *PLoS ONE*, 11(11), e0164359. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164359>.

HIBRIDISASI DAN INTROGRESI PADA PAUS BIRU (*Balaenoptera musculus*) DAN PENGARUHNYA TERHADAP KONSERVASI

HIBRIDIZATION AND INTROGRESSION OF BLUE WHALE (*Balaenoptera musculus*) AND THEIR EFFECT TOWARD CONSERVATION

Diki¹, Cut Meutia Fajrina², Fikri Nashrullah³

^{1,2}Program Studi Biologi, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi,
Universitas Terbuka

³Jurusan Perikanan, Fakultas Kelautan dan Perikanan,
Universitas Padjadjaran
dikinian@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

*Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam paradigma Society 5.0 berperan penting dalam menjaga kelestarian lingkungan hidup. Kesejahteraan manusia yang menjadi fokus dalam perkembangan teknologi juga ikut ditentukan oleh adanya lingkungan hidup yang terjaga kelestariannya. Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi juga berguna dalam memelihara kelestarian hewan laut seperti paus biru, agar ekosistem laut tetap terjaga. Tulisan ini bertujuan membahas masalah hibridisasi dan introgresi yang mempengaruhi konservasi paus biru. Terdapat hibridisasi antar subspecies paus biru, yaitu antara paus biru (*Balaenoptera musculus intermedia*) dengan paus pigmy (*Balaenoptera musculus brevicauda*) dan juga antara paus biru dengan paus sirip (*Balaenoptera physalus*). Paus biru dapat melakukan hibridisasi dengan paus sirip dan menghasilkan keturunan yang fertil, Introgresi dengan paus sirip sangat besar pengaruhnya pada paus biru, karena paus sirip memiliki populasi yang lebih besar, yaitu lebih dari 80,000 ekor. Adanya introgresi dan hibridisasi dapat mengancam pemulihan populasi paus biru.*

Kata Kunci: hibridisasi, introgresi, paus biru, paus sirip.

PENDAHULUAN

Paus biru (*Balaenoptera musculus*) merupakan makhluk hidup terbesar yang terdapat di permukaan bumi. Panjang ukuran paus biru dewasa berkisar antara 26-33 meter. Bobot tubuhnya berkisar antara 50-150 ton. Dalam satu hari, satu ekor paus biru memakan 3,6 ton krill, sejenis udang renik (Árnason, Lammers, Umar, Nilsson, & Janke, 2018). Paus biru merupakan hewan yang sering bermigrasi. Indonesia merupakan salah satu wilayah migrasi paus biru yang juga mencakup wilayah perairan Australia. Pada bulan Maret dan April, paus biru mulai bermigrasi dari perairan di sekitar sebelah barat kota Perth di bagian barat Australia menuju ke utara. Paus biru itu bergerak untuk menuju ke perairan Laut Banda di Maluku (Double et al., 2014). Keberlangsungan paus biru di perairan Indonesia merupakan bagian dari konservasi biodiversitas di Indonesia.

Paus biru merupakan hewan yang terancam kepunahan. Selama abad ke-20, terjadi perburuan paus biru, yaitu ketika perkembangan teknologi memungkinkan untuk menangkap jenis paus ini (Branch, Matsuoka, & Miyashita, 2004). Diperkirakan jumlahnya sekitar 300.000 ekor pada awal abad 20, yaitu sebelum terjadi perburuan. Pada saat ini, jumlah paus biru diperkirakan adalah 5.000 – 15.000 individu dewasa (Cooke, 2018). Diperkirakan bahwa populasi ini adalah 1% dari populasi awal sebelum terjadi perburuan (Branch et al., 2004).

Satu masalah penting dalam konservasi paus biru adalah hibridisasi. Pada umumnya, keturunan hasil hibridisasi bersifat infertil, namun terjadinya hybrid antara paus biru dan paus sirip yang bersifat fertil merupakan fenomena yang dapat berpengaruh pada konservasi paus biru. Penelitian yang dilakukan Spilliaert et al. (1991) menunjukkan adanya sifat fertil pada individu hasil hibrida antara paus biru dan paus sirip. Spilliaert et al. (1991) menemukan adanya paus yang terdampar dalam keadaan bunting. Berdasarkan uji DNA, diketahui bahwa paus tersebut adalah hibrida antara paus biru dan paus sirip. Embrio yang ada dalam paus tersebut diketahui hasil perkawinan betina hibrida itu dengan paus biru jantan. Ini menunjukkan bahwa ada paus hibrida dari persilangan antara paus biru dan paus sirip yang bersifat fertil (Spilliaert, 1991). Adanya sifat fertil ini menimbulkan dugaan bahwa sebagian individu paus biru bukan merupakan paus biru, melainkan individu hibrida yang kemurnian genetisnya meragukan.

Selain hibridisasi, masalah yang terjadi dalam konservasi paus biru adalah introgresi. Menurut Harrison & Larson (2014), introgresi berarti masuknya satu gen atau alel dari satu kelompok takson ke kelompok takson yang lain. Dalam hal ini, adanya faktor genetik dari spesies paus lain, misalnya paus sirip (*Balaenoptera physalus*) ke populasi paus biru. Berbeda dengan hibridisasi yang berupa percampuran genetik antara dua spesies yang menghasilkan keturunan yang infertil dan seragam, introgresi hanya melibatkan sedikit gen saja. Introgresi ini juga dipengaruhi oleh adanya hibrida yang fertile pada masa yang sudah sangat lama, sehingga gen dari spesies lain dapat masuk ke genom paus biru.

Kemajuan dalam biologi molekuler ini menunjukkan pentingnya ilmu pengetahuan dan teknologi untuk konservasi makhluk hidup. Bila sebelumnya perkembangan teknologi menyebabkan terjadinya perburuan paus biru yang hampir menyebabkan kepunahan, maka perkembangan teknologi biologi molekuler dapat membantu konservasi paus biru. Ini merupakan salah satu aplikasi dari paradigma *Society 5.0*.

Tulisan ini membahas fenomena hibridisasi dan introgresi yang mempengaruhi konservasi paus biru. Teori yang mendasari pembahasan adalah ekologi molekuler (DeWoody, Bickham, Michler, Nichols, Rhodes, & Woeste, 2010; Frankham, Ballou, Briscoe, & Ballou, 2010; Freeland, Petersen, & Kirk, 2011). Tulisan ini terdiri atas tiga bagian. Bagian pertama adalah mengenai karakter biologi paus biru (*Balaenoptera musculus*, Gambar 1) dan paus sirip (*B. physalus*, Gambar 2). Pada bagian kedua terdapat pembahasan mengenai ekologi molekuler dan keragaman genetik paus biru dan paus sirip. Adapun pada bagian ketiga terdapat pembahasan tentang fenomena hibridisasi dan introgresi pada paus biru dan paus sirip, serta dampaknya terhadap konservasi paus biru.



Sumber: Thewhaletrail, 2018

Gambar 1. Paus Biru (*Balaenoptera musculus*)



Sumber: Oceana, 2021

Gambar 2. Paus Sirip (*Balaenoptera physalus*)

PEMBAHASAN

1. Tinjauan tentang Ekologi Molekuler dan Genetika Konservasi

Saat ini ekologi dan konservasi mulai menerapkan ilmu genetika, khususnya genetika molekuler. Ekologi molekuler merupakan penerapan dari prinsip genetika populasi dan genetika molekuler untuk mengatasi masalah ekologi (DeWoody et al., 2010). Konsep ini juga berhubungan dengan genetika konservasi, yaitu pemanfaatan ilmu genetika untuk konservasi makhluk hidup (Frankham et al., 2010). Dalam tulisan ini, penelitian dari Attard et al. (2012) dan Barlow et al. (2018) menunjukkan pentingnya genetika molekuler untuk konservasi paus biru.

Beberapa metode molekuler yang digunakan dalam ekologi molekuler adalah analisis *Polymerase Chain Reaction* (PCR), elektroforesis, *Next Generation Sequencing* (NGS). PCR berguna untuk mengisolasi dan memperbanyak urutan pasangan basa pada suatu segmen DNA tertentu, dari keseluruhan genom makhluk tersebut. Untuk mengatasi kekurangan metode PCR, dikembangkan teknologi quantitative PCR (qPCR) atau real time PCR yang dapat mengetahui jumlah DNA yang diamati. Metode qPCR dapat digunakan untuk mengukur sejauh mana perubahan dalam ekspresi gen dapat mempengaruhi terbentuknya sifat fenotipe tertentu (Freeland et al., 2011).

Bidang ekologi molekuler banyak mengandalkan marker genetic untuk mengamati suatu populasi. Marker genetic dapat berguna untuk mengukur hubungan kekerabatan antar makhluk hidup yang berbeda berdasarkan alel tertentu, yang mungkin sudah berlangsung selama ribuan generasi. Lammers, Blumer, Rücklé, & Nilsson (2019) dan Arnasson (2018) dapat mengukur perbedaan komposisi genetik beberapa spesies paus balin dan memperkirakan berapa lama sudah terjadi introgresi antara paus biru dan spesies lain selama ribuan tahun.

Salah satu marker genetic misalnya DNA mitokondria (mtDNA). mtDNA terdiri atas 13 gen penghasil protein, 22 tRNA, dan 2 rRNA. mtDNA diwariskan dari ibu ke anak, karena itu mtDNA tidak mengalami rekombinasi dan bersifat sebagai haplotype tunggal (Freeland et al., 2011; Hartl, 2020). Penelitian yang dilakukan Attard et al. (2012), Barlow et al. (2018) dan Sremba, Hancock-Hanser, Branch, LeDuc, & Baker (2012) misalnya adalah berdasarkan pada pengamatan mtDNA paus biru.

Selain mtDNA, marker lain yang juga sering digunakan dalam ekologi molekuler adalah microsatellite atau disebut juga *Short Tandem Repeat* (STR). Microsatellite terdiri atas 1-6 pasangan basa yang berulang ada di dalam genom suatu makhluk hidup. Contoh microsatellite adalah (CA)₁₂ yaitu pengulangan 12 nukleotida CA berupa CACACACACACACACACACACA (Freeland, 2011; Hartl, 2020). Penggunaan microsatellite dalam mengamati hibridisasi dan introgresi pada paus biru dilakukan misalnya oleh Attard et al. (2012) dan Torres-Florez, Hucke-Gaete, Rosenbaum, & Figueroa (2014).

Ada sejumlah urutan DNA tertentu yang terdapat di beberapa bagian DNA secara berulang. DNA yang ada secara berulang ini disebut DNA repetitif. Ada dua macam DNA repetitif. DNA repetitif yang memiliki panjang urutan 150-300 pasangan basa disebut SINE (*short interspersed elements*). DNA repetitif yang memiliki sampai ribuan pasangan basa disebut long interspersed elements atau LINE (Hartl, 2020; Pierce, 2020). Baik LINE dan SINE juga dapat digunakan dalam penelitian ekologi molekuler, misalnya penelitian yang dilakukan oleh Arnasson et al. (2018).

Penentuan urutan DNA (DNA sequencing) berguna dalam ekologi molekuler, terutama untuk mengetahui perbedaan antar individu. Hanya dengan mengetahui perbedaan komposisi dua rantai DNA, kita dapat mengetahui bagaimana perbedaan tersebut. Perbedaan itu dapat diketahui misalnya dari *single nucleotide polymorphism* (SNIP). SNIP adalah posisi satu pasangan basa tertentu dalam rantai DNA yang berbeda antar individu (Freeland et al., 2011).

Salah satu fenomena di bidang ekologi yang memerlukan ilmu genetika adalah hibridisasi pada populasi hewan atau tumbuhan yang dilindungi. Pada umumnya makhluk hidup yang berbeda spesies akan terhambat untuk melakukan hibridisasi. Hambatan itu dapat berupa isolasi geografi maupun adanya mekanisme isolasi reproduksi. Dua spesies yang terhambat untuk melakukan perkawinan karena isolasi geografi disebut spesies alopatrik. Adapun dua spesies yang hidup di satu habitat yang sama namun memiliki isolasi reproduksi disebut spesies simpatrik. Dengan demikian, dua spesies itu akan tetap terhambat untuk melakukan perkawinan sehingga komposisi gennya menjadi semakin berbeda (Freeland et al., 2011).

Dua spesies yang berbeda dapat dipisahkan oleh isolasi geografis maupun isolasi reproduksi. Batas antar spesies tersebut dapat menjadi longgar atau justru menjadi lebih tegas karena berbagai faktor, baik faktor

alami maupun faktor pengaruh manusia. Faktor alami misalnya perpindahan aliran sungai sehingga dua populasi yang terpisah menjadi tidak terpisah lagi. Faktor pengaruh manusia yang menghilangkan pembatas alami bagi hibridisasi dapat berupa adanya pemindahan suatu jenis makhluk hidup ke daerah yang bukan habitat alaminya. Pemindahan itu dapat berlangsung secara sengaja maupun tidak sengaja. Akibat perpindahan itu adalah dua populasi yang terpisah secara geografis menjadi spesies simpatis dan dapat mengalami hibridisasi.

Pada hewan yang dilindungi, adanya hibridisasi akan merugikan upaya konservasi. Apabila ada suatu spesies yang terancam kepunahan mengalami hibridisasi dengan spesies yang lebih melimpah, maka spesies yang jumlahnya lebih sedikit akan dirugikan. Umumnya spesies yang jumlahnya lebih sedikit akan kesulitan mencari pasangan, karena jumlah pasangan juga terbatas. Hewan itu akan cenderung mencari pasangan dari spesies yang berbeda. Karena itu, populasi spesies yang terancam kepunahan akan bersaing tidak hanya oleh spesies yang lebih banyak populasinya, tapi juga akan bersaing oleh spesies hibridanya (Frankham et al., 2010).

Hibridisasi dapat menguntungkan suatu spesies. Hibridisasi dapat meningkatkan keanekaragaman genetik suatu populasi maupun spesies. Contohnya adalah bila suatu hibridisasi menghasilkan kombinasi alel yang berguna maka makhluk hasil hibridisasi menjadi memiliki kesesuaian yang tinggi dengan habitatnya (Freeland et al., 2011). Contoh hibrida yang terjadi di alam bebas adalah hibridisasi antara beruang grizzly dengan beruang kutub di wilayah utara Kanada (Pongracz, Paetkau, Branigan, & Richardson, 2017). Contoh lain adalah adanya introgresi dari hibridisasi antara serigala abu-abu dan coyote di Amerika Utara. Penelitian ini dilakukan dengan mengamati SNP pada 84 ekor serigala abu-abu dan 56 ekor coyote (vonHoldt, Kays, Pollinger, & Wayne, 2016).

Suatu hasil hibridisasi dapat juga menjadi awal bagi terbentuknya spesies baru. Terbentuknya spesies baru ini berawal ketika hybrid menghasilkan kumpulan beberapa genotipe yang bersifat heterogen. Dalam populasi hybrid, terdapat juga variasi genotipe dan fenotipe yang lebih banyak dari gabungan variasi pada kedua tetuanya. Keadaan ini disebut segregasi transgresif. Lama kelamaan, adanya variasi ini akan membentuk suatu populasi yang stabil dengan fenotipe tertentu (Freeland et al., 2011). Populasi baru itulah yang akan memiliki ciri sebagai suatu spesies baru. Newsome et al. (2017) membuat perkiraan bahwa hibridisasi antara coyote

dan serigala abu-abu berhubungan dengan makin meningkatnya kecenderungan kedua spesies yang berbeda itu untuk menjelajah wilayah pemukiman manusia karena banyaknya tersedia makanan berupa sampah. vonHoldt et al. (2016) juga menyatakan bahwa percampuran gen antara coyote dan serigala abu-abu berguna bagi binatang hybrid itu untuk memanfaatkan relung ekologi berupa wilayah yang berdekatan dengan pemukiman manusia.

Satu peristiwa hibridisasi akibat migrasi adalah pada peristiwa tersebarnya ikan catfish jenis *Orconectes rusticus* ke danau Trout Lake, Wisconsin, Amerika Serikat, yang memiliki populasi lokal ikan *O. propinquus*. Ikan *O. propinquus* termasuk spesies langka, karena populasinya terbatas. Pada saat terjadi introduksi *O. rusticus* di tahun 1979 itu, *O. propinquus* merupakan 90% dari populasi catfish di danau itu. Setelah terjadi hibridisasi maka populasi *O. propinquus* makin berkurang. Pesaing bagi *O. propinquus* adalah *O. rusticus* dan hybrid *O. rusticus/O. propinquus* (Zamudio & Harrison, 2010).

Hibridisasi dapat menguntungkan dalam hal menjaga keberadaan alel pada spesies tertentu, meskipun spesies tertentu justru menjadi terancam kepunahan. Keuntungan yang didapatkan individu hibrida itu sangat bergantung pada situasi geografi dan demografi tertentu. Pada kasus hibrida *O. rusticus/O. propinquus* yang diamati Zamudio dan Harrison (2010) itu, terjadi penyebaran hibrida tersebut ke daerah yang lebih luas dari populasi *O. rusticus* semula. Maka terjadi paradoks bahwa *O. rusticus* mengalami penurunan populasi, namun justru sebagian alelnya disebarakan dalam individu hibridanya dengan *O. propinquus*.

Pembentukan spesies baru akibat hibridisasi dapat meningkatkan keanekaragaman genetik. Meningkatnya keanekaragaman genetik ini mendorong terjadinya radiasi adaptif. Satu keuntungan dari radiasi adaptif adalah terhindarnya suatu populasi dari efek *bottleneck* (Freeland et al., 2011). Efek *bottleneck* sangat relevan dengan konservasi paus biru karena paus biru mengalami penurunan populasi yang drastis karena perburuan semenjak awal abad ke-20 (Jefferson et al., 2021).

Peristiwa gene flow juga berpengaruh pada meningkatnya keanekaragaman genetik dan terhindarnya suatu populasi dari efek *bottleneck*. Pada umumnya, suatu populasi yang mengalami penurunan jumlah secara signifikan akan mengalami efek *bottleneck*. Dalam suatu contoh, buaya Morelett di Belize, Amerika Tengah pernah mengalami

penurunan jumlah secara drastis pada tahun 1960-an karena perburuan. Penelitian menunjukkan bahwa keanekaragaman genetik populasi buaya itu tetap tinggi. Hal ini disebabkan karena populasi buaya itu masih terhubung dengan populasi di tempat lain dan dapat saling kawin sehingga tetap terjadi pertukaran gen. Gene flow juga akan berguna dalam pembahasan konservasi paus biru karena beberapa penelitian menunjukkan adanya populasi paus biru yang tidak bermigrasi dan secara genetik terpisah dari populasi paus biru lainnya (Barlow et al., 2018; Torres-Florez et al., 2014).

Aliran genetik (*genetic drift*) juga berperan penting dalam pengaturan keanekaragaman genetik. Aliran genetik berarti berubahnya frekuensi alel tertentu dalam suatu populasi dalam satu generasi ke generasi berikutnya. Terjadinya aliran genetik disebabkan karena perbedaan tingkat reproduksi antara satu genotipe dengan genotipe lain. Genotipe yang sifatnya lebih cocok dengan lingkungan akan berkembang biak lebih cepat. Maka, alel itulah yang akan lebih banyak dijumpai pada kondisi yang berbeda, misalnya akibat perpindahan lokasi.

Penerapan genetika molekuler pada konservasi sangat penting. Penggunaan beberapa marker genetic dapat dilakukan untuk mengetahui adanya introgresi. Salah satu contoh penggunaan marker genetic untuk mengetahui dan mengukur adanya introgresi adalah pada tanaman transgenik. Diketahui bahwa telah terjadi perpindahan gen resistensi terhadap glifosat dari tanaman canola transgenik di Kanada. Marker genetic dapat digunakan untuk mengenali individu mana yang merupakan hasil introgresi atau hybrid, dan individu mana yang merupakan tumbuhan dari suatu spesies tertentu secara murni (Frankham et al., 2010).

Penerapan teori dan teknik genetika, termasuk genetika molekuler untuk mencegah kepunahan merupakan fokus dari genetika konservasi. Pada umumnya studi pada genetika konservasi ditujukan pada populasi yang semula besar namun sekarang mengalami penurunan populasi dan banyak melakukan inbreeding. Pada populasi yang berjumlah sedikit, inbreeding dan berkurangnya keanekaragaman genetika merupakan ancaman terbesar bagi keberlangsungan spesies itu (Frankham et al., 2010). Satu contoh adalah penelitian Arisuryanti, Hasan, Ayu, Ratman, & Hakim (2019) tentang penggunaan DNA barcode untuk pengenalan spesies ikan air tawar di NTB. Selain itu, konservasi yang didasarkan pada karakteristik genetik juga penting pada populasi orangutan Tapanuli. Spesies orangutan ini berjumlah 800 ekor. Orangutan ini memiliki perbedaan morfologi dan perbedaan genetik dengan orangutan Sumatra dan orangutan Kalimantan (Nater et al., 2017).

2. Karakter Biologi Paus Biru

Paus biru merupakan paus balin, yaitu paus yang memiliki penyaring makanan di mulutnya. Paus ini tidak memiliki gigi. Cara paus biru makan adalah dengan menangkap sekumpulan *crustacea* (krill) dengan memasukkan langsung ke mulutnya beserta air laut. Setelah itu air laut yang ada di dalam mulutnya dikeluarkan dan melewati saringan yang disebut balin. Balin ini berguna untuk menahan kumpulan krill agar tidak keluar dari mulut paus pada saat keluarnya air. Cara makan inilah yang membedakan paus biru dengan mamalia laut lainnya (Mizroch, Rice, Zwiefelhofer, Waite, & Perryman, 2009).

Populasi paus biru di seluruh dunia terdiri atas tiga populasi. Ketiga populasi tersebut adalah Atlantik Utara, Pasifik Utara, dan Antartika. Populasi di belahan bumi selatan, baik di lautan Pasifik, lautan Atlantik, maupun lautan Hindia disebut populasi Antartika. Populasi Antartika dibagi tiga subpopulasi. Populasi pertama adalah paus biru Antartika (*B. musculus intermedia*), paus biru pigmi (*B. musculus brevicauda*), dan populasi paus biru Chile yang belum dinamai. Paus biru pigmi adalah yang terkecil. Adapun ukuran paus biru Chile adalah berada di antara ukuran paus biru kerdil dan paus biru Antartika (Vernazzani, Jackson, Cabrera, Carlson, & Brownell, 2017). Selain ukuran, paus biru pigmi juga dapat dibedakan berdasarkan bunyinya (McCauley, Gavrilov, Jolliffe, Ward, & Gill, 2018). Indonesia merupakan salah satu tempat migrasi bagi paus biru pigmi, selain Australia, New Zealand, dan Pasifik Tenggara (Branch, Stafford, Palacios, Allison, & Bannister, 2007).

Paus biru memiliki pola hidup yang selalu bermigrasi dari satu samudra ke samudra lainnya dan dari perairan dengan suhu dingin menuju perairan yang hangat. (Mizroch et al., 2009). Perjalanan antar samudra yang dilakukan paus biru terjadi ketika musim kawin tiba. Masa berkembang biak paus biru berlangsung antara musim dingin dan musim gugur dengan masa kandungan selama 10-11 bulan dan masa kandungan tersebut berlangsung setiap 2-3 tahun sekali di belahan bumi bersuhu dingin bagian utara. Di perairan Antartika, paus biru hidup di daerah lintang selatan selama musim panas. Mereka lalu bermigrasi ke perairan khatulistiwa selama musim dingin (Attard et al., 2012; McCauley et al., 2018; Double, 2014). Waktu generasi paus biru sangat lama, yaitu mencapai usia dewasa setelah tiga tahun. Betinanya beranak sekali setiap dua setengah tahun (Branch & Mikhalev, 2008).

Sebagian populasi paus biru memiliki ikatan dengan daerah tertentu. Menurut Torres-Florez et al. (2014), sekelompok paus biru di lepas pantai Chile memiliki tingkat kembali yang tinggi setiap tahun ke daerah yang sama. Populasi lain juga tinggal hampir sepanjang tahun di satu daerah, misalnya populasi di New Zealand (Barlow et al., 2018).

Salah satu peran paus biru bagi ekosistem adalah ketika binatang ini mati, bangkainya dapat menjadi sumber bahan organik di dasar laut. Ketika membusuk, bahan organik dari bangkai itu menghidupi bakteri kemotropik (Treude et al., 2009). Adapun Smith & Baco (2003) menjelaskan adanya tiga fase pembusukan bangkai paus. Yang pertama adalah pengambilan jaringan lunak oleh hagfish, hiu, atau binatang invertebrata. Tahap kedua adalah tahap pengayaan oportunistik. Cacing *Polichaeta* dan *Crustacea* paling aktif pada tahap ini. Tahap ketiga adalah dekomposisi bangkai di tahap suphobic. Proses dekomposisi ini dapat berlangsung puluhan tahun. Pada tahap ketiga bakteri kemoautotrof yang paling banyak berperan. Seluruh tahap dekomposisi ini menambah biodiversitas di dasar laut.

Jenis paus yang memiliki ukuran mendekati paus biru adalah paus sirip. Paus sirip (*Balaenoptera physalis*) merupakan paus kedua terbesar di dunia setelah paus biru. Berat maksimal paus sirip adalah 74 ton dan panjang maksimum adalah 25 meter. Paus sirip hidup berkelompok antara 4-10 ekor. Paus sirip hidup di berbagai wilayah lautan dan terbagi menjadi tiga populasi, yaitu populasi Pasifik Utara, populasi Atlantik Utara, dan populasi laut selatan. Paus sirip bermigrasi antara perairan kutub dan khatulistiwa (Attard et al., 2012).

Walaupun penangkapan paus biru sudah dihentikan sejak tahun 1972, masih ada risiko bagi populasi paus biru. Tabrakan dengan kapal dapat terjadi di jalur pelayaran. Ancaman lain adalah paus biru dapat tersangkut di jaring ikan dan perubahan iklim. Selain itu ada ancaman dari kegiatan manusia, yaitu polusi suara dan polusi laut. Polusi suara berupa penggunaan peralatan yang menggunakan gelombang ultrasonik dapat mengganggu indera pendengaran paus biru. (Terhune & Killorn, 2021).

3. Keanekaragaman Genetik Paus Biru

Keanekaragaman genetik merupakan faktor penting dalam konservasi paus biru. Keanekaragaman yang tinggi memungkinkan suatu makhluk hidup untuk bertahan menghadapi perubahan lingkungan. Pentingnya keanekaragaman paus biru adalah adanya kemungkinan terjadinya

“*bottleneck*”, yaitu menurunnya keanekaragaman genetik suatu spesies karena terjadi penurunan populasi secara mendadak, sehingga populasi yang tersisa tidak memiliki keseluruhan variasi gen ada pada spesies itu. (Hartl, 2020; Pierce, 2020). Beberapa penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa paus biru memiliki keanekaragaman yang rendah (Attard et al., 2012; Barlow et al., 2018; Torres-Florez, 2014), walaupun Sremba et al. (2012) menunjukkan tingginya keragaman genetik yang tinggi. Umumnya penelitian tersebut dilakukan pada populasi di suatu daerah tertentu,

Penelitian yang dilakukan Sremba et al. (2012) bertujuan menganalisis keberagaman dan diferensiasi mtDNA paus biru di Antartika/Kutub Selatan. Hasil pengamatan pada haplotype mtDNA ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan antara populasi paus biru di Antartika dengan populasi paus biru di lautan Hindia dan lautan Pasifik Tenggara. Hasil analisis pada mtDNA menunjukkan bahwa terdapat 52 haplotipe yang unik dengan keragaman (diversitas) sebesar 0,968. Diversitas ini menunjukkan tingginya diversitas mtDNA. Akan tetapi 52 haplotipe tersebut menunjukkan frekuensi yang rendah. Tingkat diversitas haplotype menunjukkan bahwa keanekaragaman genetik paus biru di Antartika tetap tinggi. Sremba et al. (2012) membandingkan tingginya keanekaragaman haplotype ini dengan keanekaragaman haplotype pada paus bungkuk (*humpback whale*). Keanekaragaman ini tetap tinggi walaupun terjadi penurunan populasi dari sejak awal abad ke 20 sampai tahun 1972 ketika penangkapan mulai dilarang. Populasi paus biru di Antartika ini terhindar dari menurunnya keanekaragaman genetik karena peristiwa *bottleneck*. Menurut Sremba et al. (2012), adanya keanekaragaman genetik diperkirakan karena panjangnya usia paus biru, sehingga masih dapat terus berkembang biak dalam waktu yang lama. Individu yang hidup pada masa *bottleneck* diperkirakan masih hidup dan terus berkembang biak pada masa pengambilan sampel, yang dimulai pada tahun 1990.

Sremba et al. (2012) juga menyatakan bahwa walaupun diversitas haplotype cukup tinggi, yaitu 0,968, jumlah haplotype termasuk rendah. Rendahnya jumlah haplotype ini dilihat dari perbandingan adanya 542 haplotipe dibandingkan dengan adanya 68 haplotipe dari 98 sampel paus kepala busur/*bowhead whale (Balaena mysticetus)*, atau 83 haplotipe dari 119 sampel paus minke (*Balaenoptera bonaerensis*). Perbandingan jumlah haplotype dengan paus Minke dianggap Sremba et al. (2012) cukup penting

karena paus Minke merupakan jenis paus balin yang tidak mengalami penangkapan sebanyak yang dialami paus biru. Dengan demikian, tingkat keanekaragaman genetik populasi paus biru terancam, terlebih karena jumlah populasi yang berkembang biak relatif jauh berkurang dibanding ketika sebelum terjadi perburuan selama abad ke 20.

Satu populasi paus biru yang memiliki sifat genetik yang berbeda dari populasi paus biru lainnya juga ditemukan di Perairan Chile. Penelitian Torres-Florez et al. (2014) ini menunjukkan bahwa tingkat diversitas haplotype yang didasarkan pada mtDNA pada mitokondria maupun diversitas microsatellite pada DNA inti sel tetap tinggi. Penelitian itu juga menunjukkan rendahnya inbreeding pada populasi paus biru, biarpun jumlahnya relatif sudah sangat berkurang. Hasil ini penting karena pada umumnya, populasi yang mengalami pengurangan populasi secara drastis akan mengalami *bottleneck* dan rendahnya keanekaragaman genetik (Amato, DeSalle, Ryder, & Rosenbaum, 2009; DeWoody et al., 2010).

Torres-Florez et al. (2014) mengajukan beberapa dugaan atas tetap tingginya keanekaragaman genetik pada populasi paus biru di perairan Chile. Dugaan pertama adalah karena populasi itu sudah cukup lama berada dalam keadaan tanpa penangkapan, yaitu sudah lebih dari 40 tahun sejak terakhir kali terjadi penangkapan paus biru di daerah itu. Walaupun populasi belum sebanyak sebelumnya, penambahan populasi yang cukup memadai sudah terjadi untuk menimbulkan keanekaragaman genetik. Selain itu, diduga bahwa populasi paus biru di daerah itu adalah kumpulan dari beberapa populasi berbeda yang ikut bergabung di perairan Teluk Concavado. Individu dari berbagai populasi dapat mengalami perkawinan sehingga terjadi pertukaran materi genetik yang mencegah terjadinya inbreeding.

Satu penelitian untuk mengetahui struktur genetik paus biru dilakukan di Australia oleh Attard et al. (2012). Lokasi penelitian adalah dua kawasan perairan yang menjadi tempat berkumpulnya paus biru di Australia untuk mencari krill. Satu lokasi adalah Bonney Upwelling di selatan pesisir South Australia. Lokasi lain adalah Perth Canyon di sebelah barat pesisir Western Australia. Populasi paus biru berada di dua lokasi itu untuk memakan krill sebelum bermigrasi ke perairan Indonesia. Paus biru harus dapat beradaptasi dengan perbedaan suhu, letak geografis, dan perbedaan jenis krill antara kedua lokasi. Krill di Bonney Upwelling berada di kedalaman 100 m, sedangkan krill di Perth Canyon berada di kedalaman 300 – 600 m.

Menurut Attard et al. (2012), persamaan genetik antara kedua populasi itu disebabkan karena kedua populasi paus biru tersebut sama-sama bermigrasi hingga ke perairan Indonesia pada musim dingin. Kedua populasi tersebut dapat saling kawin sehingga terjadi pertukaran gen.

Sebagian populasi paus biru memiliki sifat menetap di suatu lokasi sehingga memiliki perbedaan genetik dengan populasi paus biru di tempat lain. Barlow et al. (2018) menunjukkan bahwa terdapat kawanan paus biru yang menetap di perairan New Zealand, khususnya di perairan South Taranaki Bight. Kelompok paus biru tersebut tidak melakukan migrasi. Populasi paus biru tersebut memiliki ciri genetika yang khusus yang membedakannya dengan populasi paus biru yang lain. Jumlah populasi paus biru tersebut adalah 718 ekor. Pengamatan tentang adanya kelompok yang menetap di perairan New Zealand itu dilakukan dengan pengamatan visual, pengamatan suara, serta analisis genetika.

Barlow et al. (2018) juga menunjukkan bahwa paus biru di New Zealand memiliki keanekaragaman genetik yang rendah. Hasil penelitian Barlow et al. (2018) ini juga berbeda dengan penelitian Jossey et al. (2021) yang menunjukkan bahwa paus biru memiliki keanekaragaman genetik yang tinggi. Barlow et al. (2018) menunjukkan bahwa ada kesamaan genetik antara paus biru di New Zealand dengan populasi di Australia, yaitu paus biru pigmi (*Balaenoptera musculus brevicauda*).

Analisis genetika dilakukan dengan mengamati haplotype DNA mitokondria. Haplotype adalah rangkaian DNA tertentu dalam kromosom yang cenderung untuk diwariskan bersama-sama. Adanya haplotype bisa menunjukkan adanya kedekatan hubungan kerabat antara individu (Hartl, 2020; Pierce, 2020). Hasil pengamatan haplotype itu juga dibandingkan dengan haplotype dengan haplotype dari populasi lain, yaitu dari populasi di Australia, populasi di Pasifik Tenggara, dan populasi di Lautan Selatan. Hasil analisis genetika menunjukkan bahwa paus biru di New Zealand menunjukkan perbedaan haplotype DNA mitokondria dengan paus biru di Lautan Selatan dan Pasifik Tenggara. Haplotype paus biru New Zealand menunjukkan persamaan dengan tipe haplotype paus biru di Australia. Hasil analisis genetika ini mendukung hasil pengamatan visual dan pengamatan suara yang menunjukkan bahwa paus biru di perairan South Taranaki Bight, New Zealand, adalah populasi yang unik. Populasi ini tetap tinggal di perairan itu dan tidak bermigrasi, serta bereproduksi hanya dengan sesamanya.

4. Hibridisasi Paus Biru dengan Paus Sirip

Hibridisasi pada paus biru terjadi di beberapa bagian dunia. Ada hibridisasi antar subspecies paus biru, yaitu antara paus biru (*Balaenoptera musculus intermedia*) dengan paus pigmy (*Balaenoptera musculus brevicauda*) seperti yang dilaporkan Attard et al. (2012) di perairan Australia. Selain itu, ada juga hibridisasi antara paus biru dengan paus sirip. Hibridisasi paus biru dengan paus sirip dilaporkan terjadi di Norwegia (Pampoulie et al., 2020) dan di perairan California, Amerika Serikat (Jefferson et al., 2021).

Hibridisasi paus biru dengan paus sirip diketahui berlangsung sejak lama, yaitu sejak abad ke-19. Pada saat itu dugaan adanya hibridisasi baru didasarkan pada pengamatan morfologi (Jefferson et al., 2021). Árnason et al. (2018) menunjukkan bahwa berbagai spesies paus balin masih dapat melakukan hibridisasi walaupun telah terjadi pemisahan spesies sejak 8 juta tahun lalu atau 400.000 generasi. Kemajuan teknologi biologi molekuler membantu konservasi dengan memberikan data yang lebih akurat. Dengan demikian, teknologi ini membantu memelihara ekosistem laut yang akan mempengaruhi kehidupan manusia. Ini merupakan contoh penerapan paradigma *Society 5.0*, yang menempatkan kesejahteraan manusia sebagai tujuan dari perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Berbeda dengan penelitian yang menemukan adanya hibrida paus biru/paus sirip di lautan Atlantik, Jefferson et al. (2021) menemukan hibrida itu (Gambar 3.) pada populasi paus biru di Pasifik, yaitu di perairan California. Jefferson et al. (2021) menyatakan bahwa hibrida paus biru/paus sirip sering berdekatan dengan kelompok paus biru. Diduga individu hibrida paus biru/paus sirip mengikuti pola migrasi paus biru. Walaupun penelitian Jefferson et al. (2021) menemukan adanya hibrida antara kedua spesies, penelitian tersebut tidak melakukan pengamatan tentang fertilitas pada hasil hibrida paus biru/paus sirip.



Sumber: Jefferson et al., 2021

Gambar 3. Individu Hibrida Paus Biru/Paus Sirip di Pesisir California, Amerika Serikat

Hibridisasi pada paus biru juga terjadi antara dua subspecies. Hibridisasi ini terjadi antara paus biru (*Balaenoptera musculus intermedia*) dan paus pygmy (*Balaenoptera musculus brevicauda*) di Selatan khatulistiwa. Penelitian itu menggunakan sampel sebanyak 155 ekor, yang terdiri atas 71 betina dan 84 jantan di Antartika dan 109 di Australia yang terdiri atas 59 betina, 49 jantan, dan 1 tidak diketahui. Dari sampel tersebut, diketahui adanya 6 sampel yang merupakan bukti pertama adanya hibrida antara paus biru Antartika dan paus biru pigmi (Attard et al., 2012).

5. Introgresi Paus Biru dengan Paus Sirip

Introgresi merupakan hasil dari hibridisasi (Freeland et al., 2011). Introgresi pada paus biru terjadi sejak lama (Árnason et al., 2018; Jossey, 2021). Penelitian menunjukkan terjadi intogresi antara paus biru dan paus sirip. Paus biru dapat melakukan hibridisasi dengan paus sirip dan menghasilkan keturunan yang fertil, yang juga dinyatakan oleh Spilliaert (1991).

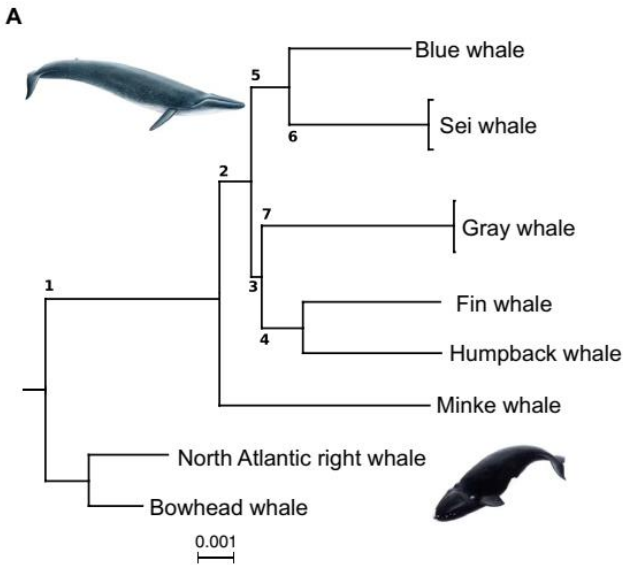
Adanya introgresi dilaporkan salah satunya oleh Árnason et al. (2018). Penelitiannya menggunakan data genom dari paus biru, paus sirip, paus sei, paus bungkuk/humpback whale (*Megaptera novaeangliae*), paus

kelabu/gray whale (*Eschrichtius robustus*), paus kepala busur (*Balaena mysticetus*), paus minke (*Balaenoptera acutorostrata*). Analisis dilakukan berdasarkan SINE, LINE, dan mtDNA.

Semua spesies paus balin dianggap sebagai spesies simpatrik, karena hidup di wilayah geografis yang sama dan umumnya memakan makanan yang hampir sama, yaitu krill dan ikan kecil. Seperti yang dijelaskan oleh Freeland et al. (2011), populasi paus balin dari seluruh spesies bersifat spesies simpatrik, yaitu spesies berbeda yang hidup di satu lingkungan yang sama dan tidak ada pembatas geografis. Penelitian ini juga menyatakan bahwa kerabat terdekat paus biru adalah paus sei (*Balaenoptera borealis*), bukan paus sirip yang diketahui dapat melakukan hibridisasi dengan paus biru.

Hibridisasi antara beberapa spesies paus balin diperkirakan merupakan bagian dari proses pembentukan spesies yang bersifat dinamis. Árnason et al. (2018) juga menemukan adanya introgresi antara paus biru dengan paus sirip dan paus lainnya. Spesies lain yang juga melakukan introgresi dengan paus biru adalah paus bungkuk, paus sei, dan paus kelabu. Árnason et al. (2018) juga menemukan bahwa paus biru memiliki heterozigositas genom tertinggi dibanding paus balin lainnya.

Árnason et al. (2018) menjelaskan adanya hibridisasi dan introgresi dalam famili paus balin berdasarkan proses pembentukan spesiesnya. Pembentukan spesies pada umumnya terjadi karena adanya pembatas biologi atau pembatas geografis yang membatasi reproduksi. Adanya pembatas tersebut jarang terjadi di lingkungan laut, tidak seperti di lingkungan darat. Walaupun terjadi proses pembentukan spesies, tetap ada kemampuan hibridisasi antar spesies paus balin.



Sumber: Árnason et al., 2018

Gambar 4. Pohon Filogenetik Keluarga Paus Balin

Berbeda dengan penelitian lainnya, Westbury et al. (2019) menunjukkan tidak adanya introgresi antara paus biru dan paus sirip. Beberapa penyebab terjadinya perbedaan ini adalah misalnya sampel yang digunakan. Sampel paus sirip yang digunakan berasal dari Pasifik Utara, tempat terjadinya beberapa peristiwa hibrid, tapi sampel untuk paus biru berasal dari lokasi yang tidak diketahui. Diduga bahwa sampel tersebut berasal dari lokasi yang tidak mengalami hibridisasi. Penyebab kedua menurut Westbury et al. (2019) adalah bahwa hibrid merupakan kejadian yang baru terjadi di masa kini, ketika populasi paus biru menurun akibat perburuan sehingga paus biru terpaksa kawin dengan paus dari spesies lain. Dalam hal ini, Westbury et al. (2019) membedakan peristiwa introgresi dengan hibridisasi yang terjadi di masa kini.

Penyebab ketiga menurut Westbury et al. (2019) adalah hibrid antara paus biru dan paus sirip mendapat seleksi negatif sehingga tidak dapat berkembang biak. Hal ini merugikan perkembangbiakan paus biru, karena anak yang dihasilkan dari hibrid itu tidak fertil. Mengingat lamanya masa

perkembangbiakan paus biru, adanya hibrid ini juga menghabiskan waktu perkembangbiakan induk paus biru. Mereka memperkirakan bahwa perbedaan hasil itu disebabkan karena penggunaan genom yang digunakan sebagai acuan. Penelitian tersebut menggunakan genom paus bungkuk.

Secara genetik, paus biru terdiri atas beberapa populasi yang berbeda, namun masih memungkinkan adanya pertukaran materi genetik. Hal ini menunjukkan bahwa isolasi reproduksi pada binatang ini tidak begitu ketat. Tulisan Attard et al. (2012) menunjukkan bahwa paus biru di Australia dan Indonesia adalah satu kesatuan populasi secara genetik. Tulisan Barlow et al. (2018) menunjukkan bahwa populasi paus biru di New Zealand juga merupakan satu populasi secara genetik. Namun tulisan Árnason et al. (2018) menunjukkan bahwa walaupun paus biru merupakan satu spesies tersendiri, telah terjadi introgresi gen antara beberapa spesies paus balin. Hal itu juga ditunjang oleh penemuan adanya hibrida yang fertil antara paus biru dengan paus sirip pada penelitian Spilliaert et al. (1991).

Jossey et al. (2021) meneliti pengaruh perburuan paus biru terhadap diversitas genetik paus biru di Atlantik Utara. Ada 25 sampel yang digunakan. Penelitian ini bermaksud membandingkan sampel jaman sekarang dan sampel dari DNA tulang paus biru yang berasal dari tahun 1970. Selain itu, penelitian ini juga membandingkan genom paus biru dengan paus bungkuk, paus sei, dan paus sirip. Penelitian ini menunjukkan bahwa paus biru di Atlantik Utara memiliki keanekaragaman genetik yang tinggi. Hal ini berarti bahwa paus biru di Atlantik Utara merupakan suatu populasi panmictic, yaitu populasi yang seluruh anggotanya dapat kawin satu sama lain.

Penelitian Jossey et al. (2021) menemukan adanya introgresi antara paus sirip dan paus biru pada sampel yang didapat pada masa sekarang. Diduga bahwa berkurangnya populasi paus biru membuat paus biru mencari pasangan berupa paus sirip. Menurut hasil penelitian Jossey et al. (2021), seluruh sampel paus biru dari Atlantik Utara menunjukkan adanya introgresi yang signifikan dengan paus sirip. Masuknya gen dari paus sirip adalah sebesar 3,5% dari gen paus biru. DNA dari tulang paus biru di tahun 1900-an juga menunjukkan adanya introgresi. Tidak terjadi introgresi antara paus biru dengan paus bungkuk.

Data menunjukkan bahwa genom paus biru di Atlantik Utara tidak terlalu jauh berbeda dengan genom paus biru di Atlantik Selatan dan Pasifik, walaupun paus biru tidak melewati khatulistiwa untuk bisa kawin silang.

Tingginya heterogenitas genetik paus biru ini juga sejalan dengan penelitian Torres-Florez et al. (2014) di Chile dan Atlantik (Árnason et al., 2018). Walaupun populasi paus biru sudah berkurang sebanyak 96% dari total populasi awal, keanekaragaman genetik tetap tinggi.

Introgresi dengan paus sirip sangat besar pengaruhnya pada paus biru, karena paus sirip memiliki populasi yang lebih besar, yaitu lebih dari 80.000 ekor. Introgresi dapat mengancam keberadaan paus biru sebagai suatu spesies (Pampoulie et al., 2020). Penelitian tersebut menekankan pada keberadaan hibrid antara paus biru dan paus sirip yang bersifat fertil. Menurut Pampoulie et al. (2020), hibrid antara paus biru dan paus sirip bersifat unidireksional, yaitu paus biru betina berpasangan dengan paus sirip jantan. Hal ini dibuktikan dari data bahwa tujuh dari delapan peristiwa hibrid tersebut melibatkan paus biru betina dengan paus sirip jantan. Peristiwa hibridisasi yang bersifat searah terjadi ketika betina dari spesies yang lebih langka kawin dengan jantan dari spesies yang lebih melimpah jumlahnya. Persilangan ini dapat merugikan keberadaan paus biru sebagai satu spesies karena anak yang dihasilkannya tidak dapat melanjutkan keturunannya lagi.

6. Dampak Hibridisasi dan Introgresi terhadap Konservasi Paus Biru

Adanya introgresi dan hibridisasi mengancam pemulihan populasi paus biru. Menurut Pampoulie et al. (2020) populasi paus biru adalah 25 kali lebih rendah dari populasi paus sirip. Karena itu, hibridisasi lebih mengancam keberadaan paus biru yang jumlahnya lebih sedikit. Kemampuan hibrida paus biru/paus sirip untuk melakukan perkembangbiakan dapat mempengaruhi keutuhan paus biru sebagai satu spesies. Pada umumnya, hibrida bersifat infertile yang merupakan salah satu bentuk isolasi reproduksi untuk menjaga keutuhan suatu spesies dengan terhalangnya perkawinan dengan individu dari spesies lain. Perkawinan dengan spesies lain akan menghasilkan keturunan yang lemah dan kemampuan berkembang biaknya yang juga rendah (Hartl, 2020; Pierce, 2020). Bagi paus biru yang jumlah populasinya tinggal 3 % dari populasi asal, jumlah anak yang hanya satu ekor setiap melahirkan, dan waktu generasi yang panjang, hibridisasi akan merusak daya hidup dan daya berkembang biak individu yang dilahirkannya (Pampoulie et al., 2020). Dengan demikian, adanya hibridisasi ini merupakan ancaman bagi keberadaan paus biru.

Adanya introgresi memerlukan pemantauan secara terus menerus. Pada saat ini memang keanekaragaman paus biru cukup tinggi dan tidak ada efek bottleneck. Namun sampai sekarang populasi paus biru belum kembali ke jumlah populasi awal. Rendahnya populasi paus biru yang diikuti hibridisasi dengan spesies lain akan mengganggu keberadaan paus biru sebagai satu spesies (Josey et al., 2021).

Adanya fertilitas individu hibrida dapat meningkatkan adanya introgresi antara paus biru dan paus sirip. Walaupun menurut Pampoulie et al. (2020) bahwa tingkat hibridisasi adalah 2%, dan terjadinya hibridisasi diamati sejak abad 19 (Jefferson et al., 2021; Pampoulie et al., 2020) peluang terjadinya dapat lebih besar lagi mengingat rendahnya populasi paus biru dibanding paus sirip pada saat ini. Kemungkinan meningkatnya frekuensi hibridisasi yang menghasilkan keturunan fertile ini semakin meningkatkan masuknya gen paus sirip ke populasi paus biru. Dapat diduga bahwa tingkat introgresi akan meningkat dari tingkat introgresi 3,5% selama ini (Jossey et al., 2021).

Perlu juga diadakan pengamatan atas kemungkinan adanya hibridisasi paus biru dengan paus sirip berikut kemungkinan fertilitas anaknya. Perlunya pengamatan ini karena penelitian mengenai adanya F1 yang fertile lebih banyak dilakukan pada populasi di Atlantik Utara (Jossey et al., 2021; Pampoulie et al., 2020, Spilliaert et al., 1991) dan di Pasifik (Jefferson et al., 2021). Perlu ada studi lanjutan dengan sampel yang lebih banyak pada paus biru di berbagai lokasi di seluruh dunia. Studi ini juga perlu mengamati adanya introgresi di masa lalu. Dengan demikian dapat diketahui tingkat heterozigositas dan dapat menjawab pertanyaan tentang aliran gen dari berbagai populasi di dunia untuk perencanaan konservasi (Jossey et al., 2021). Mengingat paus biru tidak bermigrasi melintasi khatulistiwa sehingga tidak terjadi percampuran gen antara populasi di utara khatulistiwa (baik di laut Pasifik maupun di laut Atlantik) dengan di selatan khatulistiwa, maka ada kemungkinan bahwa hibridisasi di selatan khatulistiwa memiliki ciri yang berbeda.

Perlu adanya pengamatan terhadap aspek ekologis hibrida paus biru/paus sirip. Adanya hibrida yang fertile dan adanya introgresi sejak waktu lama menunjukkan kemungkinan keunggulan adaptasi suatu hibrida (Hartl, 2020; Pierce, 2020). Pampoulie et al. (2020) menyatakan bahwa adanya sifat fertile pada hibrida paus biru/paus sirip sehingga dapat kawin dengan salah satu populasi leluhurnya adalah pada situasi lingkungan tertentu. Seperti diketahui, salah satu ancaman bagi paus biru adalah

perubahan lingkungan, seperti pemanasan global, polusi bahan kimia, dan polusi suara dari peralatan sonar. Belum diketahui apakah paus hibrida memiliki kelebihan daya adaptasi untuk menghadapi perubahan lingkungan seperti itu. Apabila paus hibrida memiliki daya adaptasi yang lebih tinggi terhadap perubahan lingkungan lautan pada masa kini, maka hibridisasi itu bersifat menguntungkan (Freeland et al., 2011). Apabila paus hibrida itu memiliki sifat yang merugikan, maka hal ini akan sejalan dengan Westbury et al. (2019) yang menyatakan tentang adanya seleksi negatif pada paus hibrida.

Perlu ada pengamatan mengenai kemungkinan hibrida paus biru/paus sirip memiliki keunggulan dibanding populasi asalnya. Selama ini belum ada penelitian mengenai daya adaptasi paus hibrida. Pengamatan oleh Jefferson et al. (2021) menunjukkan bahwa paus hibrida bermigrasi bersama paus biru. Hasil penelitian Jefferson et al. (2021) ini juga mendukung penelitian Spilliaert et al. (1991) yang menunjukkan bahwa individu hibrida yang fertil itu kawin dengan paus biru jantan. Apabila paus hibrida itu memiliki kelebihan dalam adaptasi dengan lingkungan dan kemampuan perkembangbiakan yang tinggi, diperkirakan paus hibrida itu dapat mengarah pada pembentukan spesies baru.

KESIMPULAN

Konservasi paus biru perlu dilakukan dengan memperhatikan konsep ekologi molekuler dan genetika konservasi. Contohnya adalah dengan mengamati tingkat hibridisasi antara paus biru dengan paus sirip. Penggunaan teknik genetika molekuler dapat membantu pengamatan atas tingkat hibridisasi dan introgresi yang terjadi di beberapa sub spesies populasi paus biru di berbagai tempat. Pemanfaatan teknologi biologi molekuler membantu konservasi paus biru, ini merupakan contoh paradigma *Society 5.0*.

Hibridisasi lebih mengancam keberadaan paus biru yang jumlahnya lebih sedikit. Kemampuan hibrida paus biru/paus sirip untuk melakukan perkembangbiakan dapat mempengaruhi keutuhan paus biru sebagai satu spesies. Adanya fertilitas individu hibrida dapat meningkatkan adanya introgresi antara paus biru dan paus sirip. Belum diketahui apakah paus hibrida memiliki kelebihan daya adaptasi untuk menghadapi perubahan lingkungan. Apabila paus hibrida itu memiliki sifat yang merugikan, maka hal

ini merupakan bentuk seleksi negatif pada paus hibrida. Apabila paus hibrida itu memiliki kelebihan dalam adaptasi dengan lingkungan dan kemampuan perkembangbiakan yang tinggi, diperkirakan paus hibrida itu dapat mengarah pada pembentukan spesies baru.

DAFTAR PUSTAKA

- Amato, G., DeSalle, R., Ryder, O. A., & Rosenbaum, H. C. (Eds.) (2009). Conservation genetics in the age of genomics. New York: Columbia University Press.
- Árnason, Ú., Lammers, F., Kumar, V., Nilsson, M. A., & Janke, A. (2018). Whole-genome sequencing of the blue whale and other rorquals finds signatures for introgressive gene flow. *Science Advances*, 4(4). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9873>
- Arisuryanti, T., Hasan, R. L., Ayu, K. L., Ratman, N., & Hakim, L. (2019). Genetic identification of freshwater fish species through DNA barcoding from Lake Lebo Taliwang, West Nusa Tenggara. *Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology*, 4(3), 107-112.
- Attard, C. R., Beheregaray, L. B., Jenner, K. C. S., Gill, P. C., Jenner, M. N., Morrice, M. G., Roberstson, K. M., & Möller, L. M. (2012). Hybridization of Southern Hemisphere blue whale subspecies and a sympatric area off Antarctica: impacts of whaling or climate change?. *Molecular Ecology*, 21(23), 5715-5727.
- Barlow, D.R., Torres, L.G., Hodge, K.B., Steel, D., Baker, C.S., Chandler, T.E., Bott, N., Constantine, R., Double, M.C., & Gill, P. (2018). Documentation of a New Zealand blue whale population based on multiple lines of evidence. *Endangered Species Research*, 36, 27–40.
- Branch, T. A., Matsuoka, K., & Miyashita, T. (2004). Evidence for increases in Antarctic blue whales based on Bayesian modelling. *Marine Mammal Science*, 20(4), 726-754.
- Branch, T. A., Stafford, K. M., Palacios, D. M., Allison, C., & Bannister, J. L. (2007). Past and present distribution, densities and movements of blue whales *Balaenoptera musculus* in the Southern Hemisphere and northern Indian Ocean. *Mammal Rev*, 37, 116–175.
- Branch, T. A. & Mikhalev, Y. A. (2008). Regional differences in length at sexual maturity for female blue whales based on recovered Soviet whaling data. *Marine Mammal Science*, 24(3), 690–703. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2008.00214.x>

- Cooke, J. G. (2018). *Balaenoptera musculus*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2018: e.T2477A156923585. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T2477A156923585.en>
- DeWoody, J. A., Bickham, J. W., Michler, C. H., Nichols, K. M., Rhodes, G. E., & Woeste, K. E. (Eds.) (2010). *Molecular approaches in natural resource conservation and management*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Double, M. C., Andrews-Goff, V., Jenner, K. C. S., Jenner, M. N., Laverick, S. M., Branch, T. A., & Gales, N. J. (2014). Migratory movements of pygmy blue whales (*Balaenoptera musculus brevicauda*) between Australia and Indonesia as revealed by satellite telemetry. *PLoS One*, 9(4), e93578.
- Frankham, R., Ballou, S. E. J. D., Briscoe, D. A., & Ballou, J. D. (2010). *Introduction to conservation genetics*. Cambridge: Cambridge university press.
- Freeland, J. R., Petersen, S. D., & Kirk, H. (2011). *Molecular ecology*, Wiley.
- Harrison, R. G. & Larson, E. L. (2014). Hybridization, introgression, and the nature of species boundaries. *Journal of Heredity*, 105(S1), 795-809.
- Hartl, D. L. (2020). *Essential genetics: A genomics perspective*. Burlington: Jones & Bartlett Publishers.
- Jefferson, T. A, Palacios, D. M., Calambokidis, J., Baker, C.S., Hayslip, C. E., Jones P. A., Lagerquist B. A., Jørgensen M., & Schulman-Janiger A. (2021). Sightings and satellite tracking of a blue/fin whale hybrid in its wintering and summering ranges in the Eastern North Pacific. *Advances in Oceanography & Marine Biology*. Iris Publisher. 10.33552/AOMB.2021.02.000545
- Jossey, S., Haddrath, O., Loureiro, L., Lim, B., Miller, J., Lok, S., Scherer, S., Goksoyr, A., Lille-Langoy, R., Kovacs, K., Lydersen, C., Routi, H., & Engstrom, M. (2021). Blue whale (*Balaenoptera musculus musculus*) genome: population structure and history in the North Atlantic. *Authorea Preprints*.

- Lammers, F., Blumer, M., Rücklé, C., & Nilsson, M. A. (2019). Retrophylogenomics in rorquals indicate large ancestral population sizes and a rapid radiation. *Mobile DNA*, 10(1), 1-10.
- McCauley, R. D., Gavrilov, A. N., Jolliffe, C. D., Ward, R., & Gill, P. C. (2018). Pygmy blue and Antarctic blue whale presence, distribution and population parameters in southern Australia based on passive acoustics. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 157, 154-168.
- Mizroch, S. A., Rice, D. W., Zwiefelhofer, D., Waite, J., & Perryman, W. L. (2009). Distribution and movements of fin whales in the North Pacific Ocean. *Mammal Review*, 39(3), 193-227.
- Nater A., Mattle-Greminger M.P., Nurcahyo A., Nowak M.G., de Manuel M., Desai T., Groves C., Pybus M., Sonay T.B., Roos C. (2017). Morphometric, behavioral, and genomic evidence for a new Orangutan species. *Curr. Biol.*, 27, 3487–3498.e3410.
- Newsome, T. M., Fleming, P. J., Dickman, C. R., Doherty, T. S., Ripple, W. J., Ritchie, E. G., & Wirsing, A. J. (2017). Making a new dog?. *BioScience*, 67(4), 374-381.
- Pampoulie, C., Gíslason, D., Ólafsdóttir, G., Chosson, V., Halldórsson, S. D., Mariani, S., Elvarsson, B., Rasmussen M. hH. , Iversdon. M. R., Daníelsdóttir, A. K. & Víkingsson, G. A. (2020). Evidence of unidirectional hybridization and second-generation adult hybrid between the two largest animals on Earth, the fin and blue whales. *Evolutionary applications*, 14(2), 314-321.
- Pierce, B. A. (2020) Genetics: a conceptual approach. 7th Ed. New York: MacMillan.
- Pongracz J. D., Paetkau, D., Branigan, M., & Richardson, E. (2017). Recent hybridization between a polar bear and grizzly bears in the Canadian Arctic. *Arctic*, 151-160.
- Smith, C. R. & Baco, A. R. (2003). Ecology of whale falls at the deep-sea floor. *Oceanography and Marine Biology, An Annual Review*, 41, 319-333.

- Spilliaert, R., Vikingsson, G., Arnason, U., Palsdottir, A., Sigurjonsson, J., & Arnason, A., (1991). Species hybridization between a female blue whale (*Balaenoptera musculus*) and a male fin whale (*B. physalus*): Molecular and morphological documentation. *J. Hered.*, 82, 269–274.
- Sremba A. L., Hancock-Hanser, B., Branch, T.A., LeDuc, R.L., & Baker, C.S. (2012). Circumpolar diversity and geographic differentiation of mtDNA in the critically endangered Antarctic blue whale (*Balaenoptera musculus intermedia*). *PLoS ONE* 7(3): e32579. doi:10.1371/journal.pone.0032579
- Terhune, J. M. & Killorn, D. (2021). A method for preliminary assessment of the masking potential of anthropogenic noise to baleen whale calls. *Aquatic Mammals*, 47(3), 283-291.
- Torres-Florez, J. P., Hucke-Gaete, R., Rosenbaum, H., & Figueroa, C. C. (2014). High genetic diversity in a small population: the case of Chilean blue whales. *Ecology and Evolution*, 4(8), 1398-1412.
- Treude, T., Smith, C. R., Wenzhöfer, F., Carney, E., Bernardino, A. F., Hannides, A. K., Kruger, M., & Boetius, A. (2009). Biogeochemistry of a deep-sea whale fall: sulfate reduction, sulfide efflux and methanogenesis. *Marine Ecology Progress Series*, 382, 1-21.
- Vernazzani, B., G., Jackson, J. A., Cabrera, E., Carlson, C. A., & Brownell Jr, R. L. (2017). Estimates of abundance and trend of Chilean Blue Whales off Isla de Chiloé, Chile. *PLoS one*, 12(1).
- vonHoldt, B.M., Kays, R., Pollinger, J.P., Wayne, R.K. (2016). Admixture mapping identifies introgressed genomic regions in North American canids. *Mol Ecol.*, 25, 2443–2453.
- Westbury, M. V., Petersen, B., & Lorenzen, E. D. (2019). Genomic analyses reveal an absence of contemporary introgressive admixture between fin whales and blue whales, despite known hybrids. *PLoS ONE*, 14(9), 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222004>

Zamudio K. R. & Harrison, R. G. (2010). Molecular Approaches in natural resource conservation and management. Dalam: DeWoody, J. A., Bickham, J. W., Michler, C. H., Nichols, K. M., Rhodes, G. E., & Woeste, K. E. (Eds.). (2010). *Molecular approaches in natural resource conservation and management*. Cambridge: Cambridge University Press.

TANTANGAN DAN IMPLEMENTASI INOVASI NILAI DALAM PENGEMBANGAN AGRIBISNIS UNTUK MASYARAKAT 5.0

CHALLENGES AND VALUE INNOVATION IMPLEMENTATION IN AGRICULTURAL DEVELOPMENT FOR SOCIETY 5.0

Venty Fitriany Nurunisa
Program Studi Agribisnis, Jurusan Pertanian,
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
venty@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

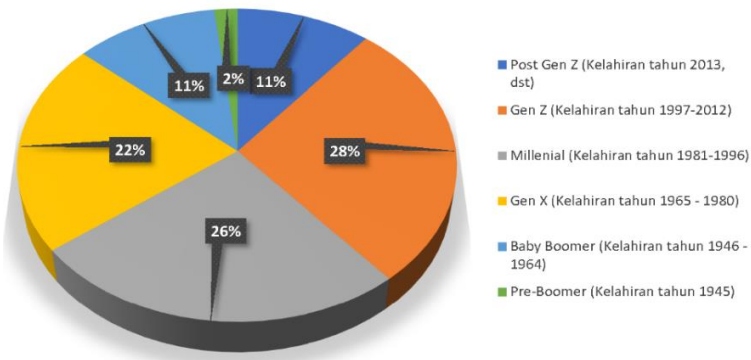
Pertanian merupakan salah satu sektor pembangunan di Indonesia yang menyerap tenaga kerja terbesar. Meskipun demikian, angkatan kerja di sektor pertanian masih didominasi oleh petani dengan usia tua dan minim keterpaparan inovasi teknologi. Di sisi lain, 73,7 persen dari penduduk Indonesia sudah terpapar internet. Indonesia saat ini sedang mengalami bonus demografi yang akan didominasi oleh generasi muda yang dinamis, kreatif dan lekat dengan teknologi informasi. Tulisan ini bertujuan mengkaji tantangan yang dihadapi oleh sektor pertanian Indonesia di era masyarakat 5.0, dan implementasi inovasi nilai pada sistem usaha agribisnis dengan pendekatan “strategi samudera biru”. Kajian literatur digunakan untuk menganalisa tantangan yang dihadapi sektor pertanian Indonesia serta implementasi inovasi nilai tersebut. Sektor pertanian Indonesia menghadapi berbagai tantangan dalam menyongsong era masyarakat 5.0 selain isu pembiayaan, harga dan pasar, sumberdaya pertanian, juga tantangan adaptasi sektor pertanian terhadap inovasi teknologi. Beberapa startup pertanian berbasis teknologi telah mulai mengembangkan bisnis model inovatif era digital ini, untuk dimanfaatkan para pelaku agribisnis. Namun, pelaku usaha agribisnis masih terperangkap dalam situasi yang disebut dengan “samudera merah”, yang mengindikasikan rendahnya implementasi inovasi di tingkat petani atau pelaku usaha agribisnis dan tingginya persaingan usaha pada industri produk terkait. Merujuk pada konsep masyarakat 5.0, pendekatan sistemik/holistik dalam persiapan sektor pertanian berdaya saing dan adaptif menjadi sangat penting untuk

diterapkan. Dengan adanya kolaborasi dan integrasi antar subsistem agribisnis, maka petani maupun pelaku usaha kecil menengah akan mampu berkontribusi mewujudkan pertanian berdaya saing. Dengan demikian, perlu upaya mengoptimalkan bonus demografi yang dialami Indonesia, sebagai peluang untuk mendukung akselerasi pembangunan pertanian.

Kata Kunci: inovasi nilai, agribisnis, masyarakat 5.0.

PENDAHULUAN

Internet telah menjadi bagian dari kehidupan sehari-hari masyarakat Indonesia, hal ini dibuktikan dengan jumlah pengguna internet Indonesia yang tumbuh signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Pengguna internet di Indonesia mencapai 196 juta jiwa (APJII, 2021) atau meningkat sebesar 37 persen dalam lima tahun (Zaky et al., 2018). Angka ini menunjukkan lebih dari separuh penduduk di Indonesia atau sekitar 73,7 persen (APJII, 2021). Penetrasi internet di Indonesia juga tidak terlepas dari bonus demografi yang sedang dialami Indonesia, pada tahun 2020, sebesar 70,72 persen penduduk Indonesia merupakan penduduk usia produktif (15–64 tahun) (BPS, 2021). Berdasarkan kondisi komposisi penduduk produktif serta tingginya aksesibilitas internet di Indonesia, hal tersebut semakin mendorong implementasi digitalisasi berbagai sektor di Indonesia, termasuk sektor pertanian.



Sumber: BPS, 2021

Gambar 1. Komposisi Penduduk Indonesia Berdasarkan Hasil Sensus Penduduk Tahun 2020

Gambar 1 menunjukkan komposisi penduduk Indonesia tahun 2020. Saat ini Indonesia sedang memasuki fase bonus demografi dengan angkatan kerja produktif yang mendominasi komposisi penduduk. Sebagian besar dari angkatan kerja produktif tersebut, yakni penduduk generasi X, milenial, dan generasi Z merupakan kelompok muda produktif dan sangat dekat dengan teknologi, termasuk teknologi berbasis internet. Hal tersebut merupakan suatu modal sosial yang dapat mendatangkan manfaat besar bagi negara jika dapat dikelola dengan tepat. Namun demikian, di sisi lain masih terdapat sekitar 70 juta masyarakat yang belum tersentuh oleh internet (APJII, 2021). Petani yang merupakan angkatan kerja pada sektor pertanian umumnya termasuk ke dalam kategori sumber daya manusia yang belum banyak terpapar oleh teknologi digital.

Salah satu permasalahan yang dihadapi oleh sektor pertanian Indonesia saat ini adalah rendahnya tingkat regenerasi petani. Penyebabnya adalah ada pandangan bahwa sektor pertanian tidak terlalu menarik untuk digeluti dan tidak terlalu menguntungkan untuk dijalankan (Rachmawati & Gunawan, 2020). Rendahnya tingkat regenerasi petani kepada petani muda tentu akan berdampak pada keberlanjutan pembangunan pertanian di Indonesia, khususnya terhadap produktivitas sektor pertanian, daya saing produk pertanian, hingga akhirnya berdampak terhadap ketahanan pangan (Rachmawati & Gunawan, 2020). Lebih lanjut, rendahnya regenerasi akan menimbulkan tantangan baru bagi sektor pertanian dalam menghadapi era digitalisasi. Berdasarkan kondisi tersebut, dibutuhkan dorongan dari pihak pemerintah, swasta dan masyarakat; agar anak muda mau berkarya di sektor pertanian; generasi anak muda yang melek teknologi. Potensi besar dari sumber daya manusia muda yang cakap teknologi dapat memberikan dampak terhadap kemajuan dan keberlanjutan pembangunan pertanian melalui inovasi teknologi.

Banyak dari petani Indonesia yang saat ini belum terpapar oleh inovasi teknologi. Hal tersebut memicu lambatnya pembangunan pertanian dan lahirnya inovasi dari sektor ini. Sementara di sisi lain, produk pertanian impor semakin inovatif dan tidak kalah bersaing di pasar domestik. Tanpa inovasi, persaingan antara produk pertanian lokal dengan produk impor menjadi situasi yang kurang menguntungkan. Industri dengan tingkat persaingan tinggi dan kondisi atribut produk yang cenderung serupa disebut dengan istilah samudera merah (*red ocean*). Pada kondisi ini secara alami pelaku usaha akan berkompetisi dan saling menunggu untuk

memenangkan persaingan. Umumnya, dalam kondisi banyak pesaing atau dikenal dengan *red ocean*, pelaku usaha atau perusahaan mengalahkan lawan untuk mendapatkan permintaan yang lebih besar dengan saling bersaing. Untuk suatu industri dalam ruang pasar yang ramai, maka prospek keuntungan dan pertumbuhan industri akan menurun (Kim & Mabourgne, 2015). Hal tersebut menyebabkan lambat laun bisnis akan menjadi kurang menarik lagi.

Paradigma agribisnis sangat penting sebagai landasan dalam mewujudkan kinerja sektor pertanian yang lebih efektif. Implementasi inovasi dalam kerangka berpikir sistem agribisnis memiliki makna yaitu inovasi menyeluruh pada subsistem-subsistem kritis dalam sistem agribisnis. Davis & Goldberg (1957) dalam awal pengembangan konsep agribisnis menyebutkan bahwa aktivitas agribisnis meliputi keseluruhan operasi yang terlibat dalam produksi dan distribusi input pertanian, budidaya pertanian, pemrosesan hingga pemasaran produk pertanian itu sendiri. Agribisnis merupakan suatu sistem, karenanya setiap subsistem di dalamnya memiliki peran yang sama untuk saling menguatkan, tanpa ada salah satu yang mendominasi. Konsep agribisnis sebagai sistem sangat berbeda dengan konsep pertanian tradisional.

Agribisnis adalah suatu aktivitas usahatani atau produksi produk pertanian besar yang didukung dengan usaha pengolahan, pemasaran serta penunjang skala besar (Setiawan, 2012). Ditengah fakta bahwa Indonesia unggul secara komparatif pada beberapa komoditas unggulan pertanian, adalah fakta bahwa kemajuan agribisnis di Indonesia tidak secepat negara lain. Integrasi antar subsistem agribisnis belum banyak ditemukan, skala usaha khususnya di sektor *on farm* masih didominasi oleh petani skala kecil, produk pertanian yang dihasilkan masih didominasi oleh produk mentah dengan sedikit nilai tambah. Begitu juga subsistem pemasaran dan penunjang seolah-olah masih berjalan secara parsial. Kondisi demikian merupakan refleksi belum terwujudnya integrasi pada sistem agribisnis di Indonesia. Tanpa adanya gebrakan inovasi yang berbasis sistem, maka pembangunan pertanian Indonesia akan mengalami proses jalan di tempat. Ditambah lagi dengan semakin cepatnya perubahan teknologi saat ini, maka inovasi-inovasi yang berbasis sistemik/holistik menjadi sangat penting untuk dikaji.

Tulisan ini berisi kajian berbagai tantangan yang dihadapi sektor pertanian Indonesia, khususnya dalam menghadapi masyarakat 5.0. Lebih lanjut, kajian hasil riset terdahulu terkait dengan implementasi inovasi nilai dalam sistem usaha agribisnis juga akan disajikan. Kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pemikiran bagi perkembangan agribisnis di Indonesia yang inovatif dan modern.

PEMBAHASAN

1. Konsep Inovasi Nilai

Inovasi merupakan proses lanjut dari sebuah penemuan yang menghasilkan penciptaan nilai melalui pelibatan teknologi (Nasution & Kartajaya, 2018). Inovasi juga berkaitan dengan upaya pemenuhan kebutuhan dan keinginan konsumen, yang membuat inovasi terus berkembang seiring dengan adanya ketidakpuasan atas pendekatan lama, yang kemudian dikemas dan disampaikan melalui teknologi yang lebih baik (Nasution & Kartajaya, 2018). Salah satu bentuk inovasi adalah inovasi nilai. Kim dan Mabourgne (2005) menyampaikan bahwa inovasi nilai perusahaan atau pelaku usaha dapat berupa penciptaan ruang pasar yang belum dimanfaatkan, yang akan menciptakan permintaan, serta peluang pertumbuhan yang menguntungkan. Pengembangan strategi usaha dengan berfokus pada pengembangan inovasi nilai disebut dengan istilah strategi samudra biru (*blue ocean strategy*). Strategi samudera biru tidak berfokus pada memenangkan persaingan, tetapi lebih pada penggunaan logika strategis (inovasi nilai). Perbedaan antara strategi samudera biru dengan pendekatan lain adalah bahwa perusahaan tidak hanya dapat meningkatkan pasar yang ada tetapi juga mencoba menciptakan pasar dari kelompok non-konsumen di industri sehingga perusahaan dapat menciptakan permintaan baru.

Saat ini sebagian besar industri yang bergerak di sektor pertanian masih menerapkan persaingan antar pelaku usaha, sehingga masing-masing pelaku usaha berlomba-lomba untuk memenangkan persaingan. Petani Indonesia juga dihadapkan pada kondisi persaingan baik dengan sesama petani, maupun dengan perusahaan di dalam dan luar negeri (khusus produk impor). Persaingan yang terjadi biasanya dalam bentuk persaingan harga diantara para pelaku usaha. Kondisi dimana persaingan antar pelaku usaha terjadi dengan sangat ketat, dan satu sama lain saling berkompetisi

untuk memenangkan persaingan disebut dengan istilah *red ocean* atau samudera merah (Kim & Mabourgne, 2015). Pada kondisi ini secara alami pelaku usaha akan berkompetisi dan saling mengungguli untuk memenangkan persaingan. Umumnya dalam kondisi *red ocean*, pelaku usaha atau perusahaan mengalahkan lawan untuk mendapatkan permintaan yang lebih besar dengan saling bersaing. Dalam kondisi *red ocean*, suatu industri dalam suatu ruang pasar yang ramai, maka prospek keuntungan dan pertumbuhan akan menurun. Hal tersebut menyebabkan lambat laun bisnis akan menjadi kurang menarik lagi. Tabel 1 menunjukkan perbedaan antara konsep *red ocean* dengan *blue ocean*.

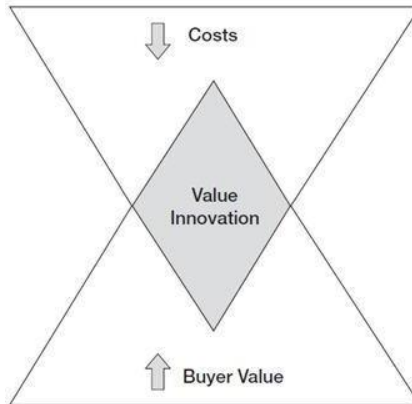
Tabel 1. Perbedaan *Red Ocean Strategy* dan *Blue Ocean Strategy*

Red Ocean Strategy	Blue Ocean Strategy
Bersaing dalam ruang pasar yang sudah ada	Menciptakan ruang pasar yang belum ada pesaingnya
Memenangi persaingan	Menjadikan persaingan menjadi tidak relevan
Mengeksploitasi permintaan yang ada	Menciptakan dan menangkap permintaan baru
Melakukan tarik ulur nilai-biaya	Mendobrak tarik ulur nilai-biaya
Memadukan keseluruhan sistem kegiatan perusahaan dengan pilihan strategis antara diferensiasi atau biaya rendah	Memadukan keseluruhan sistem kegiatan perusahaan dalam mengejar diferensiasi dan biaya rendah

Sumber: Kim & Mabourgne, 2015

Kim dan Mabourgne (2015) menyatakan bahwa inovasi nilai merupakan salah satu cara dalam menciptakan *blue ocean strategy*. Inovasi nilai yang dimaksudkan disini adalah menekankan terhadap adanya kesetaraan nilai dan inovasi. Dalam hal ini inovasi nilai didefinisikan sebagai suatu cara baru untuk memikirkan serta melaksanakan strategi ke arah penciptaan *blue ocean strategy* dan meninggalkan arena kompetisi. Pada umumnya perusahaan dihadapkan pada dua pilihan strategi dalam

menjalankan bisnisnya, yaitu dengan menciptakan produk bernilai tinggi dengan besaran biaya tertentu (diferensiasi) atau menciptakan nilai produk tertentu dengan biaya rendah (kepemimpinan biaya). Berbeda dengan konsep inovasi nilai, perusahaan tidak memilih salah satu strategi diantara diferensiasi maupun kepemimpinan biaya, melainkan menjalankan keduanya secara bersamaan. Penerapan inovasi nilai pada perusahaan akan memberikan keuntungan dari struktur biaya dan nilai yang ditawarkan kepada konsumen. Nilai yang diterima oleh konsumen akan bertambah dengan menciptakan atau menambahkan elemen- elemen yang belum ditawarkan oleh perusahaan sebelumnya. Inovasi nilai tercipta ketika perusahaan menerapkan strategi yang mempengaruhi struktur biaya dan penawaran nilai bagi pembeli. Penghematan biaya dilakukan dengan cara menghilangkan dan mengurangi faktor-faktor yang dijadikan titik persaingan dalam suatu industri. Sedangkan nilai pembeli dapat ditingkatkan dengan menambah atau bahkan menciptakan elemen-elemen yang belum pernah ditawarkan oleh industri.



Sumber: Kim & Mabourgne, 2015

Gambar 2. Inovasi Nilai

Inovasi dapat berupa tiga hal yang berbeda, yaitu inovasi berupa hasil, proses, dan pola pikir (Kahn, 2018). Inovasi sebagai hasil menekankan pada luaran apa yang dicari, termasuk inovasi produk, inovasi proses, inovasi pemasaran, inovasi model bisnis, inovasi rantai pasok, dan inovasi

organisasi. Inovasi sebagai proses memperhatikan cara di mana inovasi harus diatur sehingga dapat membuahkan hasil; ini mencakup proses inovasi secara keseluruhan dan proses pengembangan produk baru. Inovasi sebagai pola pikir membahas internalisasi inovasi oleh individu anggota organisasi di mana inovasi ditanamkan dan mendarah daging bersama dengan penciptaan budaya organisasi yang mendukung yang memungkinkan inovasi berkembang. Kline (2009) menyatakan bahwa inovasi itu kompleks, tidak pasti, agak tidak teratur, dan dapat berubah dalam berbagai jenis.

Secara ringkas, konsep inovasi nilai adalah penggabungan upaya untuk melakukan efisiensi biaya yang dikeluarkan perusahaan dan peningkatan nilai yang diterima konsumen. Penerapan kedua hal ini secara bersamaan menjadi salah satu cara menciptakan strategi samudera biru. Strategi samudera biru adalah suatu bentuk pendekatan dalam perumusan strategi bagi perusahaan atau institusi yang fokus pada penciptaan inovasi nilai. Sehingga tujuan dari dilakukannya strategi samudera biru adalah menciptakan ruang pasar yang belum dimanfaatkan, menciptakan permintaan, serta peluang pertumbuhan yang menguntungkan. Hal tersebut berbeda dengan strategi samudera merah yang merupakan strategi bersaing; sehingga tujuan dari penciptaan strateginya adalah untuk memenangkan persaingan pada pasar yang sudah ada, dan mengeksploitasi permintaan yang sudah ada.

2. Sektor Pertanian: Tantangan Menuju Masyarakat 5.0

Sektor pertanian merupakan sektor yang potensial dan telah terbukti sebagai salah satu sektor yang mampu bertahan dan berkembang selama beberapa kali masa krisis di Indonesia. Selain terhadap GDP, sektor pertanian juga berkontribusi nyata dalam penyerapan tenaga kerja dalam jumlah besar. Potensi sumber daya alam, pengembangan komoditas, lokasi Indonesia yang strategis dan potensi pasar baik pasar lokal maupun internasional menjadi peluang bagi pengembangan usaha pertanian di Indonesia (Ardiansyah,, Utami, & Nugroho, 2020). Namun demikian, peluang tersebut juga tidak terlepas dari tantangan yang di hadapi sektor pertanian, khususnya saat ini yang harus menghadapi era digitalisasi dan mewujudkan masyarakat 5.0. Beberapa isu yang masih menjadi tantangan bagi pengembangan sektor pertanian di Indonesia diantaranya aspek sumber daya manusia, pembiayaan kegiatan pertanian, harga dan pasar

produk pertanian, sumber daya manusia pertanian serta adaptasi teknologi di tingkat petani. Lebih lanjut, keseluruhan aspek tersebut sering kali ditemukan saling berkaitan satu sama lain sehingga menyebabkan sektor pertanian seperti berada pada suatu lingkaran permasalahan yang tak berkesudahan. Kompleksitas tantangan terhadap sektor pertanian tersebut tidak dapat diselesaikan secara parsial, melainkan penting untuk dilihat dengan sudut pandang sistemik/holistik.

Pada aspek permodalan, permasalahan yang sering kali ditemukan adalah rendahnya modal kapital yang dimiliki petani. Meskipun terdapat alternatif-alternatif sumber pembiayaan eksternal, namun demikian tidak serta merta mempermudah akses permodalan bagi petani. Ketidakmampuan petani dalam memenuhi persyaratan kredit yang diminta oleh Bank maupun Lembaga keuangan membuat *stakeholder* luar juga kesulitan melakukan investasi di sektor riil (sektor pertanian). Hal ini disebabkan usaha tani yang dilakukan sering kali *feasible* namun tidak *bankable*; meskipun usaha tani tersebut berjalan menguntungkan, petani tidak melakukan pencatatan dan analisa keuangan serta aset pertaniannya. Sumber permodalan lain seperti kerabat, keluarga maupun tengkulak, menawarkan sistem yang lebih sederhana; namun demikian, sumber permodalan ini memiliki tantangan berupa ketidakjelasan perjanjian peminjaman, tingkat bunga, cara pembayaran dan sebagainya.

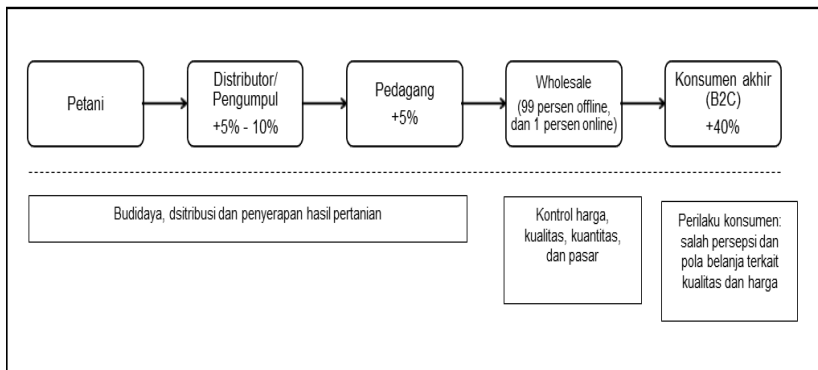
Tabel 2 menggambarkan perbedaan sumber pembiayaan eksternal yang tersedia di sektor pertanian. Sumber pembiayaan eksternal untuk kegiatan usaha tani dapat diperoleh setidaknya dari tiga sumber, yakni perbankan atau lembaga keuangan mikro, keluarga atau kerabat (informal) dan skema *crowdfunding*. Setiap sumber pembiayaan memiliki berbagai karakteristik, dari sisi persyaratan yang harus dipenuhi, besaran modal yang diberikan, bunga, waktu pencarian serta jaminan. Saat ini beberpa *startup* agribisnis telah mulai menawarkan skema pembiayaan untuk petani melalui skema *peer to peer* atau *crowdfunding*.

Tabel 2. Sumber Pembiayaan Sektor Pertanian

No	Jenis Lembaga Keuangan	Persyaratan	Besaran Modal	Bunga	Waktu Pencairan	Jaminan
1	Bank/Lembaga Keuangan Mikro	Berkas-berkas administrasi dan kelayakan usaha	Ditentukan lembaga keuangan sesuai plafon	Ada, mengikuti bunga berlaku	1 sd 6 bulan setelah berkas lengkap	Aset petani
2	Informal (Keluarga, kerabat)	Ditentukan secara kekeluargaan	Berdasarkan keputusan bersama kedua belah pihak	Sesuai kesepakatan kedua belah pihak	Langsung cair begitu ada kesepakatan	Sesuai kesepakatan kedua belah pihak
3	<i>Peer to Peer/ Crowdfunding</i>	Berkas-berkas administrasi dan kelayakan usaha	Ditentukan lembaga keuangan sesuai hasil analisis kelayakan usaha	Ada, umumnya lebih rendah dari bunga lembaga keuangan	Setelah dana terkumpul	Dikelola lembaga keuangan

Tantangan lain yang ditemukan di sektor pertanian adalah terkait dengan permasalahan rantai pasok produk pertanian atau tataniaga (Gambar 3). Tataniaga produk pertanian di Indonesia memiliki karakteristik dan tantangan tersendiri. *Pertama*, terkait dengan kondisi geografis Indonesia yang luas dan merupakan negara kepulauan. Sentra-sentra produksi sebagian besar produk pertanian berada tersebar dan berjauhan dari sentra konsumsi produk pertanian di kota besar. Hal tersebut berdampak pada pengelolaan tataniaga produk pertanian, sehingga membutuhkan dukungan sarana dan prasarana yang baik. Dengan demikian, konsumen di berbagai area di Indonesia dapat menikmati berbagai jenis produk pertanian dalam jumlah, kualitas, dan waktu yang berkualitas baik. *Kedua*, minimnya informasi pasar dan harga yang dimiliki oleh petani, membuat petani Indonesia tidak memiliki banyak pilihan untuk memasarkan produknya. Kondisi tersebut menyebabkan petani memiliki daya tawar rendah, misalnya petani tidak memiliki posisi tawar cukup tinggi untuk menentukan harga. Petani sering kali mendapatkan harga rendah untuk hasil pertanian yang diproduksinya. *Ketiga*, tantangan lain dari

tataniaga produk pertanian adalah persaingan dengan produk-produk impor. Sejak dibukanya keran perdagangan bebas antara Indonesia dan negara-negara tetangga, maka produk pertanian Indonesia “siap tidak siap” harus mampu bersaing dengan produk impor. Produk impor yang masuk ke Indonesia pun beragam dengan kualitas dan harga yang cukup kompetitif. Tanpa adanya dukungan kepada petani lokal untuk bisa meningkatkan mutu produk pertanian yang dihasilkan, maka lambat laun produk-produk impor akan bisa mengalahkan produk dari petani lokal. Tanpa adanya intervensi dan inisiatif dari pihak pemerintah dan swasta maka akan sulit bagi petani kecil bersaing dengan produk-produk pertanian impor.



Sumber: Purnamasari, 2019

Gambar 3. Alur Rantai Pasok Produk Pertanian secara Umum

Tantangan lain yang dihadapi oleh sektor pertanian di Indonesia adalah sumber daya manusia pertanian, atau dalam hal ini adalah petani. Sektor pertanian merupakan sektor penyerap tenaga kerja terbesar ketiga di Indonesia setelah sektor industri dan perdagangan. Namun demikian, sebagian besar dari sumber daya pertanian Indonesia merupakan petani dengan tingkat pendidikan rendah dan usia yang tidak lagi muda. Di sisi lain perkembangan teknologi yang begitu cepat serta perubahan perilaku konsumen dari waktu ke waktu menyebabkan kebutuhan akan teknologi dan pengetahuan baru menjadi sangat esensial bagi sektor pertanian. Hal ini guna meningkatkan kualitas dan produktivitas di sektor pertanian. Petani perlu memahami kondisi alam, tanah, cuaca dan iklim, karakteristik varietas

tanaman/hewan atau komoditas yang dibudidayakan, siklus hidup komoditas yang dikelolanya, hingga harus memahami manajemen usaha tani dan pemasaran. Karenanya peranan penyuluh maupun entitas lain sangat penting untuk dapat memberikan edukasi dan pendampingan bagi petani dalam kegiatan usaha taninya. Hal ini menjadi semakin penting seiring dengan tingginya persaingan dengan produk pertanian impor, yang tidak jarang produk pertanian impor memiliki kualitas dan harga yang lebih bersaing di pasaran.

Isu adaptasi teknologi merupakan isu krusial lain yang perlu menjadi perhatian, terlebih pada era saat ini. Peranan teknologi di tingkat budidaya menjadi semakin penting seiring dengan semakin banyaknya tantangan di subsistem tersebut. Beberapa diantaranya adalah tingginya konversi lahan pertanian, penurunan kualitas lahan pertanian, keterbatasan air dan unsur hara yang dibutuhkan di sektor pertanian, serta kondisi iklim dan cuaca yang semakin tidak menentu akibat dari perubahan iklim global. Kegiatan produksi di level *onfarm* atau budidaya di sektor pertanian merupakan aktivitas yang paling sering terindikasi adanya risiko. Risiko produksi seperti serangan hama dan penyakit, kondisi cuaca dan iklim ekstrem, banjir, dan lainnya merupakan beberapa sumber risiko yang paling sering ditemukan di lapangan dan menyebabkan kerugian bagi petani. Pengembangan dan estafet teknologi kepada para pelaku sumberdaya pertanian di lapangan sangat dibutuhkan. Dengan demikian, diharapkan dapat membantu petani dalam meminimalisir kemungkinan kerugian yang diakibatkan oleh adanya risiko produksi tersebut.

Penyampaian teknologi kepada petani untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi risiko produksi juga menghadapi beberapa tantangan. Kondisi tingkat pengetahuan dan penerimaan petani terhadap informasi baru sangat beragam, situasi di lokasi pertanian yang secara umum berada di pedesaan, belum memiliki sarana dan prasarana lengkap, termasuk diantaranya adalah tantangan ketersediaan jaringan internet yang memadai. Hal tersebut memerlukan perhatian khusus, agar akselerasi pembangunan pertanian di pedesaan dapat terealisasi.

Sejumlah isu di atas telah menjadi fokus di banyak agenda dan kebijakan pemerintah. Selama 10 tahun terakhir, perusahaan-perusahaan *startup* berbasis pertanian juga mulai bermunculan mengembangkan model bisnis dengan tujuan menyelesaikan beberapa isu di atas. Putera & Tang (2020) dalam *Indonesia Agritech Report 2020* melakukan riset mengenai

perkembangan *startup* pertanian di Indonesia. Berdasarkan fokus bisnis dan masalah yang coba dipecahkan, *startup* pertanian di Indonesia dibedakan menjadi empat kategori, yaitu kategori pembiayaan, *e-commerce*, edukasi dan pendampingan serta pengembangan teknologi pertanian. Namun demikian, beberapa *startup* juga menggabungkan beberapa kategori sekaligus dalam model bisnisnya.

Tabel 3. Kategori *Startup* Pertanian di Indonesia

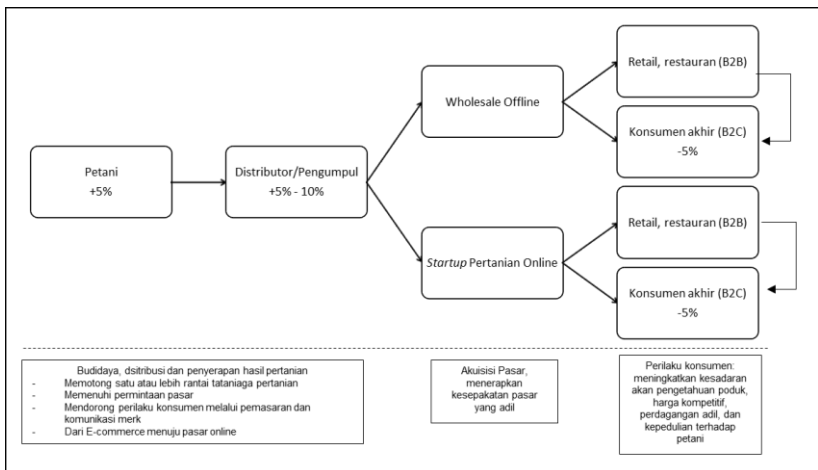
No	Kategori <i>Startup</i> Pertanian	Bisnis Model	Nama <i>Startup</i>
1	Pembiayaan	<i>Startup</i> dalam kategori ini fokus dengan kurangnya akses permodalan dan persyaratan pembiayaan yang adil bagi petani kecil. Sebagai <i>platform crowdfunding online</i> atau <i>peer-to-peer</i> (P2P), mereka menarik dana dari investor ritel, lembaga pembiayaan pinjaman mikro dan bank, menyalurkan uang ke proyek pertanian	iGrow, TaniFund (TaniGroup), Crowde
2	<i>E-Commerce</i>	<i>Startup</i> dalam kategori ini menyederhanakan rantai pasokan pertanian dengan menghubungkan petani langsung ke pembeli akhir, dan dalam prosesnya mereka menghilangkan banyak lapisan perantara dan margin yang mereka tetapkan yang menaikkan harga akhir barang. Akibatnya, petani mendapatkan harga jual yang lebih adil dan konsumen mendapatkan keuntungan dari produk yang	Chilibeli, TaniHub (TaniGroup), Kedai Sayur, Crowde, Tanijoy, 8villages, Aruna, Limakilo

No	Kategori <i>Startup</i> Pertanian	Bisnis Model	Nama <i>Startup</i>
		lebih murah. Pembeli dapat menjadi konsumen, usaha kecil dan bahkan produsen skala besar	
3	Edukasi dan Pendampingan	<i>Startup</i> dalam kategori ini mengajarkan para petani dan nelayan Indonesia keterampilan dan pengetahuan yang diperlukan untuk meningkatkan produktivitas	8villages, Aruna, TaniHub, Tanijoy, Crowde
4	Pengembangan Teknologi	<i>Startup</i> dalam kategori ini membuat perangkat keras dan perangkat lunak baru yang meningkatkan operasi pertanian. Ini termasuk sensor untuk mengumpulkan data pertanian, pupuk otomatis atau dispenser pakan ternak, <i>drone</i> dan perangkat <i>Virtual Reality/Augmented Reality (VR/AR)</i>	JALA, eFishery, HARA, Habibi Garden

Sumber: Putera & Tang, 2020

Tabel 3 menggambarkan beberapa bentuk inovasi bisnis model yang dikembangkan oleh *startup* berbasis pertanian di Indonesia. Perusahaan seperti TaniFund dan iGrow mengembangkan bisnis model yang dapat menjembatani kebutuhan modal petani. Keduanya membangun wadah yang dapat menjembatani masyarakat yang ingin berinvestasi di sektor pertanian namun tidak memiliki kecakapan teknis atau modal besar dengan para petani yang membutuhkan dukungan modal kapital dengan persyaratan sederhana. Kedua perusahaan tersebut menerapkan sistem *crowdfunding* untuk bisa mengumpulkan dan menyalurkan dana investasi masyarakat kepada petani. Sistem *crowdfunding* merupakan skema pembiayaan yang memungkinkan investor melakukan investasi dalam

berbagai jenis proyek dan usaha, dimana seringkali investasi yang dilakukan bisa didanai bahkan dalam jumlah kecil, dibandingkan dengan proyek investasi formal yang ada (Di Pietro, 2020). Skema pembiayaan *crowdfunding* memberikan beberapa keuntungan bagi petani, diantaranya adalah dapat mengakses kredit kepada lembaga keuangan formal seperti perbankan atau lembaga keuangan mikro. (Avisha, Charina, Noor, & Mukti, 2019). Beberapa perusahaan juga mengembangkan *E-commerce* khusus produk pertanian. Melalui wadah ini, rantai tataniaga produk pertanian diharapkan bisa semakin efektif dan efisien melalui pemotongan rantai pasok seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.



Sumber: Purnamasari, 2019

Gambar 4. Alur Rantai Pasok Produk Pertanian dengan Inovasi E-Commerce

Beberapa *startup* fokus pada pengembangan inovasi dalam mengatasi isu sumberdaya manusia pertanian, yakni melalui pendidikan dan pendampingan petani. Perusahaan seperti perusahaan *8villages* telah memberikan layanan informasi kepada petani melalui aplikasi pesan singkat (SMS) yang telah memiliki pengikut lebih dari 100.000 petani, sejak tahun 2012. Program ini bertujuan untuk memberikan pengetahuan berkaitan dengan proses pertanian dan diskusi antara petani dengan ahli (Putera & Tang, 2020). Lebih lanjut beberapa *startup* seperti Agrisocio, Crowde dan

lainnya juga melakukan pendampingan petani dalam kegiatan budidaya di lapangan. Sementara dalam isu adaptasi teknologi, beberapa *startup* mengembangkan teknologi berbasis internet untuk mendukung kemajuan sektor pertanian. JALA merupakan *startup* yang mengembangkan rangkaian teknologi sensor untuk mendeteksi kualitas air di kolam tambak udang, mulai dari salinitas air, kandungan pH dan tingkat oksigen dalam air. Data yang terkumpul ditransfer kepada sistem *cloud* untuk kemudian dianalisis. Hasil analisis tersebut dapat digunakan untuk mengevaluasi kualitas air yang digunakan petani. Habibi Garden dan BIOPS Agrotekno mengembangkan teknologi untuk mendeteksi kelembaban, suhu dan kandungan nutrisi tanah. Selanjutnya, *startup* HARA merupakan perusahaan yang mengembangkan teknologi *blockchain* dalam data pertanian. Data yang terkumpul kemudian disimpan dan dipertukarkan dengan pengguna lainnya. Petani yang berkontribusi mendapatkan manfaat berupa nilai transaksi dan token yang bisa ditukarkan dengan input pertanian maupun kebutuhan harian.

Uraian di atas menunjukkan bahwa dalam menghadapi perkembangan teknologi menuju masyarakat 5.0, sektor pertanian Indonesia dihadapkan pada tantangan sekaligus peluang. Berbagai kendala yang dihadapi sektor pertanian Indonesia adalah permasalahan klasik yang masih mengakar hingga saat ini. Kompleksitas tantangan terhadap sektor pertanian tersebut tidak dapat diselesaikan secara parsial, melainkan penting untuk dilihat dengan sudut pandang sistemik/holistik. Sinergi dan kolaborasi dari seluruh *stakeholder* sangat dibutuhkan untuk dapat mengurai permasalahan tersebut. Peran sumber daya manusia muda Indonesia harus didorong dan dioptimalkan untuk terus dapat menghasilkan inovasi-inovasi berbasis teknologi di sektor pertanian. Generasi muda Indonesia harus menjadi lokomotif bagi perubahan dan kemajuan sektor pertanian menuju masyarakat 5.0 (Kifli et al., 2021). Petani sebagai motor penggerak subsistem hulu pertanian, perlu didukung melalui pendampingan dan pembinaan terkait dengan peningkatan produksi, adaptasi teknologi serta aksesibilitas terhadap pasar.

3. Inovasi Nilai Berbasis Sistem Usaha Agribisnis

Berikut ini dibahas tentang agribisnis komoditas di Indonesia yang dapat mengimplementasikan konsep inovasi nilai sebagai upaya keluar dari persaingan ketat dalam industri yang dihadapinya. Beberapa riset terdahulu

mengenai analisa inovasi nilai pada usaha agribisnis dikaji sehingga diharapkan akan muncul gagasan-gagasan baru dalam pengembangan agribisnis yang modern dan adaptif terhadap perubahan zaman. Beberapa contoh kajian inovasi nilai pada sektor pertanian, antara lain: agribisnis kopi, peternakan sapi perah, objek wisata, dan pada industri bunga krisan.

Komoditas kopi merupakan salah satu komoditas perkebunan strategis yang diproduksi di Indonesia. Daya tarik komoditas kopi umumnya bersumber dari cita rasa, aroma, hingga kultur yang melekat dalam proses budi daya hingga pengolahannya. Selain sebagai produsen, Indonesia juga merupakan salah satu negara eksportir kopi terbesar dunia. Perkebunan kopi di Indonesia tercatat mencapai luas total wilayah 1.23 juta hektar, yang terdiri dari 900 ribu hektar perkebunan kopi robusta dan 330 ribu hektar perkebunan kopi arabika (Siregar & Irawan, 2021).

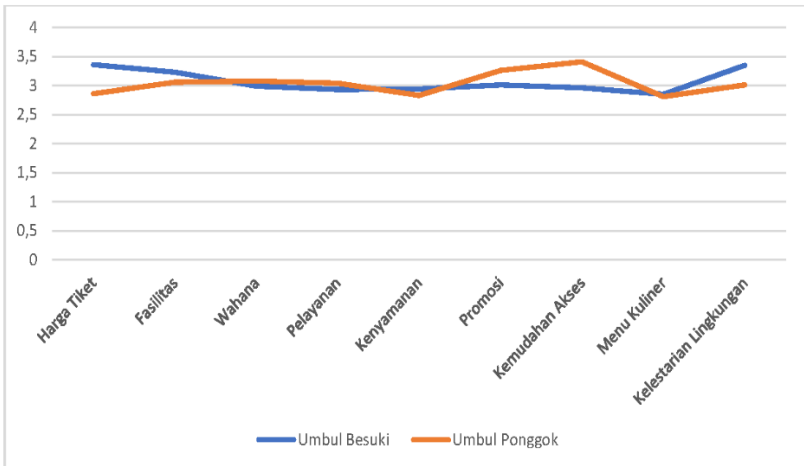
Di tengah geliat bisnis minuman kopi yang menunjukkan tren positif, petani kopi di daerah sentra produksi tidak serta merta merasakan imbas positifnya. Samrin & Irawan (2021) melakukan analisis inovasi nilai pada petani kopi gayo di Kabupaten Takengon, Aceh. Dalam penelitiannya diketahui bahwa petani kopi gayo di Kabupaten Takengon menghadapi situasi persaingan dalam industri kopi. Hal ini ditunjukkan dengan kurva nilai yang hampir sama antar pelaku usaha satu dan lainnya. Kondisi demikian menggambarkan bahwa petani Kopi Gayo di Kabupaten Takengon menghadapi situasi yang disebut dengan "Samudera Merah". Faktor harga, keramahan dan kesopanan pramusaji, serta kebersihan dan kualitas kopi menjadi faktor yang beririsan dalam Kanvas Strategi Kopi Gayo di Kabupaten Takengon. Situasi persaingan seperti ini mendorong petani kopi gayo ke dalam perebutan pangsa pasar yang semakin sedikit. Kondisi tersebut diperburuk dengan pembatasan kegiatan sosial selama masa Pandemi Covid-19. Persaingan antar petani Kopi Gayo dikarenakan sulitnya penjualan di masa pandemi Covid-19.

Analisa inovasi nilai dan perumusan Strategi Samudera Biru pada kasus industri Kopi Gayo di Kabupaten Takengon adalah dengan merekonstruksi batasan pasarnya. Hal tersebut dapat dilakukan dengan cara meningkatkan keramahan, kesopanan dan ketersediaan produk yang berkualitas. Lebih lanjut, inovasi nilai dapat dilakukan dengan menawarkan jenis produk baru selain kopi, yakni penawaran auditorium untuk lokasi pameran, penawaran paket produk, pelaksanaan promosi melalui media sosial, serta penawaran fasilitas pendukung yang tidak meningkatkan biaya namun menambah nilai tambah untuk konsumen (Samrin & Irawan, 2021).

Perumusan strategi inovasi pada usaha agribisnis tidak selamanya kaku dengan menggunakan pakem-pakem Samudera Biru. Putritamara, Azizah, Ningsih, Haryono, & Ridwan (2020) menganalisis perumusan strategi inovasi pada peternak sapi perah di Nusa Pelangi Agro Tourism, Malang. Analisis tersebut dilakukan dengan menggunakan pendekatan campuran antara *Red ocean* dan *Blue ocean*, yakni *Purple Ocean Strategy*. Strategi samudra merah dan samudra biru masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Dalam penelitiannya (Putritamara et al., 2020) menjabarkan bahwa implementasi strategi samudera biru pada kasus peternak sapi perah tidak relevan mengingat penciptaan pasar baru akan berdampak pada peningkatan biaya yang tidak dapat ditanggung peternak. Namun demikian, peternak juga tidak dapat bertahan sepenuhnya menggunakan strategi samudera merah di tengah persaingan yang ketat, karena lambat laun bisnis akan menjadi kurang menguntungkan. Sehingga, kombinasi keduanya merupakan strategi tengah yang dapat dilakukan.

Hasil analisa strategi tengah menunjukkan bahwa inovasi dapat dilakukan dengan cara menghentikan cara berjualan *hard selling*, dan menghapuskan daftar harga yang tertera pada media sosial instagram. Lebih lanjut, direkomendasikan juga untuk mengurangi konten yang tidak sesuai dengan segmentasi dan target pasar. Strategi peningkatan perlu dilakukan dalam hal peningkatan kemudahan mengakses website atau media sosial bagi konsumen, peningkatan kualitas produk susu, peningkatan kualitas kemasan, dan lainnya. Peternak sapi perah di Nusa Pelangi Agro Tourism juga dapat menciptakan penawaran baru, seperti promosi personal branding bahwa susu peternak sapi perah merupakan produsen susu berbasis *agro-educational tourism*, menciptakan kerjasama dengan pesaing melalui *frontal partnerships*, menciptakan konten menarik dalam media online usaha, dan lainnya.

Implementasi inovasi nilai lainnya dianalisa oleh Hidayat (2021) yang memotret strategi pengembangan objek wisata Umbul Besuki, di Kabupaten Klaten. Berdasarkan analisa kanvas strategi awal yang dilakukan, diketahui bahwa tingkat persaingan antara objek wisata alam Umbul Besuki dengan Umbul Ponggok menggambarkan situasi Samudera Merah. Hal tersebut ditunjukkan dalam hasil identifikasi faktor kompetitif yang ditawarkan oleh kedua objek wisata. Gambar 5 menunjukkan kanvas strategi awal kedua objek wisata tersebut.



Sumber: Hidayat, 2021

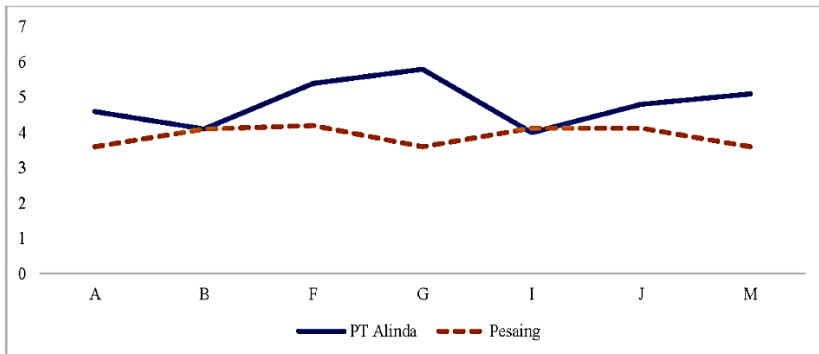
Gambar 5. Kanvas Strategi Awal Wisata Alam Umbul Besuki dan Umbul Ponggok

Hidayat (2021) memaparkan hasil analisa *Blue Ocean Strategy* dalam bentuk rekomendasi inovasi yang dapat dilakukan oleh objek wisata alam Umbul Besuki untuk mewujudkan diferensiasi produknya. Pemetaan faktor-faktor kompetisi baru menghasilkan perubahan dalam grafik kanvas strategi objek wisata Umbul Besuki melalui peningkatan di variabel wahana, pelayanan, keamanan, promosi serta faktor menu kuliner. Selain itu divergensi dengan penciptaan inovasi nilai yang direkomendasikan untuk objek wisata Umbul Besuki diantaranya yaitu: penciptaan atribut ekowisata, sarana pernikahan *outdoor*, *glamping ground* dan atraksi yang dikenakan tarif. Dengan demikian, diharapkan objek wisata Umbul Besuki dapat menciptakan pasar baru bagi bisnisnya dan tidak perlu terlibat dalam persaingan ketat di industri Samudera Merah.

Bentuk implementasi inovasi nilai lain juga ditunjukkan pada studi yang dilakukan oleh Nurunisa & Dewi (2021) pada industri krisan di Kabupaten Cianjur. Kabupaten Cianjur merupakan salah satu produsen krisan terbesar di Indonesia. Tercatat sekitar 46 petani dan/atau pelaku usaha krisan di Cianjur yang saling berkompetisi baik di pasar domestik maupun pasar

global (BPBTPH, 2016). Nurunisa & Dewi (2021) mengkaji situasi industri krisan di Kabupaten Cianjur, dan lebih lanjut menganalisa bahwa implementasi inovasi nilai dapat terlaksana dalam kerangka berpikir sistem agribisnis.

Gambaran persaingan yang sedang terjadi di industri krisan Cianjur digambarkan melalui kanvas strategi pada Gambar 6. Kim & Mauborgne (2015) menyebutkan bahwa kanvas strategi menunjukkan profil strategis suatu industri dengan penggambaran faktor-faktor kompetisi secara jelas, profil strategis dari kompetitor dalam suatu industri, faktor-faktor yang dijadikan sebagai ajang investasi bagi pelaku usaha, serta profil strategis perusahaan.



Keterangan:

A = Faktor harga

B = Faktor bebas hama dan penyakit

F = Faktor kecerahan warna

G = Faktor daya tahan bunga

I = Faktor kemudahan pemesanan

J = Faktor pelayanan negosiasi pembayaran

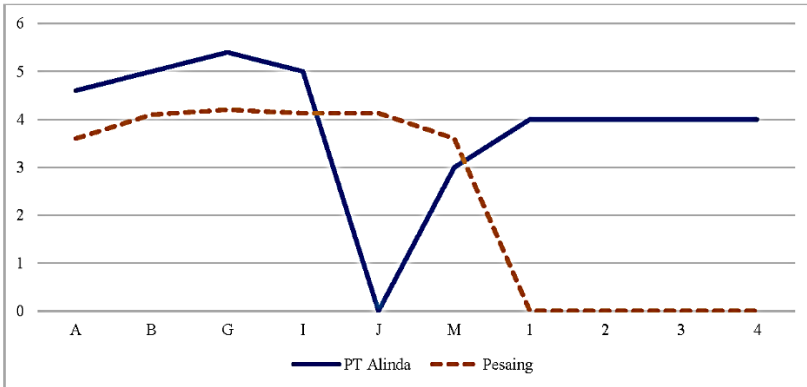
M = Faktor jaminan kualitas produk

Sumber: Nurunisa & Dewi, 2021

Gambar 6. Kanvas Strategi Industri Bunga Krisan di Kabupaten Cianjur

Visualisasi penilaian konsumen pada Gambar 6 menggambarkan posisi faktor persaingan yang dievaluasi oleh konsumen. Evaluasi menunjukkan bahwa PT Alinda memiliki skor yang lebih tinggi dibandingkan dengan pesaing dalam beberapa faktor seperti faktor harga (A), faktor kecerahan warna (F), faktor daya tahan (G), faktor layanan negosiasi pembayaran (J) dan faktor jaminan kualitas produk (M). Sedangkan faktor bebas hama dan penyakit (B), faktor kemudahan pemesanan, dan (I) nilai evaluasi yang dimiliki PT Alinda berada di bawah nilai pesaing. Namun demikian, kanvas strategi menunjukkan pola yang mirip diantara PT Alinda dan industri lain, hal tersebut mengindikasikan adanya situasi Samudera Merah pada industri Krisan di Cianjur.

Hasil perumusan strategi menggunakan pendekatan *Blue ocean* kemudian memberikan pandangan dan juga masukan yang berbeda bagi PT Alinda terkait dengan inovasi nilai yang perlu dilakukannya. Pembuatan kanvas strategi yang baru ini masih mengacu dari kanvas strategi sebelumnya untuk menentukan sumbu horizontal dan sumbu vertikal. Namun demikian, faktor kompetisi yang diplotkan sudah diproses dengan mengevaluasi kanvas sebelumnya menggunakan prinsip dan pendekatan *Blue ocean Strategy*. Gambar 7 mengilustrasikan bahwa setelah dilakukan analisa menggunakan pendekatan Strategi Samudera Biru, PT Alinda merumuskan inovasi nilai yang kemudian membedakan strategi bisnisnya dengan mayoritas pelaku usaha industri krisan di Cianjur. Hal tersebut akan membuat persaingan pelaku usaha krisan di Cianjur menjadi tidak relevan lagi.



Keterangan:

- A = Faktor harga
- B = Faktor bebas hama dan penyakit
- F = Faktor kecerahan warna
- G = Faktor daya tahan bunga
- I = Faktor kemudahan pemesanan
- J = Faktor pelayanan negosiasi pembayaran
- M = Faktor jaminan kualitas produk
- 1 = Faktor pemesanan rangkaian bunga
- 2 = Faktor kerajinan bunga kering
- 3 = Faktor fasilitas jasa penunjang
- 4 = Faktor diversifikasi produk (produk olahan)

Sumber: Nurunisa dan Dewi, 2021

Gambar 7. Ilustrasi Kanvas Strategi PT Alinda di Masa Depan Terhadap Pesaing Menggunakan Pendekatan *Blue Ocean Strategy*

Berdasarkan kajian terhadap hasil studi inovasi nilai dengan menggunakan pendekatan Strategi Samudera Biru yang dilakukan oleh Hidayat (2021), Putritamara et al. (2020); Samrin & Irawan (2021) serta Nurunisa & Dewi (2021) diketahui bahwa masih banyak ruang untuk eksplorasi dan inovasi pada usaha-usaha berwawasan agribisnis. Inovasi berwawasan agribisnis yang dimaksud adalah inovasi pengembangan produk pertanian secara luas yang terintegrasi mulai dari subsistem hulu hingga ke hilir dan penunjang. Dari kajian tersebut diketahui bahwa usaha

agribisnis secara umum masih terperangkap dalam situasi Samudera Merah. Hal tersebut ditunjukkan dengan kemiripan peta faktor kompetisi usaha pada kanvas strategi awal, sebelum perumusan strategi Samudera Biru. Hal ini mengindikasikan bahwa implementasi inovasi di tingkat petani/pelaku usaha agribisnis masih rendah, sehingga para pelaku usaha harus menghadapi persaingan yang cukup ketat dalam memperebutkan pasar.

Merujuk pada konsep masyarakat 5.0 yang pertama kali muncul dari gagasan pemerintah Jepang, yaitu merupakan penggabungan antara ruang fisik dan dunia maya melalui pemanfaatan teknologi dan informasi (Hitachi-UTokyo Laboratory, 2018). Karenanya inovasi nilai yang dibangun pada usaha-usaha di sektor pertanian Indonesia juga perlu memperhatikan perkembangan teknologi sebagai kunci akselerasi pembangunan pertanian. Melalui kajian ini, telah disampaikan bahwa persiapan menuju sektor pertanian yang berdaya saing dan mampu beradaptasi dengan perkembangan teknologi, maka pendekatan sistemik/holistik menjadi sangat penting untuk diterapkan. Tanpa adanya kolaborasi dan integrasi antar subsistem agribisnis, maka petani maupun pelaku usaha kecil menengah akan semakin jauh tertinggal. Tulisan ini juga menekankan bahwa di tengah tantangan yang dihadapi oleh sektor pertanian saat ini, Indonesia memiliki peluang yang sangat besar melalui adanya bonus demografi. Peluang tersebut harus dapat dimanfaatkan sedemikian rupa, salah satunya menjadikan generasi muda produktif sebagai lokomotif menuju pertanian Indonesia yang mampu berdaya saing di tengah era masyarakat 5.0. Kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi informasi mengenai berbagai bentuk inovasi yang dapat dilakukan pada sektor agribisnis.

KESIMPULAN

Indonesia saat ini menghadapi dua kondisi yang dapat diibaratkan sebagai 2 sisi mata uang. Sektor *onfarm* atau produksi dihadapkan pada tantangan rendahnya regenerasi petani sebagai motor penggerak subsistem budi daya. Karakteristik umum petani Indonesia saat ini adalah sumberdaya manusia yang tua, berpendidikan rendah, kaku terhadap teknologi, dan dengan berbagai tantangan lainnya. Di sisi lain, saat ini Indonesia sedang menikmati bonus demografi dimana 70,72 persen penduduk merupakan generasi muda produktif dengan karakteristik dinamis, modern, kritis dan

lekat dengan teknologi digital. Lebih lanjut, permasalahan pertanian klasik seperti persoalan pembiayaan, harga dan pasar produk pertanian, sumber daya manusia serta adaptasi teknologi di tingkat petani masih membayangi sektor pertanian Indonesia. Berbagai tantangan tersebut membutuhkan sinergi dan kolaborasi dari seluruh *stakeholder* agar akar permasalahan dapat satu per satu terurai, salah satunya dengan melakukan inovasi teknologi dan adaptasi era digital.

Kajian terhadap hasil studi inovasi nilai dengan menggunakan pendekatan Strategi Samudera Biru menunjukkan masih banyak ruang untuk eksplorasi dan inovasi pada usaha-usaha berwawasan agribisnis. Kajian pada usaha agribisnis tersebut menunjukkan bahwa secara umum, pelaku usaha masih terperangkap dalam situasi Samudera Merah; yang mengindikasikan rendahnya implementasi inovasi di tingkat petani/pelaku usaha agribisnis dan tingginya persaingan usaha pada industri terkait. Merujuk pada konsep masyarakat 5.0, pendekatan sistemik/holistik dalam persiapan sektor pertanian berdaya saing dan adaptif menjadi sangat penting untuk diterapkan. Tanpa adanya kolaborasi dan integrasi antar subsistem agribisnis, maka petani maupun pelaku usaha kecil menengah akan semakin jauh tertinggal. Lebih lanjut, bonus demografi yang dialami Indonesia harus dioptimalkan sebagai peluang untuk mendukung akselerasi pembangunan pertanian di era digital.

DAFTAR PUSTAKA

- [APJII] Asosiasi Penyelenggara Jasa Internet Indonesia. (2021). Tiga tantangan utama transformasi digital di Indonesia. *Buletin APJII*, Edisi 79, Januari 2021. APJII.
- Ardiansyah, R., Utami, H. D., & Nugroho, B. A. (2020). The value chain strategy of agribusiness of Etawah Crossbred Goat Milk toward the industrial revolution 4.00 era in Sumberdem Village, Malang Regency. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 5(2), 222–224.
- Avisha, A., Charina, A., Noor, T. I., & Mukti, G. W. (2019). Crowdfunding sebagai akses alternatif permodalan berbasis teknologi digital pada kegiatan pertanian (*Studi kasus di PT Crowde Membangun Bangsa*). *Case Stu*, 5(1), 1–22.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. (2021). Retrieved from <https://www.bps.go.id/galeri>
- [BPBTPH] Balai pengembangan budidaya tanaman pangan dan hortikultura Kecamatan Sukaresmi, Cugenang, Pacet, Cipanas Kabupaten Cianjur. (2016). Pelaku Usaha Tanaman Hias di Kabupaten Cianjur. Cianjur: BPBTPH.
- Davis, J. H. & Goldberg, R.A. (1957). *A concept of agribusiness*. *American Journal of Agricultural Economics*, Pp, xiv, 36. Boston: Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University.
- Di Pietro, F. (2020). The geography of crowdfunding. *Crowdfunding for Entrepreneurs*, 31–60. Retrieved from <https://doi.org/10.4324/9780429319785-5>
- Hidayat, A. N. (2021). Strategi pengembangan objek wisata Umbul Besuki dengan menggunakan analisis SWOT dan Blue Ocean Strategy. Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.

- Hitachi-UTokyo Laboratory. (2018). *Society 5.0 a people-centric super-smart society*. Springer Open. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-15-2989-4>
- Kim, W. C., & Mauborgne, R. (2015). *Blue Ocean Strategy*. Harvard Business School Publication Cooperation.
- Kahn, K. B. (2018). Understanding innovation. *Business Horizons*, 61(3), 453–460. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.BUSHOR.2018.01.011>
- Kifli, G. C, Slameto, S, Kilmanun, J C, Permana, D, Simanjuntak, E.J, & Meitrianty, C. (2021). Key role of millennial generation in rural agricultural development in Indonesia: Cohort Generation Theory Approach. *The 2nd International Conference on Agribusiness and Rural Development: Sustainability and Innovation in Agribusiness for a Better Life*. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Kline, S. J. (2009). An overview of innovation. *Studies on science and the innovation process*, 173–204. Retrieved from https://doi.org/10.1142/9789814273596_0009
- Nasution A. H, & Kartajaya H. (2018). *Inovasi*. Yogyakarta: Andi Publisher.
- Nurunisa, V. F., & Dewi, K. T. (2021). The blue ocean strategy analysis of Chrysanthemum flower. *The 2nd International Conference on Agribusiness and Rural Development: Sustainability and Innovation in Agribusiness for a Better Life*.
- Purnamasari, A. (2019). Building the Indonesian Ag-Tech ecosystem. Tanihub.
- Putera, P. A. W., & Tang, B. (2020). Indonesia agritech report 2020. *Compasslist Research Publication*, 9, 50.
- Putritamara, J. A., Azizah, S., Ningsih, U. W., Haryono, M. B. B., & Ridwan, A. (2020). Purple ocean strategy implementation by millennial dairy farmers in Malang, Indonesia. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 5(4), 166–169. Retrieved from <http://irjaes.com/wp-content/uploads/2020/11/IRJAES-V5N4P178Y20.pdf>

- Rachmawati, R. R., & Gunawan, E. (2020). Peranan petani milenial mendukung ekspor hasil pertanian di Indonesia. *Forum Penelitian Agro Ekonomi*, 38(1), 67. Retrieved from <https://doi.org/10.21082/fae.v38n1.2020.67-87>
- Samrin, & Irawan. (2021). Formulasi Blue Ocean Strategy : Studi kasus Kopi Gayo di Kabupaten Takengon. *Jurnal AKMAMI (Akutansi, Manajemen, Ekonomi)*, 2(2), 410–420.
- Siregar, M, & Irawan. (2021). Manajemen agribisnis Kopi Gayo di Takengon. *IHSAN: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, vol. 3 No.1, ISSN: 2685-9882.
- Zaky, M. A., Nuzar, I., Saputro, W. E., Praysuta, B. D. S., Wijaya, S. B., & Riswan, M. (2018). Mapping & database startup Indonesia 2018. *Badan Ekonomi Kreatif*, 1–202.

**PERFORMA DAN TINGKAT KESEHATAN AYAM
PEDAGING YANG DIPELIHARA DENGAN KANDANG
INTENSIF DAN KANDANG UMBARAN**

***PERFORMANCES AND HEALTH STATUS IN BROILERS
MAINTAINED WITH INTENSIVE AND FREE RANGE
SYSTEM***

Sri Yuniati Putri Koes Hardini¹, Iman Rahayu Hidayati Soesanto²

¹ Program Studi Agribisnis, Jurusan Pertanian,

Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

² Program Studi Teknologi Produksi Ternak, Departemen Ilmu Produksi
dan Teknologi Peternakan, Fakultas Peternakan, IPB University
yuniati@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Pemeliharaan intensif dan dengan umbaran merupakan dua jenis sistem pemeliharaan yang berbeda yang secara tidak langsung dapat mempengaruhi performa, kesehatan dan kualitas karkas dari ayam pedaging yang dipelihara. Tulisan ini berdasarkan penelitian tentang pemeliharaan ayam pedaging dengan menggunakan kandang intensif dan semi intensif (kandang yang ditambah tempat umbaran) dengan tujuan untuk melihat penampilan atau performa dan kondisi kesehatan (adanya kasus hockburn, footpad dermatitis dan breast blister). Penelitian dilakukan dengan menggunakan 200 ekor ayam umur sehari (Day old chick, DOC) strain Ross yang dipelihara hingga umur 6 minggu. Penelitian dirancang menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan 2 perlakuan sistem kandang dan ulangan 4 kali, dimana setiap ulangan perlakuan terdiri dari 25 ekor ayam. Pengamatan performa dilakukan setiap minggu pada parameter bobot badan, konsumsi pakan, konversi pakan dan mortalitas. Sementara itu, pengamatan pada tingkat kesehatan ayam dilakukan pada umur 3 dan 6 minggu. Analisa data dilakukan dengan menggunakan uji t. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan penampilan (performa) dari kedua jenis perlakuan kandang, kecuali pada nilai konversi pakan, yaitu pada kandang dengan umbaran lebih tinggi daripada yang

kandang intensif. Pengamatan hockburn yang terjadi pada ayam umur 3 minggu dipengaruhi oleh sistem pemeliharaa;; sedangkan pada umur 6 minggu kejadian hockburn dan footpad dermatitis pada kandang yang diberi umbaran lebih sedikit dibandingkan dengan kandang intensif. Kejadian kasus Breast Blister tidak dipengaruhi oleh sistem pemeliharaan. Kasus hockburn lebih banyak terjadi pada kandang intensif umur 6 minggu daripada umur 3 minggu, sedangkan kasus footpad dermatitis banyak terjadi pada umur 6 minggu daripada 3 minggu baik pada kandang intensif maupun kandang dengan umbaran. Hasil dari penelitian ini dapat dijadikan acuan bagi peternak, bahwa kondisi lantai kandang merupakan hal utama yang harus diperhatikan dalam memelihara ayam pedaging agar diperoleh karkas dengan kualitas baik tanpa adanya breast blister, footpad dermatitis dan hockjont. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk menghasilkan ayam berkualitas, yang akan menentukan kualitas hidup manusia.

Kata Kunci: *sistem kandang intensif, sistem kandang semi intensif, sistem kandang umbaran, kesehatan ternak, performa ternak.*

PENDAHULUAN

Protein hewani merupakan kebutuhan dasar yang harus diupayakan agar seluruh masyarakat terpenuhi kebutuhan minimalnya. Kebutuhan protein hewani bagi masyarakat Indonesia, masih sangat bergantung pada produksi ternak berupa daging, telur, dan susu. Ternak unggas menyumbang produk berupa daging dan telur. Berdasarkan Statistik Peternakan 2020 konsumsi daging ini selalu meningkat dari tahun ke tahun; hal ini dapat dilihat pada konsumsi daging ayam ras per kapita pada tahun 2019 sebesar 5.683 kg, naik 1.87% dari tahun 2018 (Ditjen PKH, 2020). Ternak unggas merupakan tulang punggung sumber protein hewani di Indonesia. Kebutuhan akan protein yang berasal dari daging unggas akan semakin meningkat seiring dengan semakin meningkatnya jumlah penduduk di Indonesia. Banyak usaha dilakukan untuk meningkatkan produksi daging yang memenuhi standar mutu kualitas daging. Salah satu upaya untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah dengan cara meningkatkan produktivitas dan kualitas daging ternak terutama unggas. Keadaan ini karena peningkatan produktivitas ternak, terutama unggas, tidak serta merta memenuhi selera konsumen dalam mengonsumsi daging ayam.

Konsumen saat ini sudah mulai melihat, menilai dan memilih kualitas daging yang akan dikonsumsinya.

Pertumbuhan ayam pedaging yang sangat cepat sering kali menimbulkan tekanan atau stres. Hal ini dapat dilihat dari kondisi tulang kaki yang sering kali bermasalah karena harus menyangga beban tubuh yang sedemikian pesat bertumbuh; sehingga ayam broiler tidak banyak bergerak, hanya makan, minum dan istirahat. Kondisi ini memunculkan masalah baru yaitu menurunnya kualitas karkas yang dihasilkan yang dapat dilihat pada bagian dada karena adanya *breast blister* dan di bagian kaki dengan adanya *footpad dermatitis* dan pada bagian lutut (*hockburn*).

Untuk memenuhi tingginya kebutuhan konsumen akan daging ayam, peternak menggunakan kandang intensif dalam memelihara ayam broiler, hal ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang secara ekonomis lebih menguntungkan. Penggunaan kandang intensif dimana ayam diletakkan pada suatu kandang dengan ukuran yang terbatas, meskipun terlihat lebih efisien dalam penggunaan lahan dan mempermudah pemeliharannya, namun dapat menyebabkan stres pada ayam (Tandiabang, 2014). Kondisi stres ini dapat menyebabkan tingkat kesejahteraan (*welfare*) ayam menurun, serta akan berpengaruh pada menurunnya kesehatan dan produksi yang dihasilkan. Penurunan produktivitas akibat turunnya tingkat kesehatan pada ternak unggas ini ditunjukkan dari adanya kelainan pada kaki, adanya kejadian kasus *hockburn* dan *footpad dermatitis*, serta memar di bagian dada dengan adanya *breast blister*, dan berbagai macam penyakit lain. Hal ini terjadi karena ayam dipelihara pada kandang intensif yang biasanya menggunakan sekam padi sebagai alasnya.

Kondisi ini tentu tidak sesuai dengan Undang-undang RI No 41 Tahun 2014 tentang perubahan atas Undang-undang RI No 18 Tahun 2009 tentang Peternakan dan Kesejahteraan Hewan. Undang-undang ini menjelaskan tentang segala urusan yang berhubungan dengan keadaan fisik dan mental hewan menurut ukuran perilaku alami hewan, yang perlu diterapkan dan ditegakkan. Undang-undang ini untuk melindungi hewan dari perlakuan yang tidak layak pada saat hewan tersebut dimanfaatkan oleh manusia.

Ada lima prinsip kesejahteraan hewan (5 F atau 5 *free*) yang harus dipenuhi untuk kenyamanan hewan atau ternak yaitu: bebas dari rasa lapar dan haus, bebas dari rasa tidak nyaman, bebas dari rasa sakit, luka dan penyakit, bebas untuk mengekspresikan perilaku normal, dan bebas dari stres dan tertekan. Untuk mengurangi tingkat stres dan meningkatkan

kenyamanan ayam, para peternak berusaha mengembangkan suatu pemeliharaan alternatif yaitu sistem *free-range* atau model kandang dengan *umbaran*, agar ayam lebih nyaman dipelihara dan pada akhirnya akan memberikan respon pertumbuhan yang sangat baik (Tandiabang, 2014).

Tulisan ini merupakan hasil penelitian yang bertujuan melihat tampilan performa dan kondisi kesehatan ayam, yaitu dengan melihat adanya kejadian *hockburn*, *footpad dermatitis*, dan *breast blister* pada ayam yang dipelihara menggunakan sistem kandang intensif dan semi intensif dengan umbaran. Penelitian dilakukan selama enam minggu sesuai dengan umur produksi ayam pedaging. Ayam yang digunakan adalah ayam pedaging (broiler) strain Ross Jumbo 747 Hijau. Berdasarkan penelitian Johan (2010), ayam strain ini menghasilkan bobot badan dan indeks performa yang cukup bagus bila dipelihara pada suhu 23 – 28 °C. Kisaran suhu ini adalah suhu di daerah Dramaga, Bogor di mana penelitian dilaksanakan.

Kandang ayam broiler yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 4 unit kandang intensif dengan ukuran masing-masing unit 2,5 x 3 m untuk 25 ekor ayam. Selain itu, ada 4 unit kandang semi intensif atau kandang dengan umbaran dengan ukuran lebih luas karena selain kandang untuk tidur, ditambah pula tempat untuk umbarannya, yaitu 4 x 4,5 m untuk 25 ekor ayam. Ukuran kandang ini berdasarkan ukuran kandang yang ada di lab tempat dilakukannya penelitian, sehingga jumlah ayam disesuaikan walaupun dengan tingkat kepadatan yang masih rendah.

Cara pemeliharaan dilakukan dengan menggunakan perlakuan yang sama sampai ayam mencapai umur 1-3 minggu, yaitu seluruh ayam dipelihara dengan menggunakan sistem kandang intensif. Selanjutnya, mulai umur 4 minggu ayam yang dipelihara dengan umbaran mulai dilepas di kandang umbarannya, setiap hari mulai dari pukul 08.00 sampai dengan pukul 17.00 WIB. Di area umbaran ditanami rumput gajah mini dan beberapa tanaman perdu liar yang tidak mengganggu kesehatan dan kenyamanan ayam. Pakan diberikan di dalam kandang intensif dan di tempat umbaran disesuaikan dengan kebutuhan ayam setiap minggunya.

Percobaan dilakukan dengan menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri dari 2 perlakuan (kandang intensif dan kandang semi intensif atau kandang dengan umbaran) dengan 4 ulangan. Setiap ulangan perlakuan terdiri dari 25 ekor anak ayam umur sehari (*Day Old Chick*, DOC). Model matematik dari Rancangan Acak Lengkap adalah sebagai berikut (Steel dan Torrie, 1995).

$$Y_{ij} = \mu + \tau + \epsilon_{ij}$$

dimana:

Y_{ij} = Pengamatan pada perlakuan ke- i dan ulangan ke- j

μ = Rataan umum

τ = Pengaruh pemberian perlakuan ke- i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

ϵ_{ij} = pengaruh acak pada perlakuan ke- i ulangan ke- j ($j = 1, 2, 3, 4$)

Analisis data dilakukan dengan sidik ragam (ANOVA) menggunakan uji T (T test). Pengamatan dan pengambilan data menggunakan sistem *scoring* yang diadopsi dari *Animal Welfare Quality Assessment Protocol for Poultry* (Welfare Quality, 2009), yaitu pedoman penilaian kualitas kenyamanan pada ternak unggas yang berfokus pada pengukuran yang berkaitan dengan kondisi tubuh, aspek kesehatan, perlakuan, tingkah laku hewan dan lain-lainnya. Dengan menggunakan standar kualitas ini diperoleh tingkat kesejahteraan dari kondisi ternak dalam hal ini adalah ayam pedaging yang diteliti.

1. Kandang Intensif dan Kandang dengan Umbaran

Kandang intensif adalah kandang yang digunakan untuk pemeliharaan terutama untuk tujuan komersial, dimana efisiensi penggunaannya sangat diperlukan, agar ayam yang dipelihara mempunyai produktivitas tinggi. Untuk ayam petelur biasanya digunakan kandang *battery* (kandang individual), sedangkan untuk ayam pedaging biasanya digunakan kandang postal atau kandang yang digunakan untuk memelihara ayam secara bersama dengan luasan tertentu dan biasanya dengan menggunakan sekam padi atau serbuk gergaji sebagai alasnya. Peningkatan kesadaran masyarakat akan makanan sehat, dan berdasarkan pada aturan tentang *animal welfare*, ternak harus dijamin kenyamanannya dengan 5 prinsip kesejahteraan hewan. Hal ini mengakibatkan banyak peternakan yang mulai berpindah dari kandang sistem intensif menuju ke kandang sistem semi intensif; selain dipelihara dalam kandang, ayam juga diberi kesempatan untuk 'diumbar' bebas di sekitar kandangnya tersebut.

Dengan menggunakan kandang sistem *free-range* atau kandang dengan *umbaran*, ayam akan memperoleh beberapa keuntungan. Ayam akan memperoleh pakan secara alami (tidak mengandung pengawet) yang ada di tempat *umbarannya*. Pada kandang dengan *umbaran* aktivitas ayam lebih

alami, karena ayam dapat melakukan gerakan mematok dan menggali tanah untuk mencari makan (disebut mengais). Pada kandang dengan *umbaran*, ayam juga terkena matahari pagi langsung, tidak hanya makan dan tidur seperti di kandang intensif. Ayam-ayam bisa melakukan *exercise* di dalam kandang dengan *umbaran*. Dengan memiliki kebebasan beraktivitas ini akan dihasilkan daging ayam yang lebih padat, kurang lemak dan lebih disukai oleh konsumen. Pada sistem kandang *free-range* ini disediakan bangunan yang tertutup untuk istirahat pada waktu malam hari.



Gambar 1. Kandang Intensif dan Kandang *Umbaran*

Pemeliharaan ayam dengan *umbaran* merupakan kandang yang selain memiliki tempat untuk berteduh, juga memiliki lahan bermain atau lahan untuk *umbaran* ayam. Pemeliharaan ayam seperti ini disebut juga pola pemeliharaan yang menyediakan ruang gerak yang lebih bebas untuk ayam. Dengan kata lain sistem *umbaran* merupakan suatu sistem pemeliharaan yang memberi kebebasan kepada ayam untuk mengekspresikan *insting* (naluri) alaminya. Naluri alami ayam antara lain adalah makan, minum, istirahat, berjalan, bersarang, mandi debu, mangais, bersolek (*preening*), mematok, dan lain-lain. Diketahui bahwa Ayam yang dipelihara dengan sistem *umbaran* lebih sehat dan menghasilkan produk dengan kualitas yang tinggi. Ayam yang dapat mengekspresikan kondisinya secara alami (dengan banyak bergerak dan beraktivitas), dan juga karena makanan yang dikonsumsi lebih alami dan bervariasi (dimakan dari tempat *umbarannya* dan lebih bersifat organik), maka ayam akan menghasilkan daging yang lebih baik dan sehat, serta banyak digemari konsumen. Kondisi ini membuat konsumen lebih menyukai produk peternakan dari sistem *umbaran* (Shields et al. 2013; Vaarst & Alrøe, 2012). Survei terhadap tanggapan publik

mengindikasikan bahwa pemeliharaan dengan sistem *umbaran* memberikan rating tertinggi diantara berbagai produksi ternak yang disukai konsumen.

Dipercaya pula bahwa kondisi pemeliharaan yang alami dan adanya peningkatan aktivitas dari ayam dapat menurunkan kadar lemak, kolesterol dan residu antibiotik pada daging dan telur. Lebih lanjut dilaporkan bahwa ayam yang dipelihara pada pastura (sumber hijauan pakan ternak) dan mengkonsumsi serangga dapat berpengaruh terhadap cita rasa produk yang dihasilkan. Namun demikian kandang *umbaran* juga tidak dapat menghindari dari masih munculnya beberapa gejala penyakit seperti yang dirilis oleh Roberts dalam *Welfare Quality* (2009), yaitu terjadinya kasus *footpad dermatitis*, *hockburn join* dan beberapa penyakit lainnya. Juga tidak bisa dihindarkan dari adanya parasit dari luar, misalnya cacing, serangga dan lain lain. Penggunaan sistem *umbaran* juga tidak diperkenankan menggunakan pestisida atau pupuk kimia yang akan membahayakan ternak ayam yang dipelihara. Kandang *umbaran* juga harus dijauhkan dari predator, karena dapat membuat ayam stres dan kadang-kadang memangsa ayam-ayam.

2. *Footpad Dermatitis*

Kejadian *footpad dermatitis* adalah salah satu kejadian atau kasus yang menyerang di bagian telapak kaki ayam yang disebabkan oleh luka sehingga bakteri masuk dan mengakibatkan infeksi. Umumnya kandang dengan lantai keras dan kotor yang menjadi salah satu faktor ayam terkena penyakit ini. Cara penanggulangannya adalah dengan memberikan tenggeran yang terbuat dari dahan kayu dan tidak kasar di dalam kandang tersebut. Namun, menurut Luciole (2017) kejadian *footpad dermatitis* ini disebabkan oleh kurangnya sinar matahari yang berakibat pada kandang menjadi lembab. Kelembaban kandang ini dapat memunculkan masalah pada kaki dan dada ayam pada pemeliharaan ayam secara intensif. de Jong dan van Harn (2012) menjelaskan bahwa pada awalnya terlihat seperti tanda kotor pada telapak kaki, dada, atau di bagian *hockjoint* namun kemudian berkembang menjadi luka yang menyakitkan yang memungkinkan masuknya bakteri yang dapat menimbulkan infeksi. Infeksi ini semakin meningkat dengan aktivitas yang selalu bersentuhan dengan litter yang lembab.

Pengamatan dan pengambilan data dilakukan pada umur 3 dan 6 minggu dengan mengambil sampel sebanyak 7 ekor per kandang pada umur

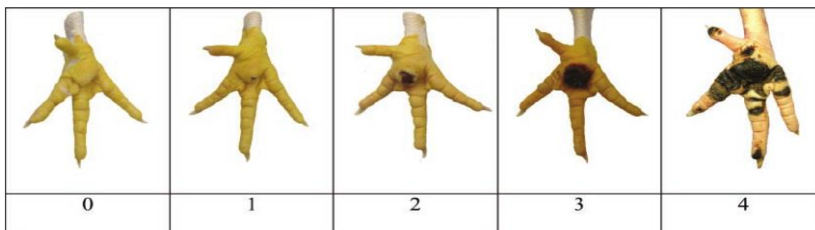
3 minggu dan 10 ekor pada umur 6 minggu (setelah dilakukan pemotongan ayam). Untuk mengukur *footpad dermatitis* dilakukan dengan menggunakan sistem *scoring* yang diambil dari *Welfare Quality* (2009), sebagai berikut.

Tabel 1. Skoring untuk Footpad Dermatitis

Skor	Deskripsi
0	Tidak ada luka sama sekali,
1	Terdapat luka kecil pada telapak kaki ayam
2	Terdapat luka sedang pada telapak kaki ayam
3	Terdapat luka besar pada telapak kaki ayam
4	Luka hampir memenuhi seluruh telapak kaki ayam

Sumber: *Welfare Quality*, 2009

Untuk lebih jelasnya, Gambar 2. menunjukkan kondisi *footpad dermatitis* pada ayam sesuai dengan deskripsi Tabel 1.



Sumber: *Welfare Quality*, 2009

Gambar 2. Kondisi Footpad Dermatitis pada Ayam

3. *Hockburn*

Hockburn merupakan penyakit yang disebabkan oleh penyebab yang sama pada penyakit *footpad dermatitis*, namun yang diserang adalah pada bagian *hockjoint*, atau pada bagian tulang lutut pada ayam. Pengukuran *hockjoint* atau *hockburn* dilakukan bersamaan dengan pengukuran *footpad dermatitis*, sehingga sampel yang digunakan juga sama, Sistem penskorannya sesuai dengan yang ada dalam *Welfare Quality* (2009) khusus untuk *hockburn*, sebagai berikut.

Tabel 2. Skoring untuk Hockburn

Skor	Deskripsi
0	Tidak ada bukti adanya luka pada <i>hockjoint</i> .
1	Terdapat luka kecil pada <i>hockjoint</i> ,
2	Terdapat luka sedang pada <i>hockjoint</i> .
3	Terdapat luka besar pada <i>hockjoint</i> .
4	Luka hampir memenuhi seluruh <i>hockjoint</i> .

Sumber: Welfare Quality, 2009

Untuk lebih jelasnya, Gambar 3. menunjukkan kondisi *hockburn* pada ayam sesuai dengan deskripsi Tabel 2.



Sumber: Welfare Quality, 2009

Gambar 3. Kondisi Kasus Pengamatan Hockburn

4. *Breast Blister*

Breast blister (BB) atau Lepuh Dada adalah peradangan pada *bursa sternum* di daerah dada. Biasanya terlihat pada ayam yang sakit atau terluka karena menghabiskan sebagian besar waktunya berbaring di bagian tulang dada. Hal ini juga terlihat pada ayam pedaging (broiler) komersial yang tidak dapat bergerak karena berat badannya yang berlebihan. Jangankan bergerak, berdiri pun sudah sulit dilakukan oleh ayam dengan berat badan berlebih. Seleksi yang ketat dan dilakukan terus menerus terhadap penambahan bobot badan pada ayam pedaging mengakibatkan peningkatan bobot badannya tidak terkendali. Hal ini menyebabkan terjadi ketidakseimbangan proporsi tubuhnya, juga terhadap organ-organ yang

tidak bisa menopang lagi mekanisme metabolisme dan menyebabkan kasus *acytes*, SMS (*Spiking Mortality Syndrome*), RSS (*Runting and Shunting Syndrome*), dan lain-lain.

Tingkat kejadian BB bervariasi dari ringan hingga parah, dan dapat mencakup kerontokan bulu dan peradangan hingga lepuh berisi cairan yang luas dan kadang-kadang berwarna putih. Pada kasus yang sangat parah harus dilakukan tindakan operasi pengeluaran eksudat tersebut. *Breast Blister* (BB) merupakan faktor penting yang mempengaruhi nilai atau kualitas karkas ayam pedaging. Pada ayam yang menderita BB, terdapat cairan lengket dan terlihat antara tulang *keel* dan kulit dada. Munculnya BB dipengaruhi oleh banyak faktor, misalnya pada saat berkembang biak, umur, dan faktor lingkungan. Tekanan, iritasi, atau gesekan terhadap *keel* berkontribusi terhadap perkembangan BB (Zhao, Geng, Li, Shi, & Zhao, 2009). Mereka juga menyatakan bahwa tipe lantai kandang memiliki pengaruh terbesar terhadap kejadian BB dibandingkan dengan kepadatan tebar (*stock density*).

Terjadinya BB lebih merupakan masalah manajemen daripada masalah penyakit menular. *Breast blister* (BB) biasanya terjadi pada unggas yang mempunyai badan besar seperti ayam jantan, kalkun dan ayam pedaging, yang menghabiskan banyak waktu beristirahat dengan bertumpu pada tulang dada mereka. Selain itu, litter yang basah atau lembab, adanya benda tajam atau kawat pada tenggeran, dapat berkontribusi besar pada terjadinya BB ini. Alas kandang panggung yang terbuat dari bilah bambu atau kayu (biasa disebut *slat*), atau yang menggunakan kawat (*wire*) juga memberikan kontribusi pada kasus terjadinya BB ini.

Penilaian BB dilakukan dengan pengambilan sampel sebanyak 7 ekor per kandang pada ayam yang berumur 3 minggu dan 10 ekor pada umur 6 minggu (setelah dilakukan pemotongan ayam). Jumlah sampel yang diambil berbeda karena untuk mengurangi terjadinya stres pada ayam umur 3 minggu dan pada umur 6 minggu diambil lebih banyak karena penelitian ini berakhir dan ayam langsung dipotong. Standar yang digunakan adalah seperti pada Gambar 3 yang diambil dari *Welfare Quality (2009)* tentang skoring khusus untuk BB.

Tabel 3. Skoring untuk Breast Blister

Skor	Deskripsi
0	Tidak ada bukti adanya luka pada dada
1	Terdapat luka kecil pada dada.
2	Terdapat luka sedang pada dada.
3	Terdapat luka besar pada dada.
4	Luka hampir memenuhi seluruh dada.

Sumber: Welfare Quality, 2009

Untuk lebih jelasnya, Gambar 4. menunjukkan kondisi *breast blister* pada ayam sesuai dengan deskripsi Tabel 3.



Sumber: Welfare Quality, 2009

Gambar 4. Kondisi Kasus Pengamatan *Breast blister*

PEMBAHASAN

1. Performa

Tabel 1 memperlihatkan hasil yang diperoleh dari kedua kelompok ayam penelitian. Kedua kelompok ayam memiliki performa yang sama, artinya pada ayam broiler yang dipelihara dalam jangka pendek (secara komersial hanya dipelihara sampai umur 5 minggu), dengan pemeliharaan secara intensif maupun dengan umbaran, menghasilkan bobot badan, konsumsi, penambahan bobot badan dan mortalitas yang sama. Hasil

berbeda ditunjukkan pada nilai konversi pakan dengan kandang intensif yang lebih efisien daripada kandang dengan umbaran. Kondisi ini dipengaruhi oleh kepadatan kandang yang masih cukup luas yaitu $2.5 \times 3 \text{ m}^2$ untuk 25 ekor ayam, sehingga ayam memiliki *space* yang cukup untuk bertumbuh dan melakukan aktivitasnya, misalnya makan, minum, istirahat dan bermain. Selain itu ayam yang dipelihara dalam kandang intensif memiliki kesempatan yang banyak untuk mengubah energi menjadi daging dibandingkan dengan ayam yang dipelihara dengan umbaran. Sementara itu, untuk ayam umbaran selain memiliki kandang untuk tidur, ayam memiliki aktivitas tambahan dengan mematok hijauan atau rumput yang tumbuh di tempat umbarannya. Rumput yang ditanam di tempat umbaran adalah gajah mini dan tanaman perdu yang disukai ayam. Umbaran yang disediakan juga bebas pestisida, insektisida dan bahan kimia yang dapat membahayakan ayam.

Tabel 4. Rerata Penampilan atau Performa Ayam (N=100)

No	Parameter	Kandang Intensif	Kandang Umbaran
1	Bobot badan awal (g/ek)	44	44
2	Bobot badan akhir (g/ek)	2527	2557
3	Pertambahan bobot badan (g/ek)	2483	2513
4	Total konsumsi (g/ek)	3963.88	4087.88
5	Konversi	1.59 ^a	1.63 ^b
6	Mortalitas (% , ekor)	6 (6)	1 (1)

^a dan ^b menunjukkan berbeda nyata ($P < 0.05$)

Hasil statistik dengan uji t yang dilakukan menunjukkan bahwa bobot badan akhir ayam pada kelompok kandang ayam intensif dan dengan umbaran tidak berbeda, meskipun data menunjukkan ayam pada kelompok kandang umbaran 30 gram lebih berat daripada kelompok kandang intensif. Total konsumsi dan pertambahan bobot badan ayam penelitian sama, namun nilai konversi yang diperoleh pada kelompok ayam dengan kandang umbaran nyata lebih besar daripada kelompok ayam yang dipelihara dengan kandang intensif (1.63 vs 1.59). Meskipun sebagian besar indikator

performa sama antar kedua perlakuan sistem kandang, namun secara nyata hasil pengamatan menunjukkan bahwa kelompok ayam dengan perlakuan kandang umbaran terlihat lebih sejahtera, lebih nyaman dan lebih sehat. Bisa dijelaskan ayam-ayam tersebut bebas mengekspresikan tingkah laku normal di kandang umbaran, yang merupakan salah satu indikator kesejahteraan ternak.

Manajemen pemeliharaan yang baik ditunjukkan dengan angka mortalitas yang kecil. Mortalitas pada penelitian ini menunjukkan tidak berbeda pada kelompok ayam yang dipelihara dengan kandang intensif maupun dengan umbaran, meskipun secara angka kematian banyak terjadi di kandang intensif (6% vs. 1%). Pada kelompok kandang umbaran ternyata ayam-ayam lebih sehat, lebih nyaman, tidak tertekan, tidak stres dan bebas dari sakit dan kesakitan, ditunjukkan dengan angka mortalitas yang kecil, 1 ekor dari 100 ekor. Indikator *Animal Welfare* (5 F atau 5 Free) terlihat dan ada pada kelompok ayam yang dipelihara dengan kandang umbaran; yaitu bebas dari rasa lapar dan haus, bebas dari rasa tidak nyaman, bebas dari rasa sakit, luka dan penyakit, bebas untuk mengekspresikan perilaku normal, dan bebas dari stres dan tertekan.

2. Kondisi Kesehatan

a. *Hockburn dan Footpad Dermatitis pada umur 3 minggu.*

Hasil yang diperoleh pada pemantauan saat umur 3 minggu ternyata terdapat perbedaan sangat nyata ($P < 0.001$) kejadian *hockburn* pada ayam umur 3 minggu antara pemeliharaan dengan kandang intensif dan dengan umbaran. Pemeliharaan dengan umbaran memiliki *hockburn* yang lebih banyak kejadiannya dibandingkan pemeliharaan intensif, hal ini dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rerata Pengamatan *Hockburn* dan *Footpad Dermatitis* Ayam Umur 3 Minggu

Keterangan		N	Mean Rank	Sum of Rank	Nilai P
<i>Hockburn</i>	Umbaran	28	33.50	938.00	0.007
	Intensif	28	23.50	658.00	
<i>Footpad Dermatitis</i>	Umbaran	28	30.02	840.50	0.159
	Intensif	28	26.98	755.50	

Kondisi ini disebabkan oleh adanya masa penyesuaian bagi ayam terhadap kandang dengan umbaran, karena mulai umur 2-3 minggu ayam yang tadinya dipelihara dengan sistem intensif mulai dilepas di umbaran yang ditanami rumput gajah mini. Masa penyesuaian ini berpengaruh terhadap kondisi *hockburn* yang tadinya menggunakan sekam kemudian berubah menjadi rumput yang tidak setebal dan selembut sekam.

b. *Hockburn, Foodpad Dermatitis dan Breast Blister* umur 6 minggu

Seperti pada kasus *hockburn* pada ayam umur 3 minggu, pada umur 6 minggu juga sangat berbeda nyata ($P < 0.01$) antara ayam yang dipelihara dengan kandang intensif dan dengan umbaran. Pemeliharaan dalam kandang dengan umbaran memiliki kasus *hockburn* yang lebih sedikit dibandingkan pemeliharaan intensif. Kondisi yang sama yaitu kasus *footpad dermatitis* terdapat perbedaan yang nyata ($P < 0.05$) pada ayam umur 6 minggu. Hal ini disebabkan pada ayam yang dipelihara secara intensif kondisi *litter* sekam yang ada menjadi semakin lembab dengan bertambahnya umur ayam.

Kondisi *hockburn* dan *footpad dermatitis* pada ayam umur 6 minggu ternyata berhubungan dengan kondisi *litter*, dimana pada umur 3 minggu seluruh kandang diganti dengan *litter* baru, namun ternyata penggantian *litter* tersebut tidak serta merta menjaga *litter* tetap dalam kondisi yang kering, karena pada umur 4 minggu *litter* sudah mulai basah sehingga dilakukan penambahan sekam lagi. Pada umur 5 minggu secara keseluruhan *litter* di kandang dengan umbaran terlihat lebih kering dan yang terlihat basah adalah *litter* yang ada di sekitar tempat air minum. Kandang dengan umbaran ini hanya digunakan pada malam hari saat ayam tidur karena siangnyanya ayam-ayam tersebut berkeliaran di tempat umbarannya. Sementara itu di kandang intensif *litter* sudah harus diganti karena kondisinya sudah sangat lembab dan basah. Meskipun di permukaan *litter* tampak kering, namun di bagian dalamnya sudah banyak belatung dan kandang banyak dikerumuni lalat. Keadaan *litter* yang seperti ini sangat mungkin untuk menjadi penyebab iritasi dan menimbulkan infeksi sehingga terjadi *hockburn* dan *footpad dermatitis*.

Disamping itu kandang dengan menggunakan umbaran yang alasnya menggunakan rumput gajah mini, dapat mengurangi infeksi akibat luka, sehingga mengurangi munculnya kasus *hockburn* dan *footpad dermatitis*. Hal ini seperti dikatakan oleh Shields dan Duncan (2008) dan Sans et al.

(2014) bahwa pemeliharaan ayam dengan sistem kandang umbaran dapat menurunkan terjadinya penyakit *hockburn* dan *footpad dermatitis*. Kaukonen et al. (2016) juga mengatakan bahwa kondisi *footpad dermatitis* semakin memburuk seiring dengan meningkatnya umur, apalagi bila tidak ditunjang dengan penggunaan *litter* yang baik atau kering. Kondisi *litter* yang lembab dapat terjadi karena nutrisi secara langsung mempengaruhi kotoran dan kelembapan kotoran, yang merupakan faktor predisposisi signifikan dalam perkembangan *foodpad dermatitis*. Literatur menunjukkan bahwa jenis dan pengelolaan *litter* merupakan komponen penting dalam menjaga alas kaki dan kesehatan unggas yang optimal (Shepherd & Fairchild, 2010).

Pada umur 6 minggu kondisi *breast blister*, *hockburn*, dan *footpad dermatitis* tidak terdapat perbedaan yang nyata pada ayam yang dipelihara dengan kandang intensif maupun dengan umbaran. Kondisi ini dapat dilihat pada Tabel 6. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan sistem kandang dengan umbaran yang memerlukan tambahan luasan kandang tidak diperlukan bagi pemeliharaan ayam broiler bila dilihat dari sisi kondisi *breast blister* dalam skala pemeliharaan kecil. Secara ekonomi kondisi daging bagian dada merupakan penentu utama kualitas karkas. Bila dilihat dari sisi biaya produksi, kondisi ini dapat menurunkan biaya pemeliharaan dengan catatan luasan kandang intensif sesuai dengan kondisi perkembangan ayam pada setiap minggunya. Meskipun menggunakan sistem umbaran, pada kandang tempat istirahat ayam harus pula dilihat kondisi *litter*nya, yaitu dibuang yang basah dan ditambah atau diganti dengan sekam kering. Kondisi *litter* ini sangat mempengaruhi kelembaban kandang, sehingga dengan mempertahankan kelembaban *litter* dapat mengurangi terjadinya luka atau iritasi yang dapat menimbulkan kasus *breast blister* (Zhao et al., 2009).

Tabel 6. Rerata *Footpad Dermatitis*, *Breast Blister*, dan *Hockburn* pada Ayam Umur 6 Minggu

Keterangan		N	Mean Rank	Sum of Rank	.Nilai P
<i>Footpad Dermatitis</i>	Umbaran	40	34.36	1374.50	0.014
	Intensif	40	46.64	1865.50	
<i>Breast Blister</i>	Umbaran	40	44.10	1764.00	0.078
	Intensif	40	36.90	1476.00	
<i>Hockburn</i>	Umbaran	40	32.89	1315.50	0.002
	Intensif	40	48.11	1924.50	

Penelitian ini masih perlu ditindaklanjuti pada peternakan dengan skala yang lebih besar dan dengan kepadatan yang lebih bernilai ekonomis. Hal ini mengingat bahwa ukuran kandang yang digunakan dalam penelitian ini masih belum memperhitungkan nilai ekonomis dan dengan kepadatan yang masih rendah. Artinya, penelitian lanjutan masih sangat memungkinkan dengan menambah lagi jumlah ayam.

Namun demikian, hal utama yang harus diperhatikan adalah cara mengelola kebersihan lantai kandang. Ayam pedaging dengan pertumbuhan yang sangat cepat dan pergerakan atau aktivitas yang lambat, akan membuat lantai kandang menjadi cepat basah dan lembap. Keadaan ini terbukti dengan kepadatan yang tidak tinggi pun lantai kandang sudah sangat lembap dalam waktu kurang dari 3 minggu. Bila kepadatan sesuai dengan standar dari jenis ayam yang dipelihara, maka sangat memungkinkan kondisi lantai akan semakin cepat basah dan lembap sehingga berakibat pada naiknya kejadian *footpad dermatitis*, *hockburn*, dan *breast blister*.

Perkembangan sains dan teknologi khususnya bidang peternakan ayam masih membutuhkan penelitian secara berkelanjutan. Hasil-hasil penelitian yang telah teruji akan dapat dimanfaatkan oleh para peternak untuk menghasilkan karkas atau daging ayam dengan kualitas yang lebih tinggi, yaitu yang memenuhi standar kesehatan pangan. Pangan berkualitas dibutuhkan untuk kehidupan manusia yang lebih berkualitas.

KESIMPULAN

Tidak ada perbedaan pertumbuhan (performa) dari kedua jenis perlakuan kandang, kecuali pada nilai konversi pakan, yaitu kandang dengan umbaran memiliki nilai konversi lebih tinggi daripada kandang intensif. Pengamatan *hockburn* yang terjadi pada ayam umur 3 minggu dipengaruhi oleh sistem pemeliharaan, sedangkan pada umur 6 minggu kejadian *hockburn* dan *footpad dermatitis* pada kandang dengan umbaran lebih sedikit dibandingkan dengan kandang intensif. Kejadian kasus *Breast Blister* tidak dipengaruhi oleh sistem pemeliharaan. Kasus *hockburn* lebih banyak terjadi pada kandang intensif umur 6 minggu daripada umur 3 minggu, sedangkan kasus *footpad dermatitis* banyak terjadi pada umur 6 minggu daripada 3 minggu baik pada kandang intensif maupun kandang dengan umbaran. Dari seluruh hasil dapat dilihat bahwa kondisi litter sangat mempengaruhi adanya *hockburn*, *footpad dermatitis*, dan *breast blister*, kondisi litter ini tetap berpengaruh meskipun pada usaha peternakan skala kecil dengan luasan kandang yang masih longgar (tidak padat) pada sistem pemeliharaan yang intensif maupun sistem kandang dengan umbaran.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, X., Jiang, W., Tan, H.Z., Xu, G.F., Zhang, X.B., Wei, S., & Wang, X.Q. (2013). Effects of outdoor access on growth performance, carcass composition, and meat characteristics of broiler chickens. *Poultry Science*, 92 (2), 435–443. <http://dx.doi.org/10.3382/ps.2012-02360>
- de Jong, I. & van Harn, J.(2012). *Management tools to reduce footpad dermatitis in broilers*. Aviagen. Wageningen University Research Centre.Lelystad. The Netherlands. Retrieved from <http://pt.staging.aviagen.com/tech-center/download/704/AviaTech-FoodpadDermatitisSept2012.pdf>
- Kaukonen, E., Norring, M. & Valros, A. (2016). Effect of litter quality on foot pad dermatitis, hock burns and breast blisters in broiler breeders during the production period. *Avian Pathology*, 45 (6), 667-673, DOI: 10.1080/03079457.2016.1197377
- Johan, K.P. (2010). Performa ayam broiler dalam kondisi kandang dengan suhu yang berbeda [skripsi]. Institut Pertanian Bogor.
- Luciole, L. (2017). Penyebab flek atau bubul pada ayam. Berita Ayam. Retrieved from <https://agensabungayamonline.com/penyebab-flek-atau-bubul-pada-ayam/>
- Shields, S. & Duncan, I.J.H. (2013). An HSUS Report: A Comparison of the Welfare of Hens in Battery Cages and Alternative Systems. The Humane Society of the United States. Retrieved from https://www.wellbeingintlstudiesrepository.org/hsus_reps_impacts_on_animals/18/
- Undang-undang RI No 41 Tahun 2014 tentang Perubahan atas UU RI No.18 Tahun 2009 tentang Peternakan dan Kesejahteraan Hewan.
- [Ditjen PKH] Ditjen Peternakan dan Kesehatan Hewan. Kementerian Pertanian. (2021). Statistik Peternakan dan Kesehatan Hewan 2020.

Retrieved from <https://ditjenpkh.pertanian.go.id/userfiles/download/18748813ab4f89601dedf7d3ee84e12.pdf>

Tandiabang, B. (2014). Tingkah laku ayam ras petelur fase *layer* yang dipelihara dengan sistem *free-range* pada musim kemarau [skripsi]. Makassar (ID). Universitas Hasanuddin.

Welfare Quality (2009). Welfare Quality assessment protocol for poultry (broilers, laying hens). Welfare Quality Consortium, Lelystad, Netherlands. Retrieved from <https://edepot.wur.nl/233471>

Sans, ECO., Frederici, J.F., Dahlke, F., & Molento, C.F.M. (2014). Evaluation of free-range broilers using the welfare quality protocol. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 16 (3), 297-306. Retrieved from <https://www.scielo.br/j/rbca/a/f7hZt5KBBXR8JSGmXcv3nWj/?format=pdf&lang=en>

Shepherd, E. M. & Fairchild, B. D. (2010). Footpad dermatitis in poultry. *Poultry Science*, 89 (10), 2043-2051. <https://doi.org/10.3382/ps.2010-00770>. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119390169?via%3Dihub>

Steel, R. G. D. & Torrie, J. H. (1995). Prinsip dan prosedur statistika. Edisi ke-4. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama (Diterjemahkan oleh B. Sumantri).

Vaarst, M. & Alrøe, H.F., (2012). Concepts of animal health and welfare in organic livestock systems. *J Agric Environ Ethics*, 25, 333–347. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s10806-011-9314-6>

Zhao, F.R., Geng, A.L., Li, B.M., Shi, Z.X., & Zhao, Y.J. (2009). Effects of environmental factors on breast blister incidence, growth performance, and some biochemical indexes in broilers. *The Journal of Applied Poultry Research*, 18(4), 699–706. Retrieved from <https://doi.org/10.3382/japr.2009-00018>.

**PENGARUH KOMPOS TANDAN KOSONG
KELAPA SAWIT DAN KOTORAN SAPI DENGAN PGPR
TERHADAP PRODUKSI PAKCHOI DI TANAH LATOSOL**

***EFFECT OF EMPTY FRUIT BUNCHES OF OIL PALM
COMPOST, COW DUNG MANURE AND PGPR ON
PAKCHOI GROWTH IN LATOSOL SOIL***

**Adhi Susilo¹, Tejo Susanto², Nurhidayat³
^{1,2,3}Program Studi Agribisnis, Jurusan Pertanian,
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
adhi@ecampus.ut.ac.id**

ABSTRAK

Pemanfaatan limbah pertanian menjadi agroinput merupakan upaya mewujudkan pertanian organik. Dibutuhkan penelitian secara berkelanjutan yang melibatkan berbagai variabel hingga menghasilkan inovasi pertanian, yang mampu menjawab permasalahan kini dan yang akan datang. Percobaan aplikasi kompos berbahan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan kotoran sapi yang dikombinasikan dengan Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) terhadap tanaman pakchoi (Brassica rapa L var. chinensis) di tanah berjenis latosol ini dilakukan menggunakan Rancangan Acak Kelompok Lengkap (RAKL) 2 Faktor. Faktor kompos terdiri dari 4 level dosis (0; 7,2; 14,4; 21,6 ton ha⁻¹) dan faktor PGPR terdiri dari 3 level dosis (0; 5; 10 liter ha⁻¹). Hasil analisis sidik ragam menunjukkan faktor perlakuan kompos dan PGPR berpengaruh sangat nyata pada α 0,01 dan Interaksi keduanya nyata pada α 0,05. Respon kuadratik ditunjukkan melalui perlakuan kombinasi kedua faktor tersebut. Aplikasi dosis 14,4 ton ha⁻¹ kompos tanpa PGPR adalah perlakuan terbaik dalam percobaan ini. Melalui pendekatan regresi polinomial ortogonal, diketahui pola hubungan dan interaksi antara kedua variabel independen. Melalui uji turunan parsial kedua, kombinasi dosis kompos 17,5 ton ha⁻¹ dan PGPR 1,2 liter ha⁻¹ merupakan kombinasi dosis yang sesuai dan respon terbaik dalam percobaan ini. Di era society 5.0, manusia sebagai pengendali teknologi; harus tanggap dan bijak dalam memutuskan inovasi yang mampu memberi solusi untuk peningkatan kesejahteraan manusia.

Kata Kunci: Pakchoi organik, kompos TKKS, kompos kotoran sapi PGPR.

PENDAHULUAN

Kegiatan budi daya atau *onfarm* sebagai salah satu subsistem dalam agribisnis memegang peranan penting sebagai sumber produksi penghasil komoditas pertanian. Tuntutan kebutuhan produk-produk pertanian yang aman, sehat, dan ramah lingkungan yang semakin meningkat dapat memantik para produsen yang bergerak di sektor *onfarm* ini untuk mengembangkan suatu kegiatan budi daya organik dimana di dalamnya tidak hanya mengejar peningkatan produksi semata, namun juga mulai memperhatikan variabel-variabel pendukung kesehatan pangan dan ekosistem pertanian, termasuk input yang digunakan dalam kegiatan produksinya.

Untuk menjawab tantangan tersebut, budi daya secara organik banyak dikembangkan dewasa ini. Menurut Widowati et al. (2018) dalam pertanian organik terdapat prinsip yang harus dipenuhi antara lain lahan yang digunakan harus bebas dari cemaran bahan agrokimia sintetis, tidak menggunakan benih/bibit *GMO (Genetically Modified Organisms)*, tidak menggunakan pupuk kimia sintetis, tidak menggunakan pestisida kimia sintetis, tidak menggunakan hormon tumbuh dan bahan aditif sintetis, dan penanganan pasca panen serta pengawetan bahan pangan dengan cara yang alami.

Selain itu, sebagai upaya untuk meminimalisir cemaran kimia maupun biologi yang dapat masuk ke lahan, kegiatan pengairannya juga memerlukan perhatian khusus. Lahan yang diperuntukkan untuk produksi secara organik dan untuk segmen pasar organik umumnya harus melalui prosedur sertifikasi lahan oleh Lembaga Sertifikasi Organik (LSO) yang ada di Indonesia (Institute, Alifa, & Kombas.id, 2019).

Sampai dengan tahun 2018 lahan di Indonesia yang telah dikonversi menjadi lahan organik mencapai 251.630,98 hektar, mengalami kenaikan dibandingkan dengan tahun-tahun sebelumnya. Luasan lahan yang bersertifikasi organik tersebut meliputi padi, kelapa, teh, kopi, jeruk, pisang, kakao, sayuran, dan buah tropis. Luas lahan yang digunakan untuk budi daya sayuran organik yang terdata pada tahun 2018 sekitar 122,01 hektar, mengalami penurunan dibandingkan periode 2014-2017 yang mencapai lebih dari 400 hektar (Institute et al., 2019). Penurunan ini bisa disebabkan karena beberapa faktor, seperti adanya operator organik baru yang belum mendaftarkan lahannya untuk disertifikasi, operator organik lama yang

tidak memperpanjang sertifikasinya, adanya beberapa komoditas pertanian baru di luar komoditas yang dibudidayakan menjadi primadona baru, kurang informasinya para pelaku usaha untuk melakukan budidaya secara organik, keengganan para pelaku untuk terjun ke segmen organik karena beberapa hal, dan sebagainya.

Dari sisi pasar, rantai distribusi sayuran organik relatif lebih pendek dibandingkan dengan sayuran nonorganik. Umumnya sayuran nonorganik untuk sampai ke konsumen, secara berurutan rantai perniagaan dimulai dari petani produsen kemudian ke pedagang pengumpul, pedagang besar, dan pedagang eceran. Sedangkan untuk sayuran organik relatif memiliki rantai yang lebih pendek, dari produsen langsung ke pedagang besar (super market) yang kemudian disalurkan ke para konsumen. Selain untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri, sayuran organik juga memiliki potensi ekspor yang besar.

Di era 4.0 sudah banyak para pelaku agribisnis melakukan terobosan pemasaran melalui berbagai aplikasi online, media sosial, atau *marketplace*, termasuk untuk komoditas sayuran. Terobosan ini sedikit banyak berpengaruh terhadap tata niaga untuk komoditas pertanian, misalnya dalam hal memperpendek rantai distribusi sayuran, yang berimplikasi terhadap naiknya margin pendapatan para pelaku bisnis/produsen sayuran.

Bila dilihat dari sisi harga, komoditas sayuran yang bersertifikasi organik memiliki tingkat harga yang lebih tinggi dan relatif stabil dibandingkan dengan sayuran nonorganik. Namun kondisi ini masih belum mampu untuk mendongkrak jumlah operator organik bila menilik dari data statistik pertanian organik di Indonesia.

Bila ditinjau di lapangan, sisi persaingan pasar dan label keorganikan sayuran di Indonesia terutama untuk produk-produk sayuran daun umumnya meliputi produk sayuran organik (dengan sertifikasi LSO), sayuran organik (klaim pelaku/tanpa sertifikasi LSO), sayuran nonorganik, dan sayuran yang dibudidayakan secara hidroponik. Sayuran nonorganik memiliki segmen pasar yang berbeda, sedangkan untuk komoditas sayuran organik dengan/tanpa sertifikasi LSO dan sayuran hidroponik, keduanya memiliki segmen pasar yang hampir sama dimana di mata produsen maupun konsumennya masing-masing memiliki keunggulannya.

Berdasarkan SNI 6729 Tahun 2016 tentang Sistem Pertanian Organik, istilah label organik untuk menyatakan bahwa suatu produk pertanian yang dihasilkan telah melalui proses produksi yang sesuai dengan standar sistem

pertanian organik dan disertifikasi oleh Lembaga Sertifikasi Organik yang telah diakreditasi. Pertanian organik bukan kegiatan pertanian yang hanya mengejar hasil semata, namun juga segala upaya yang dapat dilakukan untuk mendukung pelestarian lingkungan dengan tujuan jangka panjang menciptakan agroekosistem yang optimal, lestari, dan berkelanjutan.

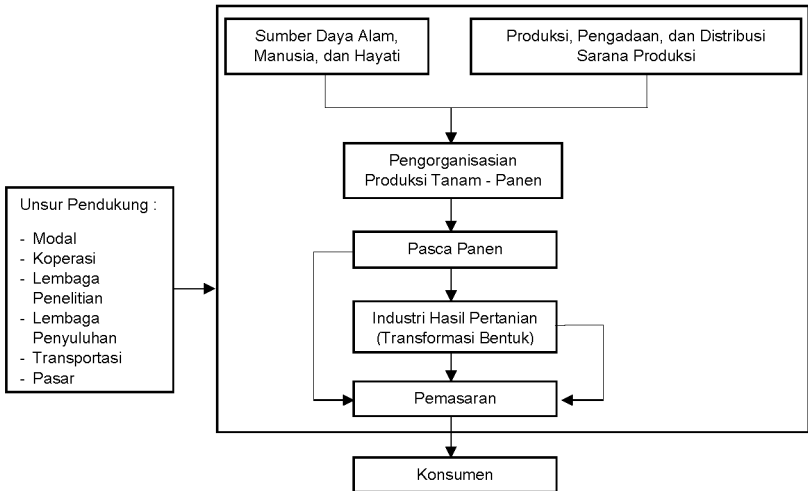
Budidaya sayuran organik merupakan salah satu bentuk budidaya tanaman hortikultura yang walaupun bukan makanan pokok namun memiliki kedudukan yang sangat penting sebagai salah satu komoditas sumber pemenuhan gizi, seperti pakchoi, bayam, kangkung, dan sebagainya. Pakchoi merupakan salah satu jenis sawi yang relatif digemari oleh sebagian masyarakat, pengembangan secara organik memiliki potensi yang menjanjikan untuk memenuhi permintaan segmen pasar sayuran organik.

Menilik data BPS (2021), produksi petsai dan sawi di Indonesia tahun 2020 mencapai 667.473 ton. Jumlah ini cukup besar dibanding dengan produk sayuran daun lainnya. Dari data global tersebut menunjukkan betapa besarnya potensi komoditas ini khususnya sawi jenis pakchoi untuk dikembangkan secara organik.

Pengembangan budi daya sayuran pakchoi secara organik merupakan suatu upaya dalam menyediakan pasokan pakchoi yang memenuhi kriteria sebagai pangan yang sehat dan aman. Di samping itu klasifikasi organik pada pakchoi sebagai salah satu produk primer dalam budi daya sayuran dapat mendorong kegiatan budi daya yang memperhatikan pelestarian keanekaragaman hayati dan agroekosistem yang optimal.

Produksi Pakchoi dan Pemanfaatan Limbah Pertanian

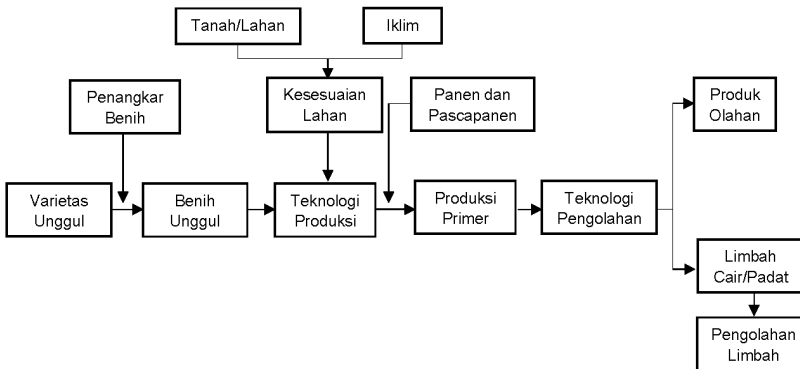
Konsep agribisnis merupakan suatu rangkaian usaha pertanian komersial yang mencakup pengadaan dan pendistribusian sumber daya, sarana produksi, dan jasa; kegiatan produksi tanaman; penanganan, penyimpanan, dan transformasi bentuk produk, dan transportasi pertanian; dan pemasaran (Widodo, 2016). Kunci dari produksi tanaman adalah menguasai rangkaian proses kegiatan budi daya tanaman atau agronomi.



Sumber: Widodo (2016)

Gambar 1. Agribisnis dan Komponennya

Dalam budi daya tanaman ada beberapa aspek agronomi penting yang sangat berkaitan dengan tingkat keberhasilan budidaya, aspek-aspek tersebut meliputi kondisi lahan/tanah, iklim, ekologi, fisiologi tanaman, varietas yang digunakan, teknologi produksi, hingga kegiatan pasca panen/pengolahan. Kemampuan dalam pengorganisasian sumber daya yang ada akan mempengaruhi produktivitas tanaman yang dibudidayakan.



Sumber: Widodo (2016)

Gambar 2. Proses Produksi Budi daya Tanaman

Indonesia memiliki beragam jenis tanah. Sekitar 10 Ordo tanah dari 12 Ordo tanah di dunia ada di Indonesia. Secara umum taksonomi tanah membagi tanah berdasarkan asal bahan induknya, yaitu tanah organik (histosol) dan tanah mineral (Subardja et al., 2016). Berdasarkan hirarki penetapan klasifikasi tanah nasional dalam Subardja et al. (2016), klasifikasi tanah terbagi berdasarkan bahan induk, tingkat kematangan dan perkembangan horison, dan jenis tanah. Jenis tanah latosol merupakan bagian perkembangan dari tanah mineral.

Tanah latosol merupakan tanah yang berkembang dari bahan vulkan intermedier-basis, memiliki kandungan liat $\geq 40\%$, remah, gembur, warna homogen, penampang tanah dalam, kejenuhan basa (KB) $< 50\%$ pada beberapa bagian horison B, mempunyai horison penciri A okrik (ketebalan ≤ 18 cm atau berwarna cerah) atau umbrik (ketebalan ≤ 18 cm atau berwarna gelap, kadar C organik $> 2,5\%$ atau $\geq 0,6\%$ lebih tinggi dari horison C, dan KB $< 50\%$), B kambik (tidak mempunyai kenaikan liat secara nyata, kapasitas tukar kation (KTK) liat > 16 cmol(+)/kg), dan tidak mempunyai plintit (mengandung kongkresi dan kerikil besi $\geq 5\%$ berdasarkan volume) dan sifat vertikal (mempunyai rekahan selebar $\geq 0,5$ cm sedalam ≥ 30 cm). Informasi tentang jenis tanah ini sangat penting karena dengan mengetahui kesesuaian jenis tanah/lahan akan sangat membantu dalam kegiatan produksi budi daya tanaman.

Pada sisi tanaman, pakchoi (*Brassica rapa L var. chinensis*) memiliki umur panen sekitar 40-60 hari setelah benih disemai, dapat tumbuh di dataran rendah maupun dataran tinggi, namun optimal di dataran tinggi (900-1.200 mdpl). Tumbuh dengan baik pada pH tanah 5,5-6 dengan sinar matahari yang cukup dan aerasi yang sempurna, pada suhu optimal 20-25°C (Setiawati, Murtiningsih, Sopha, & Handayani, 2007).

Pakchoi dapat tumbuh baik dengan kombinasi media tanam tanah *subsoil* latosol dan kompos pelepah kelapa sawit dengan perbandingan 2:1 dengan perlakuan aplikasi pupuk daun, pestisida nabati, asam humat dosis 3 gr per tanaman, dan *Trichoderma spp.* dosis 50 ml per tanaman (Rahhutami, Handini, & Astutik, 2021). Dalam budi daya secara organik, pengaplikasian agroinput non kimia sintetik mutlak diperlukan dan harus menyesuaikan dengan kondisi lahan yang akan digunakan untuk budidaya tanaman.

Dalam hal pertumbuhan tanaman, ketersediaan hara sangat dibutuhkan tanaman. Dalam hal ini limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan limbah ternak memiliki potensi sebagai penyedia hara. Sebelum diaplikasikan, limbah tersebut harus diproses lebih dahulu menjadi kompos melalui proses pengomposan dengan bantuan mikroba dekomposer (Ambarsari & Yulina, 2018). Selain itu, pemanfaatan agensi hayati yang dikemas dalam bentuk cair berupa *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) juga memiliki nilai agronomis dalam mendukung pertumbuhan tanaman.

Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) adalah bakteri tanah yang menghuni permukaan akar sebagai populasi yang secara kompetitif menjajah akar tanaman dan meningkatkan pertumbuhannya serta mengurangi penyakit tanaman (Nazir, Kamili, & Shah, 2019). Beberapa sifat yang terkait erat dengan PGPR, adalah sifat migrasi terus-menerus dan stimulasi pertumbuhan tanaman serta kemampuan biokontrolnya. Penggunaan PGPR telah terbukti menjadi metode berwawasan lingkungan untuk menumbuhkan hasil panen dengan memfasilitasi pertumbuhan tanaman baik melalui mekanisme langsung maupun tidak langsung. Mekanisme PGPR meliputi keseimbangan hormonal dan nutrisi yang dapat diubah, menginduksi konflik terhadap patogen tanaman, dan melarutkan nutrisi untuk penyerapan sederhana oleh tanaman. Dalam akumulasi, PGPR menggambarkan hubungan sinergis dan antagonis dengan mikroorganisme di dalam rizosfer dan di luar di tanah curah, yang pada akhirnya meningkatkan laju pertumbuhan tanaman.

Pemanfaatan limbah pertanian sebagai sumber hara dan mikroba fungsional sebagai agensi hayati pendukung pertumbuhan tanaman budi daya merupakan upaya pengoptimalan agroekosistem dalam rangka untuk menunjang produksi. Pemanfaatan ini juga sebagai langkah untuk meminimalisir input dari eksternal dengan mengolah biomassa atau limbah lokal spesifik menjadi agroinput.

Dalam perkebunan kelapa sawit yang melakukan integrasi dengan peternakan sapi, keberadaan limbah TKKS dan kotoran sapi tentu sangat berlimpah. Dengan melalui proses komposting, limbah-limbah tersebut akan memiliki nilai tambah sebagai penyedia hara dan pembenah tanah yang baik. Pemanfaatan mikroorganisme lokal melalui keterampilan dalam mengisolasi dan mengkulturkannya juga memiliki nilai lebih dalam pelaksanaan kegiatan pertanian yang berbasis organik ini.

Bagi masyarakat yang tinggal di sekitar perkebunan atau pabrik kelapa sawit, budi daya sayuran khususnya pakchoi bisa menjadi sumber pendapatan tambahan. Kualifikasi organik tentu bisa menjadi nilai tambah dan posisi tawar yang lebih baik dalam memasarkan sayuran pakchoi ini. Selain itu, untuk masyarakat perkebunan yang terletak di pedalaman dan jauh dari pasar dalam memenuhi kebutuhan untuk mendapatkan sayuran akan mudah terpenuhi jika di sekitar wilayah tersebut dilakukan kegiatan produksi sayuran khususnya pakchoi.

Pengaplikasian kompos dapat dilakukan jika kriteria kompos matang sudah dipenuhi yang secara fisik dapat dideteksi antara lain tidak berbau, tekstur remah, suhu normal, dan berwarna coklat kehitaman (Ambarsari & Yulina, 2018). Sedangkan penggunaan agensi hayati yang dikemas dalam bentuk cair berupa PGPR agar optimal dalam aplikasinya di lapangan harus memenuhi standaryang telah ditetapkan.

Kesuburan tanah mencakup kesuburan secara fisik, kimia, biologi; aplikasi pemberian bahan organik ke dalam tanah adalah suatu upaya untuk membangun kesuburan tanah. Kelimpahan bahan organik tentu sangat penting dalam mendukung kelimpahan mikroorganisme dan fauna tanah yang berimplikasi terhadap kesuburan tanah.

Berdasarkan Keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia No. 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 tentang Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenah Tanah terdapat beberapa parameter pada pupuk organik padat yang harus dipenuhi antara lain C-organik minimum 15%, C/N \leq 25, kadar air 8-20%, kadar hara makro N+P₂O₅+K₂O

minimum 2%, mengandung sejumlah unsur hara mikro, pH 4-9, cemaran *E. coli* dan *Salmonella sp.* $< 1 \times 10^2 \text{ cfu g}^{-1}$ atau MPN g^{-1} , dan sejumlah batas minimal cemaran logam berat yang harus dipenuhi.

Sedangkan pada pupuk hayati cair yang mengandung konsorsium mikroba lebih dari 2 genus, parameter yang harus dipenuhi antara lain mengandung bakteri fungsional; salah satu genus yang dikandung di dalamnya $> 1 \times 10^6 \text{ cfu ml}^{-1}$ (untuk kelompok bakteri), $> 1 \times 10^4 \text{ cfu ml}^{-1}$ (untuk kelompok aktinomiset), atau $> 1 \times 10^4 \text{ cfu ml}^{-1}$ (untuk kelompok fungi). Dan untuk genus-genus lain $> 1 \times 10^5 \text{ cfu ml}^{-1}$ (untuk kelompok bakteri), $> 1 \times 10^3 \text{ cfu ml}^{-1}$ (untuk kelompok aktinomiset), atau $1 \times 10^3 \text{ cfu ml}^{-1}$ (untuk kelompok fungi); tidak mengandung patogenisitas pada tanaman; dan cemaran *E. coli* dan *Salmonella sp.* $< 1 \times 10^3 \text{ cfu ml}^{-1}$.

Kompos TKKS mengandung hara makro N 1,6%; P 0,14%; K 2,53%; Ca 0,49%; Mg 0,26% dan sejumlah hara mikro. Sedangkan kompos dari kotoran ternak sapi mengandung N 2%; P 1,5%; K 2,2%; Ca 2,9%; Mg 0,7% (Hartatik & Widowati, 2006) dan sejumlah hara mikro. Keduanya merupakan komponen penting yang dapat dimanfaatkan sebagai agroinput pupuk organik dalam budidaya tanaman khususnya pakchoi (Ambarsari & Yulina, 2018).

Komponen agroinput pupuk lain yang dapat dimanfaatkan dalam kegiatan budi daya tanaman adalah PGPR, yang merupakan konsorsium mikroba perakaran tanaman yang memiliki kemampuan dalam mendukung tumbuh kembangnya tanaman. PGPR mengandung sejumlah mikroba penambat N, pelarut P dan K, mikroba yang mampu memproduksi siderofor, fitohormon, dan menunjukkan aktifitas ACC deaminase (Nazir et al., 2019; Wani & Gopalakrishnan, 2019; Yurnaliza, Hutapea, & Priyani, 2018).

Konsorsium mikroba pada PGPR dapat berupa mikroba yang berkarakteristik simbiotik atau non simbiotik. Konsorsium ini sangat beragam mikroba fungsionalnya sehingga sangat mendukung bila digunakan dalam kegiatan pertanian.

Menurut Nazir, Kamili, dan Shah (2019) dalam PGPR diantaranya terkandung mikroba IAA yang mampu memproduksi fitohormon eksogen, mikroba pelarut P dan K yang mampu mengkhelat ion-ion pengikat P dan K sehingga P dan K menjadi tersedia bagi tanaman, bakteri perombak/penambat nitrogen yang mampu memfiksasi N menjadi tersedia bagi tanaman (sekaligus sebagai pemain utama dalam proses terjadinya amonifikasi dan nitrifikasi), dan bakteri siderofor yang mampu mengkhelat

unsur Fe, Zn, dan Cu. Di samping itu, PGPR juga memiliki kemampuan sebagai agen biokontrol baik dari serangan patogen, cekaman hara, dan cekaman lingkungan.

PGPR yang memiliki banyak aktivitas yang diarahkan pada pemacu pertumbuhan tanaman dalam kaitannya dengan potensi bioremediasi dengan mendetoksifikasi berbagai polutan dan mengendalikan berbagai fitopatogen, telah menunjukkan hasil yang spektakuler dalam studi tanaman yang berbeda (Nazir et al., 2019). Efisiensi produktif PGPR tertentu dapat lebih ditingkatkan dengan optimasi dan aklimatisasi sesuai dengan kondisi tanah yang ada. Ke depan, PGPR diharapkan dapat menggantikan pupuk kimia, pestisida, dan zat pengatur tumbuh buatan yang memiliki banyak efek samping pada pertanian berkelanjutan.

Sedangkan untuk pengendalian hama dan penyakit tanaman, komponen agroinput yang dianjurkan dalam model pertanian organik adalah menggunakan pestisida yang berbasis organik/alami atau agen hayati. Dalam percobaan ini, salah satu komponen agroinput pengendali hama dan penyakit tanaman yang digunakan adalah asap cair (*liquid smoke*) dan agen hayati *Trichoderma spp.* Asap cair merupakan salah satu produk hasil kondensasi uap dari pembakaran pirolisis limbah pertanian yang banyak mengandung lignin, selulosa, dan hemiselulosa.

Pengaplikasian kompos berbahan TKKS dan kotoran ternak sapi dengan PGPR yang digunakan sebagai faktor dalam percobaan ini merupakan upaya pemanfaatan biomassa/limbah pertanian dan ternak sebagai sumber hara dan bahan organik, berbagai perlakuan kombinasi keduanya dilakukan bertujuan untuk mengetahui apakah terjadi sinergisitas di antara kedua faktor tersebut melalui respon tanaman pakchoi. Dengan berpedoman pada hasil panen sesuai ketentuan yang telah ditetapkan apakah ditemukan adanya pengaruh atau interaksi di antara keduanya sehingga diketahui kombinasi perlakuan dosis pemakaian yang sesuai.

METODE

Percobaan ini menggunakan Rancangan Acak Kelompok Lengkap (RAKL) 2 faktor, faktor A adalah aplikasi dosis kompos yang berbahan TKKS dan kotoran ternak sapi dengan 4 level (0; 7,2; 14,4; 21,6 ton ha⁻¹) dan faktor B adalah aplikasi dosis PGPR dengan 3 level (0, 5, 10 liter ha⁻¹). Dengan ulangan

dilakukan sebanyak 3 kali sehingga terdapat 12 kombinasi perlakuan dan secara keseluruhan berjumlah 36 satuan percobaan.

Data pengamatan yang diperoleh akan disajikan secara deskriptif dan dianalisis dengan dasar model aditif linier (Gomez & Gomez, 1984):

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \rho_k + \epsilon_{ijk}$$

Y_{ijk} = nilai pengamatan pada faktor A level ke- i (1, 2, 3, 4), faktor B level ke- j (1, 2, 3), dan kelompok ke- k (1, 2, 3); μ = rerata umum; α_i = pengaruh utama faktor A level ke- i (1, 2, 3, 4); β_j = pengaruh utama faktor B level ke- j (1, 2, 3); $(\alpha\beta)_{ij}$ = interaksi dari faktor A level ke- i (1, 2, 3, 4) dan faktor B level ke- j (1, 2, 3); ρ_k = pengaruh aditif kelompok; ϵ_{ijk} = komponen galat percobaan

Jika hasil analisis ragam menunjukkan perbedaan pengaruh yang nyata maka akan dilakukan uji lanjut dengan menggunakan uji lanjut perbandingan ganda Duncan (*Duncan Multiple Range Test/DMRT*). Bila pada interaksi faktor A dan B menunjukkan pengaruh yang nyata akan dilakukan analisis lanjutan dengan pendekatan *line graph* dan regresi polinomial ortogonal.

Dasar komputasi regresi polinomial menggunakan estimasi model regresi dengan menggunakan variabel-variabel yang terlibat sebagai berikut.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k$$

Dimana \hat{y} = estimator respon rata-rata; β = model parameter; x = variabel independen.

Komputasi dilakukan berdasarkan hubungan dan respon antar faktor yang ditunjukkan melalui analisis kontras polinomial ortogonal. Variabel-variabel yang memenuhi syarat akan ditransformasikan menjadi estimasi model di atas melalui penentuan matrix dan vektor.

Kemudian perhitungan prediktor x akan dilakukan melalui penentuan titik stasioner pada turunan parsial pertama dari estimasi persamaan yang terbentuk sebagai langkah awal, selanjutnya dilakukan uji turunan parsial kedua dengan menggunakan matrix Hessian (Weisstein, 2021) untuk mencari prediktor x yang dapat mencapai titik optimum dengan ketentuan:

1. Jika $D > 0$ dan $f_{x_1x_1} > 0$, maka berada di titik minimum lokal
2. Jika $D > 0$ dan $f_{x_1x_1} < 0$, maka berada di titik maksimum lokal

3. Jika $D < 0$, maka indefinit atau berada di titik pelana/*saddle point*
4. Jika $D = 0$, maka inkonklusif

1. Prosedur Percobaan

Percobaan ini dilakukan dengan kondisi sebagai berikut:

- a. Kombinasi perlakuan dalam desain faktorial ini terdiri dari 12 kombinasi dengan 3 ulangan/kelompok, dimana masing-masing kelompok terdiri dari 12 kombinasi perlakuan yang peletakannya dilakukan secara acak. Faktor A merupakan aplikasi dosis kompos yang berbahan TKKS dan kotoran ternak sapi (kode k) dengan 4 level (0; 7,2; 14,4; 21,6 ton ha⁻¹), masing-masing berkode a, b, c, d. Faktor B merupakan aplikasi dosis PGPR (kode p) dengan 3 level (0, 5, 10 liter ha⁻¹), masing-masing berkode 1, 2, 3. Diperoleh kombinasi K dan P sebagai berikut.

b.

kdp2	kap3	kdp3	kcp1	kcp3	kbp1
kbp2	kap2	kcp2	kap1	kdp1	kbp3

Kelompok 1

kbp2	kbp3	kdp2	kap1	kdp1	kdp3
kap3	kcp1	kcp2	kbp2	kap2	kcp3

Kelompok 2

kcp3	kbp3	kcp2	kdp2	kcp1	kbp1
kap1	kdp3	kap2	kap3	kdp1	kbp2

Kelompok 3

- c. Masing-masing petak berukuran 1x4 m² dalam bentuk bedengan dengan jarak antar bedengan sekitar 0,5 m, jarak tanam 20x25 cm, sehingga populasi tanaman pakchoi berjumlah 65 tanaman. Dalam percobaan ini terdapat 2.340 tanaman pakchoi.
- d. Lahan percobaan pernah bersertifikasi lahan organik dari LSO, memiliki jenis tanah *latosol* ber-pH 6,5 dimana pada kelompok 1 memiliki kandungan C-organik 1,36-1,68; kelompok 2 memiliki kandungan C-organik 0,63-0,98; dan kelompok 3 memiliki kandungan C-organik 0,40-0,58.
- e. Lahan berada di atas ketinggian sekitar 190 mdpl dan datar, pada saat percobaan dilakukan curah hujan memiliki tipe kering (Schmidt dan Fergusson) dengan suhu 25-34°C dan kelembaban udara 55-64%. Air

yang digunakan dalam penyiraman adalah sumber air tanah dengan rerata jumlah padatan terlarut (*TDS*) 116 ppm dan pH 6-7.

- f. Untuk bahan pupuk yang akan digunakan, disiapkan kompos dan PGPR sesuai dosis perlakuan kombinasi yang telah ditentukan kemudian dicampur hingga homogen sebelum diaplikasikan. Bahan kompos yang digunakan telah melalui proses pengomposan yang menggunakan bahan aktivator *Trichoderma spp.* dan *Phanerochaete spp.* sedangkan PGPR yang digunakan merupakan hasil kultur konsorsium mikroba perakaran tanaman sehat pada tanah *latosol*. Pada saat pencampuran dengan kompos (4 level dosis masing-masing 0, 5, 10, dan 15 kg yang dikonversi menjadi 0, 7,2; 14,4; dan 21,6 ton hektar⁻¹), dosis PGPR yang digunakan masing-masing 0, 3,47 dan 6,94 ml dalam 1 liter air (konversi dosis perlakuan 0, 5, dan 10 liter ha⁻¹).
- g. Bahan pestisida yang digunakan dalam percobaan ini adalah asap cair (*liquid smoke*). Asap cair merupakan produk hasil kondensasi uap dari pembakaran pirolisis limbah pertanian.

2. Tahapan Percobaan

Tahapan kegiatan percobaan meliputi:

a. Persemaian

Persemaian dilakukan dengan cara benih dicampur dengan bubuk *Trichoderma spp.* dengan cara dikocok dalam suatu wadah, kemudian ditanam dalam plot *tray* semai dengan media tanam kascing yang dibasahi merata dan secukupnya. Wadah semai diletakkan di dalam *green house* dalam rentang waktu 14 hari, secara periodik kelembaban media tanam benih dijaga dengan cara disiram jika kering.

b. Persiapan Lahan

Pengolahan tanah dilakukan 1 minggu sebelum kegiatan pindah tanam dilakukan dengan cara dicangkul sedalam 20-30 cm hingga gembur. Kemudian dibuat bedengan berukuran 1x4 m² dengan ketinggian sekitar 20 cm dan arah bedengan memanjang utara selatan dengan tujuan agar tanaman nantinya mendapatkan cahaya matahari yang cukup dan merata. Kegiatan pengapuran tidak dilakukan karena pH tanah sudah cukup ideal untuk pertumbuhan pakchoi. Pada kegiatan ini juga dilakukan pembersihan gulma jika terdapat gulma yang tampak di sekitar lahan yang akan digunakan.

c. Pemupukan

Kegiatan pemberian hara sekaligus untuk memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah dilakukan setelah persiapan lahan dilakukan. Bahan kompos dan PGPR yang telah disiapkan sesuai takaran kombinasi yang telah ditentukan ditabur merata ke atas bedengan kemudian dicangkul/aduk sehingga bahan-bahan tersebut tercampur secara homogen dengan tanah.

d. Penanaman

Bibit pakchoi yang berumur sekitar 14 hari dan telah berdaun 3-4 helai siap dipindah tanamkan ke bedengan. 1 bibit tanaman 1 lubang tanam, dengan jarak tanam 20x25 cm yaitu 20 cm (memanjang ke arah lebar bedengan) dan 25 cm (memanjang ke arah panjang bedengan).

e. Pemeliharaan

Kegiatan pemeliharaan meliputi penyiraman yang dilakukan secukupnya 2 kali sehari pada pagi dan sore atau 1 kali sehari pada sore hari dengan kondisi penyiraman yang sangat basah. Penyiangan gulma jika tumbuh gulma di sekitar petak-petak percobaan.

Sedangkan untuk pengendalian OPT (Organisme Pengganggu Tanaman) dilakukan dengan menggunakan asap cair (*liquid smoke*) menyesuaikan tingkat serangan hama yang terdeteksi. Dalam percobaan ini aplikasi asap cair dengan dosis 200 ml/ 14 liter air (kapasitas *knapsack sprayer* volume 14 liter) dilakukan 2 kali, yaitu 1 minggu setelah tanam (1 MST) dan 5 MST.

f. Pemanenan

Pemanenan dilakukan 43 hari setelah tanam (43 HST), penimbangan tanaman hasil panen dilakukan setelah melalui proses pasca panen dengan ketentuan sesuai permintaan pasar (layak pasar) berdasarkan spesifikasi yang telah ditentukan oleh mitra, seperti batang berwarna putih cerah, daun hijau segar, toleransi jika terdapat lubang pada daun maksimal 3 buah dengan diameter di bawah 0,5 cm, jika terdapat daun yang robek tidak lebih dari 1 cm, diameter batang 7-10 cm, tinggi tanaman 20-25 cm, panjang daun 15-20 cm, lebar daun 12-15 cm, panjang tangkai daun minimal 7 cm, dan akar dipotong.

g. Parameter

Parameter pengamatan yang berkaitan dengan respon pakchoi sebagai variabel dependen antara lain rerata/persentase jumlah tanaman layak

panen, rerata berat segar per tanaman, dan berat keseluruhan jumlah panen pakchoi pada tiap-tiap kelompok. Dari data persentase layak panen dan rerata berat segar per tanaman yang didapat akan disajikan secara deskriptif, sedangkan untuk data pengamatan jumlah panen pada masing-masing perlakuan akan dilakukan analisis sidik ragam untuk mengetahui pengaruh faktor kompos dan PGPR, jika pengaruhnya nyata akan dilanjutkan uji lanjut.

PEMBAHASAN

Dalam pengamatan terjadi serangan hama pada beberapa petak mulai minggu ke-1, khususnya di petak-petak kontrol namun secara umum masih bisa dikendalikan dan belum melewati ambang batas. Petak-petak dengan perlakuan kombinasi tanpa kompos dan PGPR (kap1) dan tanpa kompos dengan dosis PGPR 5 dan 10 liter ha⁻¹ (kap2, kap3) secara empiris menunjukkan serangan hama yang cukup signifikan dibandingkan dengan perlakuan kombinasi lain, jumlah persentase pakchoi layak pasar dan rerata berat segar tanpa akar dideskripsikan pada tabel di bawah ini.

Tabel 1. Rataan Hasil Panen Pakchoi Layak Pasar dari Masing-masing Kelompok/Ulangan (Dosis Kompos dalam Ton Ha⁻¹ dan PGPR dalam Liter Ha⁻¹)

Faktor Kombinasi		Kelompok			Rerata	%
Kompos	PGPR	1	2	3		
0	0	52	55	48	51,67	79,5
7,2	0	59	59	45	54,33	83,6
14,4	0	63	63	59	61,67	94,9
21,6	0	61	60	57	59,33	91,3
0	5	50	50	50	50	76,9
7,2	5	60	57	60	59	90,8
14,4	5	63	62	61	62	95,4
21,6	5	63	59	57	59,67	91,8
0	10	50	50	48	49,3	75,9
7,2	10	59	57	60	58,67	90,3
14,4	10	61	60	60	60,3	92,8
21,6	10	62	59	59	60	92,3

Persentase hasil layak panen yang dihasilkan pada penelitian ini berkisar antara 75,9% sampai dengan 95,4% menunjukkan kisaran yang sangat bervariasi dan belum mencapai hasil yang optimal. Variasi ini kemungkinan karena dalam percobaan ini hanya menggunakan pupuk organik saja, dimana pupuk organik secara utuh belum mampu memenuhi kebutuhan hara tanaman. Faktor lain yang cukup berpengaruh adalah cuaca yang cukup ekstrem pada saat penelitian, yakni paparan sinar matahari yang tinggi dan kondisi yang kering jika di siang hari. Kondisi ini mengakibatkan terganggunya aktivitas mikroba dan metabolisme tanaman, serta diduga mempengaruhi serapan hara dan terganggunya pertumbuhan tanaman sehingga tanaman tidak dapat tumbuh dan menghasilkan produksi sesuai dengan yang diharapkan.

Perlakuan pemberian dosis Kompos dan PGPR tertinggi (21,6 ton ha⁻¹ dan 10 liter ha⁻¹) pada semua parameter yang diamati menunjukkan kecenderungan menurunnya pertumbuhan dan produksi tanaman, dimana perlakuan ini berbeda dengan perlakuan pemberian kompos tanpa PGPR. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan pemberian pupuk tidak diikuti dengan membaiknya pertumbuhan tanaman, dan dapat disimpulkan bahwasanya sudah terjadi konsumsi mewah terhadap tanaman yang dibudidayakan. Menurut Schroth dan Sinclair (2003), tanaman yang memperoleh unsur hara dalam jumlah yang optimum serta waktu yang tepat, maka akan tumbuh dan berkembang secara maksimal.

Tabel 2. Rataan Berat Segar Per Tanaman (Gram) pada Masing-masing Kombinasi (Dosis Kompos dalam Ton Ha⁻¹ dan PGPR dalam Liter Ha⁻¹)

Faktor Kombinasi		Kelompok			Rerata
Kompos	PGPR	1	2	3	
0	0	189,4	168,6	184,4	180,8
7,2	0	217,8	216,3	273,6	235,9
14,4	0	240,3	231,1	239	236,8
21,6	0	240,1	233,3	247,4	240,3
0	5	192,4	190,8	190,2	191,1
7,2	5	217,1	228,8	204,2	216,7
14,4	5	232,4	233,9	230	232,1
21,6	5	239,1	238,9	245	241
0	10	200	186,8	187,9	191,6

Faktor Kombinasi		Kelompok			Rerata
Kompos	PGPR	1	2	3	
7,2	10	220,5	211,9	200,8	211,1
14,4	10	229	225	222,5	225,5
21,6	10	225	235,1	234	231,3

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa perlakuan pemberian beberapa dosis Kompos dan PGPR berbeda pada parameter berat segar tanaman. Hal ini mengindikasikan bahwasanya tanaman pakchoi sangat respon terhadap pemberian pupuk hingga batas tertentu, dimana pemberian Kompos dan PGPR 21,6 ton ha⁻¹ dan 5 liter ha⁻¹ merupakan dosis terbaik untuk pertumbuhan tanaman pakchoi sehingga terjadi peningkatan berat segar tanaman. Peningkatan berat segar tanaman tidak terlepas dari peningkatan unsur hara seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Unsur nitrogen sangat mempengaruhi pembentukan sel-sel baru, fosfor berperan dalam pengaktifan enzim-enzim pada proses fotosintesis dan kalium mempengaruhi perkembangan jaringan meristem yang dapat mempengaruhi panjang dan lebar daun. Pernyataan ini sesuai dengan Ross dan Salisbury (1974) bahwa nitrogen merupakan penyusun bagian terpenting dalam pembentukan sel-sel baru, asam amino, asam nukleat, sehingga pembentukan sel-sel baru bagi tanaman akan berlangsung dengan optimal dengan ketersediaan unsur ini. Menurut Bassi, Menossi, dan Mattiello (2018) Nitrogen (N) adalah komponen utama dalam proses fotosintesis dan banyak digunakan sebagai pupuk pada tanaman. Nitrogen memiliki peran dalam pembentukan klorofil. Terdapatnya klorofil yang cukup pada daun menyebabkan daun memiliki kemampuan untuk menyerap cahaya matahari, sehingga akan menghasilkan energi yang diperlukan sel untuk melakukan aktivitasnya seperti pembelahan dan pembesaran sel.

Peningkatan berat segar tanaman dipengaruhi oleh kadar air dalam jaringan dimana proses fisiologi yang berlangsung pada tanaman berkaitan erat dengan air dan bahan-bahan yang terlarut dalam air. Hal ini sejalan dengan pendapat Prawiranata and Tjandronegoro (1989) bahwa berat segar tanaman mencerminkan komposisi hara di jaringan dengan mengikutsertakan airnya. Air akan membentuk ikatan hidrogen dengan bahan organik seperti protein dan karbohidrat.

Gejala dan serangan hama yang terdeteksi dalam pengamatan pada 1 MST antara lain berupa belalang *Oxya spp.* dan *Acrida spp.*, kumbang *Phyllotreta spp.*, lalat *leaf miners Liriomyza spp.*, dan kutu daun *Myzus spp.*. Dalam jumlah yang kecil terdapat tanaman yang terserang penyakit *Turnip mosaic virus (TuMV)*, dengan gejala daun berbintik-bintik dengan bercak kuning dan warna daun hijau muda cerah, tanaman kerdil dan bengkok, pada batang dan tangkai daun terdapat lesi cekung dan coklat (Chaput & Cerkauskas, 2013).

Pada analisis ragam respon tanaman pakchoi terhadap perlakuan kombinasi kompos dan PGPR menunjukkan pengaruh yang sangat nyata pada level α 0,01. Sedangkan interaksi perlakuan kombinasi kompos dan PGPR menunjukkan pengaruh yang nyata pada level α 0,05. Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Dahlan, Puspita, dan Armaini (2015).

Tabel 3. Analisis Varian Kompos dan PGPR

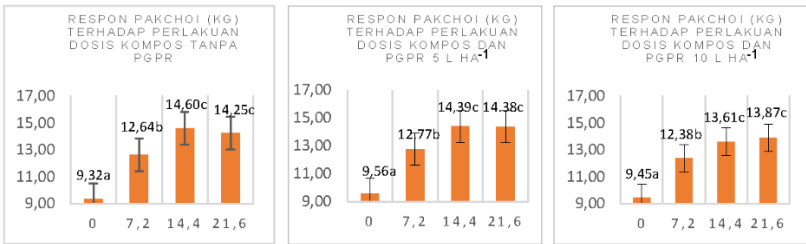
Keragaman	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F 0,05	F 0,01	Signifikansi
Kelompok	2	3,0149	1,5075	30,350**	3,443	5,719	< 0,0001
Kompos (k)	3	134,7159	44,9053	904,083**	3,049	4,817	< 0,0001
PGPR (p)	2	1,3722	0,6861	13,813**	3,443	5,719	0,0002
k x p	6	1,0013	0,1669	3,360*	2,549	3,758	0,0167
Galat kp	22	1,0927	0,0497				
Jumlah	35	141,1970					

Koefisien Keragaman = 1,7686%; Koefisien Determinasi (R^2) = 0,9923

Keterangan: ** berpengaruh sangat nyata pada taraf α 0,01;

* berpengaruh nyata pada taraf α 0,05

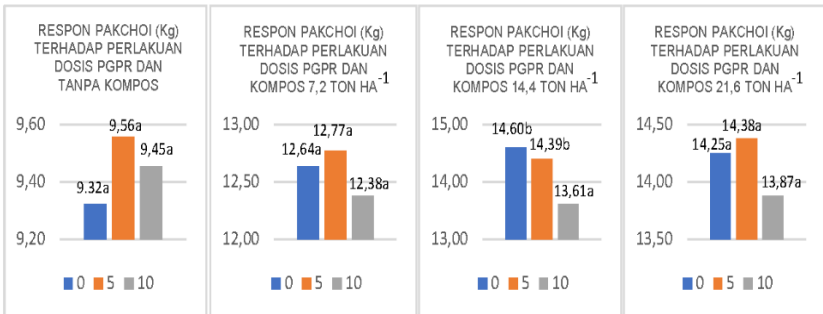
Melalui uji lanjut DMRT pada α 0,01 dan tabel dua arah pengaruh faktor kompos terhadap respon pakchoi menunjukkan perbedaan yang sangat nyata dibandingkan perlakuan tanpa kompos, begitupun ketika dosis aplikasi kompos dinaikkan dari 7,2 ton ha⁻¹ ke 14,4 ton ha⁻¹. Namun perbedaannya tidak nyata dan memiliki kecenderungan menurun ketika dosis aplikasi kompos dinaikkan menjadi 21,6 ton ha⁻¹.



Keterangan: Berdasarkan Uji Lanjut DMRT pada Taraf α 0,01; Angka yang Diikuti Huruf Berbeda Berpengaruh Sangat Nyata

Gambar 3. Pengaruh Perlakuan Dosis Kompos (ton ha⁻¹)

Sedangkan pada faktor PGPR, perlakuan yang dikombinasikan dengan perlakuan kompos menunjukkan kecenderungan berpengaruh antagonis berdasarkan respon yang ditunjukkan oleh variabel dependen. Perlakuan kompos 14,4 ton ha⁻¹ tanpa PGPR menunjukkan perbedaan sangat nyata dibandingkan dengan tambahan PGPR 10 liter ha⁻¹ dan pengaruh tidak nyata jika dibandingkan dengan tambahan PGPR 5 liter ha⁻¹.

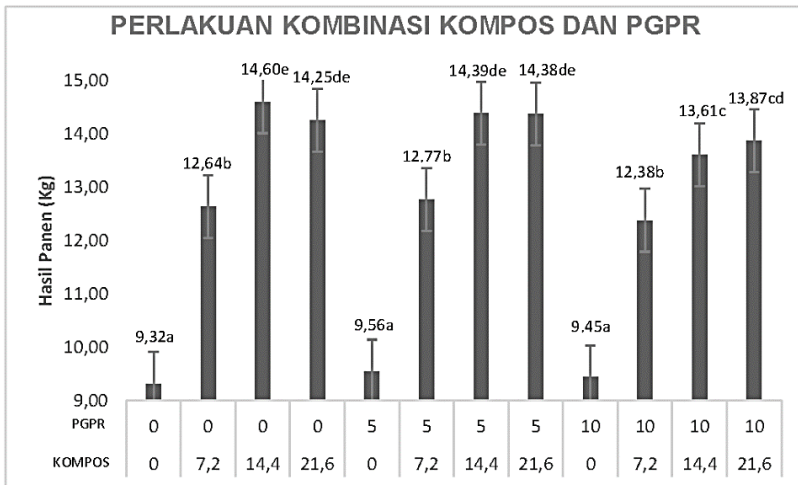


Keterangan: Berdasarkan Uji Lanjut DMRT pada Taraf α 0,01; Angka yang Diikuti Huruf Berbeda Berpengaruh Sangat Nyata

Gambar 4. Pengaruh Perlakuan Dosis PGPR (liter ha⁻¹).

Kompatibilitas atau sinergisme antar mikroba melalui perlakuan kombinasi ini sangat diharapkan; adanya sinergisme dalam konsorsium mikroba merupakan faktor yang penting agar mikroba-mikroba tersebut

dapat bekerja sama dengan baik (Asri & Zulaika, 2016; Rahayu & Zulaika, 2017). Secara keseluruhan respon pakchoi terhadap perlakuan kombinasi kompos dan PGPR disajikan melalui histogram di bawah. Perlakuan terbaik dalam percobaan ini yang ditunjukkan melalui respon pakchoi adalah perlakuan dosis kompos 14,4 ton ha⁻¹ tanpa pemberian PGPR.



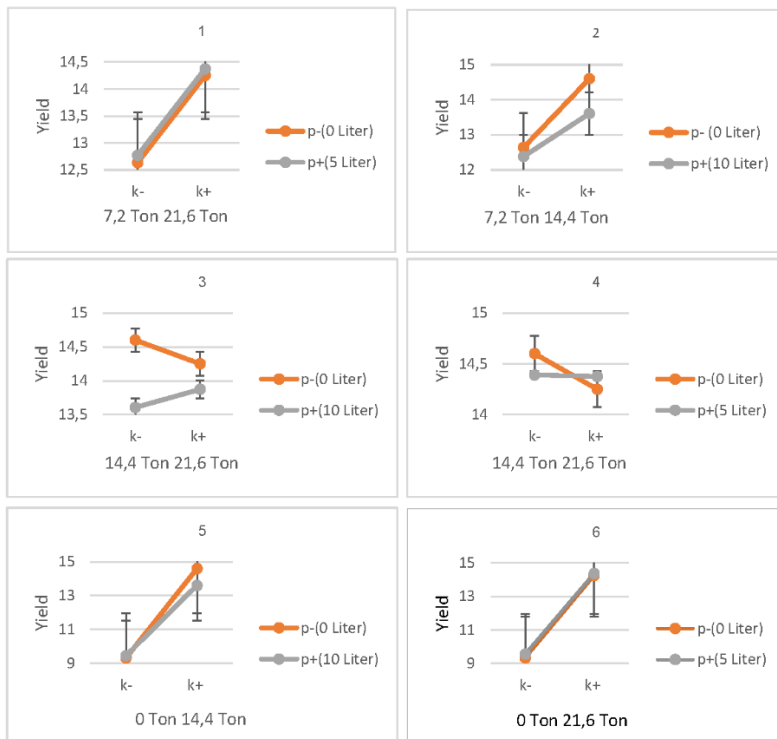
Keterangan: Berdasarkan Uji Lanjut DMRT pada Taraf A 0,01; Angka yang Diikuti Huruf Berbeda Berpengaruh Sangat Nyata

Gambar 5. Pengaruh Perlakuan Kombinasi Dosis Kompos (Ton Ha⁻¹) dengan PGPR (Liter Ha⁻¹)

Dari tabel Anova di atas interaksi antara faktor kompos dan PGPR juga menunjukkan pengaruh yang nyata pada taraf α 0,05. Melalui perhitungan pengaruh sederhana/*simple effect* (*se*), pengaruh utama/*main effect* (*me*), dan nilai interaksinya, semua perlakuan kombinasi menunjukkan interaksi yang nyata kecuali pada perlakuan kombinasi level dosis kompos dari 7,2 ton ha⁻¹ ke 21,6 ton ha⁻¹ dengan dosis PGPR dari 0 liter ha⁻¹ ke 5 liter ha⁻¹.

Pada model 36 grafik garis lurus (*line graph*) yang telah disusun, interaksi faktor kompos dan PGPR didominasi berbentuk linear dan menunjukkan kecenderungan menurun ketika dosis kompos dinaikkan dari 14,4 ton ke 21,6 ton ha⁻¹, namun dari perlakuan tersebut menunjukkan respon naik ketika dikombinasikan dengan dosis PGPR 10 liter ha⁻¹.

Beberapa model grafik garis lurus yang menunjukkan ada dan tidaknya interaksi antara faktor kompos dan PGPR melalui dosis perlakuan ditampilkan di bawah.



Keterangan: (1) Tidak ada interaksi ($me\ k = 1,61; me\ p = 0,13$); (2) Terdapat interaksi ($me\ k = 1,6; me\ p = -0,62$); (3) Terdapat interaksi ($me\ k = -0,18; me\ p = -0,04$); (4) Terdapat interaksi ($me\ k = -0,04; me\ p = -0,68$); (5) Terdapat interaksi ($me\ k = 4,72; me\ p = -0,43$); (6) Terdapat interaksi ($me\ k = 4,87; me\ p = 0,18$).

Gambar 6. Pola Interaksi Dosis Kompos TKKS dan PGPR

Untuk mengetahui gambaran lebih jauh tentang hubungan antara faktor kompos dan PGPR dalam percobaan ini maka dilakukan analisis varian melalui konstruksi kontras ortogonal. Dari analisis tersebut, diperoleh informasi tentang kontribusi dan hubungan antara 2 faktor tersebut yang digunakan dalam percobaan ini.

Tabel 4. Analisis Varian Lanjutan Faktor Kompos dan PGPR terhadap Respon Variabel Dependen

Sumber	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F 0,05	F 0,01	Signifikansi
Kompos (k)	3	134,7159	44,9053	904,083**	3,0491	4,8166	< 0,0001
Linier	1	111,9118	111,9118	2253,1318**	4,3009	7,9454	< 0,0001
Kuadratik	1	22,8006	22,8006	459,0473**	4,3009	7,9454	< 0,0001
Kubik	1	0,0035	0,0035	0,0698tn	4,3009	7,9454	0,7941
PGPR (p)	2	1,3722	0,6861	13,813**	3,4433	5,719	0,0002
Linier	1	0,84	0,84	16,9119**	4,3009	7,9454	0,0005
Kuadratik	1	0,5322	0,5322	10,7142**	4,3009	7,9454	0,0035
k x p	6	1,0013	0,1669	3,3599*	2,5491	3,7583	0,0167
Linier x Linier	1	0,3819	0,3819	7,6897*	4,3009	7,9454	0,0111
Linier x Kuadratik	1	0,0216	0,0216	0,4353tn	4,3009	7,9454	0,5162
Kuadratik x Linier	1	0,3775	0,3775	7,6003*	4,3009	7,9454	0,0115
Kuadratik x Kuadratik	1	0,0021	0,0021	0,0425tn	4,3009	7,9454	0,8385
Kubik x Linier	1	0,2176	0,2176	4,381*	4,3009	7,9454	0,0481
Kubik x Kuadratik	1	0,0005	0,0005	0,0103tn	4,3009	7,9454	0,9199
Galat kp	22	1,0927	0,0497				

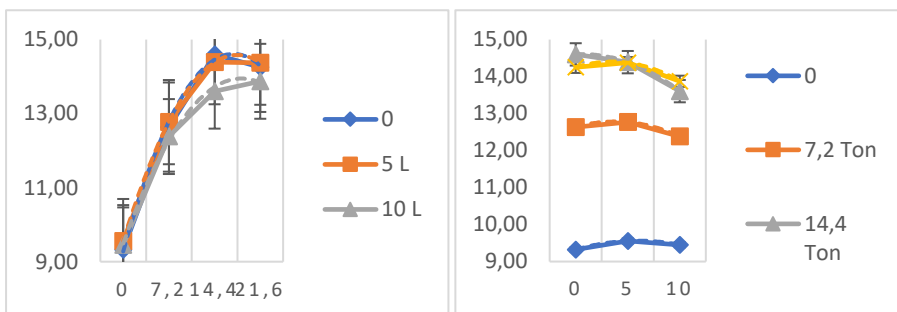
Keterangan: ** berpengaruh sangat nyata pada taraf α 0,01; * berpengaruh nyata pada taraf α 0,05; tn = tidak berbeda nyata

Berdasarkan analisis varian di atas, respon yang ditunjukkan oleh pakchoi sebagai variabel dependen memiliki kecenderungan kuadratik yang sangat nyata (α 0,01). Sedangkan pada taraf α 0,05 bentuk interaksi kompos x PGPR memiliki kecenderungan linier x linier dan kuadratik x linier yang nyata.

Jika masing-masing sebagai faktor yang berdiri sendiri dengan mengabaikan interaksi keduanya, maka melalui pendekatan regresi polinomial order 2 (kuadratik), didapatkan fungsi persamaan untuk masing-masing variabel kompos dan PGPR, $\hat{y} = 9,44 + 0,551x - 0,015x^2$ untuk kompos

dan $\hat{y} = 12,703 + 0,66x - 0,01x^2$ untuk PGPR. Dengan persamaan tersebut didapatkan titik optimasi 18,37 dan 3,3; artinya *yield* optimum pada percobaan ini (*ceteris paribus*) dapat dicapai dengan kombinasi dosis kompos dan PGPR masing-masing 18,37 ton ha⁻¹ (R² = 99,76%) dan 3,3 liter ha⁻¹ (R² = 98,87%).

Adanya pola interaksi antara keduanya, berdasarkan data analisis ragam di atas yang menarik adalah pola interaksi respon kompos dan PGPR, respon kubik pada kompos sebagai faktor yang berdiri sendiri menunjukkan tidak nyata namun dalam interaksinya dengan pola linier PGPR menunjukkan pengaruh yang nyata pada α 0,05. Sedangkan pada PGPR, respon liniernya sangat kuat dalam interaksinya dengan kompos.



Gambar 7. Pola Respon Variabel Dependen terhadap Perlakuan Kompos dan PGPR (ton ha⁻¹; liter ha⁻¹)

Untuk mendapatkan fungsi persamaan regresi yang sesuai dengan kondisi di atas kita dapat mengelompokkan bagian-bagian dari pola respon interaksi yang nyata yang ada di dalam tabel analisis ragam di atas. Pengelompokan tersebut akan membantu dalam menentukan *goal* penyesuaian dosis berdasarkan persamaan regresi yang akan kita buat.

Tabel 5. Respon Interaksi antara Kompos dengan PGPR

Pola Interaksi	Pengaruh	Variabel	Koefisien
Intersep			β_0
Kompos linier	Sangat nyata ($\alpha 0,01$)	x_1	β_1
Kompos kuadrat	Sangat nyata ($\alpha 0,01$)	x_1^2	β_2
PGPR linier	Sangat nyata ($\alpha 0,01$)	x_2	β_3
PGPR kuadrat	Sangat nyata ($\alpha 0,01$)	x_2^2	β_4
Kompos linier x PGPR linier	Nyata ($\alpha 0,05$)	$x_1 x_2$	β_5
Kompos kuadrat x PGPR linier	Nyata ($\alpha 0,05$)	$x_1^2 x_2$	β_6
Kompos kubik x PGPR linier	Nyata ($\alpha 0,05$)	$x_1^3 x_2$	β_7

Masing-masing variabel dapat diberi kode x , yang kemudian disusun menurut pola respon yang ditunjukkan. Berdasarkan data di atas didapatkan perkiraan model regresi polinomial untuk variabel kompos dan PGPR:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^2 + \beta_3 x_2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 + \beta_6 x_1^2 x_2 + \beta_7 x_1^3 x_2$$

dengan model tersebut melalui penentuan determinan matrix dan diperoleh estimasi nilai-nilai koefisien β sehingga didapatkan persamaan:

$$\hat{y} = 9,2465 + 0,61855x_1 - 0,01777x_1^2 + 0,1218x_2 - 0,01032x_2^2 - 0,00732x_1 x_2 - 0,00035x_1^2 x_2 + 0,00003x_1^3 x_2$$

Melalui turunan parsial pertama didapatkan prediksi titik stasioner x_1 dan $x_2 \approx (17,54; 1,2)$. Selanjutnya melalui uji turunan parsial kedua menurut Weisstein (2021), dari titik tersebut telah memenuhi ketentuan memiliki nilai maksimum relatif (definit negatif) dimana $f''_{x_1 x_1} < 0$ dan $D > 0$ melalui matrix Hessian.

Secara matematis, nilai x_1 dan x_2 yang mewakili variabel kompos dan PGPR di atas dapat direkomendasikan sebagai volume dosis yang sesuai dalam percobaan ini dengan asumsi *ceteris paribus*. Pendekatan di atas memperhatikan respon pakchoi sebagai variabel dependen dan mengakomodasi kompos dan PGPR dalam 2 posisinya, baik sebagai variabel yang independen maupun dalam interaksi keduanya.

Penelitian ini menerapkan metode regresi yang digunakan secara berulang-ulang pada setiap periode tanam hingga panen, untuk mempermudah dalam mengenali pola variabel-variabel yang dilibatkan. Pengenalan terhadap variabel yang dilibatkan dalam penelitian ini akan sangat membantu untuk menuju kegiatan pertanian yang semakin presisi di suatu wilayah dengan karakteristiknya.

Manusia sebagai sentral dalam era *Society 5.0* tentu harus tanggap dan bijak dalam memanfaatkan inovasi teknologi yang ada. Manusia adalah pengendali teknologi, termasuk dalam mengambil keputusan menindaklanjuti hasil-hasil penelitian yang dapat memberikan manfaat besar bagi kehidupan dan kesejahteraan manusia. Sikap manusia era *society 5.0* ini diharapkan dapat menyelesaikan permasalahan yang dihadapi tanpa mengabaikan permasalahan baru.

KESIMPULAN

Perlakuan kombinasi terbaik dalam percobaan ini adalah kombinasi dosis kompos berbahan TKKS dan kotoran ternak sapi dengan PGPR masing-masing $14,4 \text{ ton ha}^{-1}$ dan 0 liter ha^{-1} (tanpa PGPR). Melalui pendekatan regresi polinomial ortogonal berdasarkan sebaran data rerata respon pakchoi diketahui pola hubungan dan interaksi antara kedua faktor yang digunakan. Melalui uji turunan parsial kedua didapatkan perlakuan kombinasi dosis untuk mencapai hasil yang optimum, yaitu kompos $17,5 \text{ ton ha}^{-1}$ dan PGPR $1,2 \text{ liter ha}^{-1}$. Asumsi secara matematis ini berlaku dalam kondisi *ceteris paribus* mengingat begitu banyak faktor yang terlibat dalam budi daya tanaman.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambarsari, W., & Yulina, H. (2018). Pengaruh kompos sampah kota dan pupuk kandang sapi terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman pakcoy (*Brassica Rapa*, L. *Chinensis*) pada tanah aluvial kabupaten Indramayu. *Gema Wiralodra*, 9(2). doi:10.31943/gemawiralodra.v9i2.24
- Asri, A. C., & Zulaika, E. (2016). Sinergisme antar isolat Azotobacter yang dikonsorsiumkan. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 5(2), 57-59. doi:http://dx.doi.org/10.12962/j23373520.v5i2.20693
- Bassi, D., Menossi, M., & Mattiello, L. (2018). Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Scientific Reports*, 8(1), 2327. doi:10.1038/s41598-018-20653-1
- Chaput, J., & Cerkauskas, R. (2013). Insects, diseases, and disorders of asian vegetables. Ministry of Agriculture, food, and rural affairs Canada. Retrieved from <http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/00-095.htm>
- Dahlan, k. A., Puspita, F., & Armaini. (2015). Aplikasi beberapa dosis trichokompos tandan kosong kelapa sawit (TKKS) pada tanaman pakchoi (*Brassica rapa* L.). *Jurnal Online Mahasiswa*, 2(1).
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures in agricultural research*. New York: John Wiley and Sons.
- Hartatik, W., & Widowati, L. R. (2006). Pupuk kandang. In R. D. M. Simanungkalit, D. A. Suriadikarta, R. Saraswati, D. Setyorini, & Hartatik (Eds.), *Pupuk organik dan pupuk hayati* (pp. 58-82). Bogor: Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Institute, O., Alifa, Y., & Kombas.id. (2019). *Statistik pertanian organik Indonesia 2019*. Bogor: Aliansi Organik Indonesia.

- Nazir, N., Kamili, A. N., & Shah, D. (2019). Mechanism of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) in enhancing plant growth-A Review. *International Journal of Management, Technology, and Engineering*, 8(7), 709-721.
- Prawiranata, W., S. Harran , & Tjandronegoro, P. (1989). *Dasar-dasar fisiologi tumbuhan II*. Bogor: Fakultas Pertanian IPB.
- Rahayu, F. P., & Zulaika, E. (2017). Azotobacter sebagai agen biofertilizer berbentuk granul. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 6(2). doi:10.12962/j23373520.v6i2.25219
- Rahhutami, R., Handini, A. S., & Astutik, D. (2021). Respon pertumbuhan pakcoy terhadap asam humat dan Trichoderma dalam media tanam pelepah kelapa sawit. *Jurnal Kultivasi*, 20(2), 97-104. <https://doi.org/10.24198/kultivasi.v20i2.32601>
- Ross, C., & Salisbury, F. B. (1974). Plant physiology, 1947-1972. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 61(1), 112. doi:10.2307/2395187
- Schroth, G., & Sinclair, F. C. (2003). *Trees, crops and soil fertility: Concepts and research methods*: CABI.
- Setiawati, W., Murtiningsih, R., Sopha, G. A., & Handayani, T. (2007). *Petunjuk teknis budi daya tanaman sayuran*. Bandung: Balai Penelitian Tanaman Sayuran Kementerian Pertanian.
- Subardja, D. S., Ritung, S., Anda, M., Sukarman, Suryani, E., & Subandiono, R. E. (2016). *Petunjuk teknis klasifikasi tanah nasional*. Bogor: Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian Kementerian Pertanian.
- Wani, S. P., & Gopalakrishnan, S. (2019). Plant growth-promoting microbes for sustainable agriculture. *Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): Prospects for Sustainable Agriculture*, 19-45. doi:10.1007/978-981-13-6790-8_2

Weisstein, E. W. (2021). Second derivative test from MathWorld--A Wolfram Web Resource. Retrieved from <https://mathworld.wolfram.com/SecondDerivativeTest.html>

Widodo, W. D. (2016). *Dasar-dasar budi daya tanaman*. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka.

Widowati, L. R., Setyorini, D., Purnomo, J., Haryati, U., Wiratno, Samsudin, & Irawan. (2018). *Sistem budi daya sayuran organik*. Jakarta: IAARD Press.

Yurnaliza, Hutapea, A. J., & Priyani, N. (2018). The potency of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) of coastal Poaceae (phragmites karka) to stimulating of paddy (*Oryza sativa* L.) growth. Paper presented at the Proceedings of the International Conference of Science, Technology, Engineering, Environmental and Ramification Researches. <http://dx.doi.org/10.5220/0010088600670072>

ANALISIS KONVERSI LAHAN KELAPA SAWIT KE LAHAN PADI SAWAH

ANALYSIS OF LAND CONVERSION OF OIL PALM FARMING TO WETLAND

Timbul Rasoki¹, Ana Nurmalia², Lina Asnamawati³

^{1,3}Program Studi Agribisnis, Jurusan Pertanian,
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

²Program Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Dehasen
timbulrasoki@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Sektor pertanian khususnya komoditas pangan berperan penting dalam kedaulatan pangan. Di Indonesia sedang marak konversi lahan pertanian ke non pertanian, sementara itu di Kabupaten Mukomuko telah terjadi alih fungsi dari lahan perkebunan ke lahan sawah. Tujuan penelitian ini adalah menganalisa faktor yang mendorong dan mempengaruhi konversi lahan kelapa sawit ke padi sawah. Penelitian ini dianalisa menggunakan metode deskriptif dan kuantitatif. Hasil penelitian menunjukkan faktor-faktor yang mendorong konversi lahan dari kelapa sawit ke padi sawah di Kabupaten Mukomuko adalah ketersediaan air yang baik yakni sumber air irigasi Air Manjuntjo, pendapatan usaha tani padi, umur tanaman kelapa sawit, fluktuasi harga tandan buah segar (TBS), kebijakan pemerintah tentang program cetak sawah, persepsi positif masyarakat dan mekanisasi pertanian. Faktor-faktor yang secara signifikan mempengaruhi konversi lahan kelapa sawit ke padi sawah di Kabupaten Mukomuko adalah umur petani, jenis lahan dan kebijakan pemerintah terkait cetak sawah. Ketiga faktor tersebut menjadi pertimbangan dalam penentu pengambilan keputusan petani dalam melakukan konversi lahan. Salah satu faktor pendorong masyarakat untuk berkonversi ke lahan pangan karena mekanisasi pertanian yakni tersedianya teknologi yang mendukung efisiensi usaha tani padi sawah. Kondisi tersebut menggambarkan petani secara terbuka menerima perkembangan teknologi dan menjadi dasar kesiapan petani menghadapi konsep masyarakat yang berpusat pada manusia yang berbasis teknologi.

Kata Kunci: konversi lahan, kelapa sawit, padi sawah.

PENDAHULUAN

Sektor pertanian berperan penting dalam upaya membangun ekonomi nasional maupun daerah. Pertanian sebagai penyedia bahan pangan untuk ketahanan pangan masyarakat, sebagai instrumen pengentasan kemiskinan, penyedia lapangan kerja, serta sebagai sumber pendapatan masyarakat di berbagai sektor dari hulu hingga hilir. Sebagai negara agraris tidak heran sektor pertanian merupakan sektor yang paling banyak menyerap tenaga kerja, yakni sebesar 29,67% dari total 128,45 juta pekerja (BPS, 2020). Petani-petani memberikan kontribusi cukup besar bagi pertumbuhan perekonomian Indonesia. Terbukti saat krisis ekonomi yang dialami oleh bangsa Indonesia, sektor pertanian terbukti tangguh untuk menahan dampak dari krisis tersebut. Sektor pertanian berperan menyumbangkan devisa dari kegiatan ekspor komoditas pertanian. Peranan besar sektor pertanian Indonesia dalam pembangunan ekonomi menyebabkan kegiatan pertanian ini perlu adanya perhatian khusus terutama terkait semakin terbatasnya jumlah lahan pertanian yang memadai (Putra & Nasir, 2015).

Sektor non migas yang memegang peranan terpenting adalah pertanian sektor ini banyak memberikan sumber kehidupan bagi rakyat Indonesia. Hal tersebut dapat terlihat dari kondisi geografis Indonesia yang berpotensi untuk sektor pertanian. Sektor pertanian menyumbang pendapatan domestik regional bruto (PDRB) terbesar di Kabupaten Mukomuko yakni sebesar 43,64 persen, golongan pokok penyumbang PDRB tersebut mencakup tanaman pangan, tanaman hortikultura, tanaman perkebunan, peternakan, serta jasa pertanian (BPS, 2021). Sektor pangan membutuhkan dukungan lebih dari berbagai kalangan masyarakat guna mendukung program swasembada pangan. Sebagai negara agraris dan tentunya dengan dukungan segenap pihak, sudah sewajarnya Indonesia mampu menjadi negara swasembada pangan.

Berkaitan dengan upaya mewujudkan kemandirian dan kedaulatan pangan, Pemerintah Indonesia melakukan upaya-upaya untuk memperluas luasan sawah dengan memanfaatkan daerah-daerah yang memiliki lahan dan sumber air. Upaya tersebut harus disertai dengan pemberdayaan para petani guna meningkatkan kesejahteraan serta menstimulan para petani untuk berperan serta dalam upaya mewujudkan kemandirian pangan. Pada tahun 2018 pemerintah telah melaksanakan program cetak sawah dengan dukungan berbagai instansi pemerintahan (Kementerian Pertanian, 2018).

Wicaksono, et al. (2012), membenarkan kecenderungan konversi lahan memiliki dampak yang cukup serius terhadap produksi pangan, kesejahteraan masyarakat, serta lingkungan fisik pertanian. Konversi lahan menstimulasi pertumbuhan ekonomi (Barbier, 2007). Ruswandi et al. (2007) menyatakan konversi lahan mempengaruhi peningkatan pendapatan wilayah namun tidak kepada pelakunya, yaitu para petani. Pengamatan melalui perspektif historis dengan cermat dan terukur dalam kurun waktu yang relatif lama untuk memahami peristiwa konversi lahan wajib dilakukan sehingga fungsi lahan diharapkan dapat berkembang (Bruno et al., 2004).

Di Indonesia marak praktik alih fungsi lahan pertanian ke area non-pertanian, setiap tahun sekitar 60.000 ha lahan pertanian mengalami penyusutan. Rata-rata luasan lahan baku sawah berkurang sebesar 650 ribu hektar per tahun atau ekuivalen dengan 6,5 juta ton beras, dengan asumsi produksi beras sebesar 10 ton per tahun. Luas panen padi di Indonesia, pada tahun 2020 hanya mencapai 10,66 juta ha atau mengalami penurunan sebesar 0,19 persen dibandingkan dengan tahun 2019 yang sejumlah 10,68 juta ha atau 20,61 ribu ha (BPS, 2020). Lahan padi sawah merupakan salah satu faktor terpenting di dalam upaya menjaga dan meningkatkan ketahanan pangan di Negara Indonesia. Dengan bertambahnya pertumbuhan penduduk, tuntutan ekonomi, dan perkembangan zaman menjadikan eksistensi lahan pangan mulai terganggu. Permasalahan yang tidak dapat diabaikan adalah terkait dengan semakin banyaknya konversi lahan pangan ke berbagai penggunaan lain seperti industri maupun perkebunan (Astuti et al., 2011). Menurut Ilham et al. (2005), faktor-faktor yang menyebabkan konversi lahan adalah faktor ekonomi, faktor sosial, dan faktor peraturan pertanahan. Disisi lain, pertimbangan kemudahan dalam input produksi dan tenaga kerja juga menjadi salah satu yang lebih ditekankan oleh para petani untuk memutuskan konversi lahan, jarak lokasi dengan sumber daya alam sebagai input produksi dan sumber daya manusia.

Perkebunan di wilayah Kabupaten Mukomuko pada tahun 2017 mencapai 116.171,50 ha. Luasan perkebunan kelapa sawit mencapai 104.184 ha (89,68%) dari total besaran luasan lahan perkebunan di wilayah Kabupaten Mukomuko dengan tingkat produksi mencapai 350.633,28 ton (BPS, 2019). Fenomena ini menjadi perdebatan, perluasan lahan perkebunan kelapa sawit tersebut dianggap sangat bertentangan dengan visi dan misi dari kabupaten Mukomuko yang berbunyi "Kabupaten Mukomuko menjadi kabupaten yang mandiri pangan".

Namun dalam beberapa tahun terakhir banyak terjadi peralihan lahan yang awal mulanya perkebunan kelapa sawit beralih menjadi lahan padi sawah. Pada tahun 2019 kurang lebih sekitar 370 ha lahan di Mukomuko dialihfungsikan menjadi lahan sawah baru (Usman, 2019). Alih fungsi yang mulanya lahan kelapa sawit dan rawa di daerah tersebut selain ditujukan untuk meningkatkan produksi tanaman pangan yaitu beras, juga merupakan salah satu dampak dari menurunnya harga buah kelapa sawit di Bengkulu dalam beberapa tahun belakang. Masyarakat tidak memiliki semangat lagi untuk melakukan pengembangan di bidang kelapa sawit lagi, karena harga kelapa sawit yang menurun sangat drastis. Biaya operasional yang dikeluarkan oleh para petani kelapa sawit tidak dapat tertutupi oleh hasil penjualan kelapa sawit, terutama harga pupuk yang melonjak tajam dan terjadi pembengkakan biaya operasional (Usman, 2019). Dinas Pertanian Kabupaten Mukomuko juga menambahkan bahwa luas lahan perkebunan kelapa sawit terutama yang berada di daerah irigasi Air Manjuntjo berkurang seluas lebih kurang 3.000 ha. Mulanya 100.000 ha pada 2018 dan menjadi 97.000 ha pada tahun 2019.

Adanya konversi lahan menjadi penting karena dapat meningkatkan hasil produksi bahan pangan yakni beras sebagai sumber makanan pokok bagi penduduk Indonesia. Hal tersebut menjadi fenomena yang sangat menarik untuk diteliti. Di Indonesia sedang marak lahan pangan ke lahan perkebunan atau sektor non pertanian, sebaliknya di Kecamatan Lubuk Pinang, Kecamatan V Koto, Kecamatan XIV Koto dan Kecamatan Air Manjuntjo Kabupaten Mukomuko para petani kelapa sawit mengkonversikan lahannya ke padi sawah. Masyarakat yang sebelumnya menganggap bahwa usaha tani kelapa sawit lebih memiliki nilai ekonomi yang lebih tinggi ketimbang tanaman pangan khususnya padi sawah, kini mulai mempertimbangkan nilai ekonomi tanaman pangan khususnya padi.

Ayu dan Made (2015) mengungkapkan ada faktor-faktor yang dapat menstimulasi terjadinya konversi lahan yakni, rendahnya pendapatan usaha tani, pemilik lahan bekerja disektor lain, harga jual lahan, kegiatan adat, mengikuti perilaku masyarakat sekitar, lemahnya kelembagaan dan lemahnya implementasi pertanian. Suprianto et al. (2019) mengungkapkan faktor-faktor yang mendorong konversi lahan terbagi atas tiga faktor yakni teknis, ekonomi dan sosial. Faktor teknis terdiri dari kondisi dan kualitas sumber air, jenis lahan, kualitas kesuburan, indeks pertanaman (IP), kondisi iklim dan cuaca, serta produktivitas. Faktor ekonomi dibagi atas skala usaha

tani dan rentabilitas usaha tani. Faktor sosial terbagi atas persepsi masyarakat, persepsi generasi muda, dan fragmentasi lahan.

Untuk mendukung pencapaian kemandirian pangan Indonesia, sektor pertanian khususnya komoditas pangan perlu mendapat perhatian khusus. Salah satu fenomena yang perlu menjadi perhatian adalah konversi lahan pangan Indonesia ke lahan non pangan. Konversi lahan disebabkan berbagai permasalahan yakni teknis, ekonomi maupun sosial. Untuk mengatasi permasalahan sosial ekonomi, Indonesia harus siap menerapkan sebuah konsep masyarakat yang berpusat pada manusia yang berbasis teknologi (Masyarakat 5.0). Masyarakat 5.0 adalah konsep yang menyatakan bahwa teknologi akan hidup berdampingan dengan manusia untuk meningkatkan kualitas hidup secara berkelanjutan (Sugiono, 2020).

Faktor pendorong konversi lahan yakni faktor internal atau eksternal yang tersedia dan berpotensi memotivasi petani untuk melakukan alih fungsi lahan (Hastuty, 2017). Sementara itu, faktor-faktor yang mempengaruhi alih fungsi lahan adalah faktor yang secara signifikan telah teruji secara statistik berpengaruh terhadap terjadinya alih fungsi lahan. Melihat fenomena yang tak lazim, konversi lahan kelapa sawit ke lahan padi sawah maka penting untuk dilakukan analisa terkait faktor-faktor apa saja yang mendorong dan faktor-faktor yang secara signifikan berpengaruh terhadap terjadinya konversi lahan ke padi sawah. Konversi lahan kelapa sawit ke lahan padi sawah tersebut dianalisa untuk dapat dirumuskan menjadi informasi yang dapat dijadikan sebagai kebijakan konversi lahan. Hal lain yang perlu dilakukan yakni mengidentifikasi kesiapan petani terhadap konsep masyarakat 5.0 guna meminimalisir adanya kesenjangan pada manusia dan masalah ekonomi.

PEMBAHASAN

Konversi lahan yang terjadi di Kabupaten Mukomuko adalah perubahan penggunaan lahan dari kelapa sawit ke padi sawah. Untuk menganalisa lebih jauh terkait konversi lahan (faktor pendorong dan faktor yang mempengaruhi), maka perlu mendeskripsikan karakteristik wilayah dan responden sebagai gambaran dari obyek penelitian.

1. Karakteristik Wilayah dan Responden

Di Kabupaten Mukomuko khususnya Kecamatan Lubuk Pinang, Kecamatan V Koto, Kecamatan XIV Koto dan Kecamatan Air Manjuntjo. Kabupaten Mukomuko adalah salah satu Kabupaten terluar di Provinsi Bengkulu yang berbatasan dengan Provinsi Sumatera Barat. Secara geografis Kabupaten Mukomuko berada pada $101^{\circ}01'15,1''$ – $101^{\circ}51'29,6''$ BT dan pada $02^{\circ}16'32,0''$ – $03^{\circ}07'46,0''$ LS. Kondisi suhu udara Kabupaten Mukomuko berkisar antara $21,1^{\circ}$ C hingga mencapai $34,6^{\circ}$ C dengan curah hujan rata-rata 151,2 mm (BPS, 2021). Kondisi tersebut sesuai untuk pengelolaan kedua jenis lahan yaitu padi sawah dan kelapa sawit.

Data responden dan karakteristik petani berikut ini merupakan interpretasikan dari hasil observasi lapangan terhadap 211 responden atau petani. Responden merupakan petani, baik yang telah melakukan konversi lahan dari kelapa sawit ke padi sawah maupun yang tidak memutuskan untuk beralih fungsi lahan.

2. Karakteristik Responden

Karakteristik responden yang dibahas antara lain adalah umur petani (tahun), lama pendidikan terakhir (tahun), jumlah tanggungan keluarga (orang), luas areal lahan kelapa sawit (ha). Karakteristik responden perlu diamati untuk melihat keragaman dan klasifikasi responden yang memiliki potensi pengaruh baik langsung ataupun tidak langsung terhadap konversi lahan.

a. Umur Petani

Berdasarkan hasil penelitian, responden dalam penelitian ini berumur antara 22 – 67 tahun. Untuk lebih jelasnya mengenai penggolongan responden menurut umur dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Karakteristik Responden Berdasarkan Umur

No.	Umur Responden (Tahun)	Jumlah Responden (Orang)	Persentase (%)
1	22 - 35	35	16,6
2	36 – 49	125	59,2
3	50 – 63	50	23,7
4	> 63	1	0,5
Jumlah		211	100

Dari Tabel 1 tersaji mayoritas umur responden berada pada kisaran 36 – 49 tahun yakni sebesar 59,2 persen. Mayoritas data umur petani yang masuk dalam umur produktif yakni berkisar antara 15 tahun hingga 64 tahun. Umur seseorang juga bisa menjadi tolak ukur untuk melihat aktivitas para petani dalam bekerja (Hasyim, 2006). Selain itu semakin produktif usia petani juga akan mempengaruhi penerapan teknologi sehingga tentunya akan berpengaruh terhadap produksi komoditasnya. Sebagian bahwa besar responden di lapangan masuk ke dalam umur produktif sehingga memiliki potensi keberhasilan lebih banyak dalam aktivitas usaha taninya.

b. Pendidikan Terakhir

Berdasarkan hasil penelitian, lama pendidikan yang ditempuh oleh petani hingga menempuh pendidikan terakhirnya berkisar antara 0 hingga 17 tahun. Untuk lebih jelasnya mengenai penggolongan responden menurut pendidikan terakhir dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Karakteristik Responden Berdasarkan Pendidikan Terakhir

No.	Pendidikan Terakhir	Jumlah Responden (Orang)	Persentase (%)
1	Tidak pernah mengenyam pendidikan	1	0,5
2	SD	26	12,4
3	SMP	109	51,8
4	SMA	70	33,3
5	Perguruan Tinggi	5	2,5
Jumlah		211	100

Lebih dari 50% petani telah menempuh pendidikan terakhir yang telah melampaui batas himbauan pemerintah. Pemerintah Indonesia mewajibkan seluruh warganya untuk bersekolah minimum selama 9 tahun atau minimum tamat SMP. Arikunto (2013) menyatakan dengan menempuh sekolah setinggi-tingginya akan meningkatkan kemampuan diri seseorang dalam memutuskan tindakan. Salah satu hal yang mempengaruhi kesuksesan adalah pendidikan (Tambunan, 2003). Dengan demikian potensi keberhasilan konversi lahan usaha tani padi sawah lebih besar karena petani memiliki pendidikan yang cukup.

c. Jumlah Anggota Keluarga

Dari hasil observasi, jumlah anggota keluarga yang masih ditanggung oleh petani berkisar antara 3 orang hingga 6 orang. Untuk lebih jelasnya mengenai penggolongan responden menurut jumlah anggota keluarga dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Karakteristik Responden Berdasarkan Jumlah Anggota Keluarga

No.	Jumlah Tanggungan Keluarga (Orang)	Jumlah Responden (Orang)	Persentase (%)
1	1 – 2	8	3,8
2	3 – 4	114	54,0
3	5 – 6	83	39,3
4	7 – 8	6	2,8
Jumlah		211	100

Tabel 3 mendeskripsikan jumlah tanggungan keluarga yang terbanyak adalah di kisaran 3 – 4 orang yang mana mencapai hingga 54% dari total 211 responden. Sementara yang paling sedikit dengan jumlah tanggungan 7 – 8 orang. Jumlah tanggungan keluarga dinyatakan dapat mempengaruhi motivasi kerja petani dan mempengaruhi pengambilan keputusan. Semakin bertambah jumlah tanggungan keluarga, maka akan semakin banyak biaya yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan hidup anggota keluarga.

d. Luas Areal Lahan Kelapa Sawit

Berdasar hasil observasi, luasan lahan yang dimiliki oleh petani berkisar antara 0,5 ha hingga 10 ha. Untuk lebih jelasnya mengenai penggolongan responden menurut luas areal lahan kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Karakteristik Responden Berdasarkan Luasan Lahan

No.	Luas Lahan (ha)	Jumlah Responden (orang)	Persentase (%)
1	0,5 – 3,1	173	82,0
2	3,2 – 6,7	27	12,8
3	6,8 – 10	11	5,2
Jumlah		211	100

Sebagian besar petani (82%) petani memiliki lahan pada kirasan luasan terendah yakni 0,5 – 3,1 ha. Petani dengan luas lahan sedikit lebih termotivasi untuk beralih fungsi lahan demi memenuhi kebutuhan dan meningkatkan kesejahteraan (Nurhapsah, 2019). Petani yang memiliki lahan luas cenderung enggan untuk mengkonversi lahannya karena telah memiliki pendapatan dan kesejahteraan yang cukup.

e. Konversi lahan

Konversi lahan dari perkebunan kelapa sawit ke lahan padi sawah di Kabupaten Mukomuko khususnya di Kecamatan Lubuk Pinang, Kecamatan V Koto, Kecamatan XIV Koto dan Kecamatan Air Manjunto terjadi sejak tahun 2012 (Usman, 2019). Hal ini terjadi sejak ada kebijakan pemerintah yakni program cetak sawah. Program tersebut mencetuskan denah-denah lahan (peta lahan) yang harus dialihfungsikan menjadi lahan sawah, hal ini berkaitan dengan ketersediaan sumber air irigasi dan terkait undang-undang (UU) nomor 41 tahun 2009 tentang perlindungan lahan pertanian pangan berkelanjutan. Lahan-lahan yang tertera di dalam denah tersebut dicetak lahannya menjadi sawah oleh pemerintah.

Pada praktiknya konversi lahan tidak hanya terjadi pada lahan yang termasuk di denah program cetak sawah. Beberapa petani di sekitar irigasi Air Manjunto yang tidak termasuk ke dalam denah biru cetak sawah juga banyak yang mengalihfungsikan lahannya secara mandiri. Dari hasil survei lapangan pada tahun 2021 terdapat kurang lebih 100 petani yang mengalihfungsikan lahannya secara mandiri dan mengeluarkan biaya kurang lebih sebesar Rp.16.000.000,- untuk setiap hektarnya. Sedangkan masyarakat yang termasuk ke dalam program cetak sawah mendapat bebas biaya cetak sawah. Program tersebut dibiayai oleh APBN (Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara). Cetak sawah yang dilakukan Kementerian Pertanian di Kabupaten Mukomuko dilaksanakan dengan bantuan TNI (Tentara Negara Indonesia).

Program cetak sawah ini belum sepenuhnya rampung, diakibatkan oleh konflik dengan beberapa petani setempat. Dari target 1.000 ha cetak lahan pada tahun 2019 masih tersisa kurang lebih 300 ha lahan yang belum dicetak menjadi sawah. Konflik diakibatkan oleh pemilik lahan yang masuk dalam denah biru (peta cetak sawah) keberatan atas lahan yang akan dan telah di cetak sawahnya. Petani-petani yang keberatan dikarenakan lahan yang akan dan telah dicetak tersebut merupakan jenis lahan gambut. Lahan gambut

yang telah dicetak sawah merugi karena tidak sesuai untuk ditanami padi sawah. Beberapa petani pemilik lahan jenis gambut yang telah dicetak sawahnya kembali mengelola menjadi kebun sawit, karena tidak mau semakin merugi.

4. Faktor-Faktor yang Mendorong Konversi Lahan dari Kelapa Sawit ke Padi Sawah di Kabupaten Mukomuko

Faktor-faktor yang mendorong konversi lahan dari kelapa sawit ke padi sawah di Kabupaten Mukomuko adalah tersedianya irigasi teknis, pendapatan usaha tani padi sawah, umur kelapa sawit, fluktuasi harga tandan buah segar (TBS), kebijakan pemerintah, dan mekanisasi pertanian. Faktor-faktor tersebut penting untuk diidentifikasi secara deskriptif untuk mengetahui hal hal yang memotivasi petani untuk melakukan konversi lahan.

a. Tersedianya Irigasi Teknis Air Manjuntjo

Potensi budidaya padi sawah di Kabupaten Mukomuko didukung oleh sumber irigasi Air Manjuntjo. Data terkait panjang jaringan irigasi tingkat usaha tani irigasi Air Manjuntjo adalah sebagai berikut.

Tabel 5. Data Panjang Jaringan Irigasi Tingkat Usaha Tani Irigasi Air Manjuntjo

Lokasi	Panjang (m)
Daerah Irigasi Majuntjo Kiri	5750
Daerah Irigasi Selagan 1	10500
Daerah Irigasi Air Payang I 4.	4100
Daerah Irigasi Air Payang II 7.2	7250
Daerah Irigasi Gading Besar	6500
Daerah Irigasi Gading Kecil	8120
Teramang Kecil 1	1500
Air Buluh 7	750
Total	44470

Sumber: Peraturan Daerah Kabupaten Mukomuko Nomor 34 Tahun 2011.

Irigasi Air Manjunto juga mengalir di beberapa desa yakni Lubuk Angit sepanjang 600 m, Desa Air Payang I sepanjang 350 m, Sungai Besar 600 m, Selagan Kecil 275 m, dan Sungai Enau 150 m. Kondisi irigasi terpantau sangat baik karena dikelola secara berkelanjutan baik dari pemerintah daerah maupun pemerintah pusat (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat). Keberadaan irigasi sangatlah penting untuk mendukung ketersediaan pangan baik di daerah maupun secara nasional. Inilah yang menyebabkan irigasi Air Manjunto menjadi salah satu faktor pendorong terjadinya konversi lahan perkebunan ke lahan sawah. Hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan Suprianto et al. (2019) yang menyebutkan ketersediaan air merupakan faktor pendorong terjadinya konversi lahan. Terjadinya konversi lahan sawah menjadi non pertanian dikarenakan kondisi debit air irigasi tidak dapat mencukupi kebutuhan lahan sawah bagian hilir. Hal ini memunculkan dorongan di masyarakat untuk beralih fungsi ke lahan non pertanian.

Dari hasil wawancara didapatkan informasi bahwa para petani yang telah melakukan konversi lahan ke padi sawah aktif merawat dan secara berkala bergotong royong untuk membersihkan aliran air irigasi Air Manjunto. Para petani memahami pentingnya ketersediaan sumber air bagi sawah mereka. Gotong royong yang digalakkan oleh gapoktan (gabungan kelompok tani) tersebut rutin dilakukan sesaat sebelum musim tanam serentak dengan harapan agar air irigasi terawat dan debit air dapat terus mencukupi kebutuhan air lahan sawah.

b. Pendapatan Usaha Tani Padi

Dari hasil observasi dan pengolahan data primer terhadap pendapatan usaha tani padi sawah dan usaha tani kelapa sawit, diperoleh perbandingan pendapatan usaha tani padi sawah dan kelapa sawit di Kabupaten Mukomuko Provinsi Bengkulu. Usaha tani padi sawah menghasilkan pendapatan lebih besar yakni sebesar Rp.36.151.207 per usaha tani per hektar per tahun. Sedangkan rata-rata pendapatan usaha tani kelapa sawit menghasilkan sebesar pendapatan Rp.28.308.303 per usaha tani per hektar per tahun (Rasoki et al., 2020). Sehingga dapat disimpulkan bahwa pendapatan yang didapatkan oleh usaha tani padi sawah lebih besar daripada pendapatan yang didapatkan usaha tani kelapa sawit. Petani juga beranggapan hasil produksi padi sawah masih dapat disimpan apabila harga tidak stabil, bisa diolah dahulu menjadi beras agar memperoleh harga jual

lebih baik, tidak seperti hasil komoditi kelapa sawit (tandan buah segar) yang harus siap jual karena mudah rusak dan busuk. Selisih pendapatan yang cukup signifikan tersebut menyebabkan pendapatan usaha tani padi menjadi faktor pendorong konversi lahan ke lahan padi sawah.

Pendapatan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi konversi lahan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Ayu dan Made (2015) di Subak Kerdung, Kecamatan Denpasar Selatan menyimpulkan bahwa rendahnya pendapatan usaha tani padi sawah mendorong para petani untuk mengalih fungsikan lahannya menjadi lahan non pertanian. Hal ini sangat bertolak belakang dengan fenomena yang terjadi di Kabupaten Mukomuko, justru pendapatan usaha tani padi sawah mendorong alih fungsi lahan ke sektor pangan. Pendapatan usaha tani padi di Kabupaten Mukomuko khususnya di sekitar irigasi Air Manjuntio mendorong petani untuk melakukan konversi lahan. Berdasarkan keterangan Dinas Pertanian Kabupaten Mukomuko setempat hasil produktivitas lahan petani padi sawah sangat baik dapat menghasilkan gabah sampai dengan 6 ton/ha sekali musim tanam. Bahkan keterangan langsung dari petani menyebutkan beberapa petani menghasilkan hingga 8 ton/ha gabah.

c. Umur Tanaman Kelapa Sawit

Rata-rata umur tanaman kelapa sawit pada lahan milik petani yang telah melakukan konversi lahannya adalah 21,1 tahun. Umur tanaman mempengaruhi kemampuan produksi suatu tanaman sehingga menjadi salah satu faktor pendorong terjadinya konversi lahan ke padi sawah. Produktivitas TBS terus meningkat sampai pada titik optimum yaitu 12 tahun. Saat tanaman berumur 13 tahun mulai terjadi sedikit penurunan produktivitas, sehingga para petani wajib memberikan nutrisi. Pemberian nutrisi tanaman kelapa sawit agar produktivitas tetap terjaga dan meminimalisir terjadinya penurunan produktivitas dari tahun ke tahun (Tampubolon, 2016). Rata-rata umur tanaman kelapa sawit lebih dari 20 tahun (melewati batas usia produktif terbaik kelapa sawit) sehingga menstimulan para petani untuk mengalihfungsikan lahannya ke komoditas lain yang dianggap lebih menguntungkan.

Sejalan dengan penelitian Nurhapsah (2019) yang menyatakan bahwa salah satu faktor pendorong konversi lahan di antaranya adalah faktor produksi dimana menurunnya hasil produksi dari petani yang dikarenakan umur tanaman yang sudah tua. Menurut Risza (2009), produktivitas

tanaman kelapa sawit sangat dipengaruhi oleh umur tanaman. Semakin besar perbandingan komposisi umur tanaman remaja dan tanaman tua, semakin rendah produktivitas per hektarnya. Semakin tinggi umur tanaman kelapa sawit maka biaya yang akan dikeluarkan untuk menjaga produktivitas juga akan semakin besar dan tentunya produktivitasnya pun tidak akan sebesar saat titik optimum.

d. Fluktuasi Harga Tandan Buah Segar

Harga TBS di Indonesia khususnya di Kabupaten Mukomuko yang mengalami pasang surut, membuat masyarakat mengubah fungsi lahan ke tanaman yang dianggap memiliki harga lebih stabil. Berdasarkan keterangan responden, harga TBS di Kabupaten Mukomuko pada tahun 2018 pernah terpuruk sampai pada titik terendah yakni Rp.800,-/kg hingga Rp.400,-/kg bahkan petani sampai tidak melakukan aktivitas pemanenan karena menganggap biaya operasional tidak sesuai dengan penerimaan yang diperoleh. Akhir Mei 2020 harga TBS kembali terpuruk di harga Rp.800,- /kg, kemudian meningkat menjadi di atas Rp.1.000,- /kg. Kendati demikian, hingga saat ini harga TBS masih mengalami pasang surut. Rendahnya harga tersebut tidak dapat ditanggulangi dengan penyimpanan untuk menunggu harga naik, karena jika TBS yang sudah masuk masa panen tidak langsung dijual akan busuk. Harga TBS rentan mengalami fluktuasi yang tinggi saat musim hujan dan musim kemarau, serta hukum permintaan dan penawaran.

Perbedaan dan fluktuasi harga TBS di daerah masing-masing sering kali terjadi, hal ini sering disebabkan oleh permainan harga oleh oknum perkebunan (Bahari, 2014). Fluktuasi harga TBS juga dipengaruhi ketidakstabilan harga minyak sawit mentah. Ketidakstabilan harga disebabkan oleh pengaruh ekonomi global terutama saat pandemi Covid 19. Dampak dari Covid 19 menyebabkan sebagian besar pabrik tidak beroperasi beberapa waktu dan mengakibatkan keterpurukan ekonomi baik nasional maupun internasional.

e. Kebijakan Pemerintah

Program pencetakan sawah baru menjadi salah satu program pembangunan pertanian oleh Kementerian Pertanian. Konversi lahan kelapa sawit menjadi lahan padi sawah secara besar-besaran didasari oleh kebijakan program cetakan sawah di Kabupaten Mukomuko. Program cetak

sawah ini merupakan salah satu penerapan dari Undang-Undang No. 41 Tahun 2009 tentang perlindungan lahan pertanian pangan berkelanjutan. Program cetak sawah dilakukan dengan melakukan cetak sawah pada lahan-lahan yang menurut undang-undang memang diperuntukkan lahan pangan. Program cetak sawah tersebut dilakukan tanpa ada pungutan biaya dan petani diberi bantuan benih sebesar 20 kg/ha.

Petani mendapat binaan secara intensif dan mendapat fasilitas dengan bantuan untuk keperluan sarana produksi pertanian agar petani dapat mengusahakan lahan sawah tersebut secara berkelanjutan. Program cetak sawah ini diharapkan dapat mewujudkan kecukupan pangan nasional, meningkatkan kesejahteraan dan pendapatan petani, serta meningkatkan perekonomian wilayah (Kementerian Pertanian, 2018).

f. Persepsi Masyarakat

Persepsi masyarakat apabila memiliki lahan sawah dan kelapa sawit sekaligus dianggap sebagai salah satu indikator masyarakat dengan status ekonomi baik. Kebutuhan ekonomi masyarakat bisa dipenuhi dari hasil produksi kelapa sawit; sementara itu kebutuhan pangan sekaligus ekonomi diperoleh dari hasil produksi padi sawah. Disisi lain, budidaya padi sawah dapat menyerap lebih banyak pekerja dibanding dengan usaha tani kelapa sawit, sehingga usaha tani padi sawah dianggap lebih memberikan dampak sosial dan ekonomi yang lebih positif bagi masyarakat sekitar.

Menurut Kurniadi (2019) persepsi berasal dari pengalaman pola-pola perilaku manusia, persepsi mereka tentang realitas (sosial) yang dipelajari, diamati individu yang terikat dalam kesatuan masyarakat hukum dapat merubah cara pandang dan perilaku. Persepsi positif terhadap usaha tani padi sawah mendorong masyarakat untuk berbondong-bondong mengalihfungsikan lahannya ke padi sawah. Persepsi adalah segala sesuatu yang dirasakannya baik positif atau negatif tentang sesuatu hal yang menjadi pandangan diri seseorang. Dengan kata lain, persepsi adalah interpretasi terhadap rangsangan yang diterima dari lingkungan yang bersifat individual; meskipun stimulus yang diterimanya sama, tetapi karena setiap orang memiliki pengalaman yang berbeda, kemampuan berpikir yang berbeda, maka hal tersebut memungkinkan terjadi perbedaan persepsi pada setiap individu.

6. Mekanisasi Pertanian

Usaha tani padi sawah dikenal sebagai usaha tani yang membutuhkan biaya operasional yang besar dan memakan tenaga serta waktu dalam pengelolaannya, yakni pada proses pengolahan lahan, penanaman dan proses pemanenan serta perontokan padi. Di daerah penelitian diketahui mekanisasi pertanian telah mendorong terjadinya alih fungsi lahan. Beberapa peralatan modern telah digunakan petani. Berbagai alat yang diadopsi petani antara lain adalah;

- a. Traktor; alat ini membantu petani dalam mengolah sawah, sebelum proses penanaman. Sebagian besar petani di Kabupaten Mukomuko telah menggunakan traktor sebagai alat bajak sawah.
- b. Alat tanam padi (*Transplanter*); alat yang digunakan untuk menanam bibit padi ke lahan sawah. Hanya sebagian kecil petani yang menggunakan alat ini karena dianggap menggunakan tenaga kerja / buruh masih lebih efisien dan membantu perekonomian masyarakat.
- c. *Combine Harvester*; merupakan alat pemanen padi, sebagian besar petani menggunakan mesin ini karena dianggap efisien dan mempercepat proses pemanenan.
- d. *Mesin Thresher*; merupakan alat perontok padi, sebagian besar petani juga telah menggunakan mesin ini karena dianggap efisien dan mempercepat proses pemanenan.

Bisa disimpulkan para petani di wilayah Mukomuko adaptif terhadap teknologi. Para petani menggunakan atau menyewa beberapa mesin yang disediakan baik dari Dinas Pertanian Kabupaten Mukomuko maupun pihak swasta. Penggunaan alat-alat pertanian yang modern tersebut dengan pertimbangan untuk mempermudah dan mempercepat proses usaha tani.

5. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Konversi Lahan dari Kelapa Sawit ke Padi Sawah di Kabupaten Mukomuko

Faktor-faktor yang diidentifikasi berpengaruh terhadap konversi lahan adalah pendapatan, pendidikan terakhir petani, umur petani, pengalaman bertani, jumlah tanggungan keluarga, jenis lahan, serta program atau kebijakan pemerintah yakni program cetak sawah. Faktor-faktor yang mempengaruhi konversi lahan diuji signifikansinya secara statistik dengan model probit dengan aplikasi SPSS.

Tabel 6. Variabel Terikat dan Variabel Bebas Analisa Konversi Lahan dari Kelapa Sawit ke Padi Sawah di Kabupaten Mukomuko

Variabel Terikat		
Variabel		Indikator
Y	Konversi lahan	Alih fungsi: 1 Tidak alih fungsi: 0
Variabel Bebas		
Variabel		Indikator
X1	Pendapatan	Rata-rata pendapatan usaha tani petani sawit sebelum beralihfungsi lahan pada lahan yang berada di lokasi irigasi Air Manjuntio (Rp/bulan)
X2	Pendidikan terakhir petani	Jenis pendidikan formal terakhir yang telah dikenyam petani (SD, SMP, SMA, Universitas)
X3	Umur petani	Jumlah tahun dihitung sejak lahir hingga saat petani sebelum / saat mempertimbangkan akan / tidak alih fungsi (tahun)
X4	Pengalaman bertani	Jumlah tahun dihitung mulai saat pertama bertani hingga saat dilakukan wawancara. (tahun)
X5	Jumlah tanggungan keluarga	Jumlah keluarga yang masih dalam tanggungan petani (orang)
X6	Jenis lahan	Jenis lahan yang dimiliki di daerah sekitar air irigasi Air Manjuntio; Lahan mineral:1 Lahan gambut: 0
X7	Kebijakan pemerintah	Termasuk lahan petani dalam peta biru (masuk dalam program cetak sawah). Termasuk:1 Tidak termasuk:0

Pengujian faktor-faktor yang mempengaruhi konversi lahan dari kelapa sawit ke lahan sawah di Kabupaten Mukomuko dikhususkan di Kecamatan Lubuk Pinang, Kecamatan V Koto, Kecamatan XIV Koto dan Kecamatan Air Manjuntjo. Pemilihan lokasi penelitian ini dikarenakan lahan pada kecamatan tersebut dekat dengan sumber air irigasi Air Manjuntjo. Berikut adalah tabel data yang telah diolah secara komprehensif dan parsial menggunakan analisa regresi probit melalui aplikasi SPSS.

Tabel 7. Uji Kompreherensif (Simultan) Model Regresi Probit Faktor-faktor yang Mempengaruhi Konversi Lahan dari Kelapa Sawit ke Padi Sawah di Kabupaten Mukomuko

Chi-Square Tests			
		Chi-Square	Sig.
PROBIT	Pearson Goodness-of-Fit Test	752.365	0.000

Berdasarkan Tabel 7, diketahui hasil dari uji Pearson Goodness-of-Fit Test sebesar 752.365 dengan nilai peluang (p_value) sebesar $0,000 < ambang\ batas\ kesalahan\ penganggu\ (standar\ error)$ yakni 0,05. Uji ini dimaksudkan untuk mengetahui kesesuaian model, sehingga dari hasil tersebut bermakna model sesuai dan minimal ada salah satu variabel bebas yang secara signifikan berpengaruh terhadap variabel terikat (konversi lahan).

Selanjutnya untuk mengetahui pengaruh variabel bebas yakni pendapatan, pendidikan terakhir petani, umur petani, pengalaman bertani, jumlah tanggungan keluarga, jenis lahan, dan kebijakan pemerintah terhadap konversi lahan secara parsial (per variabel) maka dilakukan uji wald sebagai berikut. Uji parsial dilakukan untuk mengetahui pengaruh masing-masing variabel bebas terhadap variabel terikatnya. Dengan dilakukannya uji parsial diketahui variabel mana yang secara signifikan berpengaruh dan tidak berpengaruh terhadap konversi lahan, sehingga bisa diketahui variabel mana yang dapat dijadikan sebagai dasar pengambilan keputusan kebijakan konversi lahan ke depan.

Berdasarkan data di bawah ini diketahui faktor-faktor yang secara signifikan mempengaruhi variabel terikat (Y) konversi lahan dari kelapa sawit ke padi sawah di Kabupaten Mukomuko yakni variabel (X3) umur petani, variabel (X6) jenis lahan dan variabel (X7) kebijakan pemerintah yakni program cetak sawah. Dalam uji statistik diperoleh koefisien parameter untuk tiap variabel sehingga diperoleh model regresi probit terbaik. Model regresi faktor-faktor yang mempengaruhi konversi lahan dari kelapa sawit ke padi sawah di Kabupaten Mukomuko yang diperoleh adalah sebagai berikut.

$$Y = -1.897 + -1.924X_3 + 2.966X_6 + 2.385X_7$$

Tabel 8. Uji Parsial Model Regresi Probit Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Konversi Lahan dari Kelapa Sawit ke Padi Sawah di Kabupaten Mukomuko

Parameter	Estimate	Std. Error	Wald	Sig.
X1	-.139	.033	.407	.684
X2	.019	.045	.414	.679
X3	-0.924	.319	-2.295	.000
X4	.019	.018	1.051	.293
X5	.039	.103	.381	.703
X6	2.966	.369	8.032	.000
X7	0.995	.217	4.774	.000
Intercept	-1.097	1.026	-1.850	.044

Keterangan: Berpengaruh signifikan jika $W > Z(1 - \alpha)/2 = Z_{0,475} = 1,96$ dan nilai peluang (p_value) $< = 0,05$.

a. Pendapatan (X1)

Pendapatan merupakan selisih penerimaan dengan biaya yang dikeluarkan petani sawit. Pada penelitian ini variabel pendapatan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap variabel konversi lahan, hal ini dapat dilihat pada nilai $W < \text{nilai } Z$ yakni $0,407 < 1,96$ dan nilai peluang (p_value) sebesar $0,684 > 0,05$. Nilai Estimate pada variabel pendapatan

sebesar -0,139 mengindikasikan menurunnya pendapatan sebesar 1 satuan akan meningkatkan konversi lahan ke lahan padi sawah hanya sebesar 0,139 satuan. Para petani yang telah dan akan melakukan konversi lahan sebagian besar memiliki beberapa lahan kelapa sawit lain di lokasi yang berbeda sehingga pendapatan dari lahan yang berada di sekitar irigasi Air Majunto tidak berpengaruh secara nyata dan signifikan terhadap konversi lahan.

b. Pendidikan Terakhir Petani (X2)

Pada penelitian ini variabel pendidikan terakhir petani tidak berpengaruh nyata terhadap variabel Y (konversi lahan), hal ini dapat dilihat pada nilai $W < \text{nilai } Z$ yakni $0,414 < 1,96$ dan nilai peluang (p_value) sebesar $0,679 > 0,05$ (nilai signifikan). Dalam meningkatkan keterampilan, pengetahuan, kecakapan dan sikap seseorang, pendidikan memiliki pengaruh besar terhadap upaya meningkatkan hal-hal tersebut. Artinya semakin tinggi tingkat pendidikan akan berdampak kepada kecepatan respon para petani terhadap pengenalan dan penerapan teknologi terbaru atau pengetahuan baru. Pada akhirnya, hal ini dapat memunculkan dan membangun kemauan petani untuk berpartisipasi dalam pembangunan dan tingkat perekonomian. Pendidikan terakhir dapat merupakan pendidikan dengan tingkatan mulai dari SD atau sederajat, SMP atau sederajat, SMA atau sederajat dan perguruan tinggi atau universitas. Tingkat pendidikan seseorang secara tidak langsung menjadi faktor yang sangat penting dan akan berhubungan dalam kecakapan seseorang dalam memberikan tanggapan atau menyesuaikan diri terhadap lingkungannya.

c. Umur Petani (X3)

Pada penelitian ini variabel umur petani berpengaruh nyata terhadap variabel Y (konversi lahan), hal ini dapat dilihat pada nilai $W > \text{nilai } Z$ yakni $2,295 > 1,96$ dan nilai peluang (p_value) sebesar $0,000 < 0,05$ (nilai signifikan). Nilai estimate pada variabel umur petani sebesar -0.924 yang mengindikasikan semakin muda umur petani 1 satuan maka akan meningkatkan konversi lahan sebesar 0,924 atau semakin muda umur petani maka potensi untuk berkonversi lahan semakin besar. Umur petani berkaitan dengan kemampuan petani dalam mengelola usaha taninya. Seperti yang kita ketahui untuk melakukan konversi lahan membutuhkan sumbangsih yang tidak sedikit baik sumbangsih tenaga dan pikiran. Oleh karena itu, tentunya umur petani menjadi pertimbangan dalam

pengambilan keputusan. Saat memulai konversi lahan banyak hal yang perlu dipersiapkan antara lain tenaga kerja dan berbagai input produksi.

Usaha tani padi sawah membutuhkan lebih banyak perlakuan dibandingkan usaha tani kelapa sawit, usaha tani padi sawah membutuhkan pengelolaan mulai dari pembenihan, penanaman, perawatan (pemberian pupuk dan pestisida) hingga pemanenan dilakukan setiap musim tanam yakni 3 (tiga) kali dalam setahun. Sedangkan usaha tani kelapa sawit untuk penanaman dapat dilakukan 1 (satu) kali dalam 25 tahun (masa produksi kelapa sawit) dan pemanenan dapat dilakukan 2 (dua) kali dalam satu bulan saat tanaman kelapa sawit sudah mulai berproduksi, saat tanaman menginjak tahun ke lima. Sementara itu, perawatan, pemupukan, dan penyemprotan herbisida dilakukan 3 bulan sekali bahkan beberapa petani melakukan pemupukan dan pembersihan rumput selama 1 (satu) kali dalam enam bulan tergantung kondisi lahan.

Usaha tani padi juga membutuhkan banyak tenaga kerja terutama saat penanaman. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari lapangan, saat musim tanam para petani sering merasa kesulitan mencari pekerja untuk menanam padi, karena tanam serentak. Bahkan, para petani menyebutkan sampai menghubungi rekan tani lain di desa tetangga untuk membantu proses tanam benih padi. Tahapan-tahapan pengelolaan usaha tani padi sawah yang lebih banyak dan dianggap lebih pelik dibandingkan dengan usaha tani kelapa sawit ini membuat petani yang berumur lebih enggan mengalihfungsikan lahannya.

d. Pengalaman Bertani (X4)

Pada penelitian ini variabel pengalaman bertani tidak berpengaruh nyata terhadap variabel Y (konversi lahan), hal ini dapat dilihat pada nilai $W < \text{nilai } Z$ yakni $1,051 < 1,96$ dan nilai peluang (p_value) sebesar $0,239 > 0,05$ (nilai signifikan). Pengalaman usaha tani pada penelitian ini tidak berpengaruh secara signifikan. Petani yang melakukan konversi lahan memiliki pengalaman bertani yang bervariasi mulai dari tujuh tahun hingga 35 tahun. Para petani tidak memiliki kekhawatiran (terhadap pengalaman bertani) untuk beralih profesi ke usaha tani padi sawah. Masyarakat petani menganggap dan memperoleh informasi yang baik dari para penyuluh pertanian. Masyarakat siap dalam mengelola padi sawah, meskipun sebelumnya telah lama sebagai petani kelapa sawit. Selain itu, informasi yang diperoleh di lapangan, para petani padi sawah aktif dalam kegiatan

kelompok tani sehingga saling menstimulasi dan memberikan informasi berkaitan dengan usaha tani yang digiatkan.

e. Jumlah Tanggungan Keluarga (X5)

Jumlah tanggungan keluarga akan memotivasi petani untuk meningkatkan kesejahteraan guna kecukupan pangan anggota keluarganya. Pada observasi yang dilakukan ini variabel jumlah tanggungan keluarga ternyata tidak berpengaruh nyata terhadap variabel Y (konversi lahan), hal ini dapat dilihat pada nilai $W < \text{nilai } Z$ yakni $-0,381 < 1,96$ dan nilai peluang (p_value) sebesar $0,703 > 0,05$. Jumlah tanggungan keluarga tidak berpengaruh secara signifikan terhadap keputusan alih fungsi ke lahan padi sawah. Hal tersebut diakibatkan sebagian masyarakat petani memiliki pekerjaan sampingan seperti usaha kelontongan, pekerja swasta, serta kepemilikan lahan di beberapa lokasi lain. Sehingga petani tidak ada kekhawatiran terhadap kecukupan keluarganya sehingga tidak berpengaruh terhadap keputusan konversi lahan.

f. Jenis Lahan (X6)

Pada penelitian ini variabel jenis lahan berpengaruh nyata terhadap variabel Y (konversi lahan), hal ini dapat dilihat pada nilai $W > \text{nilai } Z$ yakni $8.032 > 1,96$ dan nilai peluang (p_value) sebesar $0.000 < 0,05$ (nilai signifikan). Nilai estimate pada variabel jenis lahan sebesar 2,966 yang mengindikasikan semakin meningkat kualitas jenis lahan 1 satuan maka akan meningkatkan konversi lahan sebesar 2,966 satuan. Jika jenis lahan di sekitar irigasi Air Manjuntjo berjenis lahan mineral maka akan meningkatkan potensi alih fungsi lahan.

Diketahui jenis lahan pada daerah penelitian terbagi atas dua yakni lahan mineral dan gambut. Lahan mineral cocok untuk usaha tani padi sawah sedangkan lahan gambut tidak cocok untuk padi sawah, terbukti beberapa petani lahan gambut yang telah dicetak sawahnya merugi. Sehingga beberapa petani tersebut mengalihfungsikan kembali lahannya ke tanaman kelapa sawit. Hanya tanaman tertentu yang ada di lahan gambut, seperti sagu dan talas. Nazir Foad, Kepala Badan Restorasi Gambut Dan Mangrove mengatakan, tanaman pangan paling mungkin dan bisa cepat di lahan gambut adalah hortikultura, seperti talas, sagu, lidah buaya, dan nenas (Arumingtyas, 2020). Hal inilah yang menjadi pertimbangan bahwa jenis lahan sangat mempengaruhi keputusan konversi lahan ke lahan padi

sawah. Jenis lahan berkaitan erat dengan produktivitas, pendapatan dan juga sangat berpengaruh terhadap kerusakan lingkungan (kerusakan lahan gambut).

g. Kebijakan pemerintah (X7)

Pada penelitian ini variabel kebijakan pemerintah yakni program cetak sawah berpengaruh nyata terhadap variabel Y (konversi lahan), hal ini dapat dilihat pada nilai $W > \text{nilai } Z$ yakni $4,774 > 1,96$ dan nilai peluang (p_value) sebesar $0,000 < 0,05$ (nilai signifikan). Nilai estimate pada variabel kebijakan pemerintah sebesar 0,995 yang mengindikasikan semakin digiatkan kebijakan pemerintah yakni program cetak sawah sebesar 1 satuan maka akan meningkatkan konversi lahan sebesar 0.995 satuan. Semakin digiatkannya program cetak lahan maka akan meningkatkan potensi konversi lahan di Kabupaten Mukomuko.

Kebijakan pemerintah terkait cetak sawah tentunya berpengaruh secara signifikan terhadap alih fungsi ke lahan padi sawah. Program cetak sawah ini dianggap menguntungkan sebagian besar petani karena memotong biaya cetak lahan menjadi sawah yang mencapai Rp.16.000.000,- jika dilakukan secara mandiri. Namun dari pengamatan dan wawancara di lapangan sebagian kecil petani merasa dirugikan terutama petani dengan jenis lahan gambut yang telah di cetak menjadi lahan sawah. Dampak dari kebijakan tersebut produktivitasnya tidak sesuai target sehingga berpengaruh terhadap penerimaan. Biaya yang dikeluarkan dalam pengelolaan usaha tani padi sawah jauh lebih besar sehingga petani merugi. Oleh karena itu, perlu ada hal-hal yang perlu dikaji ulang terkait kebijakan cetak sawah di Kabupaten Mukomuko khususnya di Kecamatan Lubuk Pinang, Kecamatan V Koto, Kecamatan XIV Koto dan Kecamatan Air Manjuntjo. Kajian yang perlu identifikasi lagi yakni terkait kajian teknis, bio fisik, kajian biofisik, infrastruktur, pengembangan jaringan irigasi serta dampak sosial ekonominya bagi petani dan masyarakat sekitar.

Dari uji simultan didapatkan kesesuaian model yang bermakna, yaitu minimal ada salah satu dari 7 variabel bebas yang secara signifikan berpengaruh terhadap konversi lahan. Setelah dilakukan uji parsial diketahui dari ke tujuh variabel bebas, ada 3 variabel yakni umur petani, jenis lahan dan kebijakan cetak sawah secara signifikan berpengaruh terhadap konversi lahan. Maka dari data tersebut dapat dinyatakan untuk pengembangan kebijakan konversi lahan selanjutnya, pengembang

program harus mempertimbangkan umur petani, mengidentifikasi kesesuaian lahan dan kebijakan cetak sawah.

Konversi lahan kelapa sawit ke padi sawah yang terjadi di Kabupaten Mukomuko didorong oleh berbagai faktor, salah satunya adalah mekanisasi pertanian. Masyarakat terdorong untuk berkonversi ke lahan pangan karena tersedianya teknologi yang mempermudah mendukung efisiensi usaha tani padi sawah. Teknologi tersebut diantaranya adalah traktor, *transplanter*, *combine harvester* dan *thresher*. Hal tersebut menggambarkan petani secara terbuka menerima perkembangan teknologi. Adopsi teknologi dilakukan guna efisiensi, mengurangi kesenjangan ekonomi dan meningkatkan kesejahteraan. Hal ini dapat menjadi dasar kesiapan petani dalam menerapkan sebuah konsep masyarakat yang berpusat pada manusia yang berbasis teknologi (Masyarakat 5.0). Kedepannya petani harus lebih siap dengan kemajuan teknologi seiring dengan perkembangan zaman, misalnya dalam memantau usaha tani menggunakan sensor, *drone*, atau CCTV.

KESIMPULAN

1. Faktor-faktor yang mendorong konversi lahan dari kelapa sawit ke padi sawah di Kabupaten Mukomuko adalah ketersediaan air yang baik yakni sumber air irigasi Majunto, pendapatan usaha tani padi, umur tanaman kelapa sawit, fluktuasi harga tandan buah segar (TBS), kebijakan pemerintah tentang program cetak sawah, dan persepsi positif masyarakat terhadap usaha tani padi sawah serta mekanisasi pertanian.
2. Faktor-faktor yang mempengaruhi konversi lahan kelapa sawit ke padi sawah di Kabupaten Mukomuko adalah umur petani, jenis lahan dan kebijakan pemerintah terkait cetak sawah berpengaruh secara signifikan dikarenakan ketiga faktor tersebut menjadi pertimbangan dalam penentu pengambilan keputusan petani dalam melakukan konversi lahan.
3. Tersedianya teknologi sebagai pendorong masyarakat melakukan konversi lahan kelapa sawit ke padi sawah, menggambarkan petani dapat mengambil keputusan dan secara terbuka menerima perkembangan teknologi. Kondisi ini menjadi dasar kesiapan petani menghadapi konsep masyarakat 5.0, yaitu dapat memanfaatkan perkembangan teknologi untuk kesejahteraan manusia.

DAFTAR PUSTAKA

- Arikunto, S. (2013). *Prosedur penelitian: suatu pendekatan praktik*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Arumingtyas, L. (2020). Cetak sawah di lahan gambut? Mereka ingatkan risiko dan usul sumber pangan lokal. Retrieved from <https://www.mongabay.co.id/2020/05/14/cetak-sawah-di-lahan-gambut-mereka-ingatkan-risiko-dan-usul-sumber-pangan-lokal/>.
- Astuti, U.P., Wibawa, W., & Ishak, A. (2011). Faktor yang mempengaruhi konversi lahan pangan menjadi kelapa sawit di Bengkulu: kasus petani di Desa Kungkai Baru. *J Prosiding Seminar Nasional Budidaya Pertanian*, 189 – 195
- Ayu, I.L.D., & Made, I.S. (2015) Faktor-faktor pendorong alihfungsi lahan sawah menjadi lahan non-pertanian. *Jurnal Manajemen Agribisnis*, 3 (2), 163-171.
- Badan Pusat Statistik (2019). Indikator pertanian 2019. Retrieved from <https://www.bps.go.id>.
- Badan Pusat Statistik (2020). Statistik Indonesia 2020. Retrieved from <https://www.bps.go.id>.
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Mukomuko (2021). Mukomuko Dalam Angka 2021. Retrieved from <https://mukomukokab.bps.go.id/publication.html>.
- Bahari, Esdwin. 2014. Analisis strategi peningkatan nilai ekonomi sawit di Provinsi Lampung. *Prosiding Seminar Bisnis & Teknologi*, hal 280-290, Bandar Lampung, 15-16 Desember 2014. 280-291.
- Barbier, Edward B (2007). Land conversion, interspecific competition, and bioinvasion in a tropical ecosystem. *ProQuest Agriculture Journal*, 39, 133-147.
- Bruno, V., Putra, A.E. & Budidarsono, S. (2004). Penyebab alih guna lahan dan akibatnya terhadap fungsi daerah aliran sungai (DAS) pada lansekap agroforestri berbasis kopi di sumatera. *Agrivita*, 26 (1), 29-38.

- Hastuty, S. (2017). Identifikasi faktor pendorong alih fungsi lahan pertanian. Prosiding Seminar Nasional Universitas Cokro Aminoto. Retrieved from <https://journal.uncp.ac.id/index.php/proceeding/article/view/858>.
- Hasyim, H. (2006). Analisis hubungan karakteristik petani kopi terhadap pendapatan (Studi kasus: Desa Dolok Saribu Kecamatan Paguran Kabupaten Tapanuli Utara). *Jurnal Komunikasi Pertanian*, 18 (1), 22-27.
- Ilham, N., Syaukat, Y. & Friyatno, S. (2005). Perkembangan dan faktor-faktor yang mempengaruhi konversi lahan sawah serta dampak ekonominya. *SOCA (Socio-Economic Of Agriculture And Agribusiness)*, 2 (1), 1-25.
- Kementerian Pertanian (2018). Cetak sawah pola swakelola direktorat perluasan dan perlindungan lahan. Direktorat Jenderal Sarana dan Prasarana.
- Kurniadi, B. (2019). Persepsi masyarakat mengenai konversi lahan kawasan Caringin Tilu Kecamatan Cimenyan Kabupaten Bandung. *Sosiohumanitas*, 21 (2), 79-85.
- Nurhapsah. (2019). Faktor pendorong alih fungsi lahan usaha tani kakao menjadi usaha tani jagung di Desa Tolada Kecamatan Malangke Kabupaten Luwu Utara. [Skripsi]. Program Studi Agribisnis Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Makassar
- Peraturan Daerah Kabupaten Mukomuko Nomor 34 Tahun 2011. Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) Kabupaten Mukomuko Tahun 2010-2015. Retrieved from https://jdih.go.id/files/293/Perda_Mukomuko_no_34_2011.pdf.
- Putra, H. & Nasir, M. (2015). Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi produksi sektor pertanian di Propinsi Aceh. *Jurnal Agrisept*, 16(1), 53-60.
- Risza, S. 2009. Kelapa sawit: upaya peningkatan produktivitas. Yogyakarta: Kanisius.
- Rasoki, T., Nurmalia, A., & Asnamawati, L. (2020). Analisis komparasi keunggulan kompetitif usaha tani padi sawah dan sawit di Kabupaten Mukomuko, Propinsi Bengkulu. *Jurnal Manajemen Agribisnis*, 8(2), 125-134.

- Ruswandi, A., Rustiadi, E. & Mudikdjo, K.(2007). Dampak konversi lahan pertanian terhadap kesejahteraan petani dan perkembangan wilayah: studi kasus di daerah Bandung Utara. *Jurnal Agro Ekonomi*. [Online] 25 (2), 207-219. Retrieved from <http://pse.litbang.deptan.go.id/ind/pdffiles/JAE%2025-2e.pdf>
- Sugiono, S. (2020). Industri konten digital dalam perspektif society 5.0. *Jurnal IPTEK-KOM (Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Komunikasi)*, 22(2), 175-191. Retrieved from <https://jurnal.kominfo.go.id/index.php/iptekkom/article/viewFile/3471/1471>.
- Suprianto, Charial, E., & Nuryaman, H. (2019). Faktor-faktor pendorong alih fungsi lahan sawah di Kota Tasikmalaya. *Jurnal Agristan*, 1(1), 12-30.
- Tambunan, T (2003). Perkembangan sektor pertanian di Indonesia, beberapa isu penting. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Tampubolon, N.S.H. (2016). Pengaruh umur tanaman terhadap produktivitas kelapa sawit (*Elaeis Guineensis*) (Studi kasus: perkebunan rakyat di Kecamatan Pegajahan, Kabupaten Serdang Bedagai). [Skripsi]. Program Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Undang Undang Republik Indonesia Nomor 41 tahun 2009 tentang Perlindungan Lahan Pertanian Berkelanjutan (lembaran lepas).
- Usman. (2019). Ratusan hektar kebun sawit di Mukomuko diubah jadi sawah. Retrieved from <https://www.beritasatu.com>.
- Wicaksono, R.R. & Navastara, A.M. (2012). Pengendalian perubahan pemanfaatan lahan pertanian tanaman pangan di Kabupaten Banyuwangi, Provinsi Sumatera Selatan (Untuk Mendukung Program Lumbung Pangan Nasional). *Jurnal Teknik ITS*, 1 (1), 52-57.

ANALISIS DAN STRATEGI PENGEMBANGAN MANAJEMEN KOTA BERBASIS SMART CITY DI KABUPATEN KENDAL

SMART CITY BASE ON URBAN MANAGEMENT ANALYSIS AND STRATEGY DEVELOPMENT IN KENDAL REGENCY

**I Gede Wyana Lokantara¹, Farisa Maulinam Amo², Erika Pradana Putri³,
Ulul Hidayah⁴**

**^{1,2,3,4}Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Jurusan Teknik,
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
igede-wyana@ecampus.ut.ac.id**

ABSTRAK

Kabupaten Kendal termasuk salah satu wilayah yang mengikuti program 100 smart city di Indonesia. Smart city dibutuhkan untuk mendorong pengelolaan pembangunan wilayah yang lebih terintegrasi yang mampu mengendalikan masalah ekonomi, sosial, lingkungan serta masalah pelayanan publik, termasuk masalah pandemi Covid-19 yang membuat kondisi ekonomi semakin terpuruk. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis tingkat kesiapan Kabupaten Kendal dalam penerapan teknologi smart city melalui identifikasi arah kebijakan dan pemenuhan kualifikasi sumber daya dan menyusun strategi pengembangan manajemen kota nya. Penelitian ini menggunakan analisis kualitatif dengan menganalisis tingkat kesiapan berdasarkan tingkat kemampuan mengaplikasikan smart city yang diukur menggunakan metode e-readiness dan Boyd Cohen Smart City Wheel. Nilai e-readiness terbaik terlihat pada indikator kelembagaan memperoleh nilai cukup baik dengan skor 7,91 dari grade 10. Dimensi smart city yang mendapat skor baik adalah smart environment dengan skor 81,15 dan smart governance (78,19). Tingginya skor dimensi tersebut disebabkan oleh kebijakan pemerintah Kabupaten Kendal dalam mendukung penerapan smart city dilakukan dengan mengembangkan berbagai platform dan inovasi pelayanan publik yang

dapat mempercepat berbagai tujuan perencanaan. Kabupaten Kendal harus mempersiapkan diri untuk beradaptasi di era society 5.0 dengan cara memperkuat dimensi pengembangan smart city dengan melibatkan berbagai pihak, khususnya melibatkan masyarakat sebagai aspek dan pelaku utama dalam pembangunan.

Kata Kunci: *Boyd Cohen Smart City Wheel, e-readiness, smart city, society 5.0.*

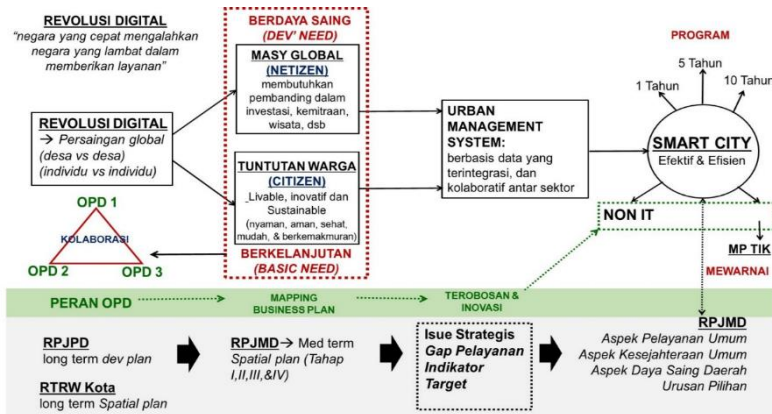
PENDAHULUAN

Kabupaten Kendal memiliki wilayah administrasi yang cukup luas, terbagi menjadi 20 kecamatan yang terdiri atas 266 desa dan 20 kelurahan, serta memiliki jumlah penduduk kabupaten sebesar 952.966 jiwa. Tekanan dan distribusi penduduk ada di daerah perdesaan, demikian juga dengan potensi unggulan banyak dijumpai di wilayah perdesaan (pertanian, UKM, pariwisata, dan industri kecil). Jarak antara desa dengan pusat kabupaten sangat jauh, terdapat rentang di atas 45 km antara desa dan kota. Bisa dibayangkan proses aliran potensi desa ke kota menjadi satu pekerjaan rumah buat pemerintah Kabupaten Kendal. *Urban-Rural Linkages* perlu dikuatkan untuk menuju Kendal *Connected*. Hal ini ditandai dengan optimalisasi pelayanan dasar pemerintahan dan proses bisnis ekonomi unggulan di tingkat desa dan kelurahan melalui konsep *Smart Village*. Kabupaten Kendal menjadi salah satu yang terpilih untuk menjadi kabupaten/kota yang mengikuti program 100 *smart city* di Indonesia dan turut serta dalam *global movement* yang disebut revolusi digital pada tahun 2018. Implementasi *smart city* yang dilakukan bertujuan meningkatkan pengembangan kualitas hidup masyarakat agar mampu menyeimbangi pembangunan global yang terus berkembang dan menuntut masyarakat untuk berinovasi dan bersaing dengan masyarakat global lainnya. Konsep *smart city* juga diharapkan menjadi jalan keluar dari beberapa permasalahan utama kota, seperti air bersih, sampah, bencana, sarana kesehatan, ekonomi, hingga info pelayanan publik (Utomo & Hariadi, 2016).

Permasalahan-permasalahan tersebut umumnya terjadi di kota dan kabupaten yang sedang berkembang di Indonesia, salah satunya Kabupaten Kendal. Kabupaten Kendal sangat membutuhkan konsep manajemen kota untuk mengendalikan permasalahan yang ada termasuk dalam pelayanan

publik yang maksimal. Namun di sisi lain, Kabupaten Kendal memiliki beragam potensi sumber daya alam yang belum dikelola dengan maksimal yang dapat menjadi kekuatan dan potensi daerah sebagai upaya peningkatan pada sektor ekonomi (Annisah, 2018). Sebanyak 75 kabupaten/kota secara aktif mendeklarasikan diri dalam upaya mengembangkan konsep *smart city* untuk melakukan pengelolaan sistem pelayanan perkotaan. Kabupaten Kendal juga mendorong strategi penerapan teknologi *smart city* dalam rangka mendorong pengelolaan perkotaan yang semakin humanis, efisien, dan berinovasi tinggi. Namun dibutuhkan komitmen yang kuat oleh pemerintah daerah dalam mempersiapkan berbagai kriteria mewujudkan kota berbasis *smart city*. Hal tersebut menjadi salah satu faktor pendorong Pemerintah Daerah Kabupaten Kendal dalam melakukan percepatan pembangunan *smart city* dengan menyiapkan arah kebijakan, dan strategi yang implementatif dan solutif atas permasalahan-permasalahan yang ada di Kabupaten Kendal saat ini (Suhendra, 2017).

Di era revolusi digital saat ini, diperlukan pelayanan yang efektif dan efisien untuk dapat menjadi berdaya saing. Persaingan global sangat terbuka, pertarungan individu dengan individu terbuka sangat lebar melintasi batas negara. Demikian pula dengan Pemerintah Kabupaten yang memiliki 2 kelompok warga yang harus dilayani yaitu warga kabupaten (*citizen*) dan warga dunia maya (*netizen*). Kabupaten Kendal sudah menyusun dokumen Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) tahun 2016 – 2021 dengan *ultimate goal* menuju Kendal Permata Pantura. Dokumen RPJMD selanjutnya diturunkan ke dalam Rencana Strategis (Renstra) yang menjadi panduan dalam penyusunan kegiatan. Setiap penganggaran kegiatan dengan Anggaran Pendapatan dan Belanja Daerah (APBD) diwajibkan untuk mencari korelasi terhadap program RPJMD dan Renstra. Korelasi antara RPJMD dengan *Masterplan Smart City* serta kolaborasi antar Organisasi Perangkat Daerah (OPD) dalam pengembangan *smart city* dapat dilihat pada skema Gambar 1 berikut.



Sumber: Dinas Komunikasi dan Informatika Kabupaten Kendal, 2019

Gambar 1. Korelasi RPJMD dan Smart City Kabupaten Kendal

Berdasarkan dokumen RPJMD dan RTRW Kabupaten Kendal, terdapat sebuah kebutuhan akan inovasi dalam mempermudah investasi masuk ke Kabupaten Kendal baik di bidang industri, pertanian, dan pendukungnya. Inovasi dimaksudkan untuk melakukan langkah-langkah yang efektif dan efisien dalam pelayanan. Sehingga dipilihlah visi dengan tekanan inovatif dan pro investasi, yaitu inovatif, mandiri dan pro investasi. Inovatif berarti inovasi terus dilakukan Kabupaten Kendal dalam pelayanan, termasuk dengan optimalisasi penggunaan Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK). Inovasi juga dilakukan dengan mengembangkan kluster-kluster pelayanan ke dalam suatu sistem. Mandiri, yaitu dalam keadaan dapat berdiri sendiri, tidak bergantung dengan daerah lain. Pro investasi yaitu pengembangan Kabupaten Kendal yang ramah terhadap investasi, dengan dukungan kemudahan perijinan, tenaga kerja dan sumber daya manusia, jaminan dari pemerintah, dan dapat diselesaikan dengan optimasi waktu yang tepat.

Selain untuk fungsi pengembangan dan peningkatan daya saing (*comparative advantages*), pengembangan *smart city* Kabupaten Kendal juga difokuskan untuk peningkatan kualitas layanan dasar (*basic need*) kepada masyarakat berikut ini.

1. Mendorong budaya partisipasi dan kolaborasi masyarakat dalam pembangunan.

2. Meningkatkan pelayanan publik efektif dengan mengoptimalkan kinerja aparatur pemerintah yang dinamis dan berintegritas.
3. Membangun infrastruktur yang terintegrasi dan berkesinambungan.
4. Mengarahkan kebijakan publik berdaya saing dan berkelanjutan.
5. Mendayagunakan TIK untuk mewujudkan efisiensi menuju *Connected Kendal*.

Masterplan Smart City Kabupaten Kendal wajib terintegrasi dengan dokumen RPJMD Kabupaten Kendal 2016-2021, sehingga pengajuan anggaran menjadi lebih mudah. Terdapat perbedaan indikator antara RPJMD dan *smart city* (mengacu pedoman dari Kominfo tahun 2020), sehingga perlu dilakukan *bridging* variabel yang dapat mengakomodasi keduanya. Pada saat ini, telah diciptakan 11 program prioritas Bupati Kendal. Program daerah tersebut merupakan sekumpulan program prioritas yang berkaitan dengan tujuan capaian sasaran pembangunan daerah. Suatu program pembangunan daerah dapat berupa pernyataan yang disamakan atau sekurang kurangnya mengandung program bupati terpilih yang di dalamnya berisi program prioritas yang bersifat strategis. Berikut merupakan 11 program prioritas bupati yang telah dituangkan melalui program pembangunan RPJMD Kabupaten Kendal Tahun 2016-2021, antara lain terkait dengan lingkungan hidup, investasi dan lapangan usaha, tata kelola pemerintahan, pendidikan, kesehatan, pendapatan masyarakat, kemiskinan, responsif gender, kesadaran pemuda, ekonomi kerakyatan serta infrastruktur seperti pada Gambar 2.



Sumber: Dinas Komunikasi dan Informatika Kabupaten Kendal, 2019

Gambar 2. Prioritas Pembangunan RPJMD Kabupaten Kendal

Program-program tersebut telah dijabarkan ke dalam visi, misi, tujuan dan sasaran pembangunan Kabupaten Kendal. Oleh karena itu untuk mencapai indikator target kinerja visi misi pada sasaran pembangunan, maka strategi atau prioritas pembangunan digunakan sebagai sarana untuk mendapatkan rumusan tentang program prioritas yang akan diselenggarakan oleh perangkat daerah.

Adanya kondisi Pandemi Covid-19 ini, secara tidak sengaja telah mempengaruhi masyarakat, bisnis, dan organisasi secara global (Nicola et al., 2020). Hal ini juga selaras dengan data sekunder yang diperoleh dalam kurun waktu penelitian terlihat bahwa Covid-19 berdampak pada lingkungan internal (*internal environment*) entitas bisnis. Covid-19 juga berdampak pada lingkungan internal badan usaha dan pola konvensional kegiatan usaha di bidang pemasaran, keuangan, sumber daya manusia, dan operasional (Taufik & Ayuningtyas, 2020). Untuk kasus di Indonesia, virus ini dianggap sebagai salah satu faktor penghambat pertumbuhan ekonomi nasional (Hidayaturrehman & Purwanto, 2020). Hal ini juga diperkuat

dengan pernyataan Kementerian Koperasi dan UKM, yaitu terdapat sekitar 37.000 Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) telah melaporkan terkena dampak yang serius saat terjadi pandemi Covid-19 dan ditunjukkan dengan adanya sekitar 56% yang melaporkan penurunan penjualan. Terkait dengan kondisi tersebut, penyebab menurunnya daya tahan UMKM karena adanya penjualan produk yang mengandalkan tatap muka atau pertemuan fisik antara penjual dan pembeli (Bahtiar & Saragih, 2020).

Berdasarkan hal tersebut, sangat menarik untuk mengkaji tentang kesiapan dari setiap kabupaten/kota di Indonesia dalam mengembangkan konsep *smart city* sebagai upaya mengelola manajemen perkotaan di wilayah masing-masing. Khusus dalam kasus ini adalah menganalisis kesiapan Kabupaten Kendal dalam mempersiapkan berbagai *master plan smart city* menyelesaikan berbagai masalah dan pengelolaan potensi lokal melalui optimalisasi penggunaan teknologi digital. Berdasarkan kondisi tersebut tujuan penelitian ini yaitu untuk menganalisis kesiapan Kabupaten Kendal menuju *smart city*, yang ditinjau dari identifikasi potensi dan masalah yang dihadapi oleh pemerintah Kabupaten Kendal dan komponen-komponen yang menjadi kriteria mengimplementasikan *smart city* seperti infrastruktur teknologi informasi, komponen sumber daya manusia, serta kemampuan manajemen tata kelola kelembagaan (Graha, 2020).

METODE PENELITIAN

1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kualitatif yang menekankan pada analisis kesiapan pemerintah Kabupaten Kendal dalam mengimplementasikan teknologi *smart city* dalam manajemen pengelolaan wilayah di Kabupaten Kendal. Tingkat kesiapan yang dimaksud adalah tingkat kematangan dalam melakukan atau melaksanakan sesuatu secara sistematis. Prosedur perolehan data dalam penelitian ini diawali dengan studi literatur terkait indikator *smart city* yang akan digunakan untuk mengukur kesiapan Kabupaten Kendal dalam menjalankan program *smart city* itu sendiri (Annisah, 2018). Setelah pengidentifikasian indikator dan tolok ukur, maka dilanjutkan dengan analisis kuantitatif yakni mengukur kesiapan dengan dilakukan survei, pengolahan data, dan analisis kondisi eksisting. Metode yang digunakan dalam mengukur kesiapan adalah metode *e-readiness* dan *Boyd Cohen Smart City Wheel*.

2. Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari kegiatan observasi lapangan, wawancara langsung, dan terbuka bersama Pemerintah Daerah Kabupaten Kendal. Wawancara terhadap Pemerintah Daerah Kabupaten Kendal diwakilkan oleh beberapa responden dari Dinas Komunikasi dan Informatika (Diskominfo) dan Badan Perencanaan Pembangunan, Penelitian dan Pengembangan (Bapelitbang). Sedangkan data sekunder diperoleh melalui studi literatur terkait indikator *smart city* yang akan digunakan untuk mengukur kesiapan Kabupaten Kendal dalam menjalankan program *smart city*.

3. Analisis Data

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari pengukuran faktor kesiapan dan kondisi eksisting, kemudian dilanjutkan dengan analisis kualitatif yakni merumuskan solusi dan strategi pembenahan manajemen tata kelola pembangunan di Kabupaten Kendal. Tingkat kesiapan dalam implementasi konsep *smart city* diukur dengan menggunakan metode *e-readiness* dan *Boyd Cohen Smart City Wheel*. Metode *e-readiness* mengukur tiga faktor utama seperti sosial, ekonomi, dan fisik. Metode *e-readiness* dijabarkan kedalam beberapa indikator *e-readiness* berdasarkan komponen pendukung (Tabel 1).

Tabel 1. Indikator *E-readiness* dalam Mengidentifikasi Kesiapan *Smart City* Kabupaten Kendal

Nilai Readiness	Bobot	Σ
Ketersediaan Fasilitas (infra)	0,1000	10,00
<i>Electronic Service</i> (infra)	0,0800	8,00
<i>System Integrated</i> (infra)	0,1200	12,00
Kehandalan (sdm)	0,1200	12,00
Penetrasi & <i>Competency</i> (sdm)	0,0900	9,00
<i>Community Participation</i> (sdm)	0,0900	9,00
Pembiayaan (lbg)	0,1500	15,00
<i>Political will</i> (lbg)	0,1000	10,00
Kerangka Regulasi (lbg)	0,1500	15,00

Keterangan: infra = infrastruktur

sdm = sumber daya manusia

lbg = lembaga

Ketujuh indikator di atas dirincikan sebagai berikut.

- a. Ketersediaan fasilitas yang dimaksud adalah kesiapan infrastruktur dalam mendukung *smart city* baik infrastruktur fisik maupun non fisik seperti Informasi Teknologi (IT). Indikator ini digunakan untuk mengukur kondisi fasilitas yang tersedia dan kemampuannya dalam mendukung *smart city*.
- b. *Electronic service* berkaitan dengan pelayanan atau teknis kegiatan yang sudah menggunakan sistem *Information and Communication Technology* (ICT), seperti sarana kesehatan yang menggunakan *electronic service* pada pelayanannya. Sampai saat ini, Kabupaten Kendal mengacu pada Undang-undang Nomor 11 Tahun 2008 tentang informasi dan transaksi elektronik telah melegalkan penggunaan berbagai device untuk keperluan transaksi elektronik.
- c. *Integrated system* berarti keterhubungan dan keterintegrasian seluruh sistem di Kabupaten Kendal, baik fisik dan non fisik.
- d. Penetrasi dan kompetensi berkaitan dengan kemampuan sumber daya manusia dalam mencapai nilai maksimal di setiap dimensi. Penetrasi menilai adanya pertumbuhan pada setiap dimensi dalam *smart city* meningkat berdasarkan kondisi eksisting komponen pendukung *smart city*.
- e. *Community participation* berkaitan dengan keikutsertaan masyarakat maupun komunitas-komunitas yang ada di Kabupaten Kendal dalam pelaksanaan konsep *smart city*. Keikutsertaan atau partisipasi yang dimaksud yaitu bersama-sama ikut membangun kota, serta menjadi pengguna kota yang aktif. Partisipasi masyarakat merupakan komponen yang krusial karena masyarakat dan komunitas sebagai objek utama dan juga menjadi penentu keberhasilan atau kegagalan terselenggaranya *smart city*.
- f. Pembiayaan adalah alokasi dana yang dialokasikan Pemerintah Daerah Kabupaten Kendal dalam pelaksanaan pembangunan dengan konsep *smart city*. Tidak hanya alokasi dana dalam pembangunan, indikator pembiayaan juga menilai pertumbuhan ekonomi Kabupaten Kendal sebelum pembangunan dengan konsep *smart city* maupun saat konsep *smart city* dilaksanakan. Indikator pembiayaan menilai pertumbuhan ekonomi, Pendapatan Asli Daerah (PAD), APBD, dan Kapasitas Keuangan Daerah.

- g. *Political will* berarti keinginan pemerintah untuk konsisten melaksanakan *smart city* yang didukung oleh adanya kebijakan yang mendukung terselenggaranya pembangunan berbasis *smart city*.
- h. Kerangka regulasi berkaitan dengan penyiapan peraturan daerah yang bersifat mengikat untuk menjamin tingkat kelancaran pelaksanaan *smart city*.

Selanjutnya indikator *e-readiness* tersebut akan dikelompokkan ke dalam tiga elemen utama yang membangun keberhasilan *smart city* di Kabupaten Kendal:

- Kelembangan (*Institution*) atau (*lbg*) termasuk di dalamnya *political will*, kerangka regulasi, dan pembiayaan;
- Human resources* atau (*sdm*) berkaitan *community participation*, kehandalan, serta penetrasi & *competency*;
- Technology infrastructure* atau (*infra*) termasuk di dalamnya adalah *electronic service*, *integrated system*, dan ketersediaan fasilitas.

Selanjutnya terkait dengan *Boyd Cohen Smart City Wheel* akan digunakan untuk mengidentifikasi dimensi *smart city* Kabupaten Kendal yang di dalamnya terdapat dimensi *Smart Government*, *Smart Economy*, *Smart Mobility*, *Smart Living* dan *Smart Environment* (Suhendra, 2017) seperti pada Tabel 2. Indikator dalam setiap dimensi menggunakan *city key* dimensi *smart city*.

Tabel 2. Indeks Pembangunan Kota Berbasis *Smart City*

No	Dimensi	Sub Indikator	Nilai
1	<i>Smart Governace</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Inovasi pelayanan publik • Kecepatan pelayanan • Jangkauan pelayanan 	%
2	<i>Smart Economy</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Entrepreneurship • Sistem payment • Platform digitalisasi 	%
3	<i>Smart Society</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Partisipasi masyarakat • Taat aturan 	%
4	<i>Smart Living</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Penataan permukiman 	%

No	Dimensi	Sub Indikator	Nilai
		<ul style="list-style-type: none"> • Ketersediaan Ruang Terbuka Hijau (RTH) • Sistem sirkulasi • Sistem transportasi 	
5	<i>Smart Environment</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Manajemen sampah • Sistem drainase • Pengelolaan limbah 	%
6	<i>Smart Branding</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Promosi pariwisata • Promosi produk lokal • Pengembangan platform investasi 	%

PEMBAHASAN

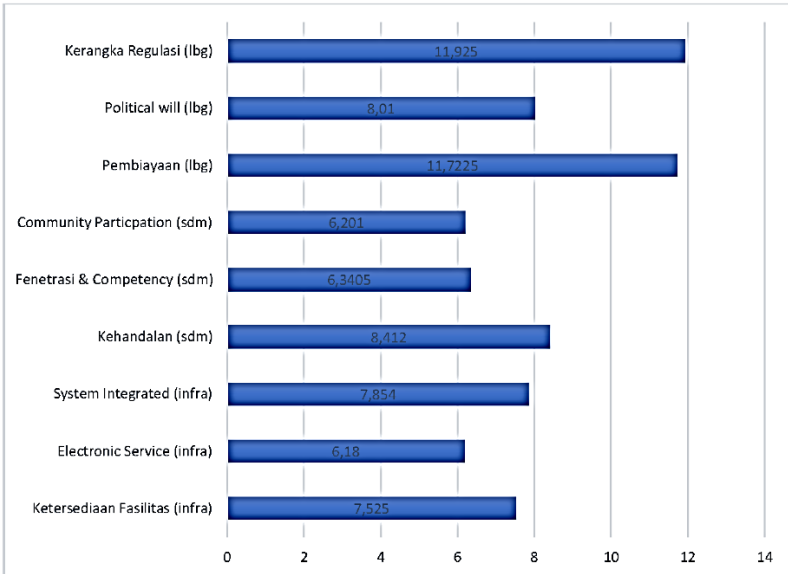
1. Analisis *E-readiness* Penerapan *Smart City* di Kabupaten Kendal

Terkait dengan pelaksanaan *smart city* di Kabupaten Kendal terdapat beberapa kendala yang diperoleh berdasarkan hasil analisis program RPJMD di Kabupaten Kendal tahun 2020-2025. Kendala tersebut secara garis besar dikelompokkan menjadi tiga bagian utama yaitu sosial, ekonomi, dan fisik. Secara spesifik isu strategis yang membutuhkan solusi dan pengembangan adalah di bidang ekonomi daerah, lingkungan, pelayanan publik, pendidikan, infrastruktur daerah, kesehatan, dan kebudayaan. Problematika dan isu strategis baik yang bersifat sektoral maupun keruangan membutuhkan manajemen tata kelola yang sifatnya komprehensif, tepat sasaran, dan efektif. Oleh pihak pemerintah Kabupaten Kendal, penerapan konsep *smart city* ini dipandang mampu menjawab tantangan pengembangan terhadap penyelesaian isu strategis eksisting menjadi fokus di Kabupaten Kendal. Program *smart city* pada penerapannya diidentikkan dengan pemenuhan infrastruktur TIK dan manajemen teknologi baik aplikasi, sensor, dan sebagainya.

Namun hal tersebut tidak cukup menjadi satu-satunya faktor untuk menentukan tingkat keberhasilan penerapan *smart city*. Faktor penting lainnya adalah perlu adanya pemahaman dan pengenalan permasalahan di lapangan serta faktor sumber daya manusia dan manajemen tatakelola yang benar. Pemenuhan infrastruktur tersebut dianggap menjadi sebuah trend

atau ciri khas dari sebuah konsep “*smart*”, sehingga tidak sedikit inisiatif program *smart city* di kota-kota berakhir dengan kegagalan. Tidak hanya terbatas pada infrastruktur berbasis TIK, faktor utama lain yang berperan penting dalam menentukan keberhasilan penerapan konsep *smart city* dalam pembangunan daerah adalah kualitas sumber daya manusia (SDM), *leadership* atau kepemimpinan, manajemen organisasi, dan manajemen tata kelola kegiatan daerah. Program *smart city* yang dijalankan oleh Kabupaten Kendal diharapkan dapat memberikan solusi atas permasalahan yang ada. Oleh karena itu perlu terlebih dahulu diukur kesiapannya menggunakan pengukuran *e-readiness* yang dikategorikan menjadi tiga faktor utama yaitu SDM, teknologi, dan kelembagaan yang setiap subindikator telah menggunakan bobot berdasarkan tingkat urgensi masing-masing. Pengukuran *e-readiness* dilakukan pada dua ranah wilayah pemerintahan, Kota dan Kabupaten Kendal.

Pengukuran ini dilakukan terhadap tiga faktor utama yaitu faktor pemerintah, faktor masyarakat, dan faktor infrastruktur IT. Faktor pemerintah dalam hal ini direpresentasikan oleh Diskominfo dan Bapelitbang Kabupaten Kendal serta beberapa instansi terkait yang memiliki peranan langsung terhadap pengimplementasian konsep *smart city* di Kabupaten Kendal. Faktor masyarakat diwakili responden sebanyak 100 orang. Sedangkan faktor infrastruktur IT dibatasi pada program aplikasi yang telah digunakan sebelumnya namun tidak secara spesifik membahas tentang keberhasilan dibentuknya aplikasi, dan para operator teknologi informasi yang ada. Ketiga faktor utama tersebut penting untuk dianalisis dalam perhitungan *e-readiness* untuk melihat kesiapan pelaksanaan program *smart city* oleh Pemerintah Kabupaten Kendal. Hasil pengukuran ini memberikan gambaran umum bagi Pemerintah Daerah yang menjadi pemangku kepentingan, pembuat kebijakan, serta pengambil keputusan terhadap tingkat kesiapan *smart city* saat ini, sehingga pembenahan permasalahan dan kekurangan yang ada saat ini dapat dilakukan. Adapun hasil pengukuran tingkat kesiapan per masing-masing indikator dijabarkan pada Gambar 3 berikut ini.



Sumber: Data Primer, 2021

Gambar 3. Nilai *E-readiness* Berdasarkan Komponen Pendukung

Nilai *e-readiness* terbesar ditunjukkan oleh indikator *kerangka regulasi* yang diperoleh skor 11,93. Skor tersebut cukup baik dan sudah terealisasi dengan baik dengan adanya master plan pembangunan *smart city* sebagai kekuatan penting sebagai pedoman dan arahan untuk seluruh pemangku kepentingan dalam mendorong realisasi *smart city*. Hal ini juga sebagai upaya dalam menjawab berbagai masalah yang sedang dihadapi oleh pemerintah Kabupaten Kendal. Kerangka regulasi yang terbentuk didorong oleh adanya *political will* dari pemerintah Kabupaten Kendal melalui penandatanganan *Memorandum of Understanding (MoU)* dengan Kementerian Komunikasi dan Informatika (Kemenkominfo) untuk mengimplementasikan program *smart city*. Pemerintah Kabupaten Kendal melalui Diskominfo Kabupaten Kendal telah menyusun masterplan atau rencana induk program *smart city*, serta telah melaksanakan beberapa forum terkait kajian pelaksanaan *smart city* di Kabupaten Kendal. Hasil pengukuran tingkat kesiapan atau *e-readiness* untuk ketersediaan fasilitas

dan prasarana kebutuhan ICT masih cukup minim, salah satunya pada *electronic service* dengan bobot 6,18. Indikator *e-readiness* terkait penetrasi dan *competency* yang berperan untuk peningkatan kreator dan sumber daya manusia dalam mendesain program *smart city* adalah mencapai 6,34. Indikator lainnya adalah yang berkaitan secara langsung dengan kelembagaan untuk memperkuat program *smart city* di Kabupaten Kendal yakni pembiayaan dengan perolehan skor sebesar 11,72. Faktor penting yang dibutuhkan dalam pelaksanaan *smart city* ini yaitu adanya Peraturan Bupati Kendal dalam mendorong peningkatan kinerja masing-masing instansi dalam memprioritaskan penerapan *smart city* ke dalam program yang tertuang dalam RPJMD.



Sumber: Data Primer, 2021

Gambar 4. Nilai *E-readiness* Berdasarkan Faktor Keberhasilan *Smart City*

Berdasarkan temuan yang diperoleh selama pengukuran ketiga komponen utama yang dijadikan dasar instrumen kesiapan Kabupaten Kendal dalam pengimplementasian konsep *smart city* dalam pembangunannya, *human resources* (sumber daya manusia) dan infrastruktur teknologi masih menjadi indikator yang memiliki nilai rendah (Gambar 4). Artinya, dalam hal sumber daya manusia dan teknologi,

Kabupaten Kendal sudah cukup siap dalam melaksanakan program *smart city*. Meski demikian, kelembagaan menjadi indikator pendorong yang sangat kuat dan dapat mendorong peningkatan keberhasilan pencapaian *smart city* di Kabupaten Kendal. Faktor kelembagaan tersebut dinilai menjadi indikator kuat karena menjadi dasar peraturan yang dapat ditindaklanjuti dengan pembuatan arahan kebijakan, program-program yang nantinya akan meningkatkan faktor lain secara tidak langsung. Sesuai dengan penelitian (Widiyastuti, Nupikso, Anata Putra, & Intanny, 2021) bahwa kelemahan belum disusunnya regulasi untuk memperkuat kelembagaan, maka kedepannya akan menjadi penyebab seluruh OPD dalam menerjemahkan program-program menjadi terhambat. Di sisi lain, Diskominfo dan Bapelitbang belum dapat menjalankan perannya dengan optimal sebagai koordinator bagi OPD yang lain dalam pelaksanaan program *smart city*. Pelaksanaan peran tersebut harus menjadi perhatian khusus bagi pemangku kebijakan agar ditindaklanjuti dengan membentuk Forum Bersama yang membahas isu-isu penghambat pelaksanaan program *smart city* di Kabupaten Kendal. Berdasarkan Gambar 4 terlihat bahwa *technology infrastructure* telah mencapai skor 7,19 dari skor 10,00 maksimal, dalam hal kesiapannya. Kesiapan ini tergambarkan dari kondisi eksisting infrastruktur digital atau TIK seperti *bandwith internet* pemerintah yang telah mencapai 17 mbps (*megabyte per second*), telah mengoneksikan beberapa Satuan Kerja Perangkat Daerah (SKPD), serta telah ada beberapa OPD yang berlangganan secara mandiri yang terdiri dari jaringan *wireless* dan jaringan optik.

Selain infrastruktur fisik ICT, infrastruktur non fisik terkait ICT berupa pengembangan aplikasi juga telah ada dan terimplementasi di beberapa OPD, seperti yang terdapat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Contoh Penerapan Program *Smart City* Kabupaten Kendal

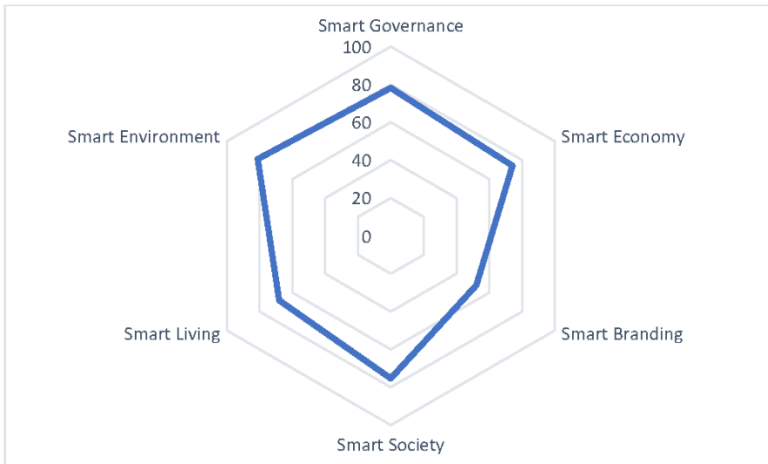
No	Nama Aplikasi	Fungsi	Dinas yang menggunakan	Keterangan
1.	SIPKD	Pengelolaan keuangan daerah, perencanaan, RKA, PDA	Dinas Bina Marga Sumber Daya Air Energi dan Sumber Daya Mineral; Dinas Kesehatan; dan Badan	Aktif dari kabupaten

No	Nama Aplikasi	Fungsi	Dinas yang menggunakan	Keterangan
			Kepegawaian Daerah	
2.	SIMPEG	Laporan	Dinas Bina Marga Sumber Daya Air Energi dan Sumber Daya Mineral; Badan Kepegawaian Daerah	Aktif
3.	EPUPNS	Pengelolaan energi	Dinas Bina Marga Sumber Daya Air Energi dan Sumber Daya Mineral	Belum Aktif
4.	SIROP	Laporan kegiatan fisik dan non fisik	Dinas Bina Marga Sumber Daya Air Energi dan Sumber Daya Mineral	Aktif
5.	Gerbang Informasi Kesehatan	Laporan bulanan	Dinas Kesehatan	Aktif
6.	SIM RS	18 modul RS	RSUD dr. H. Soewondo	Aktif
7.	SIMPOKMAS	Informasi harga kebutuhan pokok masyarakat	Dinas Perindustrian dan Perdagangan	Aktif
8.	Sistem perizinan	Perizinan	Badan Penanaman Modal dan Perizinan Terpadu	Aktif
9.	Peta pemetaan potensi investasi	Pemetaan	Badan Penanaman Modal dan Perizinan Terpadu	Tidak aktif
10.	SI Uji kendaraan	Uji Kendaraan	Dinas Perhubungan	Aktif, lengkap
11.	MAPADA	Pengelolaan Aset	Dinas Pendapatan dan Pengelolaan Keuangan Aset Daerah	Aktif
12.	SISIMOP	Pengelolaan Aset	Dinas Pendapatan dan Pengelolaan	Aktif

No	Nama Aplikasi	Fungsi	Dinas yang menggunakan	Keterangan
			Kepolisian Daerah	
13.	SI ASET	Pengelolaan Aset	Dinas Pendapatan dan Pengelolaan Keuangan Aset Daerah	Aktif
14.	SI PAJAK	Pengelolaan Aset	Dinas Pendapatan dan Pengelolaan Keuangan Aset Daerah	Aktif
15.	SIM GAJI	Pengelolaan gaji	Badan Kepegawaian Daerah	Aktif
16.	SAPK	Sistem aplikasi pelayanan kepegawaian	Badan Kepegawaian Daerah	Aktif
17.	SISTEM PENGUMUMAN	Sistem pengumuman ke spd lain	Dinas Komunikasi dan Informatika	Pasif
18.	HELP DESK	Aplikasi web helpdesk	Dinas Komunikasi dan Informatika	Belum Aktif
19.	E-OFFICE	Aplikasi agenda surat	Dinas Komunikasi dan Informatika	Belum Aktif

Sumber: Dinas Komunikasi dan Informatika Kabupaten Kendal, 2019

Selain mengukur *e-readiness* pada tingkat kematangan dalam melaksanakan program *smart city*, diukur juga skor dimensi *smart city* Kabupaten Kendal yang ditinjau berdasarkan program yang telah dilakukan oleh masing-masing OPD. Identifikasi dimensi *smart city* dalam konteks pembangunan di Kabupaten Kendal diidentifikasi menggunakan pendekatan *Boyd Cohen Smart City Wheel* yang telah disesuaikan dengan beberapa indikator dari *city key* mengingat di Indonesia sendiri belum tersedia standarisasi nyata untuk mengidentifikasi indeks dimensi *smart city*. Indikator yang digunakan dalam mengukur masing-masing dimensi telah disesuaikan dengan kondisi awal pelaksanaan program terkait sektor-sektor yang berhubungan langsung dengan dimensi *smart city* di Kabupaten Kendal. Adapun hasil perhitungan rating dimensi *smart city* menggunakan metode *Boyd Cohen Smart City Wheel* adalah sebagai berikut pada Gambar 5.



Sumber: Data Primer, 2021

Gambar 5. Analisis *Boyd Cohen Smart City Wheel* Kabupaten Kendal Tahun 2021

Berdasarkan hasil data pada Gambar 5, ditemukan bahwa dimensi *smart environment* mendapatkan skor tertinggi mencapai 81,15. Sementara dimensi *governance* memperoleh skor 78,19. Nilai terkecil terdapat dimensi *smart branding* yaitu mencapai skor 52,10. Nilai *smart governance* mendapat nilai tertinggi disebabkan oleh karena adanya beberapa inovasi pelayanan publik dan *platform digital* yang didesain oleh pemerintah Kabupaten Kendal untuk mempercepat berbagai layanan yang dibutuhkan oleh masyarakat sehingga masyarakat dapat mengakses berbagai kebutuhan layanan dengan mudah, efisien dan biaya terjangkau. Presentase pelayanan kesehatan yang dinilai telah mencapai kondisi prima. Kondisi prima ini juga dilihat dari tingginya angka harapan hidup yang mencerminkan baiknya pelayanan fasilitas kesehatan di Kabupaten Kendal. Terkait dengan konsep *smart city*, saat ini telah ada upaya penggunaan teknologi dalam pelayanan fasilitas kesehatan berupa menciptakan sistem informasi ketersediaan kamar rawat inap dan antrian (Sikini) sehingga memudahkan masyarakat atau calon pasien untuk mengetahui jumlah kamar yang tersedia. Inovasi lainnya berupa pengembangan pendaftaran rumah sakit secara *online* berbasis Android (RSUD Pendaftaran *Online*)

sehingga dapat memangkas waktu tunggu calon pasien dan mengurangi penumpukan pasien pada jam-jam sibuk sehingga dapat meminimalisir keramaian. *Smart environment* awalnya dianggap tantangan paling utama karena masih banyak program yang belum bisa dilakukan. Kondisi lingkungan di beberapa titik sebelumnya sangatlah buruk, diantaranya karena adanya tumpukan sampah di sekitaran sungai Patebon, Kecamatan Kendal. Namun kondisi ini sudah dapat diatasi oleh pemerintah Kabupaten Kendal melalui beberapa kebijakan berbasis *smart city* yang telah di desain dengan baik.

Terkait komponen penilaian lain, persentasinya tergolong rendah artinya membutuhkan strategi matang dan solusi efisien untuk meningkatkan nilai rating. Peningkatan efisiensi penggunaan energi juga dapat menunjang peningkatan tata kelola sampah dan limbah (*waste*), sehingga kedua komponen tersebut dapat meningkatkan *smart environment*. Sebagai upaya menciptakan peningkatan *smart environment*, Kabupaten Kendal harus mulai memikirkan penggunaan ramah lingkungan berupa pemanfaatan energi yang efisien, peningkatan usaha pengembangan energi alternatif yang ramah lingkungan (*environmentally friendly*) dan berkelanjutan (*sustainable*) seperti pemanfaatan kembali limbah/sampah sebagai biogas, sosialisasi penggunaan energi yang efisien dan bertanggungjawab kepada pemerintah daerah dan masyarakat.

Smart branding memperoleh skor 52,10 dalam hasil pengukuran *smart city* di Kabupaten Kendal. Pengembangan *smart branding* masih cukup lemah terkait dengan promosi pariwisata, pengelolaan hasil industri, dan investasi. *Smart branding* ini dilihat dari kuantitas tingkat kunjungan wisata, pertumbuhan jumlah wisatawan yang datang ke Kabupaten Kendal, promosi objek wisata, penyelenggaraan festival seni, dan nilai investasi yang masih menjadi tantangan utama bagi Kabupaten Kendal karena masih jauh dari target yang dicapai. Sementara dalam dimensi *smart economy* yang mengandalkan peningkatan kapasitas UMKM berbasis digital dan pengembangan *smart industry* sudah cukup baik dengan memperoleh skor sebesar 74,15. Pengembangan kapasitas UMKM dilakukan dengan digitalisasi UMKM, memberikan modal ventura dan membangun *Kendal Creative Hub*. Sementara *smart industri* Kabupaten Kendal kini telah memiliki Kendal Industrial Park (KIK). Penguatan dua sektor ini nantinya diharapkan dapat meningkatkan kontribusinya terhadap Pendapatan Asli Daerah sehingga meningkatkan *Smart Economy*.

Terkait dengan *smart living* yang berkaitan dengan penataan kawasan, kondisi lingkungan perumahan, sistem sirkulasi, dan transportasi memiliki persentase yang tergolong masih cukup rendah dengan rata-rata mencapai 68,05%. Komponen tersebut tersebut teridentifikasi masih belum menggambarkan kondisi ideal dalam sebuah pembangunan kawasan hunian di Kabupaten Kendal. Harmonisasi tata ruang kawasan dan kenyamanan dalam bertempat tinggal serta memperoleh akses transportasi masih belum optimal, karena belum terjadi sinkronisasi letak lokasi perumahan dengan sarana transportasi sehingga masyarakat cenderung menggunakan angkutan pribadi dalam memenuhi mobilitasnya. Kondisi ini tidak berkontribusi baik dalam menunjang *smart living*. Integrasi lainnya belum terkoneksi dengan baik antara ekosistem pendidikan dengan zona mobilitas angkutan barang yang tidak didukung dengan proteksi lingkungan dengan baik. Rendahnya integrasi tata ruang dan lingkungan dapat berkontribusi rendah terhadap keselamatan masyarakat.

Hasil pemetaan (*Mapping*) kondisi eksisting *smart city* di Kabupaten Kendal dikatakan bahwa tingkat kematangannya berada pada tahap *ad-hoc*. Tahap *ad-hoc* artinya inisiatif pengembangan kelembagaan program dan manajemen tata kelola masih banyak yang belum berbentuk formal dan searah dengan implementasi program *smart city* yang bertujuan mengatasi permasalahan isu strategis di masing-masing wilayah baik di tingkat kecamatan, kelurahan, atau desa. Kondisi ini menyebabkan penanganan masalah di Kabupaten Kendal pada berbagai sektor belum dapat terlaksana dengan baik dan masih perlu ditingkatkan komitmen semua pihak terkait. Namun, pada beberapa kasus penting, tingkat kematangan *smart city* di Kabupaten Kendal telah ada inisiatif formal (initial) yang tertuang dalam rencana formal kabupaten yang telah melibatkan berbagai pihak seperti Dewan *Smart City*, Lembaga Swadaya Masyarakat, private sektor, pengusaha, akademisi, dan pihak-pihak terkait lainnya (Safitry, Purnomo, & Salsabila, 2020).

2. Strategi Pengembangan Manajemen Kota Berbasis *Smart City* di Kabupaten Kendal

Masterplan *smart city* Kabupaten Kendal telah diterbitkan tahun 2019 yang menjadi acuan dan dasar hukum pengembangan *smart city* di Kabupaten Kendal, namun belum ada dasar hukum yang secara eksplisit menaungi penerapan Manajemen Pengelolaan *Smart City* Kabupaten

Kendal. Selain itu, pemerintah pusat melalui Kemenkominfo belum mengeluarkan penetapan aturan atau kebijakan implementatif tentang tata kelola *smart city* di Indonesia. Kondisi tersebut memperpanjang daftar tugas Pemerintah Daerah yang harus dilakukan agar subindikator tata kelola *smart city* dapat tercapai. Penataan unsur *smart city* di Kabupaten Kendal sepenuhnya dilakukan oleh Pemerintah Daerah yang dalam hal ini oleh Diskominfo dan Bapelitbang. Penataan unsur *smart city* tersebut meliputi pemberian batasan dan panduan bagi OPD dan organisasi *smart city* di Kabupaten Kendal. Beberapa kerangka strategi yang menjadi pilihan terkait manajemen tata kelola *smart city* yang telah dianalisis berdasarkan kondisi eksisting di lapangan terdiri atas dua strategi.

1. Strategi 1: Pembenahan manajemen tata kelola yang mencakup tiga komponen penting seperti sumber daya manusia, kelembagaan, dan infrastruktur teknologi informasi.
2. Strategi 2: Optimalisasi peran dan fungsi dewan *smart city*.

Mengacu pada kondisi saat ini, Kabupaten Kendal dinilai perlu untuk lebih meningkatkan studi banding mempelajari *best practice* yang telah lebih dahulu dilakukan oleh kota-kota lainnya di Indonesia. Beberapa kota yang menjadi contoh *best practice* adalah Kota Surabaya dan Kota Bandung. Kedua kota besar tersebut dinilai telah berhasil dalam penerapannya.

Kabupaten Kendal harus berbenah dan mencari solusi terbaik dalam menindaklanjuti segala kendala internal baik melalui organisasi/kelembagaan maupun program. Beberapa strategi yang perlu dilaksanakan untuk mewujudkan *smart city* adalah penguatan koordinasi antar SKPD dan optimalisasi peran dewan *smart city* serta membentuk sekretariat bersama yang berfungsi sebagai pusat koordinasi antar SKPD berdasarkan dimensi *smart city* yang telah dirumuskan yaitu dimensi *smart living*, *smart environment*, *pokja smart government*, *smart economy*, dan *smart people*. Sekretariat bersama yang dibentuk tersebut berguna dalam peningkatan koordinasi pelaksanaan program-program, sinkronisasi proses pelaksanaan, evaluasi hasil, dan pelaporan dari pelaksanaan program-program yang telah dilaksanakan oleh masing-masing instansi. Berikut beberapa strategi yang dapat dilakukan untuk pembenahan manajemen tata kelola oleh Pemerintah Daerah Kabupaten Kendal guna menindaklanjuti program *smart city*.

Tabel 4. Analisis Pengembangan *Smart City* Kabupaten Kendal

No	Indikator Pengembangan <i>Smart City</i>	Strategi	Aksi
1.	Kelembagaan	Diperlukannya membangun kelembagaan yang fokus mengelola <i>smart city</i>	Mendirikan kelembagaan <i>smart city</i>
		Perlu dibentuk aturan tertinggi	Menerbitkan Peraturan Bupati tentang pengelolaan <i>smart city</i>
		Diperlukan dokumen formal setiap OPD pengelola dimensi <i>smart city</i>	Kebijakan teknis masing-masing kepala OPD tentang pengelolaan <i>smart city</i>
		Diperlukannya mekanisme pengelolaan anggaran yang seimbang	Membangun kemitraan tentang <i>sharing profit</i> pengelolaan anggaran
2.	Sumber daya Manusia	Belum optimalnya kualitas <i>SDM</i> pengelola teknologi <i>smart city</i>	Peningkatan <i>skill</i> tenaga profesional di bidang ICT/TIK yang berkemampuan pada bidang big data, aplikasi, analisis data, dan dalam bidang manajerial
		Belum optimalnya kapasitas <i>SDM</i> pengelola masing-masing dimensi <i>smart city</i> pada setiap OPD	Penguatan literasi pemahaman <i>smart city</i> kepada masing-masing pengelola dimensi <i>smart city</i>

No	Indikator Pengembangan Smart City	Strategi	Aksi
3.	Infrastruktur IT	Belum terintegrasinya sistem pelayanan publik berbasis SPBE	Penguatan inovasi layanan berupa pembuatan aplikasi, dan strategi sosialisasi
		Lemahnya manajemen pengelolaan data untuk <i>making decision</i>	Pembentukan <i>command center</i> , Kendal Satu Data, dan akses data publik
		Belum tersedianya SOP yang menjadi acuan pengelolaan teknologi	Menyiapkan rancangan SOP penggunaan teknologi dan informasi
		Kerentanan kerusakan, dan peretasan data daerah	Perlu adanya skema mitigasi bencana dan SOP pelaksanaan mitigasi tersebut

Sumber: Data Primer, 2021

Ketiga komponen utama penunjang pengembangan *smart city* pada Tabel 4, perlu menjadi fokus utama Pemerintah Daerah Kabupaten Kendal. Strategi tambahan lainnya sebagai berikut.

1. Strategi peningkatan kelembagaan
 - a. Membentuk komunitas pendukung *smart city* daerah yang struktur organisasinya terdiri dari lembaga swadaya masyarakat, pemangku adat/agama, dan perwakilan masyarakat itu sendiri.
 - b. Pemantapan tugas dan fungsi dari dewan *smart city*, memperjelas kedudukan, struktur elemen, dan pembagian kewenangan dalam melaksanakan program.
 - c. Berbeda dengan dewan, tim pelaksana dan tim evaluator juga perlu diperjelas struktur, tugas dan fungsinya.
 - d. Strategi kolaborasi. Selain oleh Dewan *Smart City*, koordinasi dan evaluasi juga perlu melibatkan Diskominfo untuk menilai aspek-aspek teknologi dalam pelaksanaan program-program oleh SKPD.

- e. Pemantapan kembali kesiapan keuangan daerah dalam pendanaan pengembangan *smart city*, baik kejelasan alokasi dana untuk *smart city* maupun pengelola dana itu sendiri.
 - f. Penyiapan instrumen pemberian insentif dan disinsentif bagi SKPD yang melaksanakan program-program pendukung implementasi konsep *smart city* secara efisien.
2. Strategi peningkatan sumber daya manusia
- a. Peningkatan kapasitas sumber daya manusia secara kelembagaan yang akan mengelola *smart city*. Memanfaatkan sumber daya manusia yang tersedia dengan melakukan peningkatan kapasitas pada setiap dimensi *smart city* untuk mendorong operasionalisasi berbagai macam teknologi yang dapat menyelesaikan persoalan daerah serta mendorong visi dan misi pembangunan.
 - b. Peningkatan keahlian dan keterampilan pengelola aplikasi yang dapat mengoperasikan dan mengembangkan platform pelayanan publik kepada masyarakat. Kapasitas yang maksimal akan membuat semua potensi yang dimiliki bermanfaat untuk kepentingan publik.
 - c. Penguatan Aparatur Sipil Negara (ASN) di lingkungan OPD Kabupaten Kendal untuk memahami program *smart city* supaya lebih memahami perkembangan teknologi, sistem pengembangan yang relevan dengan kondisi saat ini, serta dapat membantu meningkatkan dimensi *smart city*.
 - d. Memperkuat sumber daya manusia terkait dengan melengkapi segala perangkat lunak maupun perangkat keras. Tujuannya adalah supaya sumber daya manusia lebih memahami perkembangan perangkat komputer yang dikembangkan saat ini.

Upaya-upaya yang dilakukan melalui peningkatan infrastruktur untuk merealisasikan penerapan *smart city* adalah sebagai berikut.

1. Optimalisasi penggunaan aplikasi yang sudah tersedia dengan aktif, melakukan diseminasi platform pelayanan publik, pengembangan fitur, dan pengelolaan data.
2. Penambahan dukungan situs pemerintah skala kecamatan untuk mendukung data dan informasi yang disajikan melalui situs resmi pemerintah kabupaten.

3. Pemberian insentif berupa kemudahan pembuatan *website* resmi kecamatan oleh Diskominfo Kabupaten Kendal untuk meningkatkan pembuatan *website* resmi kecamatan.
4. Pemberian insentif berupa keringanan pajak, kemudahan pengurusan administrasi bagi pengembang *startup* yang ikut meningkatkan UMKM masyarakat Kabupaten Kendal.
5. Pemberian program bimbingan teknis, seminar, dan *workshop* terkait teknologi bagi pokja *smart city*.
6. Peningkatan basis data desa dan dilakukan digitalisasi data. Digitalisasi data dimudahkan untuk pengelolaan data secara *realtime* bagi pemerintah daerah, dan pengakseskan data dasar desa bagi masyarakat umum.

Penguatan infrastruktur merupakan strategi pertama yang harus dioptimalkan jika melihat hasil kesiapan *smart city* Kabupaten Kendal. Beberapa aplikasi yang sudah disiapkan dan sudah diimplementasikan harusnya ditingkatkan dari pengembangan fitur, akses dan jangkauan, serta kebermanfaatannya. Membangun pusat pengelolaan data juga menjadi fokus utama bagi Kabupaten Kendal. Kelemahan ketersediaan data dapat ditindaklanjuti dengan membangun *big data management* dan *command center* sebagai pertimbangan utama pengelolaan informasi dan pengambilan keputusan. Konektivitas antara satu wilayah dengan wilayah yang lain harus mampu dilakukan sehingga dapat mengontrol dan memantau setiap persoalan yang terjadi.

Penerapan konsep *smart city* di Kabupaten Kendal dapat terlaksana dengan efisien dan efektif apabila melibatkan berbagai pihak yang disebut dengan *pentahelix* yaitu meliputi peran Pemerintah Daerah Kabupaten Kendal, akademisi, pelaku usaha, masyarakat dan media. Saat ini pengkajian *smart city* Kabupaten Kendal telah melibatkan beberapa pihak terkait namun masih dalam lingkup kecil dan menghasilkan saran dan masukan yang harus dilaksanakan segera mungkin. Dewan *smart city* berdasarkan Keputusan Bupati Kendal Nomor 650/262/2018 memiliki tugas dan fungsi yaitu membantu pemerintah Kabupaten Kendal untuk mengelola pelaksanaan *smart city* dan menjadi wadah untuk semua elemen dalam rangka mempercepat pembangunan *smart city* di Kabupaten Kendal.

Dewan *smart city* dapat melakukan penerapan teknologi *smart city* dalam pembangunan Kabupaten Kendal dengan melibatkan masyarakat

menciptakan masyarakat dan komunitas yang siap dalam menyongsong *society* 5.0. Konsep *society* 5.0 ini nantinya akan melatih masyarakat untuk menerapkan ilmu pengetahuan untuk mempermudah hidup mereka melalui teknologi karena sesuai tujuannya bahwa *society* 5.0 menjadikan manusia sebagai target utama pengguna teknologi dan penerima manfaat dari teknologi itu sendiri.

Pada era *society* 5.0, inovasi dan perkembangan teknologi informasi kemudian diarahkan untuk mengatasi ketimpangan dengan memperbaiki produk dan jasa menjadi lebih berkualitas, bahkan mengembangkan produk, barang, dan jasa baru yang belum tersentuh pada era sebelumnya. Kabupaten Kendal harus mempersiapkan diri dalam mengembangkan era *society* 5.0 dengan memperkuat dimensi pengembangan *smart city* dan melibatkan seluruh pihak, termasuk melibatkan masyarakat sebagai aspek dan pelaku utama dalam pembangunan. Penggunaan berbagai perangkat teknologi secara otomatis seperti penggunaan *artificial intelegent* akan membuat proses produksi dan operasionalisasi berjalan 24 jam sehingga kapasitas produksi barang, produk, dan jasa menjadi lebih maksimal, standarisasi kualitas produk juga lebih terjamin. Akhirnya segala sesuatu yang dijadikan fokus pengembangan akan tercipta efisiensi dan memaksimalkan keuntungan organisasi. Pada konteks implementasi penguatan pelayanan publik dan kebijakan *smart city*, seharusnya dapat diarahkan untuk mengadopsi *society* 5.0 sehingga masyarakat Kabupaten Kendal akan mulai beradaptasi dengan teknologi dan diharapkan teknologi tersebut menjadi bagian dari aktivitas masyarakat serta dapat menciptakan hal modern yang baru.

KESIMPULAN

Pembangunan *smart city* Kabupaten Kendal dipengaruhi oleh tiga indikator penting yang dijadikan acuan dalam mengukur kesiapan *smart city* antara lain institusional, manusia, dan teknologi. Indikator kelembagaan memperoleh nilai cukup baik dengan skor 7,91 dari *grade* 10. Nilai tersebut mencerminkan bahwa implementasi *smart city* secara regulasi sudah cukup baik. Namun dari aspek pengembangan sumber daya manusia dan infrastruktur teknologi masih perlu ditingkatkan sebagai upaya untuk mewujudkan suksesnya penerapan *smart city* di Kabupaten Kendal. Dimensi *smart city* yang mendapat skor baik adalah *smart environment* (skor 81,15)

dan *smart governance* (skor 78,19). Berdasarkan hal tersebut diketahui bahwa kebijakan pemerintah Kabupaten Kendal dalam mendukung penerapan *smart city* sudah cukup baik, dengan terealisasinya beberapa pengembangan platform dan inovasi pelayanan publik. Namun masih diperlukan dorongan untuk diterbitkannya Peraturan Bupati sebagai penguat kebijakan yang telah ada yang sangat diperlukan guna memudahkan masing-masing OPD dalam melaksanakan program yang sudah direncanakan dalam *master plan smart city*. Kabupaten Kendal juga harus mempersiapkan diri untuk beradaptasi di era *society 5.0* dengan memperkuat dimensi pengembangan *smart city* dengan melibatkan berbagai pihak, khususnya melibatkan masyarakat sebagai aspek dan pelaku utama dalam pembangunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Annisah, A. (2018). Usulan perencanaan smart city: smart governance pemerintah daerah Kabupaten Mukomuko. *Masyarakat Telematika dan Informasi: Jurnal Penelitian Teknologi Informasi dan Komunikasi*, 8(1), 59. <https://doi.org/10.17933/mti.v8i1.103>
- Bahtiar, R. A., & Saragih, J. P. (2020). Dampak Covid-19 terhadap perlambatan. *Kajian Singkat terhadap Isu Aktual dan Strategis*, 12, 20.
- Dinas Komunikasi dan Informatika Kabupaten Kendal (2019). *Master plan smart city Kabupaten Kendal 2019-2028*. Kabupaten Kendal: Dinas Komunikasi dan Informatika.
- Graha, I. M. S. (2020). Proses Kota Denpasar menuju smart city. *Jurnal Litbang Sukowati : Media Penelitian dan Pengembangan*, 4(2), 11. <https://doi.org/10.32630/sukowati.v4i2.125>
- Hidayaturrehman, M., & Purwanto, E. (2020). COVID-19: Public support to handle economic challenges. *Jurnal Inovasi Ekonomi*, 5(2), 31–36. <https://doi.org/10.22219/jiko.v5i3.11681>
- Nicola, M., Alsafi, Z., Sohrabi, C., Kerwan, A., Al-Jabir, A., Losifidis, C.,...Agha, R. (2020). The socioeconomic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): A review. *International Journal of Surgery*, 78, 185-193.
- Safitry, N., Purnomo, E. P., & Salsabila, L. (2020). Go-Jek sebagai dimensi *smart mobility* dalam konsep *smart city*. *Journal Moderat*, 6(1), 157–170.
- Suhendra, A. (2017). Kesiapan pemerintah daerah dalam mewujudkan kota cerdas di Bandung dan Surabaya. *Matra Pembaruan*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.21787/mp.1.1.2017.1-9>
- Taufik, T., & Ayuningtyas, E. A. (2020). Dampak pandemi Covid 19 terhadap bisnis dan eksistensi platform online. *Jurnal Pengembangan Wiraswasta*, 22(01), 21. <https://doi.org/10.33370/jpw.v22i01.389>
- Utomo, C. E. W., & Hariadi, M. (2016). Strategi pembangunan smart city dan tantangannya bagi masyarakat kota. *Jurnal Strategi dan Bisnis*, 4(2), 159–176.

Widiyastuti, I., Nupikso, D., Anata Putra, N., & Intanny, V.A. (2021). *Smart sustainable city framework: usulan model kota cerdas yang berkelanjutan dan integratif*. *Jurnal PIKOM (Penelitian Komunikasi dan Pembangunan)*, 22(1), 13. <https://doi.org/10.31346/jpikom.v22i1.3297>

BIODATA PENULIS



Dr. Fatia Fatimah, S.Si., M.Pd., lahir di Pinagar, Sumatera Barat pada tahun 1980. Fatia, panggilan akrabnya, menempuh S1 di Jurusan Matematika, Universitas Andalas (Unand) dan lulus pada tahun 2002. Pada tahun 2009 Fatia menyelesaikan S2 pada Jurusan Teknologi Pendidikan Konsentrasi Matematika di Universitas Negeri Padang (UNP) dengan predikat *cumlaude*. Pada tahun 2018 Fatia juga berhasil mendapat *Cumlaude* pada Program Doktor Matematika (S3) di Universitas Gadjah Mada (UGM). Saat ini penulis merupakan dosen Program Studi Matematika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka. Penulis merupakan penemu teori *N-Soft Sets*. Semua karya penulis dapat dibaca pada fatia.staff.ut.ac.id. Penulis juga sebagai *invited speaker* di berbagai kegiatan. Motto yang selalu dipegang teguh penulis adalah “*no matter what people say, dare to dream*”. Email yang dapat dihubungi adalah fatia@ecampus.ut.ac.id



Darsih Idayani, M.Si. lahir di Situbondo, Jawa Timur. Pendidikan S1 Matematika diperoleh dari ITS pada tahun 2010. Pendidikan S2 juga diperoleh dari ITS pada tahun 2014. Saat ini penulis bertugas sebagai dosen pada Program Studi Matematika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka. Mata kuliah yang diampu adalah mata kuliah Kalkulus I, Pemodelan Matematis, Metode Matematis I, dan Metode Matematis II. Bidang minat penelitian adalah matematika terapan (kontrol optimal dan optimasi). Email yang dapat dihubungi adalah darsih@ecampus.ut.ac.id



Selly Anastassia Amellia Kharis, S.Pd, M.Si. lahir di Jakarta. Pendidikan S1 Pendidikan Matematika diperoleh dari Universitas Negeri Jakarta pada tahun 2016. Pendidikan S2 diperoleh dari Universitas Indonesia pada tahun 2018. Mata kuliah yang menjadi ampunan adalah mata kuliah Fungsi Kompleks, Kalkulus I, Kalkulus II, dan Pengantar Matematika. Bidang minat penelitian adalah di bidang *big data* dan *machine learning*. Email yang dapat dihubungi adalah **selly@ecampus.ut.ac.id**



Dra. Lintang Patria, M.Kom. Lahir di Mojokerto. Pendidikan S1 bidang Matematika dari Institut Teknologi Sepuluh Noverber pada tahun 1991. Pendidikan S2 diperoleh dari Universitas Indonesia pada tahun 2003. Mata kuliah yang menjadi ampunan adalah Himpunan Kabur. Bidang minat penelitian adalah di bidang Matematika dan Sistem Informasi. Email yang dapat dihubungi adalah **lintang@ecampus.ut.ac.id**.



ing. Mohamad Rajih Radiansyah B.AS., M.Sc., berasal dari kota Jakarta. Pendidikan S1 bidang *Process and Food Technology* diperoleh dari *The Hague University of Applied Sciences* pada tahun 2011 dan Pendidikan S2 bidang *Food Technology* diperoleh dari *Gent University* pada tahun 2018. Mata kuliah yang menjadi ampunan diantaranya adalah Pengemasan Pangan, Pengendalian Mutu pada Industri Pangan, Rancangan Percobaan untuk Teknologi Pangan dan Rekayasa Pangan. Minat dan penelitian adalah dalam bidang nutrisi, teknologi dan rekayasa pangan. Email yang dapat dihubungi adalah **ing-mohamad@ecampus.ut.ac.id**



Athiefah Fauziyyah, S.T.P., M.Si. lahir di Yogyakarta pada tanggal 14 Juli 1991. Pada tahun 2013, penulis meraih sarjana pada bidang teknologi pangan dari Universitas Gadjah Mada. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor di bidang ilmu pangan. Mata kuliah yang menjadi ampunan adalah Teknologi Pengolahan Pangan, Regulasi Pangan, Evaluasi Sensori, Penyimpanan dan Penggudangan, Kewirausahaan Produk Pangan dan Praktikum Teknologi Pengolahan Pangan. Bidang minat penelitian penulis adalah bidang teknologi pangan. Penulis dapat dihubungi pada alamat email athiefah.fauziyyah@ecampus.ut.ac.id



Dini Nur Hakiki, S.T.P., M.Si. lahir di Pasuruan. Pendidikan S1 bidang Teknologi Industri Pertanian diperoleh dari Institut Pertanian Bogor (IPB) pada tahun 2006. Pendidikan S2 Teknologi Pascapanen diperoleh dari IPB pada tahun 2015. Mata kuliah yang menjadi ampunan adalah Penanganan dan Pengolahan Hasil Hortikultura, Penanganan dan Pengolahan Sereal dan Palawija, dan Penanganan dan Pengolahan Hasil Peternakan. Bidang minat penelitian adalah di bidang Teknologi Pascapanen, Rekayasa Pangan, Pangan Lokal, Pangan Fungsional, dan Pangan Halal. Email yang dapat dihubungi adalah dini-hakiki@ecampus.ut.ac.id



Dra. Eko Yulastuti E.S., M.Si. lahir di Kudus. Pendidikan S1 di bidang Biologi diperoleh dari Universitas Jenderal Soedirman pada tahun 1988. Pendidikan S2 di bidang Gizi Masyarakat diperoleh dari IPB pada tahun 2005. Mata kuliah yang menjadi ampunan adalah mata kuliah Evaluasi Nilai Gizi Pangan, Pengetahuan Bahan Pangan, dan Penanganan dan Pengolahan Hasil Perikanan. Bidang minat penelitian adalah di bidang gizi pangan. Email yang dapat dihubungi eko@ecampus.ut.ac.id



Diki, S.Si., M.Ed., Ph.D. lahir pada tanggal 15 April 1969. Saat ini menjadi dosen di Program Studi Biologi, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka. Matakuliah ampuannya adalah Genetika. Pendidikan sarjananya adalah di Jurusan Biologi, Universitas Padjadjaran, Bandung. Pendidikan magister diselesaikan di Jurusan Information Technology for Education di University of

Sydney, Australia dengan beasiswa dari Australian Development Scholarship. Adapun Pendidikan doktoral ditempuh di Jurusan Educational Studies di Claremont Graduate University, California, Amerika Serikat, dalam program Japan-Indonesia Presidential Scholarship dari World Bank. Kegiatan seminar dan studi banding yang pernah diikuti adalah di India, Malaysia, Vietnam, Pakistan, dan Selandia Baru.



Cut Meutia Fajrina, S.Hum. merupakan mahasiswa Program Studi (S1) Biologi di Universitas Terbuka sejak tahun 2020 yang memiliki peminatan di bidang neurobiologi, genetika, dan bahasa. Penulis memulai pendidikan dasar di Lhokseumawe, Aceh, kemudian melanjutkan pendidikan SMP dan SMA di Doha, Qatar, dengan peminatan di bidang Biologi dan Bahasa Asing. Pada tahun 2017, penulis menempuh Pendidikan Sarjana Humaniora di Fakultas Ilmu Pengetahuan Budaya, Universitas Indonesia. Kariernya berlanjut di bidang pendidikan

bahasa asing di sebuah sekolah kerjasama Cambridge pada 2018-2021, kemudian aktif sebagai pengajar IELTS dan penerjemah lepas hingga saat ini. Beberapa penelitian telah dilakukannya, diantaranya mengenai penggunaan *Spaced-Repetition System* untuk meningkatkan retensi memori, prospek terapi gen pada Glioblastoma, dan membantu penelitian yang dihasilkan menjadi buku berjudul *Merawat Nilai-nilai KelIndonesiaan*. Email yang dapat dihubungi adalah **cutmeutiafa@gmail.com**



Fikri Nashrullah lahir di Kota Tasikmalaya pada tanggal 20 April 2000. Menjalani jenjang pendidikan SD hingga SMA di Kota Tasikmalaya. Saat ini menjadi mahasiswa S1 Jurusan Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Padjadjaran, Bandung. Memiliki minat di bidang sosial ekonomi perikanan. Adapun mata kuliah yang paling disukai adalah ekonomi produksi perikanan. Email yang dapat dihubungi adalah

fikrinashrullah@gmail.com



Mutimanda Dwisatyadini, M.Kep. lahir di Jakarta. Pendidikan S1 bidang Keperawatan diperoleh dari Universitas Binawan pada tahun 2009. Pendidikan S2 bidang Keperawatan diperoleh dari Universitas Indonesia pada tahun 2012. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Mikrobiologi dan Hidrobiologi. Bidang minat penelitian adalah di bidang Kesehatan dan Biomedik. Email yang dapat dihubungi

adalah **mutimanda@ecampus.ut.ac.id**.



Venty Fitriany Nurunisa SE., M.Si., M.Sc. lahir di Bogor. Pendidikan S1 bidang Agribisnis diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2011. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor dan Georg August University pada tahun 2015. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Dasar-Dasar Agribisnis, Manajemen Agribisnis, Studi Kelayakan Agribisnis, Tataniaga

Pertanian, dan Kewirausahaan. Bidang minat penelitian adalah di bidang Agribisnis. Email yang dapat dihubungi adalah **venty@ecampus.ut.ac.id**



Ir. Sri Yuniati Putri Koes Hardini, M.P. lahir di Banjarnegara. Pendidikan S1 Peternakan diperoleh dari IPB pada tahun 1982. Pendidikan S2 diperoleh dari IPB pada tahun 2008. Mata kuliah yang menjadi ampunan adalah mata kuliah Lingkungan Ternak dan Pengolahan Limbah Ternak. Bidang minat penelitian adalah di bidang Agribisnis. Email yang dapat dihubungi adalah yuniati@ecampus.ut.ac.id



Prof. Dr. Ir. Iman Rahayu Hidayati Soesanto, MS. IPU lahir di Surabaya, 21 April 1959. Pendidikan Sarjana diselesaikan di Fakultas Peternakan IPB tahun 1982, selanjutnya Program Magister diselesaikan di Universitas Padjadjaran, bidang Ilmu Ternak tahun 1991 dan Doctor of Philosophi (PhD) diperoleh tahun 2000 dari University Putra Malaysia. Sejak tahun 1991 hingga saat ini aktif melaksanakan kegiatan Tri Dharma Perguruan Tinggi di Departemen Ilmu Produksi dan Teknologi Peternakan, Fakultas Peternakan, IPB. Pengalaman mengajar beberapa mata kuliah seputar Unggas (produksi, nutrisi, ekonomi sosial, tingkah laku dan kesejahteraan ternak unggas, pengolahan hasil ternak unggas, dan lain lain). Penelitian mutakhir yaitu penggunaan IoT pada pengamatan ternak unggas dan *Smart Poultry Farm*.



Adhi Susilo, S.Pt., M.Biotech.St., Ph.D. berkecimpung di bidang ilmu produksi ternak, bioteknologi, bioremediasi, pendidikan jarak jauh, serta media dan teknologi pendidikan. Saat ini menjabat sebagai Wakil Dekan bidang Akademik, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka. Lahir di Purwokerto, 16 April 1970, menyelesaikan pendidikan S1 pada tahun 1994, Jurusan Produksi Ternak di Universitas Jenderal Soedirman. Magister Ilmu Bioteknologi (M.Biotech.St.) pada tahun 2007 Program Studi Bioteknologi di Universitas Flinders, Adelaide - Australia Selatan. Doktor teori kurikulum dan penerapannya dari Simon Fraser University di British Columbia (Vancouver-Canada) pada tahun 2013. Sebagai nara sumber pada

berbagai kegiatan ilmiah, perumusan kebijakan di Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, dan tenaga ahli dalam pengembangan Desa Berinovasi Badan Riset dan Inovasi Nasional. Sebagai narasumber dan penulis aktif pada berbagai makalah dalam pertemuan ilmiah, seminar nasional, dan internasional. Penulis dapat dihubungi pada HP/WA 081399646475. email: adhi@ecampus.ut.ac.id



Tejo Susanto, S.P. Lahir di Sragen, menyelesaikan pendidikan S1 Agribisnis bidang minat Penyuluhan dan Komunikasi Pertanian, di Jurusan Pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka pada tahun 2019. Penulis adalah praktisi di bidang bioteknologi dan aktif sebagai mentor pada berbagai pelatihan pertanian. Email yang dapat dihubungi adalah susanto.tejo@gmail.com



Nurhidayat, Amd.Kom., S.P. lahir di Ciamis. Pendidikan Diploma 3 bidang Manajemen Informatika diperoleh dari AMIK Citra Buana Indonesia pada tahun 2010. Pendidikan S1 Agribisnis diperoleh dari Jurusan Pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka pada tahun 2020. Bidang minat penelitian adalah di bidang Pertanian.

Email yang dapat dihubungi adalah nurhidayatcorp@gmail.com



Timbul Rasoki, S.P., M.Si. Lahir di Padangsidimpuan pada tanggal 17 Juni 1990. Menyelesaikan pendidikan S1 di Universitas Andalas Tahun 2012 dan S2 di Institut Pertanian Bogor Tahun 2016. Sejak tahun 2019 aktif sebagai staf pengajar di Program Studi Agribisnis, Jurusan Pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka. Penulis aktif dalam kegiatan penelitian dalam bidang kelembagaan dan pemasaran pertanian. Beberapa mata kuliah ampuan diantaranya Dasar-Dasar Agribisnis, Manajemen Agribisnis, dan Tata Niaga Peternakan. Email yang dapat dihubungi adalah timbulrasoki@ecampus.ut.ac.id



Ana Nurmalia, S.P., M.Si. lahir di Magelang. Pendidikan S1 Agribisnis diperoleh dari Universitas Bengkulu pada tahun 2013. Pendidikan S2 diperoleh dari Universitas Bengkulu pada tahun 2015. Matakuliah yang menjadi ampunan adalah Manajemen Strategi Agribisnis dan Pembiayaan Agribisnis. Bidang minat penelitian adalah di bidang agribisnis. Email yang dapat dihubungi adalah ananurmalia@unived.ac.id



Lina Asnamawati, S.P., M.Si. lahir di Tangerang. Pendidikan S1 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2004. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2014. Mata kuliah yang menjadi ampunan adalah mata kuliah Metode dan Teknik Penyuluhan Pertanian, serta Pembangunan Masyarakat Desa. Bidang minat penelitian adalah di bidang pemberdayaan masyarakat. Email yang dapat dihubungi adalah

linaas@ecampus.ut.ac.id



Gede Wyana Lokantara, S.Pd., M.Eng. lahir di Tiyingtali, 14 Januari 1992. Pendidikan S1 Pendidikan Geografi diperoleh dari Jurusan Pendidikan Geografi, Universitas Pendidikan Ganesha pada tahun 2014. Pendidikan S2 diperoleh dari Magister Perencanaan Wilayah dan Kota, Universitas Gadjah Mada tahun 2016. Mata kuliah yang menjadi ampunan adalah Analisis Lokasi dan Pola Keruangan, serta Sistem Informasi Perencanaan. Bidang minat penelitian adalah di bidang Smart City, Urban Mobility dan Perkotaan. Email yang dapat dihubungi adalah igede-wyana@ecampus.ut.ac.id



Farisa Maulinam Amo, ST., M.T. lahir di Manado. Pendidikan S1 bidang Perencanaan Wilayah dan Kota diperoleh dari Universitas Sam Ratulangi pada tahun 2013. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Teknologi Bandung pada tahun 2017. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah Perencanaan Sistem Transportasi dan mata kuliah Teknik Komunikasi dan Presentasi. Bidang minat penelitian adalah di bidang sistem infrastruktur dan transportasi wilayah. Email yang dapat dihubungi adalah farisa@ecampus.ut.ac.id



Ulul Hidayah, ST., M.Si. lahir di Jombang. Pendidikan S1 bidang Perencanaan Wilayah dan Kota diperoleh dari Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya pada tahun 2016. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor di Program Studi Ilmu Perencanaan Pembangunan Wilayah dan Perdesaan pada tahun 2017. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah Ekonomi Wilayah dan Kota, Metode Analisis Perencanaan, Pembangunan yang Bertumpu pada Komunitas, Perencanaan Wilayah, dan Studio Perencanaan Wilayah. Email yang dapat dihubungi adalah ulul-hidayah@ecampus.ut.ac.id



Erika Pradana Putri, ST., M.Sc. lahir di Bogor. Pendidikan S1 bidang Perencanaan Wilayah dan Kota diperoleh dari Universitas Gadjah Mada, pada tahun 2008. Pendidikan S2 diperoleh dari Asian of Institute of Technology, Thailand pada tahun 2011. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Pengantar Perencanaan Wilayah dan Kota, Pengantar Proses Perencanaan, Hukum dan Administrasi Perencanaan, dan Studio Proses Perencanaan. Bidang minat penelitian adalah di transportasi dan perkotaan. Email yang dapat dihubungi adalah erikap@ecampus.ut.ac.id



UNIVERSITAS TERBUKA

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI

Penerbit Universitas Terbuka
Jalan Cabe Raya, Pondok Cabe, Pamulang,
Tangerang Selatan - 15437, Banten - Indonesia
Telp. 021-7490941, Faks. 021-7490147
Website. www.ut.ac.id