

## BIOKONVERSI LIMBAH ORGANIK MENGHASILKAN LIPID BERNILAI EKONOMIS MENGUNAKAN MIKROALGA *AURANTIOCHYTRIUM* DARI HUTAN BAKAU BUNAKEN, SULAWESI UTARA

Suhendra<sup>1\*</sup>, Sekar Pratiwi<sup>1</sup>, Hutri Puspita Sari<sup>1</sup>, Andri Hutari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Kimia, Universitas Ahmad Dahlan (UAD), Kampus 4 UAD, Jalan Ringroad Selatan, Bantul, DI Yogyakarta.

<sup>2</sup>Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Prof. Dr. Hamka (UHAMKA), Jalan Tanah Merdeka, Ciracas, Jakarta Timur

[\\*Corresponding author: suhendra@che.uad.ac.id](mailto:suhendra@che.uad.ac.id)

**ABSTRAK.** Modernisasi dan industrialisasi telah merevolusi sektor pangan dan pertanian yang mengarah pada peningkatan dramatis dalam produktivitas dan pemasarannya. Dampaknya adalah peningkatan produksi makanan dan limbah agroindustri. Untuk mengatasi problematika masalah sampah secara terpadu, perlu dikembangkan strategi berkelanjutan yang sangat tergantung pada pemahaman tentang tantangan teknologi dan ekonomi. Terkait dengan itu, perlu dieksplorasi teknologi untuk mengkonversi limbah organik menjadi produk bernilai ekonomi tinggi, antara lain melalui biokonversi menggunakan mikroalga. Salah satu mikroalga yang menarik perhatian besar dunia industri dunia adalah spesies *Aurantiochytrium sp.* yang saat telah dikembangkan di Eropa dan Amerika pada skala industri. Mikroalga spesies *Aurantiochytrium* dikenal memiliki habitat hutan bakau dan pertumbuhannya yang cepat dalam produksi asam lemak tak jenuh ganda (lemak tak jenuh rantai panjang PUFA) dengan nilai ekonomi tinggi. Meski Indonesia dikenal sebagai negara dengan hutan bakau terluas di dunia, tetapi kajian teknik kultivasi mikroalga *Aurantiochytrium* belum banyak dipublikasikan dengan isolat lokal Indonesia. Produk yang dapat dihasilkan dari mikroalga ini salah satunya yaitu omega-3 DHA (Docosahexaenoic acid). Asam lemak tak jenuh rantai ganda (*Polyunsaturated Fatty Acids/ PUFA*) omega-3 sangat dibutuhkan tubuh manusia, seperti pencegah penyakit jantung dan diabetes, pertumbuhan sel otak dan lain sebagainya. Produksi PUFA secara ekonomis dari biokonversi mikroalga *Aurantiochytrium* tergantung dari nutrisi yang digunakan. Karenanya, tujuan penelitian ini adalah mempresentasikan teknik kultivasi mikroalga heterotropik menggunakan mikroalga *Aurantiochytrium* yang masih jarang dipaparkan pada publikasi nasional. Kedua, memaparkan kemampuan biokonversi limbah organik dengan mikroalga *Aurantiochytrium* yang berasal dari hutan bakau Bunaken, Sulawesi Utara. Penelitian ini dimulai dengan isolasi sampel mikroalga dari hutan bakau Bunaken dan melakukan teknik isolasi *direct plating* hingga dihasilkan isolat murni. Setelah itu, dilakukan kultivasi dengan sumber nutrisi dari limbah melon, limbah apel, limbah molasses dan limbah air kelapa. Kultivasi dilakukan dalam tiga tahapan, masing-masing tahap standing culture (SC, 48 jam), pre-culture (PC, 48 jam) dan main culture (MC, 120 jam). Pada tahap kultivasi utama (MC) perbandingan sumber nitrogen dan sumber karbon masing-masing 12,5 gram (sumber nitrogen) dan 37,5 gram (sumber karbon). Sumber karbon berasal dari molasses (hasil samping pabrik gula), sampah buah melon, sampah buah apel dan air kelapa. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mikroalga *Aurantiochytrium* dapat tumbuh pada media yang digunakan. Selain itu, biomassa yang dihasilkan berwarna kuning cerah berbau amis seperti ikan. Dari variable jenis limbah organik yang dipakai, sampah limbah buah melon menghasilkan biomassa tertinggi, yaitu 99,4 gram/ liter. Potensi produk omega-3 yang dihasilkan bermanfaat untuk dikembangkan di sektor perikanan, peternakan, nutrisi, kosmetika dan farmasi. Oleh karena itu, dengan penelitian ini, kedepan topik penelitian biokonversi ini semoga dapat bermanfaat untuk dikembangkan dalam menghasilkan produk-produk yang memiliki nilai tambah ekonomi bagi negara demi terwujudnya negara dengan nilai gizi masyarakat dalam program ketahanan pangan dan obat-obatan nasional.

**Kata kunci:** *Aurantiochytrium*, Asam Lemak Tak Jenuh, Mikroalga, Omega-3, Squalene, Limbah Organik.

**ABSTRACT.** Modernization and industrialization have revolutionized the food and agriculture sectors leading to dramatic increases in their productivity associated with market demand. The impact is an increase in food production and agro-industrial waste. In order to address the problematic waste problem in an integrated manner, it is necessary to develop a sustainable strategy that is highly dependent on an understanding of technological and economic challenges. Related to that, it is necessary to explore technology to convert organic waste into products with higher economic value, including bioconversion using microalgae. One of the microalgae that has attracted the attention of the industries comes from *Aurantiochytrium* species which has now been developed in Europe and America on an industrial scale. *Aurantiochytrium* microalgae has recognized coming from mangrove forest as the habitat. In addition, it is also known that this species demonstrates a rapid growth in the production of polyunsaturated fatty acids (long chain unsaturated fats PUFA) with high economic value. Although Indonesia is known as a country with the largest mangrove forest in the world, however, studies on *Aurantiochytrium* microalgae cultivation techniques have not been widely published with local Indonesian isolates. One of the products that can be produced from this microalga is omega-3 DHA (Docosahexaenoic acid). Omega-3 double chain unsaturated fatty acids (Polyunsaturated Fatty Acids / PUFA) are required by the human body, such as prevention from heart diseases and diabetes, growth of brain cells and so on. The economical production of PUFA from *Aurantiochytrium* microalgae bioconversion depends on the nutrients used. Therefore, the purpose of this study is to present the techniques on heterotrophic microalgae cultivation using *Aurantiochytrium* microalgae which are rarely presented in national publications. Second, the paper shall describe the bioconversion ability of organic waste with *Aurantiochytrium* microalgae originating from Bunaken mangrove forest, North Sulawesi. This study began with the isolation of microalgae samples from the Bunaken mangroves and direct plating techniques to produce pure isolates. After that, cultivation was carried out with nutritional sources from melon waste, apple waste, molasses waste and coconut water waste. Cultivation was carried out in three stages, namely standing culture (SC, 48 hours), pre-culture (PC, 48 hours) and main culture (MC, 120 hours). At the main cultivation stage (MC) the ratio of nitrogen sources and carbon sources was 12.5 grams (nitrogen source) and 37.5 grams (carbon source) respectively. The carbon source comes from molasses (a by-product of sugar factories), melon waste, apple waste and coconut water. The results of this study indicated that *Aurantiochytrium* microalgae could grow on the media used. In addition, the biomass produced is bright yellow and smells fishy like fish. Of the variable types of organic waste used, melon fruit waste produced the highest biomass, namely 99.4 grams/liter. The potential of the resulting omega-3 products is useful for development in the fisheries, animal husbandry, nutrition, cosmetics and pharmaceutical sectors. Therefore, with this research, it is hoped that in the future this bioconversion research topic can be useful to be developed in producing products that have added economic value for the country in order to create a country with community nutritional value in the national food and drug security program.

**Keywords:** *Aurantiochytrium*, Unsaturated Fatty Acids, Microalgae, Omega-3, Squalene, Organic Waste

## PENDAHULUAN

Salah satu sumber sampah perkotaan yaitu dengan fenomena menumpuknya sampah organik, dimana sampah organik khususnya yang berasal dari pasar buah dan sayur telah menjadi bagian penting dari rantai pasokan makanan. Sayangnya, jejak limbah yang ditinggalkan sering menjadi masalah besar. Telah banyak pemberitaan terkait pedagang dan pembeli di banyak pasar sering mengeluarkan persoalan sampah, yang menumpuk di Tempat Pembuangan Sampah Sementara (TPPS) yang berada di sisi pasar

(World Bank, 2020). Upaya mengatasi peningkatan jumlah sampah dan limbah adalah dengan menangani dampak pembangunan aktivitas manusia hari-hari dengan cara yang aman dan tanpa mengganggu lingkungan, yaitu melalui mikroalga (Li et al., 2019; Pleissner & Rumpold, 2018).

Sebenarnya, limbah pasar buah dan sayur menjanjikan “tambang” bahan baku berlimpah mengingat kandungan bahan dari sayuran maupun buah-buahan yang mengandung komposisi nutrisi yang diperlukan makhluk hidup. Salah satu mikroorganisme yang dapat mengkonversi limbah organik

menjadi produk nilai ekonomi tinggi adalah mikroalga. Banyak penelitian sebelumnya menyoroti bahwa mikroalga memiliki potensi mengolah secara efektif sumber karbon organik, fosfor, dan nitrogen konsentrasi tinggi dari limbah organik makanan (Humaidah et al., 2020; Kumar et al., 2022; Laddha et al., 2021; Lee et al., 2020; Li et al., 2019; Lowrey et al., 2016; Patel et al., 2020; Spalvins et al., 2018; Yafetto, 2022; Zeng et al., 2015). Setelah melalui proses biokonversi, produk dihasilkan memiliki bernilai tambah lebih tinggi (polisakarida, biofuel, pigmen, dan asam amino) (Ummalyma, et al. 2021). Oleh karena itu, limbah organik yang digunakan sebagai media nutrisi untuk pertumbuhan biomassa mikroalga diharapkan dapat mengurangi biaya operasi produksi biomassa bernilai ekonomi tinggi. Selain itu, dengan biokonversi limbah organik produk biorefinery dapat menunjang konsep *circular economy* dimana produk komersial dapat dihasilkan dari mengolah limbah yang bersumber dari rantai produksi lain (Khajuria et al., 2022; Lehmann et al., 2022).

Karenanya, penelitian ini menampilkan salah satu metode biokonversi limbah organik menjadi biomassa berpotensi ekonomi tinggi. Mikroalga spesies *Aurantiochyrium* yang dikenal sebagai produsen omega-3 *docosahexanoic acid* (asam dokosaheksanoat/DHA) kandungan tinggi (Aasen, Ertesvåg, Marita, et al., 2016; Verma et al., 2019). Mikroalga *Aurantiochyrium* dikenal memiliki habitat di hutan bakau (Yaguchi et al., 1997; Yang et al., 2010). Teknik mendapatkan bibit (strain) mikroalga ini dapat dikaji dari beberapa video pembelajaran yang telah ada (Suhendra, Chuzaimah, Andri Hutari, 2022; Suhendra, 2020; Suhendra, Chuzaimah, et al., 2022b).

Limbah organik yang telah berhasil dijadikan sumber nutrisi pertumbuhan mikroalga *Aurantiochyrium* antara lain limbah pengolahan kedelai (Lee et al., 2020), limbah buah kurma (Abdel-wahab et al., 2021), limbah industri pengolahan jus jeruk (Abdel-wahab et al., 2021) dan limbah campuran berbagai buah (Nazir et al., 2020). Trend penggunaan limbah organik dari buah-buahan sebagai nutrisi adalah untuk mengurangi biaya operasi dibandingkan dengan penggunaan nutrisi sumber karbon umum yaitu gula dengan kualitas tinggi berharga mahal (Maria et al., 2016).

Review tentang multifungsi produk yang bisa dihasilkan oleh konversi mikroalga *Aurantiochyrium* telah dibahas sebelumnya (Suhendra, Chuzaimah, et al., 2022c) dan aplikasinya di berbagai diilustrasikan pada gambar 1 di bawah. Dari gambar 1 bisa difahami bahwa nilai strategis produk yang dihasilkan sangat bermanfaat untuk bidang peternakan, ketahanan pangan maupun kesehatan dimana digunakan untuk manusia sebagai pangan fungsional, kosmetik, suplemen kesehatan dan bahan baku farmasi, maupun untuk peternakana sebagai nutrisi hewan peliharaan (pet nutrition), pakan ternak (ayam,sapi dan kambing) dan pakan ikan.



Gambar 1. Ilustrasi aplikasi produk hasil biokonversi mikroalga *Aurantiochyrium*.

Secara nilai ekonomi, pasar omega-3 di dunia terus meningkat. Pasar omega 3 global bernilai USD 2,43 miliar pada tahun 2022 dan diperkirakan akan berkembang dengan tingkat pertumbuhan tahunan gabungan (CAGR) sebesar 7,8% dari tahun 2023 hingga 2030. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya penggunaan bahan berbasis omega 3 di pola makan manusia untuk mendukung kesehatan otak dan jantung. Selain itu, meningkatnya investasi konsumen dalam perawatan kesehatan dan kesejahteraan juga diharapkan dapat meningkatkan permintaan produk.

Oleh karena itu, penelitian ini mempresentasikan metode produksi biomassa mikroalga *Aurantiochyrium* skala laboratorium dengan menggunakan limbah organik sebagai sumber nutrisi. Di Indonesia, limbah organik banyak didapatkan di pasar tradisional dengan biaya terjangkau. Karena limbah organik umumnya masih mengandung bahan berguna seperti air, sumber karbon, nitrogen, vitamin

dan mikronutrien maka harapannya, nutrisi dari limbah organik dapat dikonversi menjadi omega-3 menggunakan *Aurantiochytrium*.

## METODOLOGI PENELITIAN

### Bahan dan Alat

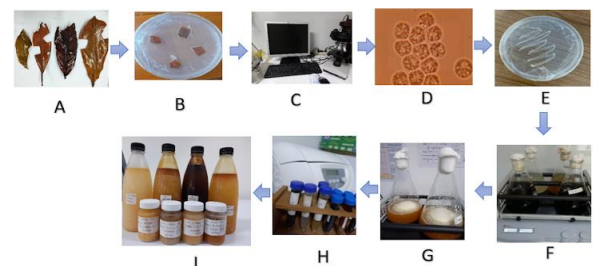
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat-alat seperti : Shaker, autoclave, mikroskop perbesaran 4x, 10x, 40x, 100x merk Yazumi, komputer, lemari LAF (Laminar Air Flow), erlenmeyer 100, 250 dan 1000 ml, pengaduk kaca, gelas beker 250 ml, kaca preparat, propipet dan pipet ukur, gelas ukur 100 ml, blender, Pipet tetes, pisau, botol, centrifuge, tabung centrifuge, bunsen, korek api, timbangan analitik, aluminium foil, jarum ose, kapas, kasa, gunting, sendok, pH dan TDS (Total Dissolved Solid) meter, sonikator. Bahan-bahan yang digunakan yaitu sumber nitrogen (yeast extract dan MSG), sumber karbon (limbah apel, limbah melon, molasses, air kelapa), glukosa, reef salt, aquadest, minyak imersi, HCl 0,1 N, NaOH 5 N. Tahapan kultivasi terbagi menjadi standing culture (SC), pre-culture (PC) dan main culture (MC). Kultivasi dilakukan dalam tiga tahapan, masing-masing tahap standing culture (SC, 48 jam), pre-culture (PC, 48 jam) dan main culture (MC, 120 jam). Ratio sumber karbon dan nitrogen pada tiap tahap kultivasi telah diuraikan sebelumnya pada penelitian sebelumnya (Suhendra, Martomo Setiawan, Endah Sulistiawati, 2022; Suhendra, Sulistiawati, et al., 2021). Produksi biomassa dilakukan tiga tahap, masing-masing tahap standing culture, pre-culture dan main culture.

Komposisi media bervariasi pada tiap tahapnya, masing-masing standing culture 2 g/ L yeast extract, 9 g/L glukosa anhidrid, dan campuran air laut dan aquadest dengan perbandingan 1:1. media tiap tahap standing culture 10 g/ L; pre-culture yeast extract, 25 g/L glukosa anhidrid, dan campuran air laut dan aquadest dengan perbandingan 1:1 dan main culture 25 g/L yeast extract, 100 g/L glukosa anhidrid, dan campuran air laut dan aquadest dengan perbandingan 1:1. Kultivasi utama (MC) pada penelitian ini dilakukan pada labu erlenmeyer 1000 ml dengan massa sumber nitrogen 12,5 gram, sumber karbon 37,5 gram.

### Gambaran Umum Eksperimen

Penelitian ini dimulai dengan sampling dan isolasi mikroalga

*Aurantiochytrium* dari hutan bakau Bunaken, Sulawesi Utara. Validasi teknik sampling dan isolasi mikroalga telah berhasil dilakukan (Suhendr et al., 2020; Suhendra et al., 2019; Suhendra, Pantooyo, et al., 2021; Suhendra, Yuniasih, et al., 2021; Suhendra, Chuzaimah, et al., 2022b, 2022a). Selanjutnya, rangkaian eksperimen bisa ditampilkan pada gambar 2. Rangkaian alat meliputi alat-alat untuk pengerjaan sampel daun (Gambar A), alat untuk streaking isolat (Gambar B), alat untuk observasi mikroskopis morfologi sel (Gambar C) hingga diperoleh sel yang diinginkan (Gambar D). Selanjutnya rangkaian alat diperlukan untuk streaking hingga diperoleh kultur murni yang diharapkan (Gambar E). Rangkaian alat berikutnya yang diperlukan adalah alat untuk kultivasi meliputi orbital shaker (Gambar F) dan gelas erlenmeyer untuk kultivasi (Gambar F), hingga diperoleh biomassa hasil kultivasi (Gambar G). Tahap selanjutnya adalah rangkaian alat pemisahan biomassa dengan cairan supernatan menggunakan centrifuge (Gambar H). Setelah sentrifugasi akan diperoleh biomassa padatan yang siap dianalisis (I).



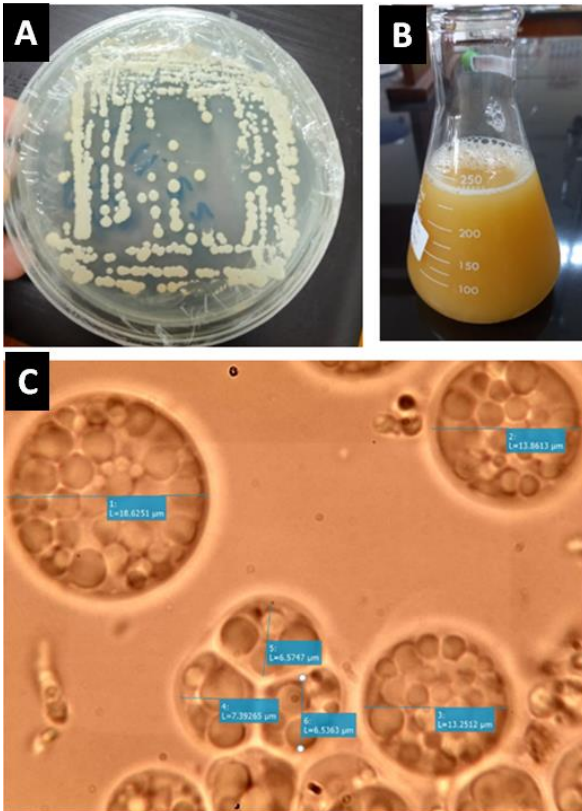
Gambar 2. Rangkaian Proses Eksperimen Mikroalga *Aurantiochytrium*

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Hasil Penelitian Isolat dan Produk

Gambar 2A merupakan kultur isolat murni hasil streaking dari sampel daun mangrove yang sudah di streaking. Sementara gambar 2B menunjukkan tampilan dan warna biomassa yang dihasilkan secara umum, dimana berwarna putih kekuningan dan berbau amis. Sementara gambar 2C menunjukkan mikroskop sel hasil kultivasi yang berdiameter terbesar dan terkecil masing-masing 18 dan 7 mikron. Mengacu kajian sebelumnya (Fossier et al., 2018; Jaseera, 2018; Morales-Sánchez et al., 2017; Raghukumar, 2008), bulat-bulat kecil di dalam sel merupakan organ berbahan lipid (lipid

body) dari isolat mikroalga *Aurantiochyrium* yang digunakan.



Gambar 2. Isolat (A), biomassa (B) dan mikrograf sel mikroalga *Aurantiochyrium* yang dihasilkan (C).

Tabel 2 menampilkan hasil biomassa basah pada beberapa jenis limbah organik. Dari tabel ditampilkan bahwa, formulasi nutrisi dengan sumber nitrogen MSG menghasilkan biomassa lebih banyak dari sumber nitrogen dari yeast extract. Limbah melon menghasilkan biomassa terbanyak dibandingkan limbah organik lainnya. Biomassa basah maksimal yang bisa diperoleh adalah 99,4 gram untuk kultivasi selama 120 jam di dalam erlenmyer 1000 ml.

Tabel 2. Biomassa Basah yang Dihasilkan.

Sumber nitrogen	Nutrisi	
	Sumber karbon	Biomassa basah (gram/ liter)
Yeast extract	Molasses	23,1
	Limbah melon	31,7
	Limbah apel	17,8

MSG	Air kelapa	4,2
	Molasses	28,6
	Limbah melon	99,4
	Limbah apel	78,1
	Air kelapa	26,2

## Pembahasan

Penelitian ini mengusulkan konversi limbah organik menggunakan mikroalga *Aurantiochyrium* dari Meskipun Indonesia dikenal sebagai negara dengan hutan bakau terluas, sayangnya kajian tentang mikroalga *Aurantiochyrium* di Indonesia masih jarang. Referensi jurnal internasional menggunakan *Aurantiochyrium* strain lokal Indonesia belum ada selama ini. Mengacu peta keragaman hayati global, dari 6.534 strain yang ditemukan dalam publikasi, strain lokal dari Indonesia memiliki informasi yang terbatas (Global Biodiversity Information Facility, 2022 <https://www.gbif.org/occurrence/search?q=aurantiochyrium>).

Salah satu strain asli Indonesia yang sudah berhasil diidentifikasi adalah *Aurantiochyrium* sp. LR52 dan sudah terbukti sebagai penghasil omega-3 DHA yang tinggi (Hutari et al., 2016). Mengacu hasil biomassa, aroma amis adalah salah satu indikasi khas aroma ikan yang mengandung omega-3 DHA. Karenanya, penelitian ini telah memberikan contoh biokonversi limbah organik dengan mikroalga *Aurantiochyrium*. Potensi produk biokonversi yang bernilai ekonomis tinggi antara lain polisakarida, biofuel, pigmen, dan asam amino (Ummalya, et al. 2021). Oleh karena itu, diharapkan limbah organik yang digunakan pada penelitian ini dapat diolah sebagai media nutrisi untuk pertumbuhan biomassa mikroalga selain akan mengurangi biaya operasi sekaligus menghasilkan produk bernilai ekonomi tinggi. produk biorefinery circular economy dimana dapat dihasilkan dari mengolah limbah yang bersumber dari rantai produksi lain (Khajuria et al., 2022; Lehmann et al., 2022).

Produk yang dihasilkan dari mikroalga *Aurantiochyrium* berpotensi mengandung asam lemak tak jenuh rantai ganda, squalene/terpenoid dan astaxanthin/ karotenoid. Kajian sebelumnya menunjukkan peluang produksi terpadu untuk menghasilkan dua atau tiga komponen. Bila satu produk menginginkan ke-

3 komponen tersebut maka sangat menguntungkan karena dapat didesain menjadi produk “3-in-1” (Aasen, Ertesvåg, Heggeset, et al., 2016; Chen et al., 2021; Morales-Sánchez et al., 2017),

Berkaca pada hasil penelitian ini, kajian mikroalga *Aurantiochytrium* perlu dikembangkan. Dengan kajian ini, diharapkan ada potensi untuk penguatan industri strategis nasional di masa depan. Untuk merealisasikannya, perlu kajian teknologi mikrobiologi dan bioproses untuk mendapatkan strain unggul dan tahapan menuju skala produksi ekonomis yang menghasilkan produk berkualitas tinggi. Diharapkan karakteristik umum produk yang diinginkan sebagai berikut:

- Mampu diproduksi untuk skala komersial.
- Kemurnian tinggi, bebas logam berat.
- Berasal dari alam Indonesia dan proses zero waste dan ramah lingkungan.
- Produk yang dihasilkan terbukti aman untuk dikonsumsi maupun untuk bagian luar tubuh.

## KESIMPULAN DAN SARAN

1. Penelitian ini menggunakan mikroalga *Aurantiochytrium* dengan nutrisi media dari limbah organik. Biomassa yang dihasilkan secara umum berwarna putih kekuningan, berbau amis seperti ikan dan mengandung padatan terlarut. Observasi mikroskopis menunjukkan mikrograf sel mikroalga *Aurantiochytrium* tumbuh baik pada formulasi media yang digunakan.
2. Dari hasil *organoleptis* menunjukkan bahwa produk yang dihasilkan berpotensi mengandung omega-3 DHA yang tinggi. Karenanya, hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa mikroalga *Aurantiochytrium* dapat dikembangkan dengan menggunakan bahan baku yang bersumber dari limbah organik buah-buahan.
3. Penggunaan sumber nitrogen dari MSG menghasilkan berat biomassa lebih banyak dari pada yeast extract. Dalam penggunaan sumber nitrogen dalam MSG bersifat lebih basa terkecuali pada limbah molasses.
4. Produk omega-3 dan squalene yang berpotensi dihasilkan pada penelitian ini adalah bahan baku strategis bagi industri nasional bidang nutrisi, kosmetika dan farmasi. Karenanya, perlu dukungan riset

dari peneliti dan pemerintah di bidang riset ini yang masih sangat jarang dilakukan di Indonesia.

## Ucapan Terima Kasih

Penelitian konversi limbah organik dengan menggunakan mikroalga *Aurantiochytrium* ini adalah bagian dari proyek hibah Riset Mihammadiyah (RisetMu 2022) majelis pendidikan tinggi penelitian dan pengembangan pimpinan pusat Muhammadiyah. Karenanya, kami mengucapkan terima kasih atas bantuan hibah yang diberikan, mengucapkan terimakasih atas bantuan hibah yang diberikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aasen, I. M., Ertesvåg, H., Heggeset, T. M. B., Liu, B., Brautaset, T., Vadstein, O., & Ellingsen, T. E. (2016). Thraustochytrids as production organisms for docosahexaenoic acid (DHA), squalene, and carotenoids. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *100*(10), 4309–4321. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7498-4>
- Aasen, I. M., Ertesvåg, H., Marita, T., Heggeset, B., Liu, B., Brautaset, T., Vadstein, O., & Ellingsen, T. E. (2016). Thraustochytrids as production organisms for docosahexaenoic acid (DHA), squalene, and carotenoids. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *1*, 4309–4321. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7498-4>
- Abdel-wahab, M. A., El-samawaty, A. E. M. A., Elgorban, A. M., & Bahkali, A. H. (2021). Biological Sciences Fatty acid production of thraustochytrids from Saudi Arabian mangroves. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *28*(1), 855–864. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.11.024>
- Chen, L., Qian, X., Zhang, X., Zhou, X., Zhou, J., Dong, W., Xin, F., Zhang, W., Jiang, M., & Ochsenreither, K. (2021). Co-production of microbial lipids with valuable chemicals. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *15*(3), 945–954. <https://doi.org/10.1002/bbb.2209>
- Fossier, L., Lee, K. J., Nichols, P. D., Mitchell, W. J., Polglase, J. L., & Gutierrez, T. (2018). Taxonomy, ecology and

- biotechnological applications of thraustochytrids: A review. *Biotechnology Advances*, 36(1), 26–46. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.09.003>
- Humaidah, N., Nakai, S., Nishijima, W., Gotoh, T., & Furuta, M. (2020). Application of *Aurantiochytrium* sp. L3W for food-processing wastewater treatment in combination with polyunsaturated fatty acids production for fish aquaculture. *Science of the Total Environment*, 743(November), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140735>
- Hutari, A., Hidayat, W., Mustopa, A. Z., & Neubauer, P. (2016). Docosahexaenoic acid (DHA) production of new strain of Indonesian *Thraustochytrid* *Aurantiochytrium* sp. LR52 in single use TubeSpin 600 system (P29). *Bioprocess Intensification through Process Analytical Technology (PAT) and Quality by Design (QbD)*, April.
- Jaseera, K. V. (2018). *Isolation and phylogenetic identification of heterotrophic thraustochytrids from mangrove habitats along the southwest coast of India and prospecting their PUFA accumulation. 1994.*
- Khajuria, A., Atienza, V. A., Chavanich, S., Henning, W., Islam, I., Kral, U., Liu, M., Liu, X., Murthy, I. K., Oyedotun, T. D. T., Verma, P., Xu, G., Zeng, X., & Li, J. (2022). Accelerating circular economy solutions to achieve the 2030 agenda for sustainable development goals. *Circular Economy*, 1(1), 100001. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2022.100001>
- Kumar, Y., Kaur, S., Kheto, A., Munshi, M., Sarkar, A., Pandey, H. O., Tarafdar, A., & Sirohi, R. (2022). Cultivation of microalgae on food waste: Recent advances and way forward. *Bioresource Technology*, August, 8–10.
- Laddha, H., Pawar, P. R., & Prakash, G. (2021). Bioconversion of waste acid oil to docosahexaenoic acid by integration of “ex novo” and “de novo” fermentation in *Aurantiochytrium limacinum*. *Bioresource Technology*, 332(July), 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125062>
- Lee, G. I., Shin, W. S., MoonGeun Jung, S., Kim, W., Lee, C., & Kwon, J. H. (2020). Effects of soybean curd wastewater on growth and DHA production in *Aurantiochytrium* sp. *Lwt*, 134(December), 2020–2022. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110245>
- Lehmann, C., Cruz-Jesus, F., Oliveira, T., & Damásio, B. (2022). Leveraging the circular economy: Investment and innovation as drivers. *Journal of Cleaner Production*, 360(August), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132146>
- Li, S., Zhao, S., Yan, S., Qiu, Y., Song, C., Li, Y., & Kitamura, Y. (2019). Food processing wastewater purification by microalgae cultivation associated with high value-added compounds production — A review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(12), 2845–2856. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.03.028>
- Lowrey, J., Brooks, M. S., & Armenta, R. E. (2016). Nutrient recycling of lipid-extracted waste in the production of an oleaginous thraustochytrid. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 4711–4721. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7463-2>
- Maria, A., Finco, D. O., Maria, A., Finco, D. O., Daniel, L., Mamani, G., De, J. C., Vinicius, G., Pereira, D. M., Thomaz-soccol, V., Soccol, R., Maria, A., Finco, D. O., Daniel, L., Mamani, G., & De, J. C. (2016). Technological trends and market perspectives for production of microbial oils rich in omega-3. *Critical Reviews in Biotechnology*, 0(0), 000. <https://doi.org/10.1080/07388551.2016.1213221>
- Morales-Sánchez, D., Martínez-Rodríguez, O. A., & Martínez, A. (2017). Heterotrophic cultivation of microalgae: production of metabolites of commercial interest. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 92(5), 925–936. <https://doi.org/10.1002/jctb.5115>
- Nazir, Y., Halim, H., Al-Shorgani, N. K. N., Manikan, V., Hamid, A. A., & Song, Y. (2020). Efficient conversion of extracts from low-cost, rejected fruits for high-valued Docosahexaenoic acid production by *Aurantiochytrium* sp. SW1. *Algal*

- Research*, 50(September), 1–11.  
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101977>
- Patel, A., Rova, U., Christakopoulos, P., & Matsakas, L. (2020). Mining of squalene as a value-added byproduct from DHA producing marine thraustochytrid cultivated on food waste hydrolysate. *Science of the Total Environment*, 736, 139691.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139691>
- Pleissner, D., & Rumpold, B. A. (2018). Utilization of organic residues using heterotrophic microalgae and insects. *Waste Management*, 72, 227–239.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.020>
- Raghukumar, S. (2008). Thraustochytrid Marine Protists: Production of PUFAs and Other Emerging Technologies. *Mar Biotechnol.*  
<https://doi.org/10.1007/s10126-008-9135-4>
- Spalvins, K., Zihare, L., & Blumberga, D. (2018). Single cell protein production from waste biomass: Comparison of various industrial by-products. *Energy Procedia*, 147, 409–418.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.111>
- Suhendr, S., Zahro, H., Sulistiawati, E., & Hutari, A. (2020). *Potensi Mikroalga Aurantiochytrium: Dari Pakan Ternak, Biodiesel Hingga Vaksin Covid-19.*  
<https://doi.org/https://doi.org/10.24853/konversi.8.1.10>
- Suhendra, Chuzaimah, Andri Hutari, A. G. E. S. (2022). Isolasi Mikroalga Aurantiochytrium Dari Hutan Bakau Hingga Isolat Murni : In *HKI, Kementrian Hukum dan Hak Asasi Manusia, HKI Nr.: EC00202208612, 5 Februari 2022* :
- Suhendra, Martomo Setiawan, Endah Sulistiawati, S. W. N. (2022). *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Bahan Alam.*  
<https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Suhendra. (2020). *Isolation of Marine Microalgae.*  
<https://www.youtube.com/watch?v=91cvOZ1A4I8>
- Suhendra, Chuzaimah, Hutari, A., & Saputro, A. G. E. (2022a). *Isolasi Mikroalga Aurantiochytrium dari Hutan Bakau.*  
<https://www.youtube.com/watch?v=0PRdXOxHNI8>
- Suhendra, Chuzaimah, Hutari, A., & Saputro, A. G. E. (2022b). *Isolasi Mikroalga dari Hutan Bakau.*
- Suhendra, Chuzaimah, Hutari, A., & Saputro, A. G. E. (2022c). *Potensi Mikroalga Aurantiochytrium Dari Pakan Ternak, Biodiesel Hingga Vaksin Covid-19.*
- Suhendra, E., S., H., Z., & A, H. (2019). Kajian Singkat Rancang Bangun Pabrik Docohexanoic Acid dari Mikroalga Species Aurantiochytrium dari Hutan Bakau Indonesia. *Konversi*, 8(1), 33–44.
- Suhendra, Pantoiyo, T., Fazlia, S., Sulistiawati, E., & Evitasari, R. T. (2021). Bioprocess Potentials of Squalene from Thraustochytrids Microalgae for Nutraceuticals in New Normal Era Isolated from Indonesian Mangroves: A Review. *CHEMICA*, 8(1).
- Suhendra, Sulistiawati, E., Evitasari, R., Ariandi, T. R., Septianingsih, L., & Andri Hutari. (2021). Potentials of Omega-3 Rich Microalgae from Kulonprogo Mangrove Forest Yogyakarta for Nutraceuticals and Pharmaceuticals Products. *Second International Symposium of Indonesian Chemical Engineering (2nd ISICChem 2021).*
- Suhendra, Yuniasih, D., Lira Amanda Ningtias, G. W., Saputra, A. G. E., & Hutari, A. (2021). Bioprocess of of Astaxanthin Production as Functional Food from Aurantiochytrium Microalgae: A Review. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 8(2).  
<http://journal.uad.ac.id/index.php/CHEMICA/article/view/21954>
- Verma, M. L., Kishor, K., Sharma, D., Kumar, S., & Sharma, K. D. (2019). Microbial production of omega-3 polyunsaturated fatty acids. In *Biotechnological Production of Bioactive Compounds.* Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64323-0.00010-2>
- Yafetto, L. (2022). Application of solid-state fermentation by microbial biotechnology for bioprocessing of agro-industrial wastes from 1970 to 2020: A review and bibliometric analysis. *Heliyon*, 8(3), e09173.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09173>
- Yaguchi, T., Tanaka, S., Yokochi, T., Nakahara, T., & Higashihara, T. (1997). Production of high yields of



docosahexaenoic acid by Schizochytrium  
sp. strain SR21. JAOCS, Journal of the  
American Oil, 1997.