

Pemodelan Laju Respirasi Buah Kolang-kaling (*Arenga pinnata*) pada Penyimpanan *Modified Atmospheric Packaging* (MAP)

Respiration Rate Modeling of Sugar Palm Fruit (*Arenga pinnata*) in Modified Atmospheric Packaging (MAP)

Arina Fatharani, Nursigit Bintoro*, Arifin Dwi Saputro

Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian,
Universitas Gadjah Mada, Jl. Flora No. 1, Bulaksumur, Yogyakarta 55281, Indonesia

*Penulis korespondensi: Nursigit Bintoro, *E-mail*: nursigit@ugm.ac.id

Tanggal submisi: 30 September 2019; Tanggal penerimaan: 16 Desember 2019

ABSTRAK

Buah kolang-kaling (*Arenga pinata*) merupakan buah tropis yang penanganannya masih menggunakan cara tradisional. Hal ini menyebabkan kesulitan dalam distribusi pemasaran. Salah satu cara yang belum banyak digunakan untuk mempertahankan umur simpan buah kolang-kaling adalah dengan penyimpanan dalam *Modified Atmospheric Packaging* (MAP). Penentuan suhu ruang penyimpanan dan kemasan diketahui dapat mempengaruhi kualitas produk segar yang diwakili oleh laju respirasi produk (produksi CO₂). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis laju respirasi dalam MAP dan memodelkan laju respirasi berdasarkan suhu ruang penyimpanan dan ketebalan kemasan. Kombinasi perlakuan yang digunakan adalah suhu ruang penyimpanan dan ketebalan kemasan. Suhu ruang penyimpanan yang digunakan adalah 5, 15, dan 28 °C. Kemasan yang digunakan adalah *Low Density Polyethylene* (LDPE) dengan ketebalan 30, 50, dan 80 µm. Nilai permeabilitas CO₂ sebesar 13205,4; 8390,1; dan 5260 cm³/m².d.0,1MPa untuk ketebalan 30, 50, dan 80 µm. Laju respirasi tertinggi didapatkan pada suhu penyimpanan 28 °C dengan ketebalan kemasan 30 µm sebesar 8,61 mL/kg.jam. Laju respirasi produksi CO₂ terendah didapatkan pada suhu penyimpanan 5 °C dengan ketebalan kemasan 80 µm sebesar 1,97 mL/kg.jam. Suhu ruang penyimpanan dan kemasan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap laju respirasi buah kolang-kaling dalam MAP. Suhu ruang penyimpanan yang tinggi dan kemasan yang lebih tipis atau kemasan dengan nilai permeabilitas yang tinggi akan menghasilkan laju respirasi yang lebih tinggi. Analisis statistik mengindikasikan bahwa suhu ruang penyimpanan, karakteristik kemasan, dan interaksi kedua faktor tersebut berpengaruh secara signifikan pada laju respirasi produksi CO₂ buah kolang-kaling dalam MAP ($p < 0,05$). Persamaan Arrhenius dan persamaan regresi polinomial dapat menjelaskan pengaruh suhu ruang penyimpanan dan ketebalan kemasan terhadap pola perubahan laju respirasi dari buah Kolang-kaling dalam MAP.

Kata kunci: CO₂; kolang-kaling; laju respirasi; *modified atmosphere storage*; permeabilitas

ABSTRACT

Sugar palm fruit (*Arenga pinata*) is a tropical fruit. The traditional methods of postharvest handling and storage limit market distribution. An alternative approach to extend the shelf life of sugar palm fruit is by applying the Modified Atmospheric Packaging (MAP). Storage room temperature and packaging thickness can affect the quality of a fresh product, as indicated by the respiration rate (CO₂ production). This research aimed to analyze the respiration rate in MAP and build a model of respiration rates based on storage temperatures (5, 15, and 28 °C) and packaging thickness (30, 50 and 80 µm) of Low-density Polyethylene (LDPE). Permeability values of CO₂ were found to be 13205.4; 8390.1; and 5260.8 cm³/m²-d-0.1 MPa for packaging thicknesses of 30, 50 and 80 µm, respectively. The highest respiration rate of 8.61 mL/kg-hour was observed at 28 °C storage room temperature

DOI: <http://doi.org/10.22146/agritech.50247>
ISSN 0216-0455 (Print), ISSN 2527-3825 (Online)

using a 30 μm packaging thickness. While the lowest respiration rate was 1.97 mL/kg-hour stored at 5 °C by 80 μm packaging thickness. Storage room temperature had a significant impact on the respiration rate of sugar palm fruit in MAP. A high temperature of storage room and a thin packaging or a high permeability value provided the highest respiration rate. Both storage temperature and packaging thickness significantly affected the respiration rate of CO_2 production in sugar palm fruit using MAP ($p < 0.05$). Arrhenius and polynomial regression equations have been successfully used to study the effect.

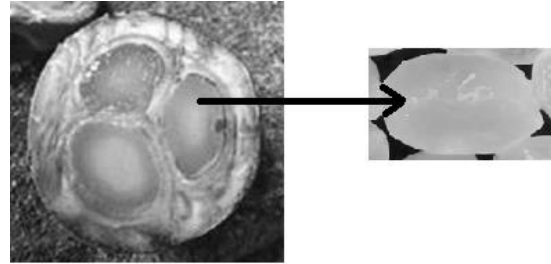
Keywords: CO_2 ; modified atmosphere packaging; permeability; respiration rate; sugar palm fruit

PENDAHULUAN

Buah kolang-kaling (*Arenga pinnata*) merupakan salah satu buah tropis yang banyak dikonsumsi oleh penduduk Asia. Buah kolang-kaling memiliki peran penting dalam segi ekologi, ekonomi, sosial budaya, dan kesehatan. Dalam segi ekologi, buah kolang-kaling memiliki peran penting untuk melindungi tanah dari erosi dengan kekuatan akarnya dalam menahan tanah. Dalam segi ekonomi, buah kolang-kaling banyak dimanfaatkan untuk berbagai fungsi, seperti manisan, bahan pembuatan makanan, hidangan penutup, bahan campuran minuman, dan lain sebagainya (Gunawan dkk., 2018; Ho dkk., 2007). Dalam segi sosial budaya, buah kolang-kaling biasa digunakan sebagai bahan minuman seperti yang biasa dibuat pada hari raya. Dalam segi kesehatan, buah kolang-kaling memiliki serat yang dapat menurunkan kolesterol dalam darah dan mencegah kegemukan atau obesitas (Dameswari, 2017; Tusiyeem dkk., 2015).

Pada penanganan pascapanen, buah kolang-kaling masih tergolong tradisional, yaitu dengan melakukan perendaman dalam air dan harus diganti setiap tiga hari sekali. Selain itu, buah kolang-kaling yang sudah direndam biasanya hanya diberikan bahan tambahan seperti kapur atau gula untuk memperpanjang umur simpan. Namun cara tersebut masih menyulitkan dalam segi ekonomi dan membahayakan kesehatan. Kolang-kaling yang direndam di dalam air, akan menyulitkan distribusi pemasaran, sehingga kolang-kaling hanya dijual di pasar tradisional atau lokal (Dameswari, 2017).

Buah kolang-kaling yang bisa dimakan berupa endosperm, yang merupakan makanan cadangan yang terdapat di dalam biji tumbuhan yang masih muda. Buah kolang-kaling dapat dilihat pada Gambar 1. Produk ini termasuk ke dalam produk olahan *minimally processed*, karena masih dapat memperlihatkan proses fisiologi setelah proses penanganan, perlakuan, dan pengemasan (Kirana, 2017). Sehingga produk ini mudah sekali rusak dan harus mendapatkan penanganan yang tepat. Kerusakan dari produk ini dapat dilihat dari menurunnya kualitas ketika penyimpanan pada periode tertentu (Dameswari, 2017).



Gambar 1. Buah Kolang-kaling (*Arenga pinnata*) (Sapuan dkk., 2019)

Produk segar dan produk yang telah mengalami proses minimal akan terus melakukan proses fisiologi dan metabolisme selama penyimpanan. Hal ini berpengaruh terhadap penurunan kualitas dan memperpendek umur simpan (Belay dkk., 2016). Proses kimiawi dan fisiologi dari produk segar merupakan fungsi dari tingkat respirasi selama penyimpanan. Penurunan kualitas dari produk segar juga berkaitan dengan laju respirasi. Proses respirasi terdiri atas pertukaran gas O_2 dan CO_2 , di mana pengukurannya dilakukan di dalam wadah yang kedap udara (Ghosh & Dash, 2018). Laju respirasi dapat dianalisis dengan perhitungan konsumsi O_2 dan produksi CO_2 per satuan waktu. Laju respirasi bergantung pada faktor internal dan eksternal, berupa tingkat kematangan dari produk, suhu ruang penyimpanan, konsentrasi O_2 dan CO_2 , dan waktu penyimpanan (Keshri dkk., 2019). Suhu ruang penyimpanan yang rendah dapat mempertahankan umur simpan produk. Hal ini dikarenakan adanya penurunan reaksi kimiawi pada produk. Suhu ruang penyimpanan juga berpengaruh pada reaksi enzimatik, di mana reaksi tersebut dapat meningkat setiap kenaikan suhu penyimpanan 10 °C (Belay dkk., 2016).

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk memperpanjang umur simpan dan dapat menjaga kualitas produk segar dari kontaminasi lingkungan adalah dengan menggunakan *Modified Atmospheric Packaging* (MAP). Tujuan utama dari MAP adalah untuk dapat mencapai keseimbangan atmosfer dengan konsentrasi O_2 dan CO_2 yang terbaik untuk produk yang ada di dalam kemasan (Mangaraj & Goswami, 2009).

Keseimbangan konsentrasi gas yang ada di dalam kemasan dipengaruhi oleh karakter produk, massa, permeabilitas kemasan, suhu ruang penyimpanan, dan laju respirasi produk (Belay dkk., 2016; Kendra, 2010; Kirtil dkk., 2016).

Pengukuran dan pemodelan laju respirasi sangat penting dalam mendesain kemasan untuk MAP. Terdapat 3 metode pengukuran laju respirasi, yaitu dengan menggunakan sistem tertutup atau statis, sistem aliran, dan sistem *permeable*. Pada MAP, dapat dilakukan pengukuran laju respirasi dengan menggunakan sistem *permeable*, yaitu dengan adanya kemasan yang sudah diketahui laju transmisi gas dan ukurannya diisi dengan produk (Belay dkk., 2016).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Barui dkk. (2017), terdapat perbedaan signifikan pada efek dari jenis kemasan, waktu penyimpanan dan suhu ruang penyimpanan pada konsentrasi O₂ dan CO₂. Konsentrasi CO₂ yang pada mulanya sebesar 0,03%, setelah 1 hari penyimpanan mengalami kenaikan pada suhu ruang penyimpanan 5 dan 10 °C. Terdapat perbedaan kemasan pada LDPE pada ketebalan 25 dan 50 µm yang digunakan pada pengemasan buah jambu, yaitu adanya perbedaan konsentrasi O₂ dan CO₂ didistribusi oleh perbedaan permeabilitas kemasan terhadap O₂ dan CO₂ pada setiap kemasan. Konsentrasi O₂ yang lebih tinggi dan CO₂ yang lebih rendah ditemukan pada kemasan yang lebih tipis.

Penelitian yang dilakukan oleh Castellanos dkk. (2016), yaitu menggunakan model matematis untuk mendeskripsikan perubahan konsentrasi O₂ dan CO₂ dalam sistem MAP dengan perhitungan difusivitas permeasi gas melalui film kemasan dapat dilakukan. Namun pemodelan tersebut baru diaplikasikan pada buah tomat. Masih jarang sekali dilakukan analisis pemodelan matematis pada MAP buah kolang-kaling. Perlu adanya penelitian lebih lanjut untuk mengetahui laju respirasi buah kolang-kaling dalam MAP dengan memodelkan berdasarkan pengaruh faktor yang ada, terutama faktor suhu ruang penyimpanan dan ketebalan kemasan yang digunakan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis dan memodelkan laju respirasi yang dipengaruhi oleh suhu ruang penyimpanan dan ketebalan kemasan MAP buah kolang-kaling selama proses penyimpanan.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada bulan Februari–Juni 2019 di Laboratorium Teknik Lingkungan dan Bangunan Pertanian dan Laboratorium Teknik Pangan dan

Pascapanen Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.

Bahan, Alat, dan Persiapan Penelitian

Sampel buah kolang-kaling didapatkan dari Kulon Progo, D.I. Yogyakarta. Kolang-kaling yang telah dipetik direbus dahulu selama 60 menit untuk menghilangkan getah yang ada pada buah tersebut karena dapat menimbulkan rasa gatal dan alergi. Selanjutnya, daging buah kolang-kaling diambil dan disimpan untuk sampel penelitian. Kemasan yang digunakan adalah jenis LDPE dengan ukuran 19,8 x 29,7 cm dan variasi ketebalan 30, 50, dan 80 µm. Sampel kolang-kaling dimasukkan ke dalam plastik sebanyak 150 g dan disimpan pada suhu ruang penyimpan 5, 15, dan 28 °C. Masing-masing kombinasi perlakuan diulang sebanyak tiga kali.

Prosedur Penelitian

Kolang-kaling yang didapatkan dari petani dicuci sampai bersih dan ditiriskan. Kemudian sebanyak 150 g dimasukkan ke dalam kemasan LDPE dengan variasi ketebalan 30, 50, dan 80 µm. Kemasan ditutup dengan menggunakan *sealer* dan dipastikan tidak bocor. Kolang-kaling yang sudah dikemas disimpan pada ruang penyimpan dengan suhu 5, 15, dan 28 °C. Laju respirasi yang dinyatakan dalam produksi CO₂ pada semua kolang-kaling yang sudah dikemas diukur dengan menggunakan O₂/CO₂ gas *analyzer* (Quantek Model 902D, USA). Pengukuran konsentrasi CO₂ di dalam kemasan dilakukan selama 6 jam sekali sampai konsentrasi CO₂ di dalam kemasan mencapai konstan.

Perhitungan dan Analisis Data

Permeabilitas kemasan

Menurut Kubík & Zeman (2013), penyerapan dan transmisi gas melalui membran polimer bergantung pada permeabilitas dan difusivitas. Banyaknya gas yang ditransfer melalui membran dapat dinyatakan dengan Persamaan 1.

$$Q = \frac{D \sigma (p_1 - p_2) S t}{h} \quad (1)$$

dimana D adalah koefisien difusivitas (m²/s), p₁ adalah tekanan eksternal (Pa), p₂ adalah tekanan internal (Pa), h adalah ketebalan membran (m), σ adalah konstanta Henry (mol/m³.Pa), t adalah waktu (s), dan S adalah luas permukaan membran (m²).

Dengan asumsi keseimbangan termodinamika, koefisien P dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.

$$P = D \sigma \quad (2)$$

Nilai permeabilitas merupakan fungsi dari volume optimal, energi kohesif, dan morfologi polimer. Koefisien permeabilitas tersebut dapat dinyatakan dengan Persamaan 3.

$$P = \frac{Q h}{S \Delta p t} \quad (3)$$

Dengan mengaplikasikan persamaan gas ideal $pV=nRT$, maka persamaan permeabilitas dapat dinyatakan pada Persamaan 4.

$$P = \frac{Q h}{S \Delta p t} \times \frac{p V}{n R T} = \frac{p V h}{t S \Delta p R T} \quad (4)$$

dimana P adalah permeabilitas (mol/m.s.Pa), Q adalah jumlah gas (mol), S adalah luas permukaan (m²), t adalah waktu (s), p adalah tekanan (Pa), dan V adalah volume gas (m³).

Permeabilitas membran juga dapat dinyatakan dengan yang dapat dilihat pada Persamaan 5.

$$P_{CO_2} = P \frac{V}{Q h} \quad (5)$$

Berdasarkan percobaan yang dilakukan oleh Kubík & Zeman (2013), koefisien permeabilitas dikembangkan menjadi Persamaan 6.

$$P = \frac{\Delta \rho_p V h}{\Delta t S \rho_i R T} \quad (6)$$

dimana ρ_i adalah densitas gas pada volume awal (kg/m³), V adalah volume terkalibrasi (m³), h adalah ketebalan membran (m), $\Delta \rho_p$ adalah perubahan densitas gas yang ditransfer pada volume berkalibrasi (kg/m³), Δt adalah waktu selama difusivitas (d), S adalah luas permukaan membran (m²), R adalah nilai tetapan gas (8,314 J/mol.K), dan T adalah suhu (K).

Kemudian, persamaan permeabilitas dari Persamaan 6 diaplikasikan pada persamaan gas ideal $pV=nRT$, seperti pada Persamaan 7.

$$P_{CO_2} = \frac{\Delta \rho_p V M}{\Delta t S \rho_i^2 R T} \quad (7)$$

dimana ρ_i adalah densitas gas pada volume awal (kg/m³), $\Delta \rho_p$ adalah kenaikan densitas gas yang ditransfer ke volume kalibrasi (kg/m³), V adalah volume wadah (m³), M adalah massa molekul (kg/mol), Δt adalah waktu (d), S adalah luas plastik kemasan (m), R adalah nilai tetapan gas (8,314 J/mol.K), dan T adalah Suhu (K).

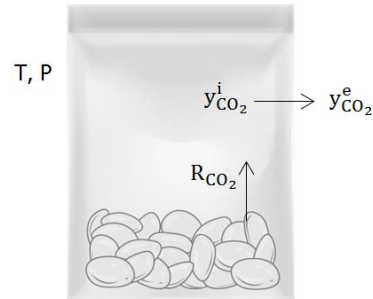
Laju Respirasi (Produksi CO₂)

Laju respirasi (produksi CO₂) dapat dilihat pada Gambar 2. Dari data konsentrasi karbon dioksida

yang diambil, dilakukan analisis laju respirasi dengan menggunakan Persamaan 8.

$$R_{CO_2} = \frac{P_{CO_2} \cdot A}{100 \cdot L \cdot M} (y_{CO_2}^i - y_{CO_2}^e) \quad (8)$$

dimana adalah permeabilitas plastik kemasan (mL.µm/m².jam.atm), A adalah luas permukaan kemasan (m²), L adalah tebal kemasan (µm), M adalah berat produk dalam kemasan (kg), e adalah eksternal atau di luar kemasan, dan i adalah internal atau di dalam kemasan.



Gambar 2. Perubahan konsentrasi CO₂ dalam sistem MAP (Castellanos dkk., 2016)

Pemodelan Laju Respirasi

Dalam penelitian ini digunakan variasi suhu, oleh sebab itu perlu dilakukan evaluasi pengaruh suhu penyimpanan terhadap laju respirasi. Untuk itu digunakan persamaan Arrhenius (Persamaan 9).

$$R_{CO_2} = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (9)$$

dimana A adalah faktor frekuensi tumbukan, E_a adalah energi aktivasi (J/mol), R adalah konstanta gas (8,314 J/kmol.K), dan T adalah suhu ruang penyimpanan (K).

Pemodelan laju respirasi dengan mengkomodasikan dua faktor pengaruh, yaitu suhu ruang penyimpanan dan ketebalan kemasan, dilakukan menggunakan regresi polinomial orde kedua seperti pada Persamaan 10.

$$R_{CO_2} = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 L + \beta_{11} T^2 + \beta_{22} L^2 + \beta_{12} TL \quad (10)$$

dimana β adalah konstanta regresi, T adalah suhu ruang penyimpanan (°C), dan L adalah tebal kemasan (µm).

Analisis Statistik

Pada penelitian ini menggunakan rancangan faktorial 3 x 3 dengan menerapkan *Completely Randomized Design* (CRD) dengan faktor peubah pertama yaitu variasi suhu ruang penyimpanan 5, 15, dan 28 °C dan

faktor peubah kedua yaitu variasi ketebalan kemasan 30, 50, dan 80 μm .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai Permeabilitas Kemasan terhadap CO_2

Nilai permeabilitas kemasan terhadap CO_2 dilakukan dengan metode yang dilakukan oleh Kubik & Zeman (2013) dengan sedikit modifikasi, didapatkan hasil seperti pada Tabel 1. Dapat dilihat bahwa nilai permeabilitas terbesar adalah pada kemasan dengan ketebalan terkecil, yaitu 30 μm . Sebaliknya, nilai permeabilitas terendah adalah pada kemasan dengan ketebalan terbesar, yaitu 80 μm . Pada setiap penurunan

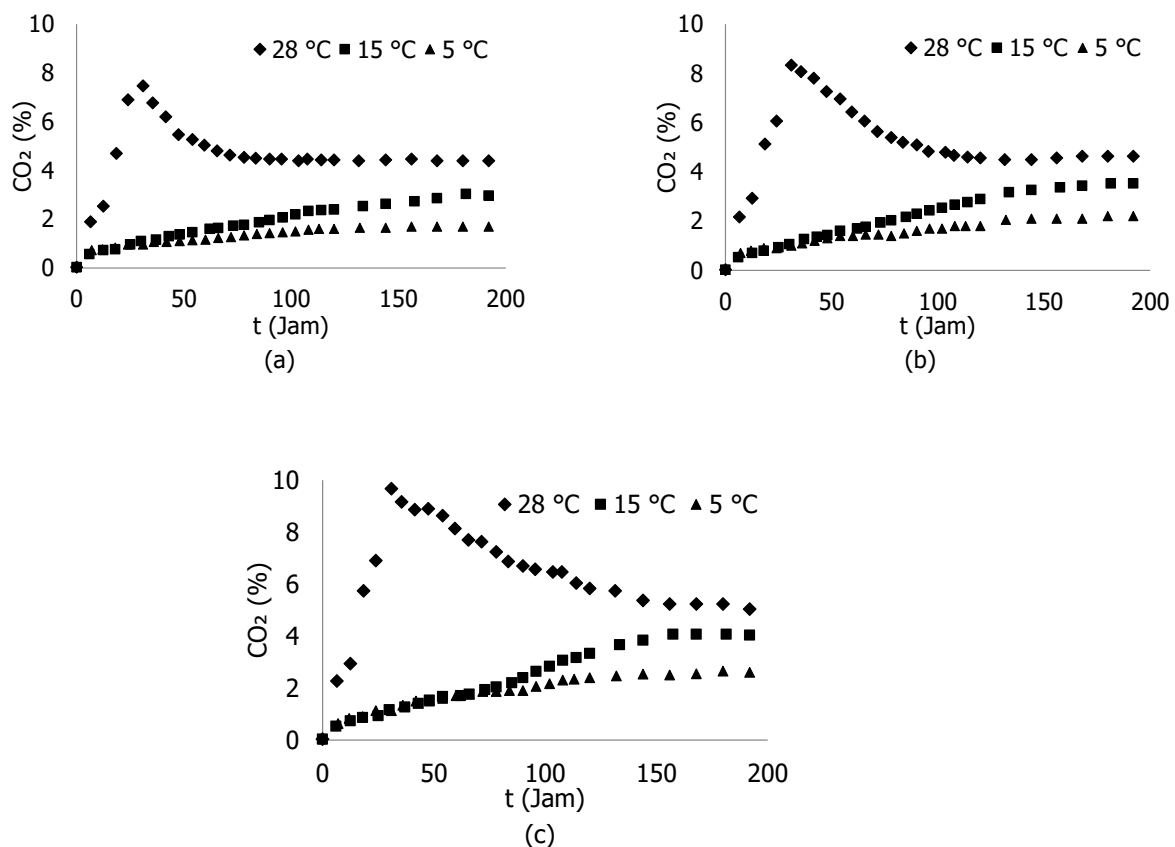
Tabel 1. Nilai permeabilitas kemasan terhadap CO_2

Ketebalan (μm)	Nilai Permeabilitas ($\text{cm}^3/\text{m}^2.\text{d.0,1MPa}$)
30	13205,4 \pm 2224,5
50	8390,1 \pm 1161,1
80	5260,8 \pm 598,0

rerata ketebalan 40%, nilai permeabilitas rerata naik sebanyak 60%. Selanjutnya nilai-nilai permeabilitas tersebut digunakan untuk menentukan laju respirasi kolang-kaling dalam pengemasan MAP.

Pengaruh Suhu Ruang Penyimpanan dan Tebal Kemasan pada Laju Respirasi

Pada Gambar 3 dapat dilihat perubahan konsentrasi CO_2 saat konstan di dalam kemasan MAP selama periode penyimpanan. Pada suhu 5 dan 15 $^\circ\text{C}$, konsentrasi CO_2 di dalam kemasan secara berangsur-angsur meningkat dan kemudian mencapai konstan, sedangkan pada suhu 28 $^\circ\text{C}$ konsentrasi CO_2 secara cepat meningkat kemudian turun menuju nilai konstan tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa pola perubahan konsentrasi CO_2 dalam kemasan sangat berbeda antara penyimpanan pada suhu rendah (*cold storage*) dan penyimpanan pada suhu ruang (28 $^\circ\text{C}$). Peningkatan drastis pada awal penyimpanan pada suhu 28 $^\circ\text{C}$, menunjukkan terjadinya laju respirasi yang sangat cepat karena persediaan O_2 dalam kemasan masih banyak dan suhu penyimpanan yang tinggi. Kedua parameter tersebut



Gambar 3. Perubahan konsentrasi CO_2 pada berbagai suhu ruang penyimpanan (a) kemasan 30 μm , (b) kemasan 50 μm , dan (c) kemasan 80 μm

merupakan faktor yang memicu tingginya laju respirasi produk segar. Untuk mencapai konsentrasi CO₂ konstan tersebut, setiap variasi suhu dan ketebalan kemasan memiliki nilai konsentrasi CO₂, laju respirasi, dan waktu yang berbeda-beda seperti dapat dilihat pada Tabel 2.

Pada suhu ruang penyimpanan 28 °C menunjukkan penambahan konsentrasi CO₂ dalam kemasan yang tercepat. Kemudian konsentrasi yang ada di dalam kemasan perlahan menurun dan mencapai konstan pada waktu tertentu dan tercepat jika dibandingkan dengan suhu ruang penyimpanan 15 dan 5 °C. Dapat dikatakan, produksi CO₂ pada kemasan meningkat secara signifikan pada 31 jam pertama, kemudian menurun perlahan hingga mencapai konstan pada 78 jam untuk ketebalan kemasan 30 µm dan 108 jam untuk kemasan 50 dan 80 µm. Pada suhu ruang penyimpanan yang sama, kemasan yang lebih tipis memiliki waktu konstan yang lebih cepat dan laju respirasi produksi CO₂ yang lebih besar daripada kemasan lainnya. Dapat diketahui juga buah kolang-kaling membutuhkan waktu konstan lebih lama dan menghasilkan laju respirasi terendah ketika ditempatkan ke dalam kemasan 80µm pada suhu 5 °C.

Analisis statistik mengindikasikan bahwa suhu ruang penyimpanan, karakteristik kemasan, dan interaksi kedua faktor tersebut berpengaruh secara signifikan pada laju respirasi produksi CO₂ buah kolang-kaling dalam MAP ($p < 0,05$). Pengaruh suhu yang tinggi akan mempercepat proses metabolisme, sehingga mempercepat terjadinya respirasi dan kerusakan buah kolang-kaling (Sousa Gallagher & Mahajan, 2011). Hal ini ditandai juga dengan menurunnya secara perlahan produksi CO₂ dari buah kolang-kaling sampai mengalami

nilai konstan. Berbagai perubahan konsentrasi CO₂ yang terjadi pada setiap kemasan dikarenakan adanya perubahan konsentrasi CO₂ yang disebabkan oleh perbedaan distribusi permeabilitas kemasan terhadap gas CO₂ (Baruipur dkk., 2017). Laju respirasi produksi CO₂ dipengaruhi oleh beberapa faktor dan harus diteliti lebih dalam pada penelitian selanjutnya. Berdasarkan analisis *Duncan's Multiple Range Test*, dapat diketahui bahwa secara umum laju respirasi pada hampir semua suhu ruang penyimpanan dan ketebalan kemasan satu dengan yang lainnya berbeda secara signifikan (Tabel 2).

Pemodelan Laju Respirasi

Pengaruh suhu ruang penyimpanan terhadap laju respirasi buah kolang-kaling dalam MAP untuk setiap ketebalan kemasan dapat dimodelkan dengan menggunakan persamaan Arrhenius (Baruipur dkk., 2017). Dari persamaan Arrhenius, kemudian dapat dikembangkan lagi berdasarkan ketebalan kemasan seperti pada Tabel 3 (Mahajan & Caleb, 2017).

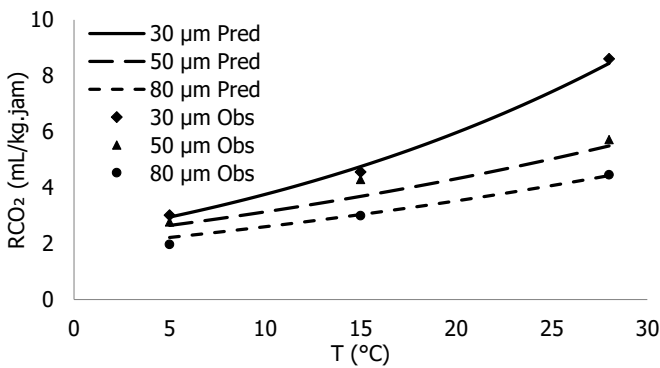
Dari persamaan Arrhenius didapatkan nilai frekuensi tumbukan (A) dan energi aktivasi (E_a) terbesar dimiliki oleh kemasan yang paling tipis. Hal ini dikarenakan dengan adanya nilai permeabilitas CO₂ yang besar, maka proses perpindahan dan perubahan konsentrasi CO₂ di dalam kemasan akan semakin besar, sehingga menimbulkan nilai frekuensi tumbukan dan energi aktivasi yang besar. Demikian pula laju respirasinya juga lebih besar daripada kemasan lainnya. Dari nilai frekuensi tumbukan dan energi aktivasi yang dihasilkan dari persamaan Arrhenius, didapatkan

Tabel 2. Waktu untuk mencapai konstan, konsentrasi CO₂ konstan, dan laju respirasi respirasi dari variasi perlakuan yang diteliti

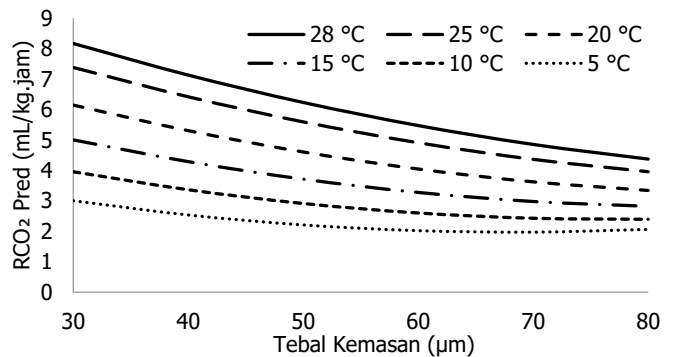
Suhu (°C)	Tebal kemasan (µm)	Waktu konstan (jam)	CO ₂ konstan (%)	RCO ₂ (mL/kg. jam)
28	30	78	4,53 ± 0,06	8,61 ± 0,19 ^e
	50	114	4,60 ± 0,40	5,72 ± 0,49 ^d
	80	131,5	5,73 ± 0,29	4,46 ± 0,26 ^c
15	30	108	2,33 ± 0,32	4,56 ± 0,71 ^c
	50	133,5	3,40 ± 0,64	4,29 ± 0,84 ^c
	80	144	3,83 ± 0,58	3,00 ± 0,27 ^b
5	30	108	1,57 ± 0,06	3,02 ± 0,06 ^b
	50	132	1,90 ± 0,40	2,78 ± 0,57 ^b
	80	144	2,53 ± 0,35	1,97 ± 0,25 ^a

Tabel 3. Energi aktivasi dan faktor frekuensi tumbukan dengan persamaan Arrhenius dari ketiga ketebalam plastik kemasan

Tebal Kemasan (µm)	A (mL/kg.jam)	Ea (J/mol)	R _{CO₂} Prediksi (mL/kg. jam)
30	2845644,11	31869,17	$R_{CO_2} = 2845644,11 \cdot e^{-3832,98 \frac{1}{T}}$
50	37219,94	22087,49	$R_{CO_2} = 37219,94 \cdot e^{-2656,51 \frac{1}{T}}$
80	19112,54	20955,91	$R_{CO_2} = 19112,54 \cdot e^{-2520,41 \frac{1}{T}}$



Gambar 4. Laju respirasi prediksi Buah Kolang-kaling pada berbagai variasi ketebalan kemasan MAP



Gambar 5. Kurva prediksi laju respirasi pada berbagai suhu ruang penyimpanan dan ketebalan kemasan

persamaan laju respirasi produksi CO₂ prediksi untuk kemasan 30, 50, dan 80 µm. Dari ketiga persamaan tersebut dapat dibuat suatu kurva prediksi pengaruh suhu ruang simpan terhadap laju respirasi untuk suhu penyimpanan 5 – 28°C yang dapat dilihat pada Gambar 4.

Untuk dapat mengakomodasi kedua faktor variasi, yaitu suhu ruang penyimpanan dan ketebalan kemasan kedalam persamaan laju respirasi, pemodelan dilakukan dengan menggunakan regresi polinomial orde dua. Berdasarkan hasil analisis diperoleh persamaan laju respirasi (Persamaan 11).

$$R_{CO_2} = 4,0068 + 0,2369 T - 0,0829 L + 0,0019 T^2 + 0,0007 L^2 - 0,0025 TL \quad (11)$$

Selanjutnya dengan Persamaan 11 dapat digambarkan kurva laju respirasi pada suhu 5–28 °C dan pada kemasan dengan ketebalan 30–80 µm secara bersamaan seperti pada Gambar 5. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa semakin tinggi suhu ruang penyimpanan dan semakin tipis kemasan yang digunakan akan memberikan laju respirasi CO₂ pada saat konstant dengan nilai yang lebih tinggi. Demikian juga bahwa semakin tinggi suhu ruang penyimpanan, pengaruh ketebalan kemasan terhadap laju respirasi semakin terlihat jelas.

Untuk membuktikan kestabilan penggunaan model dan menentukan reabilitas prediksi laju respirasi produksi CO₂, dilakukan validasi model Arrhenius dan regresi polinomial orde kedua. Kedua model tersebut berlaku untuk MAP buah kolang-kaling pada suhu 5-28 °C dan ketebalan kemasan 30-80 µm. Berdasarkan model yang telah digunakan, dihasilkan koefisien korelasi pada setiap kemasan yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Didapatkan rerata koefisien korelasi pada persamaan Arrhenius sebesar 0,989 dan pada regresi polynomial orde kedua sebesar 0,983. Dengan begitu, penggunaan pemodelan dengan persamaan Arrhenius dan regresi polynomial orde kedua dapat digunakan dengan baik untuk memprediksi laju respirasi produksi

Tabel 4. Nilai uji validasi R² untuk pemodelan Arrhenius dan regresi polinomial orde kedua

Tebal Kemasan (µm)	Koefisien Korelasi (R ²)	
	Arrhenius	Regresi Polinomial Ordo Kedua
30	0,997	0,985
50	0,972	0,974
80	0,998	0,991

CO₂ pada kolang-kaling dengan *Modified Atmospheric Packaging* (MAP).

KESIMPULAN

Laju respirasi produksi CO₂ pada suhu 28 °C yaitu 8,61 ± 0,19; 5,72 ± 0,49; dan 4,46 ± 0,26 mL/kg.jam untuk kemasan 30,50, dan 80 µm. Paling tinggi jika dibandingkan dengan laju respirasi produksi CO₂ pada suhu 15 dan 5 °C. Pada suhu 15 °C memiliki laju respirasi produksi CO₂ sebesar 4,56 ± 0,71; 4,29 ± 0,84; dan 3,00 ± 0,27 mL/kg.jam untuk kemasan 30,50, dan 80 µm. Pada suhu 5 °C memiliki laju respirasi produksi CO₂ sebesar 3,02 ± 0,06; 2,78 ± 0,57; dan 1,97 ± 0,25 mL/kg.jam untuk kemasan 30,50, dan 80 µm. Variasi suhu ruang penyimpanan dan ketebalan kemasan yang paling berpengaruh pada perlambatan laju respirasi kolang-kaling adalah pada variasi suhu ruang penyimpanan 5 °C dan kemasan 80 µm. Analisis statistik mengindikasikan bahwa suhu ruang penyimpanan, karakteristik kemasan, dan interaksi kedua faktor tersebut berpengaruh secara signifikan pada laju respirasi produksi CO₂ buah kolang-kaling dalam MAP ($p < 0,05$). Pemodelan yang digunakan, yaitu persamaan Arrhenius dan regresi polynomial orde kedua dapat digunakan dengan baik untuk memprediksi laju respirasi produksi CO₂ pada kolang-kaling dengan *Modified Atmospheric Packaging* (MAP) dengan rerata nilai koefisien korelasi (R^2) sebesar 0,989 pada persamaan Arrhenius dan 0,983 pada regresi polynomial orde kedua. Kedua model tersebut berlaku untuk MAP buah kolang-kaling pada suhu 5-28 °C dan ketebalan kemasan 30-80 µm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia melalui Program Penelitian Magister (PTM) tahun 2019.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa artikel ini asli hasil penelitian para penulis, hanya dipublikasikan pada jurnal ini, dan tidak ada konflik kepentingan.

DAFTAR PUSTAKA

Baruipur, C., Murmu, S. B., & Mishra, H. N. (2017). LWT - Food Science and Technology Engineering evaluation of thickness and type of packaging materials based on the modified atmosphere packaging requirements of

guava. *LWT - Food Science and Technology*, 78, 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.043>

Belay, Z. A., Caleb, O. J., & Linus, U. (2016). Modelling approaches for designing and evaluating the performance of modified atmosphere packaging (MAP) systems for fresh produce: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 10, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2016.08.001>

Castellanos, D. A., Cerisuelo, J. P., Hernandez-muñoz, P., Herrera, A. O., & Gavara, R. (2016). *Modelling the evolution of O₂ and CO₂ concentrations in MAP of a fresh product: Application to tomato*. 168, 84–95.

Dameswari, A. H. dkk. (2017). Kombinasi Teknologi Kemasan dan Bahan Tambahan Untuk Mempertahankan Mutu Kolang Kaling. *Jurnal Keteknik Pertanian*, 5(Desember), 201–208. <https://doi.org/10.19028/jtep.05.3.201-208>

Ghosh, T., & Dash, K. K. (2018). Respiration rate model and modified atmosphere packaging of bhimkol banana. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 11(4), 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.04.004>

Gunawan, R., Ramadhan, U. G. A. G., Iskandar, J., & Partasasmita, R. (2018). *Local knowledge of utilization and management of sugar palm (Arenga pinnata) among Cipanggulaan People of Karyamukti, Cianjur (West Java, Indonesia)*. 19(1), 93–105. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d190115>

Ho, C. W., Aida, W. M. W., Maskat, M. Y., & Osman, H. (2007). *Food Chemistry Changes in volatile compounds of palm sap (Arenga pinnata) during the heating process for production of palm sugar*. 102, 1156–1162. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.004>

Kendra, K. V. (2010). LWT - Food Science and Technology Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs. *LWT - Food Science and Technology*, 43(3), 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.05.018>

Keshri, N., Truppel, I., Herppich, W. B., Geyer, M., Weltzien, C., & Mahajan, P. V. (2019). Development of sensor system for real-time measurement of respiration rate of fresh produce. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157(January), 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.006>

Kirana, M. A. (2017). *Kajian Matematis Laju Respirasi dan Perubahan Sifat Fisik Buah Nangka (Artocarpus heterophyllus Lamk.) Terolah Minimal Selama Penyimpanan pada Kondisi Atmosfer Termodifikasi*. Universitas Gadjah Mada.

Kirtil, E., Kilercioglu, M., Oztop, M. H., & East, M. (2016). Modified Atmosphere Packaging of Foods. In *Reference Module in Food Science*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03218-2>

Kubík, L., & Zeman, S. (2013). Determination of oxygen permeability of polyethylene and polypropylene

- nonwoven fabric foils. *Research in Agricultural Engineering*, 59(3), 105–113.
- Mahajan, P. V., & Caleb, O. J. (2017). Modeling MAP of Fruits and Vegetables. *Reference Module in Food Science*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.21461-3>
- Mangaraj, S., & Goswami, T. K. (2009). Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables for Extending Shelf-Life: A Review. *Global Science Books*, 651–674.
- Sapuan, S. M., Sahari, J., Ishak, M. R., & Sanyang, M. L. (2019). Sugar Palm Biofibers, Biopolymers, and Biocomposites. In *Taylor & Francis Group*.
- Sousa Gallagher, M. J., & Mahajan, P. V. (2011). The stability and shelf life of fruit and vegetables. In *Food and Beverage Stability and Shelf Life*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-701-3.50022-0>
- Tusiyem, Suroso, A., Retnowaty, S. F., & Wirman, S. P. (2015). Uji fisis dan pH Manisan Air Buah Kolang-Kaling. *Jurnal Photon*, 5(2), 53–62. Retrieved from [blob:http://ejournal.umri.ac.id/0a80a3a2-27d2-4638-af23-86f3e69abadb](http://ejournal.umri.ac.id/0a80a3a2-27d2-4638-af23-86f3e69abadb)