Agroteknika 9 (3): 796-805 (2026)

AGROTEKNIKA

ISSN: 2685-3450 (*Online*) www.agroteknika.id ISSN: 2685-3450 (*Print*)

Studi Karakteristik Laju Respirasi Alpukat Tongar pada Berbagai Konsentrasi Oksigen selama Penyimpanan Dingin

Study of the Respiration Rate Characteristics of Tongar Avocado at Various Oxygen Concentrations during Cold Storage

Syarifah Ummairoh [1], Omil Charmyn Chatib [1], Khandra Fahmy [1,*]

[1] Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

[*]Penulis Korespondensi
Email: khandrafahmy@ae.unand.ac.id

Check for updates

Abstrak. *Alpukat varietas Tongar merupakan buah klimakterik yang memiliki laju respirasi tinggi setelah panen sehingga mudah mengalami penurunan mutu dan kerusakan. Pengendalian kondisi penyimpanan, khususnya konsentrasi O_2 dan suhu, sangat penting untuk memperlambat proses respirasi dan memperpanjang umur simpan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik laju respirasi alpukat Tongar pada berbagai konsentrasi O_2 selama penyimpanan pada suhu dingin (10°C). Pengukuran laju respirasi dilakukan menggunakan metode aliran kontinu (flow-through method) dengan perlakuan konsentrasi O_2 sebesar 2%, 4%, 9%, dan 20%. Parameter yang diamati meliputi laju konsumsi O_2 dan laju produksi CO_2 selama 14 jam penyimpanan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju konsumsi O_2 menurun seiring waktu pada seluruh perlakuan, dengan nilai tertinggi pada konsentrasi 20% O_2 dan terendah pada 9% O_2. Sebaliknya, laju produksi CO_2 meningkat selama penyimpanan, dengan nilai tertinggi juga ditemukan pada konsentrasi 20% O_2, sedangkan konsentrasi 2% menghasilkan produksi CO_2 terendah. Hasil ini menunjukkan bahwa konsentrasi O_2 berpengaruh terhadap laju respirasi alpukat Tongar. Konsentrasi O_2 rendah efektif menekan respirasi, namun perlu dikontrol agar tidak memicu kondisi anaerob. Dengan demikian, pengaturan konsentrasi O_2 dan suhu penyimpanan yang tepat berpotensi mempertahankan mutu dan memperpanjang umur simpan alpukat Tongar.*

Kata kunci: *alpukat Tongar, laju respirasi, konsentrasi O_2, penyimpanan dingin, metode aliran-kontinu.*

Abstract. *Tongar avocado is a climacteric fruit with a high postharvest respiration rate, making it susceptible to quality deterioration and damage. Controlling storage conditions, particularly O_2 concentration and temperature, is essential for slowing respiration and extending shelf life. This study aimed to analyze the respiration rate characteristics of Tongar avocado under various O_2 concentrations during cold storage (10 °C). Respiration rates were measured using the flow-through method with O_2 concentration treatments of 2%, 4%, 9%, and 20%. The parameters observed were the O_2 consumption rate and CO_2 production rate over 14 hours of storage. The results showed that the O_2 consumption rate decreased over time in all treatments, with the highest value at 20% O_2 and the lowest at 9% O_2. In contrast, the CO_2 production rate increased during storage, with the highest value also found at 20% O_2, while 2% O_2 resulted in the lowest CO_2 production. These results indicate that O_2 concentration affects the respiration rate of Tongar*

Diterima: 24 Mei 2026; Disetujui: 11 Juli 2026; Diterbitkan: 30 September 2026
https://doi.org/10.55043/agroteknika.v9i3.761
© 2026 Penulis. Diterbitkan oleh Green Engineering Society dalam jurnal Agroteknika
Artikel ini adalah artikel open access di bawah lisensi CC BY-SA 4.0

avocado. Low O_2 concentrations effectively suppress respiration but must be controlled to avoid inducing anaerobic conditions. Therefore, appropriate control of O_2 concentration and storage temperature can help maintain quality and extend the shelf life of Tongar avocado.
Keywords: *Tongar avocado, respiration rate, O_2 concentration, cold storage, flow-through method.*

1. Pendahuluan

Alpukat merupakan buah klimakterik yang ditandai dengan adanya lonjakan respirasi dan produksi etilen setelah panen, yang memicu berbagai perubahan fisiologis dan biokimia selama proses pematangan (Giovannoni, 2001). Dibandingkan dengan buah klimakterik lainnya, alpukat diketahui menghasilkan etilen dalam jumlah relatif tinggi, yaitu sekitar 80–100 µL kg^{-1} jam^{-1} pada suhu 20°C selama proses pematangan (Seymour & Tucker, 1993). Tingkat kematangan buah alpukat sangat menentukan mutu dan kualitasnya, terutama terkait tekstur, rasa, dan daya simpan. Alpukat merupakan komoditas yang rentan mengalami kerusakan akibat faktor mekanis maupun fisiologis sehingga memiliki umur simpan yang relatif pendek (Yanti *et al.,* 2023).

Buah alpukat varietas Tongar merupakan salah satu varietas unggulan yang berasal dari Desa Tongar, Kecamatan Pasaman, Kabupaten Pasaman Barat. Alpukat ini memiliki bentuk buah bulat dengan permukaan kulit licin, ujung buah membulat, serta pangkal buah tumpul. Daging buah berwarna kuning mentega, dengan berat buah sekitar 256,19±69,35 gram, Panjang buah 9,67±1,51 cm dan diameter buah 7,57±0,67 cm (Sari *et al.,* 2024). Selain itu, alpukat Tongar dikenal memiliki cita rasa gurih dan tekstur pulen. Sebagai buah klimakterik, alpukat Tongar bersifat mudah mengalami kerusakan setelah panen. Oleh karena itu, penanganan pascapanen yang tidak tepat dapat mempercepat penurunan mutu serta meningkatkan kehilangan hasil.

MAP (*Modified Atmosphere Packaging*) merupakan teknologi pengemasan yang memodifikasi komposisi gas di dalam kemasan untuk mempertahankan mutu dan memperpanjang umur simpan produk segar selama proses transportasi dan penyimpanan (Kargwal *et al.,* 2020; Mungalpara *et al.,* 2025). Dalam sistem MAP, permeabilitas bahan kemasan memegang peranan penting karena menentukan keseimbangan konsentrasi gas O_2 dan CO_2 di dalam kemasan. Prinsip kerja MAP didasarkan pada interaksi antara respirasi alami produk dan pertukaran gas melalui kemasan, yang menyebabkan perubahan komposisi gas di dalam kemasan hingga tercapai kondisi kesetimbangan (Mangaraj *et al.,* 2015; Mendoza *et al.,* 2016). Keberhasilan MAP dalam menjaga mutu buah sangat bergantung pada keseimbangan antara laju respirasi produk dan laju permeasi gas melalui kemasan. Apabila laju respirasi lebih tinggi dibandingkan laju permeasi gas, maka oksigen di dalam kemasan akan cepat habis sehingga memicu terjadinya respirasi anaerob. Sebaliknya, jika laju permeasi gas terlalu tinggi dibandingkan laju respirasi, maka komposisi atmosfer di dalam kemasan akan mendekati kondisi normal, sehingga fungsi MAP dalam

memperlambat kerusakan menjadi tidak optimal. Oleh karena itu, pemilihan kemasan dengan tingkat permeabilitas yang sesuai sangat penting untuk menjaga keseimbangan antara laju respirasi dan laju pertukaran gas, sehingga mutu buah dapat dipertahankan secara optimal selama penyimpanan (Kargwal *et al.,* 2020).

Laju respirasi pada produk segar dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain suhu penyimpanan, konsentrasi gas O_2 dan CO_2, produksi etilen, serta kondisi fisik buah. Pengendalian laju respirasi setelah panen sangat penting karena berkaitan langsung dengan kemampuan mempertahankan mutu dan kesegaran produk hingga sampai ke konsumen. Suhu, khususnya suhu dingin, memiliki peranan penting dalam menekan laju respirasi dan aktivitas metabolik sehingga mampu memperlambat proses pematangan, menunda senesensi, serta mempertahankan kualitas buah selama penyimpanan. Penyimpanan pada suhu rendah juga terbukti efektif dalam mengurangi perubahan fisik dan kimia selama pascapanen dibandingkan penyimpanan pada suhu ruang (Zainal *et al.,* 2024). Namun demikian, penerapan suhu dingin pada buah alpukat perlu dikendalikan dengan baik, karena suhu yang terlalu rendah dapat menyebabkan *chilling injury* (CI), terutama pada buah tropis dan subtropis. Kerusakan ini ditandai dengan gejala seperti bercak hitam pada kulit, pelunakan tidak merata, pencoklatan jaringan, serta meningkatnya kerentanan terhadap pembusukan, yang pada akhirnya dapat menurunkan mutu dan meningkatkan kehilangan hasil (*losses*). Pada alpukat, penyimpanan pada suhu sangat rendah bahkan dapat memicu kerusakan fisiologis yang signifikan dan menurunkan daya simpan serta nilai jual produk (Sati *et al.,* 2025; Sivankalyani *et al.,* 2015). Oleh karena itu, pengukuran laju respirasi menjadi salah satu parameter penting dalam menentukan umur simpan dan kualitas produk pascapanen (Guillard *et al.,* 2016).

Meskipun karakteristik respirasi telah banyak dilaporkan pada beberapa varietas alpukat, informasi mengenai laju respirasi alpukat varietas Tongar pada berbagai konsentrasi O_2 masih terbatas. Data tersebut diperlukan sebagai dasar dalam pengembangan teknologi penyimpanan berbasis *Controlled Atmosphere* (CA) dan MAP. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi laju respirasi alpukat Tongar pada berbagai konsentrasi O_2 selama penyimpanan pada suhu 10°C menggunakan metode aliran-kontinu, sehingga diperoleh data dasar untuk mendukung penentuan kondisi penyimpanan yang optimal.

2. Bahan dan Metode

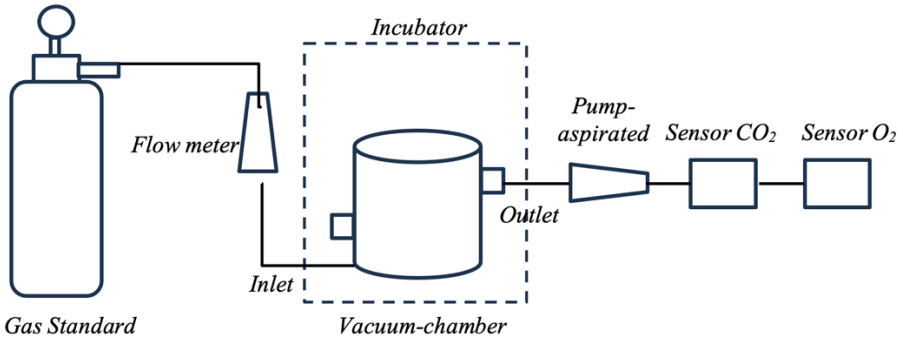
2.1. Alat dan bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah 30 buah alpukat varietas Tongar dengan berat berkisar antara 250–350 gram per buah. Sampel alpukat dipanen pada tingkat kematangan 180 hari setelah bunga mekar dengan mutu kelas I. Alpukat yang digunakan memiliki

kriteria fisik yang seragam, yaitu tidak mengalami kerusakan pada kulit dan memiliki ukuran yang relatif sama. Sedangkan alat yang digunakan yaitu timbangan digital (KERN ABJ, 320-4NM, *Germany*), *sensor zirconia* O_2 (MC-86, Ijma Electronic, *Japan)*, *probe* CO_2 *solid-state* (GMP 221, Vaisala, *Finland*), *flowmeter* (RMA-150-SSV,Dwyer,*Usa*), *vacuum-chamber* (3,8 L) dan *incubator* (*Cooling Incubator Laboratorium*, *18- One*, *China*).

2.2. Pengukuran laju respirasi dengan *flow-through method*

Pengukuran laju respirasi alpukat Tongar dilakukan dengan menggunakan metode aliran-kontinu (Gambar 1). Alpukat Tongar ditempatkan di dalam *vacuum-chamber* yang dialiri gas O_2 yang berasal dari tabung gas standar dengan konsentrasi O_2 2%,4%,9% dan 20%. Nilai ini diambil berdasarkan rekomendasi konsentrasi atmosfer untuk penyimpanan buah alpukat (Kader, 2002). Gas yang masuk ke dalam *vacuum-chamber* diatur kecepatannya sebesar 100 mL menit^{-1} dengan menggunakan *flowmeter*. *Vacuum-chamber* ditempatkan di dalam inkubator pada suhu 10^{o}C. Perubahan pada komposisi gas diukur dengan menggunakan sensor *zirconia* O_2 (MC-86, Iijima Electronic, Jepang) dan *probe* CO_2 *solid-state* (GMP221, Vaisala, Finlandia).



Gambar 1. Diagram skematik instrumen untuk pengukuran laju respirasi dengan metode aliran kontinu.

Laju respirasi sebagai laju konsumsi O_2 dan laju produksi CO_2 dihitung berdasarkan perbedaan konsentrasi gas O_2 dan CO_2 di *inlet* dengan di *outlet*, dengan menggunakan Persamaan (1) dan (2) berikut (Fahmy & Nakano, 2014).

$$= \mathrm{R}\ o_2 \left| \frac{y_{O_2}^{in} - y_{CO_2}^{out}}{100} \right| \frac{F}{M} \times \quad (1)$$

$$\mathrm{R}co_2 = \left| \frac{y_{CO_2}^{in} - y_{CO_2}^{out}}{100} \right| \times \frac{F}{M} \quad (2)$$

R_{O_2} : laju konsumsi O_2 dari produk (mL kg^{-1} h^{-1})
R_{CO_2} : laju produksi CO_2 dari produk (mL kg^{-1} h^{-1})
y_{O_2} : konsentrasi volumetrik O_2 (%)
y_{CO_2} : konsentrasi volumetrik CO_2 (%)
F : *flow rate* (ml h^{-1})
M : massa buah (kg)
in : *inlet*
out : *outlet*

3. Hasil dan Pembahasan

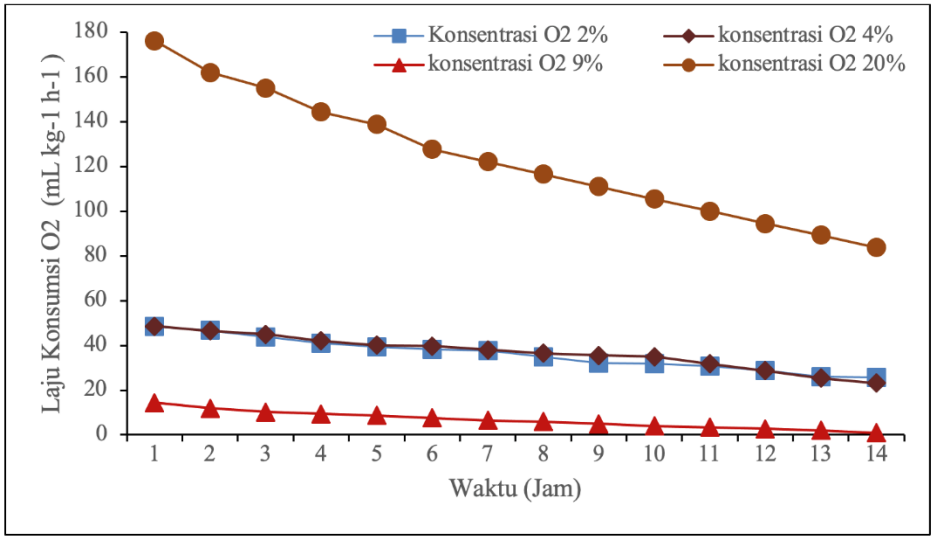
3.1. Laju konsumsi O_2

Berdasarkan Gambar 2, laju konsumsi O_2 alpukat Tongar menunjukkan perbedaan yang jelas pada setiap konsentrasi O_2 serta menurun seiring waktu penyimpanan (1–14 jam). Penelitian ini terbatas pada pengamatan laju respirasi selama 14 jam, sehingga karakteristik respirasi yang diperoleh merepresentasikan respons fisiologis awal alpukat Tongar terhadap berbagai konsentrasi O_2. Meskipun demikian, rentang waktu tersebut telah memadai untuk menggambarkan pola laju respirasi pada setiap perlakuan. Penelitian selanjutnya perlu dilakukan dengan durasi penyimpanan yang lebih panjang untuk memperoleh gambaran perubahan laju respirasi selama seluruh periode penyimpanan. Pada O_2 20%, laju konsumsi O_2 paling tinggi, yaitu sekitar 175 mL kg^{-1} jam^{-1} di awal dan menurun menjadi ±85 mL kg^{-1} jam^{-1} di akhir. Pada O_2 4% dan 2%, laju konsumsi berada pada tingkat sedang, yaitu sekitar 45–50 mL kg^{-1} jam^{-1} di awal dan menurun hingga ±23–27 mL kg^{-1} jam^{-1}. Pada O_2 9%, laju konsumsi paling rendah, berkisar dari ±13 mL kg^{-1} jam^{-1} dan turun hingga mendekati 1–2 mL kg^{-1} jam^{-1} di akhir pengamatan. Secara umum, semua perlakuan menunjukkan tren penurunan konsumsi O_2, namun besarnya laju respirasi sangat dipengaruhi oleh konsentrasi O_2 di lingkungan penyimpanan.

Perbedaan laju konsumsi O_2 antar perlakuan menunjukkan bahwa konsentrasi O_2 merupakan faktor utama yang mengendalikan respirasi buah. Semakin tinggi konsentrasi O_2, semakin tinggi pula laju konsumsi O_2 karena respirasi aerob memerlukan oksigen sebagai akseptor elektron utama. Hal ini terlihat pada perlakuan 20% O_2 yang memiliki laju respirasi tertinggi sepanjang waktu (Lokke *et al.,* 2011). Sebaliknya, pada konsentrasi O_2 rendah (2–4%), terjadi penekanan laju respirasi akibat terbatasnya ketersediaan oksigen untuk proses metabolisme. Kondisi ini menyebabkan penurunan aktivitas rantai respirasi dan penggunaan substrat menjadi lebih lambat. Temuan ini sesuai dengan penelitian yang menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi O_2 secara signifikan menurunkan laju respirasi dan memperpanjang masa simpan buah (Ho *et al.,* 2018).

Pada konsentrasi 9% O_2, laju konsumsi O_2 menunjukkan nilai paling rendah dibandingkan perlakuan lainnya. Pada konsentrasi tersebut, kemungkinan telah terjadi kondisi mendekati hipoksia, sehingga metabolisme aerob sangat terbatas. Dalam kondisi ini, jaringan buah dapat mulai beralih ke metabolisme anaerob (fermentasi), yang menghasilkan energi lebih kecil dan menurunkan konsumsi O_2 secara drastis. Selain pengaruh konsentrasi O_2, penurunan laju konsumsi O_2 seiring waktu juga terjadi pada semua perlakuan. Hal ini menunjukkan adanya adaptasi fisiologis buah selama penyimpanan, di mana aktivitas metabolisme berangsur menurun menuju

fase penuaan. Pada buah klimakterik seperti alpukat, respirasi awalnya dapat ditekan oleh kondisi lingkungan, namun tetap akan mengalami perubahan sesuai tahap perkembangan fisiologisnya (Young *et al.,* 1961). Dalam konteks penyimpanan atmosfer termodifikasi, kombinasi O_2 rendah dan suhu dingin (10°C) terbukti efektif untuk menekan respirasi, mengurangi kehilangan substrat, serta memperlambat pematangan dan penurunan kualitas buah. Namun, konsentrasi O_2 yang terlalu rendah perlu dihindari karena dapat memicu kondisi anaerob yang berpotensi merusak mutu buah.



Gambar 2. Laju konsumsi O_2 buah alpukat Tongar pada berbagai konsentrasi O_2 dan penyimpanan suhu 10°C yang dihitung dengan Persamaan (1).

3.2. Laju produksi CO_2

Berdasarkan grafik Gambar 3, laju produksi CO_2 alpukat Tongar menunjukkan tren meningkat seiring waktu penyimpanan pada semua perlakuan konsentrasi O_2 (1–14 jam), namun dengan tingkat peningkatan yang berbeda. Pada O_2 20%, laju produksi CO_2 paling tinggi, meningkat dari sekitar 9 (jam ke-1) menjadi ±83 mL kg^{-1} jam^{-1} (jam ke-14) dengan kenaikan tajam terutama setelah jam ke-8. Pada O_2 9%, laju produksi CO_2 berada pada tingkat sedang, yaitu dari sekitar 2 mL kg^{-1} jam^{-1} menjadi ±25 mL kg^{-1} jam^{-1} di akhir pengamatan. Pada O_2 4%, peningkatan relatif lebih rendah, dari ±1 mL kg^{-1} jam^{-1} menjadi ±17 mL kg^{-1} jam^{-1}. Pada O_2 2%, laju produksi CO_2 paling rendah, yaitu dari ±0,5 mL kg^{-1} jam^{-1} dan hanya mencapai sekitar 7 mL kg^{-1} jam^{-1} pada akhir penyimpanan. Secara umum, semakin tinggi konsentrasi O_2, semakin tinggi laju produksi CO_2, dan semua perlakuan menunjukkan peningkatan seiring waktu.

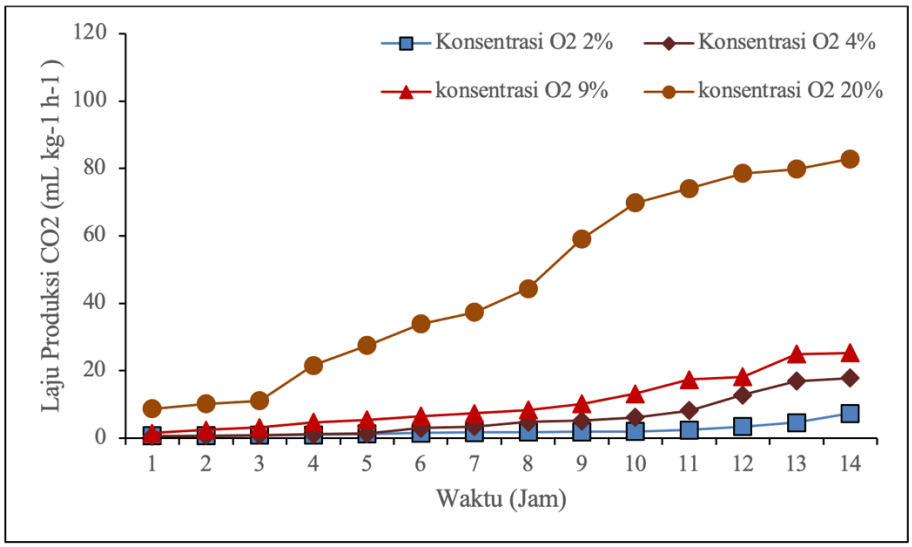
Peningkatan laju produksi CO_2 pada semua perlakuan menunjukkan bahwa respirasi buah alpukat tetap berlangsung selama penyimpanan, karena CO_2 merupakan produk utama dari respirasi aerob, yaitu hasil oksidasi substrat organik menggunakan oksigen. Dalam proses ini, semakin aktif metabolisme sel, maka semakin tinggi pula produksi CO_2 yang dihasilkan (Asmiya & Venkatesh, 2024).

Perbedaan laju produksi CO_2 pada berbagai konsentrasi O_2 menunjukkan bahwa ketersediaan oksigen sangat mempengaruhi intensitas respirasi. Pada konsentrasi O_2 tinggi (20%), respirasi aerob berlangsung optimal sehingga menghasilkan CO_2 dalam jumlah paling besar. Hal ini sesuai dengan teori bahwa laju respirasi meningkat dengan meningkatnya ketersediaan O_2 karena oksigen berperan sebagai akseptor elektron dalam rantai respirasi (Lokke *et al.,* 2011).

Sebaliknya, pada konsentrasi O_2 rendah (2–4%), laju produksi CO_2 jauh lebih rendah. Kondisi ini disebabkan oleh terbatasnya suplai oksigen yang menghambat proses fosforilasi oksidatif, sehingga aktivitas metabolik menurun. Pada kondisi hipoksia ini, respirasi dapat ditekan dan proses pematangan buah menjadi lebih lambat. Hal ini menjadi dasar penerapan teknologi penyimpanan atmosfer termodifikasi (MA/CA) untuk memperpanjang umur simpan buah dengan cara menurunkan kadar O_2 di lingkungan penyimpanan (Benkeblia, 2021; Ho *et al.,* 2018; Kandasamy, 2022).

Pada perlakuan O_2 9%, laju produksi CO_2 berada di antara perlakuan lainnya, yang menunjukkan bahwa konsentrasi ini masih memungkinkan berlangsungnya respirasi aerob, tetapi dalam kondisi terbatas. Hal ini menegaskan adanya hubungan langsung antara konsentrasi O_2 dan laju respirasi, di mana penurunan O_2 akan diikuti oleh penurunan produksi CO_2 hingga batas tertentu. Selain itu, peningkatan tajam produksi CO_2 terutama pada perlakuan O_2 20% menunjukkan adanya kecenderungan menuju fase klimakterik. Alpukat termasuk buah klimakterik yang mengalami lonjakan respirasi selama proses pematangan, yang ditandai dengan peningkatan produksi CO_2 dan energi metabolik. Selama fase ini, aktivitas enzim meningkat untuk mendukung perubahan fisiologis seperti pelunakan jaringan dan pembentukan rasa khas buah (Bennett *et al.,* 1987). Namun demikian, walaupun suhu penyimpanan rendah (10°C) mampu memperlambat respirasi, faktor waktu tetap menyebabkan akumulasi aktivitas metabolik. Hal ini terlihat dari tren peningkatan CO_2 pada semua perlakuan, meskipun laju peningkatannya berbeda. Suhu rendah diketahui dapat menekan respirasi, tetapi tidak menghentikannya sepenuhnya sehingga produksi CO_2 tetap meningkat secara bertahap (Lokke *et al.,* 2011).

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa interaksi antara konsentrasi O_2 dan waktu penyimpanan menentukan pola respirasi buah alpukat, di mana O_2 tinggi mempercepat respirasi dan pematangan, sedangkan O_2 rendah efektif menekan respirasi dan memperlambat proses tersebut, namun harus dijaga agar tidak mencapai kondisi anaerob yang dapat menurunkan mutu buah.



Gambar 3. Laju produksi CO_2 buah alpukat Tongar pada berbagai konsentrasi O_2 dan penyimpanan suhu 10°C yang dihitung dengan Persamaan (2).

Hasil penelitian ini memberikan informasi dasar mengenai karakteristik laju respirasi alpukat Tongar pada berbagai konsentrasi O_2 yang dapat dimanfaatkan dalam pengembangan teknologi penyimpanan pascapanen. Data tersebut dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan komposisi atmosfer pada sistem MAP maupun CA guna menekan laju respirasi, mempertahankan mutu, dan memperpanjang umur simpan buah. Bagi petani dan pelaku industri, informasi ini dapat mendukung penanganan pascapanen yang lebih efektif sehingga berpotensi mengurangi kehilangan hasil serta meningkatkan nilai ekonomi alpukat Tongar.

4. Kesimpulan

Laju respirasi alpukat Tongar dipengaruhi oleh konsentrasi O_2 selama penyimpanan pada suhu 10 °C. Peningkatan konsentrasi O_2 meningkatkan laju konsumsi O_2 dan produksi CO_2, sedangkan konsentrasi O_2 rendah mampu menekan aktivitas respirasi. Namun, konsentrasi O_2 yang terlalu rendah berpotensi memicu kondisi hipoksia yang dapat menurunkan mutu buah. Oleh karena itu, pengaturan konsentrasi O_2 yang tepat menjadi faktor penting dalam mempertahankan kualitas dan memperpanjang umur simpan alpukat Tongar.

Singkatan yang Digunakan

O_2	Oksigen
CO_2	Karbon dioksida
MAP	*Modified Atmosphere Packaging*
MA	*Modified Atmosphere*
CA	*Controlled Atmosphere*
CI	*Chilling Injury*

Pernyataan Ketersediaan Data

Data akan tersedia berdasarkan permintaan.

Kontribusi Para Penulis

Syarifah Ummairoh: kurasi data, persiapan, investigasi, sumber daya, dan penulisan draf awal. **Omil Charmyn Chatib**: pengawasan, konseptualisasi, dan sumber daya. **Khandra Fahmy**: pengawasan, penulisan draf awal, konseptualisasi, metodologi, akuisisi dana, dan sumber daya.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Para penulis naskah ini menyatakan tidak ada konflik kepentingan atau kepentingan yang bersaing.

Ucapan Terima Kasih

Para penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Andalas atas dukungan pendanaan yang diberikan untuk penelitian ini melalui skema Penelitian Skripsi Sarjana dengan nomor hibah 184/UN16.19/PT.01.03/PSS/2024. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada United Graduate School of Agricultural Science, Gifu University, Jepang, atas dukungan fasilitas laboratorium dalam pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

Asmiya, R., & Venkatesh, C. (2024). Fruits Respiration. *GreenariA*, *2*(5), 44–46. https://share.google/guGDYaW2im579M8gX

Benkeblia, N. (2021). Physiological and Biochemical Response of Tropical Fruits to Hypoxia/Anoxia. *Frontiers in Plant Science*, 12. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.670803

Bennett, A. B., Smith, G. M., & Nichols, B. G. (1987). Regulation of Climacteric Respiration in Ripening Avocado Fruit. *Plant Physiol*, *83*(4). https://academic.oup.com/plphys/article/83/4/973/6082692

Fahmy, K., & Nakano, K. (2014). Optimal Design of Modified Atmosphere Packaging for Alleviating Chilling Injury in Cucumber Fruit. *Environmental Control in Biology*, *52*(4), 233–240. https://doi.org/10.2525/ecb.52.233

Giovannoni, J. (2001). Molecular Biology of Fruit Maturation and Ripening. *Annual Review of Plant Biology,* 52. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.52.1.725

Guillard, V., Buche, P., Dibie, J., Dervaux, S., Acerbi, F., Chaix, E., ..., & Guillaume, C. (2016). CO2 and O2 Solubility and Diffusivity Data in Food Products Stored in Data Warehouse Structured by Ontology. *Data in Brief*, 7, 1556–1559. https://doi.org/10.1016/j.dib.2016.04.044

Ho, Q. T., Hertog, M. L. A. T. M., Verboven, P., Ambaw, A., Rogge, S., Verlinden, B. E., & Nicolaï, B. M. (2018). Down-Regulation of Respiration in Pear Fruit Depends on Temperature. *Journal of Experimental Botany*, *69*(8), 2049–2060. https://doi.org/10.1093/jxb/ery031

Kandasamy, P. (2022). Respiration Rate of Fruits and Vegetables for Modified Atmosphere Packaging: A Mathematical Approach. *Journal of Postharvest Technology*, *10*(1), 88–102. https://www.researchgate.net/publication/358532606_Respiration_rate_of_fruits_and_vegetables_for_modified_atmosphere_packaging_a_mathematical_approach

Kargwal, R., Garg, M., Singh, V., Garg, R., & Kumar, N. (2020). Principles of Modified Atmosphere Packaging for Shelf Life Extension of Fruits And Vegetables: An Overview of Storage Conditions. *International Journal of Chemical Studies*, *8*(3), 2245–2252. https://www.doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i3af.9545

Lokke, M. M., Seefeldt, H. F., Edwards, G., & Green, O. (2011). Novel Wireless Sensor System for Monitoring Oxygen, Temperature and Respiration Rate of Horticultural Crops Post Harvest. *Sensors*, *11*(9), 8456–8468. https://doi.org/10.3390/s110908456

Mangaraj, S., Goswami, T. K., & Mahajan, P. V. (2015). Development and Validation of A Comprehensive Model for Map of Fruits Based on Enzyme Kinetics Theory and Arrhenius Relation. *Journal of Food Science and Technology*, *52*(7), 4286–4295. https://doi.org/10.1007/s13197-014-1364-0

Mendoza, R., Castellanos, D. A., García, J. C., Vargas, J. C., & Herrera, A. O. (2016). Ethylene Production, Respiration and Gas Exchange Modelling in Modified Atmosphere Packaging for Banana Fruits. *International Journal of Food Science and Technology*, *51*(3), 777–788. https://doi.org/10.1111/ijfs.13037

Mungalpara, B., Kashyap, D. H., Ratanpara, K., & P, T. G. (2025). Modified Atmosphere Packaging and Its Application:-A Review. *International Journal on Science and Technology*, *16*(1), 1–13. https://doi.org/10.71097/IJSAT.v16.i1.1958

Sari, M. D., Hayati, P. K. D., Gustian, & Kuswandi. (2024). Characterization of Avocado (*Persea americana Mill*.) in Nagari Giri Maju, West Pasaman Regency Based on *fruit morphological characteristics. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1306(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1306/1/012009

Sati, H., Kataria, P., Pareek, S., & Neuwald, D. A. (2025). Molecular Biochemistry and Physiology of Postharvest Chilling Injury in Fruits: Mechanisms and Mitigation. *Agronomy, 15*(12). https://doi.org/10.3390/agronomy15122914

Seymour, G. B., & Tucker, G. A. (1993). *Biochemistry of Fruit Ripening*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1584-1

Sivankalyani, V., Feygenberg, O., Maorer, D., Zaaroor, M., Fallik, E., & Alkan, N. (2015). Combined Treatments Reduce Chilling Injury and Maintain Fruit Quality in Avocado Fruit during Cold Quarantine. *PLoS ONE*, *10*(10). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140522

Yanti, N. R., Fahmy, K., Ifmalinda, I., Arlius, F., & Fresmiyanti, M. (2023). Pengaruh Penggunaan Lilin Carnauba Terhadap Mutu Buah Alpukat *(Persea Americana Mill*) Varietas Mega Paninggahan. *Journal Teknologi Pertanian Andalas*, *27*(2), 239–248. https://doi.org/10.25077/jtpa.27.2.239-248.2023

Young, R. E., Romani, R. J., & Biale, J. B. (1961). Carbon Dioxide Effects on Fruit Respiration . II. Response of Avocados, Bananas, & Lemons. *Plant Physiology*, *37*(3). 416–422. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC549804/

Zainal, P. W., Syukri, D., Suliansyah, I., & Fahmy, K. (2024). Physical Treatments for Alleviating Chilling Injury in Fresh produce. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, *13*(2). https://doi.org/10.23960/jtep-l.v13i2.493-505