



Analisis konsep fisika pada Teknologi Controlled Atmosphere Storage (CAS) dan Modified Atmosfer Storage (MAS) pada Umur Simpan Buah Tropis

Gunawan Ragil Rahmadhan¹, Ulvia Khoirunisa Bisanti², Sudarti³, Kendid Mahmudi⁴

¹Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Jember

²Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Jember

Jln. Kalimantan Tegalboto No. 37, Krajan Timur, Sumbersari, Kecamatan Sumbersari, Kabupaten Jember, Jawa Timur, 24416

Abstract

Received: 2 November 2025
Revised: 14 November 2025
Accepted: 29 November 2025

Penyimpanan Atmosfer Terkendali (Controlled Atmosphere Storage/CAS) dan (Modified Atmosphere Storage/MAS) adalah dua buah metode penyimpanan yang memperpanjang umur buah dan sayur dengan mengendalikan konsentrasi gas yang memengaruhi proses pematangan buah dan sayur, termasuk pula buah tropis. Spesies dan kultivar yang berbeda memiliki metabolisme pascapanen yang unik yang mempengaruhi permulaan dan durasi proses pematangan yang berlebihan hingga pembusukan. Buah-buahan klimakterik (misalnya mangga, alpukat, apel) yang terus matang setelah panen menjadi perhatian khusus karena umur simpan pascapanennya seringkali pendek. MAS dan CAS biasanya terdiri dari N₂, O₂, dan CO₂. Rasio O₂ dan CO₂ yang berubah inilah yang membuat perbedaan dalam pengawetan komoditas pangan. Manfaat utama dari CAS dan MAS adalah kemampuannya dalam mempertahankan kesegaran produk hingga jangka waktu yang lama. Namun, tidak semua buah dan sayuran dapat disimpan menggunakan teknologi ini sehingga dibutuhkan kondisi yang berbeda untuk setiap jenis komoditi agar penyimpanan lebih efektif. Teknologi lainnya yang dapat dikombinasikan dengan penyimpanan dingin adalah Modified Atmosfer Storage (MAS), yang memodifikasi jumlah atau komposisi di dalam tempat penyimpanan tanpa adanya proses kontrol. Penggunaan teknologi ini biasanya mengarah pada buah potong segar (fresh cut fruit) atau produk yang telah terolah minimal (minimally process). Pada artikel ini akan dibahas tentang analisis konsep-konsep fisika yang terdapat dalam kedua teknologi tersebut yaitu Controlled Atmosphere Storage (CAS) dan Modified Atmosphere Storage (MAS) seperti termodinamika.

Kata Kunci: CAS, MAS, Konsep Fisika, dan Buah Tropis

(*) Corresponding Author: kendidmahmudi.fkip@unej.ac.id

How to Cite: Rahmadhan, G., Bisanti, U., Sudarti, S., & Mahmudi, K. (2025). Analisis konsep fisika pada Teknologi Controlled Atmosphere Storage (CAS) dan Modified Atmosfer Storage (MAS) pada Umur Simpan Buah Tropis. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 11(12.B), 342-368. Retrieved from <https://jurnal.peneliti.net/index.php/JIWP/article/view/13492>.

PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara tropis yang diberkahi dengan berbagai macam sumber daya alam yang melimpah. Di antaranya adalah buah-buahan eksotis yang sangat diminati oleh orang lain di dunia. Sementara itu, dalam proses pengiriman dan penyimpanan untuk distribusi, diperlukan teknologi yang dapat menjaga ketahanan buah agar tidak cepat matang, sehingga meningkatkan nilai ekonomisnya (Baheramsyah & Fatahilah, 2021). Penyimpanan dalam jangka waktu lama dapat membahayakan buah dan sayuran yang dipanen. Tampilan, rasa, dan nilai gizi buah semuanya dipengaruhi oleh hal ini. Karena aktivitas metabolismenya yang kuat, buah yang baru dipetik akan mudah hancur. Sistem penyimpanan terpadu yang mencakup

seluruh rantai pasokan, mulai dari proses panen hingga pasca panen, penyimpanan, dan distribusi, dapat mencegah bahaya semacam ini. Tempat penanaman buah terkadang sangat jauh dari tempat tinggal konsumen. Kerusakan tersebut disebabkan oleh penanganan yang ceroboh setelah panen. Hasil observasi menunjukkan bahwa pangan hortikultura memiliki tingkat kehilangan dan kerusakan sekitar 20-40%. Berapa lama buah tetap segar dan seberapa enak rasanya dipengaruhi oleh mekanisme laju respirasi. Mengurangi kadar karbon dioksida dan oksigen untuk penyimpanan (Zidny, et al., 2024).

Buah-buahan tropis memberikan daya tarik visual kepada konsumen melalui warna kulit dan daging buahnya yang menarik, aroma dan rasa yang unik. Atribut-atribut ini juga secara langsung menunjukkan nilai gizi buah-buahan. Buah-buahan tropis menanggung beban perubahan cuaca yang tidak dapat diprediksi seperti banjir, kekeringan yang berkepanjangan, hama dan penyakit, yang semakin diperburuk oleh pemanasan global. Buah-buahan perlu dipanen pada tahap yang tepat untuk memiliki daya jual yang lebih baik dan mencegah kehilangan nutrisi. Namun, karena sifatnya yang sangat mudah rusak, kehilangan pasca panen sekitar 20–40%. Buah tropis dengan masa simpan lebih lama lebih cocok untuk dikonsumsi dan diolah dalam keadaan segar. Fase juvenil yang panjang, pembuahan tidak teratur, salinitas, kekeringan, dan penyakit layu semuanya merupakan ancaman besar bagi pemulia dan petani buah. Mencapai varietas kerdil hasil tinggi dengan buah berbentuk seragam, hasil yang baik, daging buah yang diinginkan, aroma, warna kulit, dan ukuran seragam dengan kandungan nutrisi yang tinggi diinginkan di pasar konsumen (Mathiazhagan, et al., 2021). Solusi untuk permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan teknologi Penyimpanan Atmosfer Terkendali (*Controlled Atmosphere Storage/CAS*) dan (*Modified Atmosphere Storage/MAS*).

Sangat sedikit penelitian yang dilakukan mengenai MA/CA buah-buahan tropis dibandingkan dengan buah-buahan beriklim sedang seperti apel dan pir. Sangat sedikit ulasan yang ditulis mengenai MA/CA tanaman tropis dan informasinya sebagian besar terbatas pada mangga, alpukat, pisang, nanas, dan pepaya. Informasi mengenai banyak tanaman tropis minor tidak ada atau tersebar di jurnal dan laporan lokal yang kurang dikenal. Sebagian besar penelitian yang dilakukan mengenai MA/CA tanaman tropis dilakukan pada alpukat, pisang, mangga, pepaya, dan nanas. Sangat sedikit penelitian yang dilakukan pada singkong, srikaya, feijoa, jambu biji, langsung, loquat, rambutan, sawo dan srikaya, dan tidak ada penelitian yang dilaporkan pada atemoya, birba, sukun, kakao, belimbing, jambu mete, kelapa, nangka, langsung, lengkung, makadamia, mam-mee-apple, mamey, apel gunung, tomatillo, pulsan, sawo putih, sirsak, asam jawa dan ubi jalar. Penelitian tentang cara kerja MA/CA telah dilakukan hampir secara eksklusif pada alpukat dan pisang, tetapi sangat sedikit atau tidak ada sama sekali pada tanaman tropis lainnya.

Manfaat potensial MA dan CA untuk tanaman tropis bergantung pada jenis tanaman, metode penanganan selama pra dan pasca panen, serta lamanya periode pengiriman. Sistem penanganan yang memadai yang mencakup manajemen suhu, kontrol kelembapan, menghindari kerusakan mekanis, sanitasi, dan perawatan penghilangan etilen (untuk beberapa tanaman) sangat penting untuk keberhasilan penerapan MA/CA. Penggunaan CO sebagai tambahan pada MA atau CA dapat memberikan beberapa keuntungan seperti pengendalian penyakit dan serangga patogen, serta pencoklatan dan perubahan warna jaringan. Ada potensi penggunaan CO untuk buah-buahan tropis; namun, pengembangan metode aplikasi yang aman seperti penambahan bau diperlukan sebelum penggunaan komersial apa pun dapat

dipertimbangkan. Penggunaan CO harus dikombinasikan dengan konsentrasi O2 rendah (<4 kPa) (Elhadi, 2006). Dalam teknologi-teknologi penyimpanan atmosfer terkendali menerapkan konsep-konsep fisika yang sering ditemui, diantaranya adalah konsep tentang laju respirasi, suhu, dan konsep termodinamika.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penyusunan artikel ini adalah metode penelitian berbasis literatur review atau library research dengan menggunakan pendekatan kualitatif. Penelitian berbasis pendekatan kualitatif adalah penelitian yang dilakukan secara cermat, mendalam, dan rinci sehingga dapat mengumpulkan data dengan sangat lengkap yang dapat menghasilkan informasi yang menunjukkan kualitas tertentu. Hasil kualitatif hanya berlaku bagi wilayah yang diteliti saja (Mukhid, 2019: 14). Penulis mengumpulkan data tanpa terjun secara langsung ke lapangan, yaitu dengan menggunakan berbagai macam referensi dari berbagai jurnal ilmiah yang relevan baik dari jurnal ilmiah nasional maupun jurnal ilmiah internasional. Selain itu, peneliti juga mengambil beberapa data dari buku nasional maupun internasional.

Penulis mengolah data dengan tahapan penelitian yang sesuai dengan studi literatur yang ada. Dimulai dengan tahapan pertama yaitu, penulis mengkaji jurnal dan buku bertaraf nasional dan internasional. Selanjutnya, penulis membaca, menelaah, dan mencatat point-point penting yang ada di dalam jurnal yang kemudian dianalisis atau diolah sesuai data yang relevan. Tahap terakhir, penulis memuat data serta pustaka yang digunakan ke dalam bentuk tabel hasil pengamatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Hasil Literatur Review Artikel

Year	Title	Result
2025	Naibaho, B., Simanungkalit, F. J., & Nadapdap, E. Y. (2025). Pengaruh Tingkat Kematangan dan Lama Penyimpanan Terhadap Karakteristik Mutu Fisik Buah Lemon Lokal (Citrus X Limon) pada Kondisi Penyimpanan Ruang. <i>Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi</i> , 25(1), 45-55. DOI : 10.33087/jiubj.v25i1.5628	Petani dan pedagang menyimpan buah lemon lokal di dalam keranjang yang disimpan pada suhu ruang, tanpa menggunakan lemari pendingin. Faktor pertama adalah tingkat kematangan: hijau (H), hijau-kuning (HK) dan kuning (K). Faktor kedua adalah lama penyimpanan (hari): 0, 2, 4, 6, 8, 10 dan 12 hari. Parameter yang dianalisis terdiri dari: susut bobot, susut ukuran dan kekerasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kematangan buah lemon lokal (Citrus x limon) memberi pengaruh berbeda nyata

		<p>terhadap susut bobot yang berkisar antara 8,9388% - 10,6499%, susut ukuran buah (membujur) 3,16 mm – 4,94 mm dan kekerasan 4,65 – 5,53 kg/cm². Lama penyimpanan buah lemon lokal (Citrus x limon) memberi pengaruh berbeda nyata terhadap susut bobot yang berkisar antara 0,0000% - 17,0168%; susut ukuran buah (membujur) 0,00 mm -7,19 mm; susut ukuran buah (melintang) 0,00 mm - 4,08 mm. Interaksi tingkat kematangan dan lama penyimpanan buah lemon lokal (Citrus x limon) memberi pengaruh berbeda nyata terhadap kekerasan buah.</p>
<p>2025</p>	<p>Zainal, P. W. (2025). Kemunduran Kesegaran Selama Perkembangan Chilling Injury Pada Penyimpanan Dingin Buah Tomat. <i>Jurnal Teknologi Pertanian Andalas</i>, 29(1), 41-47 DOI :. ISSN 1410-1920, EISSN 2579-4019</p>	<p>Kesegaran merupakan istilah yang digunakan untuk mendefinisikan kondisi produk segar seperti buah dan sayur mendekati kondisi setelah panen. Parameter yang paling sering digunakan untuk menilai kesegaran di tingkat distributor, pasar atau supermarket adalah warna, aroma, mengkilat, dan kekerasan. Akan tetapi variable lainnya seperti kebocoran ion yang disebabkan oleh kerusakan dingin belum menjadi perhatian saat ini. Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil bahwa berdasarkan produksi CO₂ dan perubahan warna, buah tomat yang disimpan pada suhu 2°C tidak mengindikasikan terjadinya kemunduran kesegaran karena produksi CO₂ yang rendah yaitu 0,2 di awal penyimpanan dan dapat</p>

		<p>dipertahankan menjadi rendah sekitar 0,5 mmol kg/jam hingga hari ke 27 penyimpanan. perubahan warna menunjukkan warna tidak berubah menjadi warna merah pekat di hari ke Sembilan. Berdasarkan kebocoran ion, kerusakan dingin telah terjadi yang ditandakan dengan persentase kobocoran ion yang tinggi pada hari ke-27.</p>
<p>2024</p>	<p>Zidny, F. F., Edy S., Adi Anto. 2024. Simulasi Fuzzy Logic yang Diterapkan Pada Controlled Atmosphere Storage. <i>Jurnal Elkolind</i>, 11(2): 386. DOI:http://dx.doi.org/10.33795/elkolind.v11i2.5449</p>	<p>Hasil observasi menunjukkan bahwa pangan hortikultura memiliki tingkat kehilangan dan kerusakan sekitar 20-40%. Berapa lama buah tetap segar dan seberapa enak rasanya dipengaruhi oleh mekanisme laju respirasi. Mengurangi kadar karbon dioksida dan oksigen untuk penyimpanan. Oleh karena itu diperlukan suatu sistem yang dikenal dengan nama <i>Controlled Atmospheric Storage (CAS)</i> untuk mengatur kondisi udara di dalam ruang penyimpanan. Sebagai teknik penyimpanan, CAS memungkinkan pengaturan kelembapan dan kandungan oksigen (O₂). Sederhananya, CAS memiliki kandungan gas O₂ sekitar 21% di udara bebas dan konsentrasi gas CO₂ sekitar 0,03%. Respirasi dapat diperlambat dengan mengurangi gas O₂ menjadi 3-5% dan meningkatkan gas CO₂ menjadi 3-5%. Diperlukan tingkat kelembapan 85-95% karena pendinginan menurunkan kelembapan di tempat penyimpanan. Di Indonesia,</p>

		teknologi controlled atmosfer storage (CAS) belum banyak digunakan.
2024	Ihsan T., dan Vioni D. 2024. Tinjauan Strategi Pengemasan Buah dan Sayur dalam Memerangi Food Loss dalam Rantai Pasokan Pascapanen di Indonesia. <i>Jurnal Ilmu Lingkungan</i> , 22(4): 1082.	Gas pematangan lainnya, seperti O ₂ atau CO ₂ , di udara sekitar produk juga mempengaruhi laju respirasi dan umur simpan produk terkait. Teknologi pascapanen yang sesuai, seperti penyimpanan dengan udara terkendali (<i>Controlled Atmosphere Storage/ CAS</i>) atau kemasan aktif, memodifikasi komposisi gas di sekitarnya untuk mempertahankan kesegaran produk lebih lama. Selain itu, penyerapan etilen, pencegahan kargo yang muatannya bercampur, serta penyimpanan dan pengangkutan yang berventilasi baik dapat membantu mengendalikan dan memperlambat proses terkait etilen.
2024	Rohmayanti, T., Budiharti, U., & Tjahjohutomo, R. (2024). Karakteristik Fisik dan Kadar Air Cabai Merah (<i>Capsicum annum L.</i>) dengan Variasi Kondisi dan Kemasan Penyimpanan. <i>Karimah Tauhid</i> , 3(6), 6445-6456.	Cabai merah keriting (<i>Capsicum annum L.</i>) merupakan salah satu komoditas pertanian yang mudah rusak sehingga tidak dapat disimpan untuk waktu yang lama. Salah satu Upaya untuk memperpanjang masa simpan yaitu dengan mengkombinasikan kondisi dengan kemasan penyimpanan. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi penyimpanan kondisi ruang (T: 30-35°C, RH: 40-53%), kondisi kulkas (T: 10-15°C, RH: 45-65%) dan kondisi Controlled Atmosphere Storage (CAS, T: 13°C, O ₂ : 5%, CO ₂ : 0,031%,

		<p>RH: 85 90%) dan kemasan kardus, plastic PP dan keranjang terbuka terhadap kadar air, warna merah (a), ekkerasan dan susut bobot. Hasil uji menunjukkan bahwa kadar air yang stabil ditunjukkan pada keranjang terbuka dengan kondisi CAS yaitu sebesar 86,58%. Pada uji kekerasan pada penyimpanan kondisi CAS mengalami penurunan lebih sedikit dibandingkan dengan kondisi kulkas dan ruang. Pada uji warna merah (a) pada hari ke-30 yang paling cerah terdapat pada kemasan kardus kondisi kulkas yaitu 36,61 serta pada susut bobot yang memiliki hasil terbaik ada pada penyimpanan kondisi CAS.</p>
<p>2024</p>	<p>Joco, R. (2024). Development and evaluation of semi-automatic Controlled Atmosphere Storage facility for calamansi (<i>Citrofortunella microcarpa</i>). <i>Agricultural Engineering International: CIGR Journal</i>, 26(2).</p>	<p>Pengembangan dan evaluasi fasilitas penyimpanan atmosfer terkontrol semi-otomatis untuk calamansi (<i>Citrofortunella microcarpa</i>) dikembangkan dengan penerapan prinsip rekayasa pendingin kompresi uap dan sistem arduino untuk memperpanjang umur simpan buah untuk keperluan komersialisasi dan pengolahan. Dimensi keseluruhan prototipe adalah panjang 210 cm, lebar 120 cm, dan tinggi 120 cm, dan memiliki volume penyimpanan 0,512 m³. Ini memiliki kapasitas penyimpanan sekitar 90-120 kilogram. Mempertahankan kisaran suhu 80C -100C, CO₂ 1%-6%, O₂ 7%-12%, dan N konsentrasi atmosfer 80%-90% di dalam</p>

		<p>fasilitas penyimpanan atmosfer semi-terkontrol menghasilkan penurunan persentase yang signifikan (13,01%) buah calamansi busuk dibandingkan dengan ruang penyimpanan normal (36,39%) dari berat awalnya. Ini menunjukkan bahwa fasilitas tersebut dapat mengurangi laju pernapasan buah dan mengurangi kerusakan.</p>
<p>2024</p>	<p>Imansyah, F. (2024). Inovasi Atmosfer Terkendali: Pemeliharaan Kesegaran Buah Pisang Untuk Peningkatan Ketersediaan Dan Kualitas Konsumsi. <i>Jurnal Abdi Insani</i>, 11(3), 77-89.</p>	<p>Teknologi pengawetan makan seperti <i>Modified Atmosphere Storage</i> (MAS) adalah sistem pengontrolan laju aliran udara untuk menurunkan kadar O₂ dengan menyuntikan CO₂ untuk menahan laju pembusukan pada buah. Inovasi dalam teknologi penyimpanan atmosfer terkendali (IAT) telah menjadi fokus utama dalam upaya meningkatkan ketersediaan dan kualitas konsumsi buah pisang. Hasil kegiatan menunjukkan bahwa penerapan IAT efektif dalam mempertahankan kesegaran buah pisang dengan menghambat proses pematangan dan mengurangi tingkat kerusakan pasca panen. Peningkatan umur simpan buah pisang memberikan fleksibilitas yang signifikan dalam rantai pasokan, mengoptimalkan distribusi dan mengurangi pemborosan. Selain itu, survei konsumen menunjukkan bahwa buah pisang yang disimpan dengan menggunakan teknologi ini lebih disukai karena kualitasnya.</p>

<p>2024</p>	<p>Wahyudi D., Yusmiati, Eva M., Mawar I. P. A., Maryanti, Rahmi E. P., Gallusia M. N.I., Nurullia F., Febrina D., Sakinah A. D. 2024. Prinsip Proses Pengolahan Pangan. Bogor: Lingkar Edukasi Indonesia. (213)</p>	<p>Teknologi yang juga digunakan sebagai pengawetan produk hasil pertanian dengan pemanfaatan suhu dingin adalah menggunakan teknologi kriogenik (<i>cryogenic</i>). Metode ini merupakan teknologi pemanfaatan suhu rendah dengan suhu ekstrem di bawah titik beku menggunakan media pembeku seperti nitrogen (N₂) dan karbon dioksida (CO₂). Teknologi lainnya adalah menggunakan CFC (<i>Freon Chlorofluorocarbon</i>) sebagai media pendingin. Karena zat tersebut merupakan zat yang dapat bertugas sebagai agen pendingin, namun tidak disarankan karena berdampak pada kerusakan lingkungan seperti merusak lapisan ozon.</p>
<p>2023</p>	<p>Kulviwat, N., Eze, F. N., & Ovatlarnporn, C. (2023). The impact of alginate composites enriched with spent black tea, green tea, jasmine tea, and Oolong tea wastes on the shelf-life extension of fruits and vegetables. <i>Applied Food Research</i>, 3(1), 100290.</p>	<p>Pisang dan tomat adalah makanan pokok yang paling berharga di dunia. Mereka banyak dibudidayakan di negara-negara tropikal. Pisang hijau dan tomat yang baru dipanen dibawa dari ladang perkebunan, dikemas dan dikirim ke banyak negara seperti Amerika Serikat dan negara-negara Eropa. Namun, sebagai buah klimakterik, tantangan utama bagi pemangku kepentingan pemasok pisang dan tomat adalah umur simpan pasca panen yang pendek karena permulaan pematangan yang cepat dan perubahan terkait pematangan yang tidak diinginkan, yang mengakibatkan kerugian besar. Penelitian ini bertujuan untuk</p>

		<p>mengetahui dampak biokomposit berdasarkan limbah teh bekas (STW) dan alginat pada umur simpan pisang Cavendish (<i>Musa acuminata</i>) dan tomat. STW dari teh hitam, teh hijau, teh melati, dan teh Oolong diperoleh melalui ekstraksi air panas. Kesembuhan tertinggi dan terendah masing-masing tercatat untuk bubuk teh hijau (96,0%) dan daun teh Oolong (88,33%).</p>
<p>2022</p>	<p>Yadav, A., Kumar, N., Upadhyay, A., Fawole, O. A., Mahawar, M. K., Jalgaonkar, K., ... & Mekhemar, M. (2022). Recent advances in novel packaging technologies for shelf-life extension of guava fruits for retaining health benefits for longer duration. <i>Plants</i>, 11(4), 547.</p>	<p>Buah jambu biji (<i>Psidium guajava L.</i>) juga dikenal sebagai apel tropis, termasuk dalam keluarga genus <i>Psidium</i>, dan banyak dibudidayakan di zona tropis dunia. Banyak teknologi pascapanen seperti kemasan yang dapat dimakan, kemasan atmosfer yang dimodifikasi (MAP), kemasan komposit, kemasan atmosfer terkontrol (CAP), kemasan antimikroba/antijamur, dan kemasan nano telah digunakan untuk memperlambat cedera dingin dan meningkatkan kualitas pemeliharaan buah jambu biji selama periode penyimpanan untuk mengontrol laju pernapasan, mengurangi penurunan berat badan, meminimalkan oksidasi lipid, dan mempertahankan sifat organoleptik. Namun, teknologi pengemasan ini memiliki efek yang bervariasi pada atribut kualitas internal dan eksternal buah jambu biji. Oleh karena itu, ulasan ini membahas fisiologi, mekanisme</p>

		<p>pematangan, oksidasi, dan produksi etilena buah jambu biji. Tinjauan ini juga membahas teknologi pengemasan dan pengaruhnya terhadap karakteristik pascapanen buah jambu biji selama periode penyimpanan.</p>
<p>2022</p>	<p>Fuentealba, C., Vidal, J., Zulueta, C., Ponce, E., Uarrota, V., Defilippi, B. G., & Pedreschi, R. (2022). Controlled Atmosphere Storage alleviates Hass avocado black spot disorder. <i>Horticulturae</i>, 8(5), 369.</p>	<p>Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki efek dari berbagai kondisi penyimpanan pascapanen dalam mengendalikan perkembangan bintik hitam yang menargetkan efeknya pada sistem antioksidan (non-enzimatik dan enzimatik) kulit. Empat pascapanen perawatan (T1: penyimpanan udara biasa (RA) pada suhu 5 C selama 40 d; T2: penyimpanan atmosfer terkontrol (CA) 4 kPa O₂ dan 6 kPa CO₂ pada 5 C for 40 d; T3: 10 d RA + 30 d CA and T4: 5 Mmethyl jasmonat (MeJA) selama 30 s + 10 RA + 30dCA) diuji untuk mengendalikan insiden bintik hitam pada buah dari enam kebun dari zona agroklimatik dan panen yang berbeda. Aplikasi segera CA (T2) mengontrol perkembangan bintik hitam selama penyimpanan yang lama (40 d) dan dalam kondisi ini kandungan TPC tetap lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Hasil yang diperoleh sangat bernilai bagi rantai pasok alpukat Hass karena kinerja CA yang jelas terbukti akan menghasilkan pengurangan kerugian pascapanen terkait masalah ini.</p>

<p>2022</p>	<p>Lastriyanto A., Bagus I B., La C.H., Sasongko A. W. 2022. Pengawetan Buah Jambu Biji (<i>Psidium Guajava L.</i>) Segar dengan Teknologi Hypobaric Storage. <i>Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem</i> 10(1): 55-56. https://doi.org/10.21776/ub.jkptb.2022.010.01.07</p>	<p>Metode penyimpanan tekanan rendah adalah salah satu metode pascapanen yang dapat digunakan untuk mengurangi laju kematangan buah jambu biji merah. Produksi etilen akan terhambat pada tekanan rendah, sehingga dengan melambatnya produksi etilen maka buah jambu biji akan mengalami penghambatan kematangan. Penyimpanan tekanan rendah adalah salah satu metode Controlled Athmosphere Storage (CAS) karena keadaan di ruang penyimpanan dapat diatur, dalam hal ini tekanan dan tingkat RH di dalam ruang penyimpanan. Sehingga, dengan melambatnya produksi etilen dan transpirasi pada buah jambu biji dalam kondisi tekanan rendah dapat menjaga tingkat kekerasan buah.</p>
<p>2021</p>	<p>Baheramsyah, A., & Fatahilah, K. (2021). Automatic Monitoring and Controlled Atmosphere System Using Arduino on Tropical Fruit Container Integrated with IoT. <i>Int. J. Mar. Eng. Innov. Res</i>, 6(2), 135-139.</p>	<p>Dari masalah ini, tercipta perangkat bernama <i>Controlled Atmosphere Storage (CAS)</i> yang dapat menyimpan buah dan menyesuaikan kondisi ruangnya sesuai dengan kebutuhan udara spesifik dari setiap komoditas dalam wadah. Desain sistem kontrol dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana mengatur kadar etilen, oksigen, karbon dioksida, dan suhu dengan menggunakan Arduino Uno sebagai mikrokontroler dan mengintegrasikannya dengan sistem IoT. Sistem ini terdiri dari mikrokontroler, sensor DHT22, sensor MQ 135, sensor MQ5, sensor KE25, relai,</p>

		Esp8266, dan aktuator seperti kipas dan servo. Dari hasil percobaan tersebut, diketahui bahwa sistem kontrol yang digunakan mampu melakukan AC di dalam wadah dan dapat mengintegrasikannya dengan konsep IoT menggunakan media Thingspeak.com.
2021	Muhtarom, Kurnia S. A. 2021. <i>Design Of Low-Cost Energy Controlled Atmosphere System For Fruit Container Using Dry Ice</i> . Undergraduate thesis, Institut Teknolgi Sepuluh Nopember. (6)	Penyimpanan atmosfer terkendali harus kedap gas sebisa mungkin. Penyimpanan CA mengurangi oksigen dalam wadah kedap udara atau ruangan tertutup dengan memasukkan nitrogen secara hati-hati. Buah dan sayur yang disimpan dalam kondisi ini dicegah untuk matang pada kecepatan normal; akibatnya, proses penuaan diperlambat. Campuran gas untuk aplikasi ini biasanya mencakup proporsi karbon dioksida yang lebih besar; CO2 memiliki keunggulan dibandingkan gas lainnya karena dapat membunuh sebagian besar bakteri dan membantu membasmi jamur, serangga, dan hewan pengerat. Banyak penelitian telah menunjukkan bahwa keuntungan dasar pengawetan buah dalam atmosfer terkendali adalah sebagai berikut: infestasi buah-buahan oleh penyakit fisiologis lain yang sering dijumpai ketika buah-buahan diawetkan dalam lemari es pada tempat penyimpanan buah konvensional dapat dikurangi, rasa dan aroma buah lebih terjaga, dan Konsistensi buah dipertahankan untuk jangka

		waktu yang lebih lama. Kehilangan buah dalam atmosfer terkendali berkurang setengah hingga sepertiga, sementara periode pengawetan jauh lebih lama daripada saat disimpan dalam atmosfer tak terkendali.
2020	Pardede, E. (2020). Pengemasan buah dan sayur dengan atmosfer termodifikasi. <i>Jurnal Visi Eksakta</i> , 1(1), 11-20.	Teknologi <i>Modified Atmosphere Packaging</i> (MAP) menggunakan atmosfer kesetimbangan dalam kemasan, di mana oksigen yang relatif rendah dan konsentrasi karbon dioksida tinggi dicapai secara alami di dalam kemasan saat respirasi terjadi, yang nantinya mengarah pada laju respirasi yang lebih rendah. Teknik baru, yang disebut <i>Perforation-Mediated Modified Atmosphere Packaging</i> (PM-MAP), dengan memiliki mikroperforasi pada film plastik diterapkan untuk memperbaiki pertukaran udara selama penyimpanan. Oleh karena itu, teknologi <i>Modified Atmosphere Packaging</i> (MAP) menawarkan keunggulan yang mengarah pada perpanjangan umur simpan produk segar. Industri makanan segar dan segar memanfaatkan keunggulan ini untuk memenuhi permintaan yang terus meningkat akan buah dan sayuran berkualitas yang nyaman dan segar, untuk menjaga atribut kualitas kesegaran dan untuk memperpanjang umur simpan.
2020	Asiah N., et al. 2020. Prinsip Dasar Penyimpanan Pangan pada Suhu Rendah. 1st edn. Makassar: Nas Media Pustaka.	Sebelum dilakukan penyimpanan sebaiknya buah dan sayur melewati proses pra

		<p>pendinginan atau yang secara umum dikenal dengan <i>pre-cooling</i>. <i>Pre-cooling</i> akan membantu produk mengalami penurunan suhu secara perlahan sesaat setelah dilakukannya tahapan pemanenan. Produk yang telah dipanen akan mengalami pemanasan saat di lahan dan akan menyimpan panas tersebut di dalam produk sehingga harus dikeluarkan dengan bantuan tekni <i>pre-cooling</i>. Teknik <i>pre-cooling</i> yang benar akan membantu dalam hal menekan laju respirasi pada produk, menunda proses pematangan yang dapat mengakibatkan perubahan fisiologis pada produk, serta dapat mempertahankan karakteristik sensoris produk yang dalam hal ini adalah tekstur, warna, serta rasa. Diantara metode yang dapat dilakukan sebagai teknik dari <i>pre-cooling</i> adalah <i>Hydro-cooling</i>, <i>Forced-air cooling</i>, <i>Room cooling</i>, <i>Vacuum cooling</i>, dan <i>Package icing</i>.</p>
<p>2020</p>	<p>Fatharani, A., Bintoro, N., & Saputro, A. D. (2020). Pemodelan laju respirasi buah kolang-kaling (<i>Arenga pinnata</i>) pada penyimpanan Modified Atmospheric Packaging (MAP). <i>agriTECH</i>, 40(2), 124-132. DOI:https://doi.org/10.22146/agritech.50247</p>	<p>Buah kolang-kaling (<i>Arenga pinnata</i>) merupakan buah tropis yang penanganannya masih menggunakan cara tradisional. 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</p>

		<p>ruang penyimpanan dan ketebalan kemasan. Suhu ruang penyimpanan yang digunakan adalah 5, 15, dan 28 °C. 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 ($p < 0,05$).</p>
<p>2018</p>	<p>Widyaningrum, Yohanes A. P., dan Sutrisno M. 2018. Desain Sistem Kontrol dan Monitoring Kondisi Udara pada Controlled Atmosphere Storage Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno. <i>Jurnal Keteknikaan Pertanian</i>, April 2018. Vol. 6 No. 1, p 75-82. P-ISSN 2407-0475 E-ISSN 2338-8439. (76)</p>	<p>Konsentrasi gas O₂ dan atau CO₂ di sekitar produksi segar dijaga pada suatu konsentrasi yang diinginkan. Dengan adanya pengendalian kedua gas tersebut akan terjadi hambatan laju respirasi sehingga laju respirasi relatif rendah pada batas tidak menimbulkan kondisi respirasi anaerobik pada produk segar tersebut. Secara teknis atmosfer terkendali mencakup penambahan atau pengurangan gas-gas yang menghasilkan susunan udara yang sangat berbeda dengan udara biasa. Jadi, CO₂, O₂, CO, C₂H₄, asetilena, atau N₂ dapat diatur untuk mendapatkan berbagai kombinasi komposisi gas. Namun, dalam penerapannya sekarang atmosfer terkendali merupakan istilah untuk</p>

		penambahan CO ₂ , penurunan O ₂ , dan kandungan N ₂ tinggi dibanding udara pada umumnya.
2017	Mulyawanti, I., Enrico S., dan Dwi A. 2017. Teknologi Pengemasan Atmosfir Termodifikasi (Modified Atmosphere Packaging/MAP) dan Vakum pada Buah Durian. <i>Jurnal Penelitian Pascapanen Pertanian</i> , 14(1) : 1.	Durian tergolong buah klimakterik dengan tingkat respirasi tinggi, sehingga menyebabkan umur simpannya pendek karena proses pematangan buah berlangsung cepat. Penelitian dilakukan terhadap buah durian Perwira dengan tingkat ketuaan 1-3 hari sebelum jatuh yang berasal dari Majalengka, Jawa Barat, Indonesia. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan kemasan vakum menunjukkan kandungan TPT dan tingkat keretakan buah yang lebih rendah dibandingkan dengan kemasan MAP, namun tidak berpengaruh terhadap pH, vitamin C, dan total asam. Jenis kemasan juga tidak berpengaruh terhadap warna buah durian, namun pada tekstur menunjukkan bahwa jenis kemasan vakum dapat mempertahankan tekstur lebih baik dibandingkan dengan kemasan MAP. Buah durian dikemas secara MAP menggunakan plastik PE berketebalan 0,06 mm dengan perforasi 0,5 cm ataupun vakum dan disimpan pada suhu dingin 12-15°C dapat meningkatkan umur simpan buah durian hingga 21 hari.
2011	Utama, I. M. S., Setiyo, Y., Puja, I. A. R., & Semadi, N. (2011). Kajian atmosfir terkendali untuk memperlambat penurunan mutu buah mangga	Mangga Arumanis (<i>Mangifera indica L. cv Arumanis</i>) yang merupakan salah satu buah tropis Indonesia

	<p>arumanis selama penyimpanan. <i>Jurnal Hortikultura Indonesia (JHI)</i>, 2(1), 27-33.</p>	<p>yang memiliki potensi tinggi untuk dikembangkan sebagai komoditas ekspor. Investigasi, dilakukan untuk memperlambat kerusakan buah yang melibatkan konsentrasi gabungan gas O₂ dan CO₂ yang berbeda selama penyimpanan mangga Arumanis pada suhu dingin (12+ 1,5oC) dan ruangan (28+ 2oC). Empat gas gabungan O₂ dan CO₂ yang berbeda, yaitu 5% O₂ dan 5% CO₂; 5% O₂ dan 10% CO₂; 10% O₂ dan 5% CO₂; dan 10% O₂ dan 10% CO₂ melonjak di sekitar buah-buahan yang disimpan pada suhu dingin dan kamar. Buah-buahan tanpa perlakuan dengan gas gabungan disiapkan sebagai kontrol. Tidak ada efek berbeda yang signifikan pada tingkat kerusakan di antara buah-buahan yang diolah dengan konsentrasi gabungan O₂ dan CO₂ yang berbeda. Atmosfer yang terkendali, bagaimanapun, lebih baik untuk menyimpan buah dibandingkan dengan yang disimpan tanpa atmosfer terkontrol.</p>
--	--	---

Buah-buahan merupakan salah satu produk hortikultura yang sangat bermanfaat bagi kesehatan tubuh manusia yaitu sebagai sumber energi, sumber serat, sumber vitamin, antioksidan dan berbagai mineral yang membantu proses metabolisme tubuh. Dewasa ini konsumsi buah-buahan di Indonesia baru mencapai 40 kg per kapita per tahun masih dibawah standar WHO yaitu sebesar 70 kg per kapita per tahun. Tanaman buah-buahan merupakan salah satu bagian dari tanaman yang termasuk hortikultura di samping tanaman sayuran dan tanaman hias. Buah (*fruktus*) adalah organ generatif pada tumbuhan yang dapat dikonsumsi karena memiliki rasa yang enak, segar dan mengandung gizi yang bermanfaat bagi kesehatan. Buah biasanya membungkus dan melindungi biji pada tanaman yang termasuk sub divisi *Angiospermae*. Buah tropis merupakan buah-buahan dari tanaman yang tumbuh di wilayah dengan iklim panas atau tropis dengan suhu udara sekitar 25° C atau lebih, termasuk di

dalamnya adalah tanaman buah yang tumbuh di wilayah Indonesia, contohnya adalah buah nanas, durian, pisang, pepaya, mangga, rambutan, melon dan sebagainya (Zubaidah, 2021).

1. Penerapan Prinsip Kalor pada Teknologi *Controlled Atmosphere Storage* (CAS) dan *Modified Atmosfer Storage* (MAS)

Untuk mempertahankan kualitas dan memperpanjang umur produk hortikultura seperti buah dan sayuran, suhu penyimpanan sangat penting. Suhu rendah pada dasarnya memperlambat reaksi biokimia seperti respirasi, transpirasi, dan aktivitas mikroba. (Made et al., 2011) menjelaskan bahwa penyimpanan dengan suhu dingin adalah metode utama untuk mempertahankan tekstur buah. Ini lebih baik daripada metode lain, seperti modifikasi atmosfer yang lebih bersifat tambahan. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa suhu rendah memiliki kemampuan untuk mencegah kerusakan struktural pada jaringan buah, memperlambat pelunakan, dan menjaga kandungan air tetap stabil.

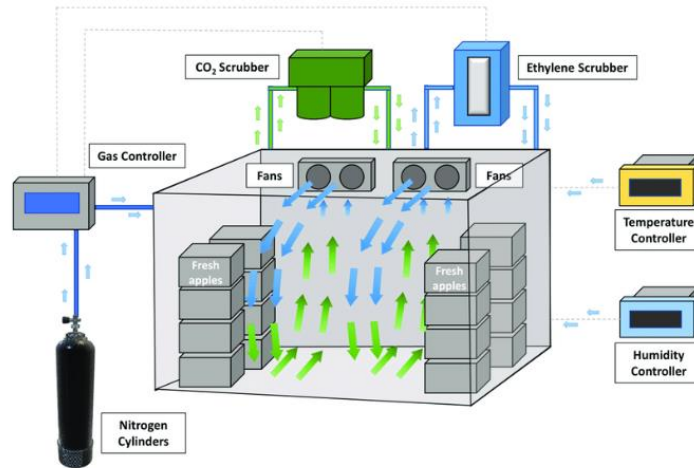
Pengemasan atmosfer termodifikasi juga berhasil secara komersial untuk mengawetkan buah-buahan dan sayuran tertentu. Dengan pengetahuan dasar dan fundamental yang luas yang tersedia tentang subjek ini, penelitian di bidang ini mengambil dimensi baru untuk menyesuaikan tren dan permintaan konsumen baru. Ada minat baru dalam menerapkan teknik ini pada produk siap konsumsi dalam industri daging. Teknik ini dapat diintegrasikan dengan pengemasan aktif atau interaktif untuk meningkatkan kontrol atas atmosfer kemasan guna mencapai kualitas dan keamanan produk yang unggul. Indikator waktu-suhu pada kemasan untuk menunjukkan sisa masa simpan produk pangan akan meningkatkan keamanan pangan dan kontrol inventaris (Jayas *et al.*, 2002).

MA/CA untuk transportasi belum tercakup secara memadai dalam tinjauan sebelumnya. Banyaknya kemajuan yang telah dicapai dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa transportasi dalam MA/CA jauh lebih menjanjikan untuk buah-buahan tropis daripada penyimpanan CA. Karena periode transportasi tanaman tropis dapat relatif lama (hingga beberapa minggu), MA/CA dapat sangat membantu dalam menjaga kualitas buah. Penggunaan MA/CA dapat mendorong penggunaan transportasi laut, karena lebih murah daripada transportasi udara. Atmosfer untuk transportasi dapat dikembangkan secara pasif, semi-aktif, atau aktif. Sistem pasif adalah rezim MA di mana atmosfer dimodifikasi oleh respirasi buah dan permeabilitas bahan penghalang. Dalam sistem semi-aktif, satu atau lebih gas ditambahkan atau dikeluarkan, paling umum di awal, tetapi tidak ada kontrol ketat yang dilakukan. Sistem aktif menyiratkan kontrol ketat terhadap atmosfer selama seluruh periode pengangkutan. Sistem yang paling umum untuk pengangkutan dalam 30 tahun terakhir telah dikembangkan secara semi-aktif. Sistem ini digunakan untuk pengangkutan pisang (Woodruff 1969a,b) dan stroberi (Harvey 1977); meskipun biasanya kurang efisien, sistem ini lebih murah daripada sistem aktif (Yahia, 2010).

Beberapa penelitian independen lebih lanjut tentang efek atmosfer terkendali pada pematangan buah dilakukan di Amerika Serikat. Satu penelitian melibatkan pembangunan tempat penyimpanan atmosfer terkendali primitif oleh Benjamin Nyce di Cleveland, Ohio, tempat apel berhasil disimpan. Akan tetapi, baru pada tahun 1927, melalui penelitian Kidd dan West di Stasiun Penelitian Suhu Rendah di Cambridge, Inggris, dasar yang kuat untuk penyimpanan hasil bumi dalam atmosfer terkendali berhasil ditetapkan. Selama 90 tahun

terakhir, pengaruh atmosfer terkendali dan penyimpanan MA serta hipobarik pada buah-buahan dan sayur segar telah diteliti secara saksama.

Gambar : *Controlled Atmosphere Storage (CAS)*



(Sumber : Guan *et al.*, 2021)

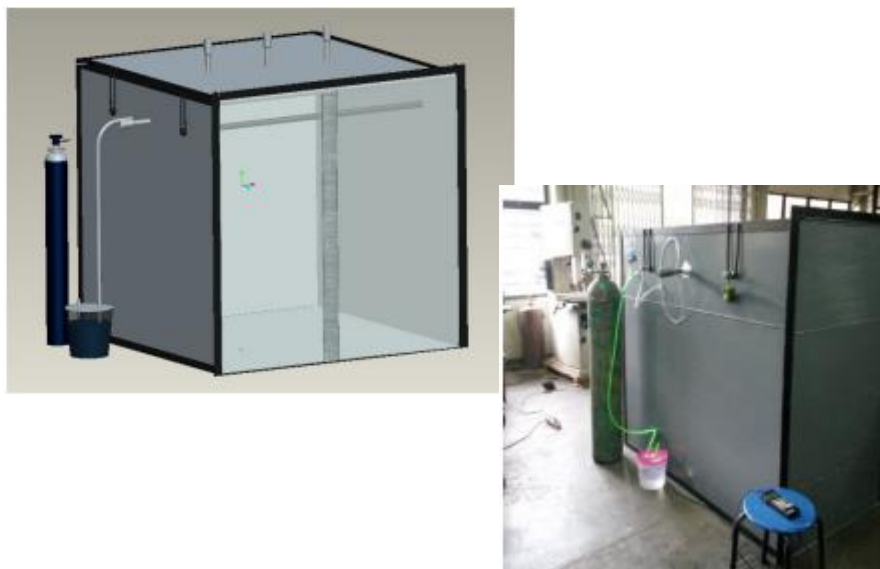
Banyak penelitian yang menghasilkan hasil yang baik yang menunjukkan bahwa salah satu metode pengawetan buah yang paling efektif adalah menyimpannya dalam suasana terkendali dengan campuran oksigen, karbon dioksida, dan nitrogen yang ditentukan secara ketat. Inti dari metode ini tidak terletak pada penggantian pendinginan buah dengan metode lain, tetapi pada peningkatan lebih lanjut dari metode pendinginan itu sendiri. Pengawetan buah dalam suasana terkendali menghasilkan hasil yang baik hanya jika dilakukan pada suhu udara tertentu, yang pada gilirannya hanya dapat dicapai dengan pendinginan. Sudah menjadi fakta umum bahwa buah-buahan dan sayur-sayuran segar sangat mudah rusak dalam bentuk alamnya yang belum diolah. Proses ini merupakan kelanjutan dari aktivitas metabolismenya setelah dipanen. Dikatakan bahwa buah-buahan dan sayur-sayuran mengalami kondisi "tidur" atau "hibernasi" pada suhu tertentu, mendekati 4°C. Aktivitas metabolisme ini diwujudkan melalui respirasi. Backer dan rekan kerja (1996) mengembangkan korelasi berikut yang memberikan persamaan untuk menghitung panas respirasi yaitu

$$w = 10.7 f \left(\frac{9t}{5} + 32 \right)^g$$

di mana w = laju respirasi, W/kg; t = suhu, °C; f dan g = koefisien respirasi (Rao *et al.*, 2015)

Sebagaimana dijelaskan dalam (Fatharani *et al.*, 2020) tentang kolang-kaling, suhu penyimpanan yang lebih rendah mengurangi kecepatan respirasi buah-buahan lain. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan suhu dari 28°C ke 5°C menurunkan laju respirasi CO₂ kolang-kaling secara signifikan. Semakin rendah suhu penyimpanan, semakin sedikit CO₂ yang diproduksi, yang berarti laju metabolisme yang lebih rendah dan umur simpan yang lebih lama. Selain itu, ditemukan bahwa ketebalan kemasan berkorelasi dengan suhu untuk meningkatkan perlambatan respirasi.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa suhu rendah sangat penting untuk memperpanjang umur simpan buah dan sayuran. Namun, untuk menghindari efek samping seperti kerusakan dingin, tetap harus memperhatikan batas toleransi masing-masing komoditas. Dengan mengoptimalkan suhu penyimpanan bersama dengan teknik penyimpanan lain seperti pembungkus atmosfer modifikasi (MAP) atau penyimpanan atmosfer yang dikontrol (CAS),



Anda dapat mencapai hasil yang lebih baik dalam menjaga kualitas dan kesegaran produk hortikultura selama penyimpanan.

Gambar : *Modified Atmosphere Storage (MAS)*

(Sumber : Libyawati *et al.*, 2017)

2. Hubungan Suhu dengan Laju Respirasi pada Teknologi *Controlled Atmosphere Storage (CAS)* dan *Modified Atmosfer Storage (MAS)*

Tidak diragukan lagi faktor eksternal yang paling penting yang mempengaruhi respirasi adalah suhu. Hal ini karena suhu memiliki pengaruh yang mendalam pada laju reaksi biologis, misalnya, metabolisme dan respirasi. Pada rentang fisiologis sebagian besar tanaman, yaitu, 0 – 30⁰ C (32 hingga 86⁰ F), peningkatan suhu menyebabkan peningkatan respirasi secara eksponensial. Aturan Van't Hoff menyatakan bahwa kecepatan reaksi biologis meningkat 2 hingga 3 kali lipat untuk setiap kenaikan suhu 10⁰ C dalam rentang suhu yang biasanya ditemui dalam rantai distribusi dan pemasaran. Pada suhu yang lebih tinggi, denaturasi enzimatik dapat terjadi dan mengurangi laju respirasi. Jika suhu terlalu rendah, cedera fisiologis dapat terjadi, yang dapat menyebabkan peningkatan laju respirasi. Untuk distribusi dan suhu eceran (0 - 30⁰ C) di mana MAP cocok, efek suhu rendah yang menurunkan laju reaksi biokimia adalah positif. Pengaruh suhu pada laju respirasi pertama kali diukur dengan nilai titik Q₁₀^R (hasil bagi suhu untuk respirasi), yang merupakan peningkatan laju respirasi untuk kenaikan suhu 10⁰ C. Hal ini dapat dinyatakan sebagai

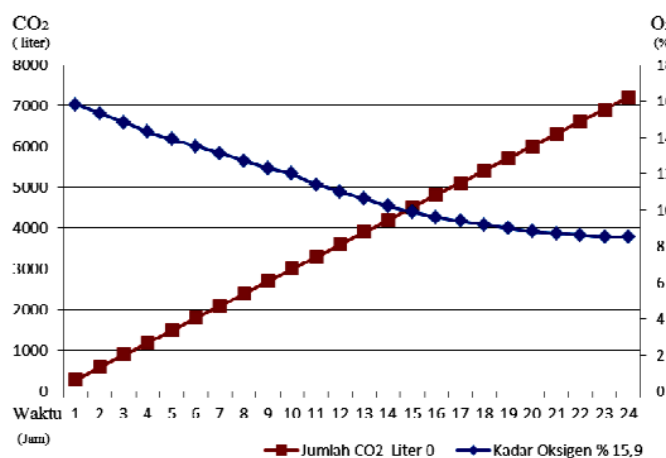
$$Q_{10}^R = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{10 / (T_2 - T_1)}$$

di mana R_2 adalah laju respirasi pada suhu T_2 dan R_1 adalah laju respirasi pada suhu T_1 . Hasil bagi suhu berguna karena memungkinkan kita menghitung laju respirasi pada satu suhu dari laju yang diketahui pada suhu lain. Akan tetapi, laju respirasi tidak mengikuti perilaku ideal, dan Q_{10}^R dapat sangat bervariasi dengan suhu. Untuk berbagai produk, nilai Q_{10}^R dapat berkisar dari 1 hingga 4 tergantung pada rentang suhu. Pada suhu yang lebih tinggi, Q_{10}^R biasanya lebih kecil daripada pada suhu yang lebih rendah (Mangarai *et al.*, 2009).

Salah satu faktor biologis paling penting yang menentukan umur produk segar seperti buah dan sayur adalah laju respirasi. Proses metabolik yang dikenal sebagai respirasi mengubah karbohidrat dalam sel tanaman menjadi energi, menghasilkan karbon dioksida (CO_2) dan uap air sebagai produk sampingan. Tingginya laju respirasi biasanya mempercepat degradasi mutu dan penggunaan cadangan energi, yang berarti umur simpan produk lebih pendek. Dalam (Yadav *et al.*, 2022), dijelaskan bahwa metode pengemasan seperti pelapis makanan dan pengemasan atmosfer yang dimodifikasi (MAP) bertujuan untuk mengurangi laju respirasi buah jambu biji dengan mengubah atmosfer di sekitarnya, sehingga memperpanjang masa penyimpanannya.

Selain itu, bagaimana laju respirasi berkontribusi terhadap susut bobot pada buah lemon lokal dibahas dalam (Naibaho *et al.*, 2025). Respirasi yang tinggi mengurangi karbon dalam bentuk CO_2 dan air melalui transpirasi. Akibatnya, berat buah secara bertahap menurun. Metabolisme respirasi dan kualitas fisik produk seperti bobot, tekstur, dan tampilan visual terkait erat, seperti yang ditunjukkan oleh fenomena ini. Oleh karena itu, untuk menjaga kualitas buah selama penyimpanan, pengendalian laju respirasi sangat penting.

Pardede pada tahun 2020 memperingatkan sebaliknya bahwa saat konsentrasi oksigen terlalu rendah atau CO_2 terlalu tinggi, dapat terjadi pergeseran dari respirasi aerobik ke anaerobik, yang pada gilirannya mempercepat kerusakan mutu melalui pembuatan zat fermentasi yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, laju respirasi harus diatur secara proporsional dengan mempertimbangkan toleransi fisiologis masing-masing produk. Secara keseluruhan, mengelola laju respirasi sangat penting untuk memperpanjang umur simpan buah dan sayur. Metode seperti pengaturan suhu, pengendalian atmosfer, dan penggunaan teknologi pengemasan modern dapat mengurangi degradasi kualitas akibat respirasi, sehingga produk tetap segar lebih lama dan memiliki kualitas yang sama.



Gambar : Hubungan waktu pemasukan CO₂ dengan kadar CO₂ & O₂ di ruang penyimpanan MAS

(Sumber : Libyawati *et al.*, 2017)

MA dan CA biasanya terdiri dari N₂, O₂, dan CO₂. Rasio O₂ dan CO₂ yang berubah inilah yang membuat perbedaan dalam pengawetan komoditas pangan. Dengan mengurangi kadar O₂ dan meningkatkan kadar CO₂, pematangan buah dan sayur dapat ditunda, laju respirasi dan produksi etilen dapat dikurangi, pelunakan dapat diperlambat, dan berbagai perubahan komposisi yang terkait dengan pematangan dapat diperlambat. Oksigen sangat penting untuk respirasi komoditas hortikultura segar. O₂ yang dihilangkan dapat digantikan dengan N₂, yang umumnya dikenal sebagai gas inert, atau CO₂, yang merupakan penghambat kompetitif aksi etilen dan dapat menurunkan pH atau menghambat pertumbuhan beberapa jamur dan bakteri. Laju respirasi mulai menurun saat kadar O₂ diturunkan hingga di bawah 12 kPa, dan kadar yang umum digunakan untuk sebagian besar komoditas hortikultura segar adalah sekitar 3-5 kPa. Tidak adanya O₂ dapat menyebabkan respirasi anaerobik, mempercepat kerusakan, dan pembusukan. Kadar CO₂ yang tinggi merupakan penghambat pertumbuhan bakteri dan jamur yang efektif; namun, kadar ≥ 10 kPa diperlukan untuk menekan pertumbuhan jamur dan bakteri secara signifikan. Atmosfer >10 kPa CO₂ dapat bersifat fitotoksik terhadap banyak komoditas hortikultura segar. Nitrogen digunakan sebagai gas pengisi karena tidak memiliki efek biologis langsung pada komoditas hortikultura, dan oleh karena itu N₂ umumnya digunakan sebagai komponen inert MA/CA. Mengganti N₂ dengan argon atau helium dapat meningkatkan difusivitas O₂, CO₂, dan C₂H₄, tetapi tidak memiliki efek langsung pada jaringan tanaman dan lebih mahal daripada N₂ sebagai komponen MA/CA (Elhadi, 2009).

Aspek termodinamika sangat penting untuk menjelaskan bagaimana suhu mempengaruhi laju respirasi dan umur simpan buah dan sayuran dalam hal penyimpanan produk segar. Mekanisme energi aktivasi memengaruhi kecepatan reaksi kimia melalui suhu, yang memengaruhi reaksi biokimia dalam respirasi. Persamaan Arrhenius adalah salah satu teori yang digunakan untuk memahami hubungan ini. Berdasarkan (Fatharani *et al.*, 2020), model Arrhenius dapat digunakan untuk memprediksi secara akurat laju respirasi kolang-kaling yang disimpan dalam kemasan udara modifikasi (MAP) ada koefisien korelasi yang sangat tinggi ($R^2 = 0,989$).

Menurut persamaan Arrhenius, suhu meningkatkan kecepatan reaksi secara eksponensial. Dalam konteks respirasi, laju respirasi buah meningkat seiring dengan suhu penyimpanan, yang menghasilkan peningkatan konsumsi substrat energi dan peningkatan produksi CO₂. Sebaliknya, ketika suhu turun, energi kinetik molekul berkurang, yang berarti lebih sedikit molekul yang memiliki energi untuk melampaui batas energi aktivasi, yang mengakibatkan penurunan laju reaksi respirasi. Fakta bahwa pendinginan efektif dalam memperpanjang umur produk segar telah dibuktikan secara ilmiah.

Dalam (Fatharani *et al.*, 2020), disebutkan bahwa suhu dan karakteristik kemasan dapat digunakan untuk menghitung laju respirasi dengan menggunakan model regresi polinomial orde kedua, selain persamaan Arrhenius. Metode ini lebih bersifat empiris, tetapi masih bermanfaat untuk mengoptimalkan praktik penyimpanan komersial, terutama ketika mempertimbangkan berbagai kombinasi faktor lingkungan. Teknologi penyimpanan yang lebih presisi, seperti pengaturan suhu dinamis berbasis sensor otomatis, dapat dikembangkan dengan memahami prinsip termodinamika ini. Oleh karena itu, penerapan konsep

termodinamika tidak hanya menjelaskan mekanisme utama yang menyebabkan perubahan kualitas produk, tetapi juga menjadi dasar untuk inovasi teknologi yang memungkinkan buah dan sayur tetap berkualitas selama distribusi dan pemasaran serta memperpanjang masa simpan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Teknologi *Controlled Atmosphere Storage* (CAS) dan *Modified Atmosphere Storage* (MAS) secara efektif mampu memperpanjang masa simpan buah-buahan tropis dengan memanfaatkan konsep fisika yang terlibat dalam kontrol gas, tekanan, suhu, dan difusi molekuler di dalam area penyimpanan. Dalam CAS, komposisi atmosfer dikontrol secara aktif untuk mempertahankan kadar oksigen rendah dan kadar karbon dioksida tinggi, sehingga menghambat respirasi dan memperlambat proses fisiologis buah. Dalam MAS, modifikasi atmosfer lebih merupakan fungsi dari tindakan alami buah dan sifat-sifat kemasan, mengikuti prinsip pertukaran gas melalui membran semipermeabel. Faktor-faktor fisik seperti konduktivitas termal, transportasi massa, dan gradien konsentrasi terutama bertanggung jawab untuk mengatur keseimbangan internal atmosfer. Dengan menerapkan konsep-konsep tersebut dalam fisika, CAS dan MAS mampu mengatur laju metabolisme buah-buahan tropis, memperlambat kerusakan yang berkaitan dengan usia, dan mempertahankan kualitas rasa, tekstur, dan nutrisi untuk jangka waktu yang lebih lama daripada penyimpanan tradisional. Secara umum, seseorang perlu memiliki pemahaman yang baik tentang konsep-konsep fisika yang mendasari CAS dan MAS untuk mengoptimalkan desain sistem penyimpanan yang efisien, efektif, dan sejalan dengan sifat khusus buah-buahan tropis yang akan disimpan. Penelitian ini diharapkan mampu digunakan sebagai acuan atau sumber rujukan bagi penelitian-penelitian selanjutnya tentang Teknologi *Controlled Atmosphere Storage* (CAS) dan *Modified Atmosphere Storage* (MAS).

DAFTAR REFERENSI

- Asiah N., et al. 2020. Prinsip Dasar Penyimpanan Pangan pada Suhu Rendah. 1st edn. Makassar: Nas Media Pustaka.
- Baheramsyah, A., & Fatahilah, K. (2021). Automatic Monitoring and Controlled Atmosphere System Using Arduino on Tropical Fruit Container Integrated with IoT. *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res*, 6(2), 135-139.
- Elhadi M Yahia. 2006. Stewart Postharvest Solutions (UK) Ltd. Modified and controlled atmospheres for tropical fruits. *Stewart Postharvest Review An international journal for reviews in postharvest biology and technology*, 5(6): 3.
- Elhadi M. Yahia. 2009. *Modified and Controlled Atmospheres for the Storage, Transportation, and Packaging of Horticultural Commodities*. London: CRC Press. (hal 6)
- Fatharani, A., Bintoro, N., & Saputro, A. D. (2020). Pemodelan laju respirasi buah kolang-kaling (*Arenga pinnata*) pada penyimpanan Modified Atmospheric Packaging (MAP). *agriTECH*, 40(2), 124-132.
- Fatharani, A., Bintoro, N., & Saputro, A. D. (2020). Pemodelan laju respirasi buah kolang-kaling (*Arenga pinnata*) pada penyimpanan Modified Atmospheric Packaging (MAP). *agriTECH*, 40(2), 124-132. DOI: <https://doi.org/10.22146/agritech.50247>

- Fuentealba, C., Vidal, J., Zulueta, C., Ponce, E., Uarrota, V., Defilippi, B. G., & Pedreschi, R. (2022). Controlled Atmosphere Storage alleviates Hass avocado black spot disorder. *Horticulturae*, 8(5), 369.
- Guan, J., Alison., Bhargavi R., Juming T., Shyam S., dan Vivian C. H. W. 2021. A Review: Gaseous Interventions for *Listeria monocytogenes* Control in Fresh Apple Cold Storage. *frontiers in Microbiology*, 12 (1): 5.
- Ihsan T., dan Vioni D. 2024. Tinjauan Strategi Pengemasan Buah dan Sayur dalam Memerangi Food Loss dalam Rantai Pasokan Pascapanen di Indonesia. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(4): 1082.
- Imansyah, F. (2024). Inovasi Atmosfer Terkendali: Pemeliharaan Kesegaran Buah Pisang Untuk Peningkatan Ketersediaan Dan Kualitas Konsumsi. *Jurnal Abdi Insani*, 11(3), 77-89.
- Jayas, D. S., S. Jeyamkondan. 2002. PH—Postharvest Technology: Modified Atmosphere Storage of Grains Meats Fruits and Vegetables. *Biosystems Engineering Volume 82, Issue 3, July 2002, Pages 235-251.*
- Joco, R. (2024). Development and evaluation of semi-automatic Controlled Atmosphere Storage facility for calamansi (*Citrofortunella microcarpa*). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 26(2).
- Kulviwat, N., Eze, F. N., & Ovatlarnporn, C. (2023). The impact of alginate composites enriched with spent black tea, green tea, jasmine tea, and Oolong tea wastes on the shelf-life extension of fruits and vegetables. *Applied Food Research*, 3(1), 100290.
- Lastriyanto A., Bagus I B., La C.H., Sasongko A. W. 2022. Pengawetan Buah Jambu Biji (*Psidium Guajava L.*) Segar dengan Teknologi Hypobaric Storage. *Jurnal Keteknikaan Pertanian Tropis dan Biosistem* 10(1): 55-56. <https://doi.org/10.21776/ub.jkptb.2022.010.01.07>
- Libyawati W., I Gede E. L., A. Raynold, Hafidan A., dan L. Mahardhika. 2017. Modified atmosphere storage (mas) buah pisang. *Dinamika Teknik Mesin*, 7 (2): 95-98.
- Mangaraj, S., Tridib K. G. 2009. Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables for Extending Shelf-Life: A Review. *Fresh Produce* ©2009 Global Science Books. (hal 7)
- Mathiazhagan, M., Bhavya Ca., Laxman R. H., Kundapura V. R. 2021. Genomic Approaches for Improvement of Tropical Fruits: Fruit Quality, Shelf Life and Nutrient Content. 2021 Nov 25;12(12):1881. doi: 10.3390/genes12121881
- Muhtarom, Kurnia S. A. 2021. Design Of Low-Cost Energy Controlled Atmosphere System For Fruit Container Using Dry Ice. Undergraduate thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Mulyawanti, I., Enrico S., dan Dwi A. 2017. Teknologi Pengemasan Atmosfir Termodifikasi (Modified Atmosphere Packaging/MAP) dan Vakum pada Buah Durian. *Jurnal Penelitian Pascapanen Pertanian*, 14(1) : 1.
- Naibaho, B., Simanungkalit, F. J., & Nadapdap, E. Y. (2025). Pengaruh Tingkat Kematangan dan Lama Penyimpanan Terhadap Karakteristik Mutu Fisik Buah Lemon Lokal (*Citrus X Limon*) pada Kondisi Penyimpanan Ruang. *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, 25(1), 45-55.
- Naibaho, B., Simanungkalit, F. J., & Nadapdap, E. Y. (2025). Pengaruh Tingkat Kematangan dan Lama Penyimpanan Terhadap Karakteristik Mutu Fisik Buah Lemon Lokal (*Citrus*

- X Limon) pada Kondisi Penyimpanan Ruang. *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, 25(1), 45-55. DOI : 10.33087/jiubj.v25i1.5628
- Pardede, E. (2020). Pengemasan buah dan sayur dengan atmosfer termodifikasi. *Jurnal Visi Eksakta*, 1(1), 11-20.
- Puspasari, D. 2024. Prinsip Pengolahan Menggunakan Suhu Rendah, in A. Karim (ed.) *Teknologi Pengolahan dan Hasil Pertanian (Prinsip, Metode, dan Teknologi)*. Medan: Yayasan Kita Menulis.
- Putra, S. N., Sukorini, H., & Septia, E. D. (2024). PENERAPAN PENGEMASAN MODIFIKASI ATMOSFER UNTUK MEMPERTAHANKAN MUTU DAN KUALITAS SENSORIK ASPARAGUS (*Asparagus Officinalis L.*). *VIABEL: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Pertanian*, 18(1), 76-87.
- Rao, C. G. 2015. *Engineering for Storage of Fruits and Vegetables Cold Storage, Controlled Atmosphere Storage, Modified Atmosphere Storage*. BS Publication. (511-529)
- Rohmayanti, T., Budiharti, U., & Tjahjohutomo, R. (2024). Karakteristik Fisik dan Kadar Air Cabai Merah (*Capsicum annum L.*) dengan Variasi Kondisi dan Kemasan Penyimpanan. *Karimah Tauhid*, 3(6), 6445-6456.
- Utama, I. M. S., Setiyo, Y., Puja, I. A. R., & Semadi, N. (2011). Kajian atmosfer terkendali untuk memperlambat penurunan mutu buah mangga arumanis selama penyimpanan. *Jurnal Hortikultura Indonesia (JHI)*, 2(1), 27-33.
- Utama, I. M. S., Setiyo, Y., Puja, I. A. R., & Semadi, N. (2011). Kajian atmosfer terkendali untuk memperlambat penurunan mutu buah mangga arumanis selama penyimpanan. *Jurnal Hortikultura Indonesia (JHI)*, 2(1), 27-33.
- Wahyudi D., Yusmiati, Eva M., Mawar I. P. A., Maryanti, Rahmi E. P., Gallusia M. N.I., Nurullia F., Febrina D., Sakinah A. D. 2024. *Prinsip Proses Pengolahan Pangan*. Bogor: Lingkar Edukasi Indonesia.
- Widyaningrum, Yohanes A. P., dan Sutrisno M. 2018. Desain Sistem Kontrol dan Monitoring Kondisi Udara pada Controlled Atmosphere Storage Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, April 2018. Vol. 6 No. 1, p 75-82. P-ISSN 2407-0475 E-ISSN 2338-8439.
- Yadav, A., Kumar, N., Upadhyay, A., Fawole, O. A., Mahawar, M. K., Jalgaonkar, K., ... & Mekhemar, M. (2022). Recent advances in novel packaging technologies for shelf-life extension of guava fruits for retaining health benefits for longer duration. *Plants*, 11(4), 547.
- Yadav, A., Kumar, N., Upadhyay, A., Fawole, O. A., Mahawar, M. K., Jalgaonkar, K., ... & Mekhemar, M. (2022). Recent advances in novel packaging technologies for shelf-life extension of guava fruits for retaining health benefits for longer duration. *Plants*, 11(4), 547.
- Yahia, E. 2010. *Horticultural Reviews, Volume 22 Purdue University*. (129-130).
- Zainal, P. W. (2025). Kemunduran Kesegaran Selama Perkembangan Chilling Injury Pada Penyimpanan Dingin Buah Tomat. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, 29(1), 41-47. DOI : ISSN 1410-1920, EISSN 2579-4019
- Zidny, F. F., Edy S., Adiando. 2024. Simulasi Fuzzy Logic yang Diterapkan Pada Controlled Atmosphere Storage. *Jurnal Elkolind*, 11(2): 386. DOI: <http://dx.doi.org/10.33795/elkolind.v11i2.5449>

Zubaidah, S. 2021. *Teknologi Produksi Tanaman Buah Tropis*. Nusa Tenggara Barat: Pusat Pengembangan Pendidikan dan Penelitian Indonesia.