JURNAL ILMIAH INOVASI

Vol. 26, No. 2, Juli 2026
E-ISSN : 2527-6220 | P-ISSN : 1411-5549
DOI : 10.25047/jii.v26i02.7176

Pengembangan dan Evaluasi Sistem Monitoring Laju Respirasi Berbasis *Closed System* secara *Real-Time* untuk Produk Buah Segar

Development and Evaluation of a Real-Time Closed-System Respiration Rate Monitoring System for Fresh Fruit Products

Dimas Triardianto[1*], Annisa'u Choirun[1], Yani Subaktilah[1], Shinta Widyaningtyas[1], A. Sirojul Anam Izza Rosyadi[1], Elok Kurnia Novita Sari[1]

[1] Jurusan Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Jember
** dimas.triardianto@polije.ac.id*

ABSTRAK

Produk buah segar tetap melakukan aktivitas metabolisme setelah panen sehingga kualitasnya terus berubah selama penyimpanan. Laju respirasi merupakan salah satu parameter penting untuk mengevaluasi kondisi fisiologis dan mutu buah. Pengukuran laju respirasi umumnya menggunakan instrumen laboratorium seperti gas analyzer atau gas chromatograph yang relatif mahal dan kurang praktis untuk pemantauan real-time. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem monitoring laju respirasi real-time berbasis sistem tertutup dan mengevaluasi kinerjanya melalui pengukuran konsentrasi CO_2 serta aplikasi pada buah tomat dan mangga selama penyimpanan. Sistem yang dikembangkan diuji menggunakan gas analyzer sebagai referensi dengan parameter evaluasi berupa akurasi, deviasi, MAE, RMSE, regresi linier, dan koefisien determinasi (R^2). Selanjutnya, sistem digunakan untuk memonitoring laju respirasi tomat dan mangga pada suhu 7°C, 17°C, dan suhu ruang (27°C) selama 5 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem menghasilkan akurasi rata-rata 77,83%, deviasi rata-rata 22,17%, MAE 0,271%, RMSE 0,314%, serta persamaan regresi linier y=1,2711x−0,0375 dengan (R^2)=0,993. Sistem juga berhasil memantau laju respirasi tomat dan mangga, dimana laju respirasi menurun seiring penurunan suhu penyimpanan. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai alat monitoring laju respirasi produk hortikultura secara real-time.

Kata kunci — CO_2; laju respirasi; mangga; monitoring real-time; pascapanen; tomat.

ABSTRACT

Fresh fruits continue to undergo metabolic activities after harvest, causing quality changes during storage. Respiration rate is a key physiological indicator used to assess fruit quality and postharvest conditions. Conventional respiration measurements commonly require laboratory instruments, such as gas analyzers and gas chromatographs, which are costly and less suitable for continuous real-time monitoring. This study aimed to develop a real-time respiration rate monitoring system based on a closed-system approach and evaluate its performance through CO_2 concentration measurements and respiration monitoring of tomato and mango fruits. System performance was validated against a gas analyzer using accuracy, deviation, mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), linear regression, and coefficient of determination (R^2) analyses. The system was then applied to monitor the respiration rates of tomatoes and mangoes stored at 7°C, 17°C, and 27°C for 5 days. The results showed an average accuracy of 77.83%, an average deviation of 22.17%, an MAE of 0.271%, an RMSE of 0.314%, and a linear regression equation of y=1.2711x−0.0375 with an R^2 value of 0.993. The respiration rates of both commodities decreased as storage temperature decreased, indicating that the developed system is suitable for real-time monitoring of horticultural product respiration during storage.

Keywords — *CO_2; mango; postharvest; real-time monitoring; respiration rate; tomato.*

OPEN ACCESS
© 2023. Dimas Triardianto, Annisa'u Choirun, Yani Subaktilah, Shinta Widyaningtyas, A. Sirojul Anam Izza Rosyadi, Elok Kurnia Novita Sari
Creative Commons Attribution 4.0 International License

1. Pendahuluan

Produk buah segar merupakan komoditas hortikultura yang tetap melangsungkan aktivitas metabolisme setelah dipanen sehingga kualitasnya terus mengalami perubahan selama penyimpanan. Proses fisiologis yang berlangsung, seperti respirasi, transpirasi, dan pematangan, menyebabkan perubahan warna, pelunakan tekstur, kehilangan bobot, penurunan kandungan nutrisi, serta berkurangnya umur simpan produk. Laju perubahan kualitas tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain jenis komoditas, tingkat kematangan, suhu penyimpanan, dan kondisi atmosfer di sekitar produk [1]. Aktivitas metabolisme yang berlanjut setelah panen menjadi penyebab utama penurunan mutu buah selama distribusi dan penyimpanan sehingga pemantauan kondisi fisiologis produk sangat diperlukan untuk mendukung pengelolaan mutu pascapanen yang efektif.

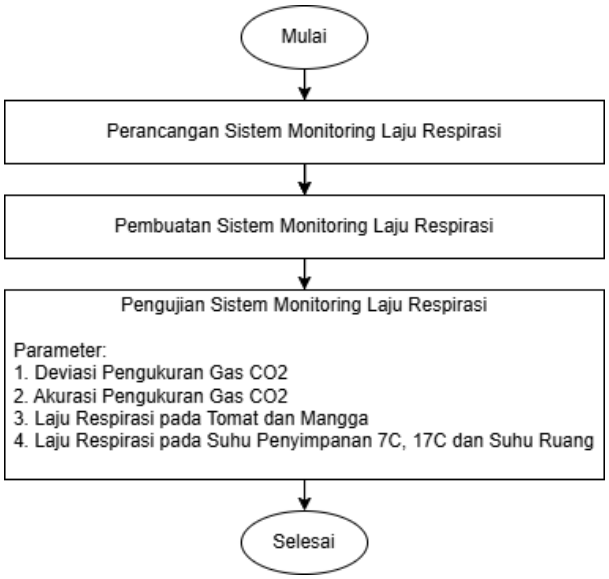
Salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas dan kondisi fisiologis buah selama penyimpanan adalah laju respirasi. Respirasi merupakan proses metabolisme yang melibatkan konsumsi oksigen (O_2) dan produksi karbon dioksida (CO_2), yang berkaitan erat dengan tingkat kematangan, laju senesens, serta umur simpan produk hortikultura. Semakin tinggi laju respirasi suatu komoditas, semakin cepat proses deteriorasi dan penurunan kualitas terjadi [2]. Pengukuran laju respirasi umumnya dilakukan menggunakan instrumen laboratorium seperti *gas chromatograph* (GC) maupun *gas analyzer* yang menganalisis perubahan konsentrasi O_2 dan CO_2 dalam ruang tertutup *(closed system*) maupun sistem aliran gas (*flow-through* system) [3] [4] [5]. Meskipun metode berbasis GC mampu menghasilkan data dengan tingkat akurasi yang tinggi, proses pengukurannya memerlukan peralatan laboratorium yang relatif mahal, prosedur analisis yang kompleks, serta tidak praktis untuk pemantauan respirasi secara kontinu dan *real-time* pada kondisi lapangan maupun rantai pasok pascapanen.

Keterbatasan tersebut mendorong kebutuhan akan sistem monitoring yang lebih portabel, ekonomis, dan mampu menyediakan data secara real-time. Beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa integrasi sensor O_2 dan CO_2 dalam sistem tertutup mampu melakukan pengukuran respirasi secara non-destruktif, kontinu, dan *real-time* dengan tingkat akurasi yang baik [6] [7]. Selain mengurangi kebutuhan analisis laboratorium yang berulang, sistem monitoring berbasis sensor O_2 dan CO_2 memungkinkan pengamatan laju respirasi secara langsung sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam penanganan pascapanen, pengelolaan penyimpanan, dan metode distribusi produk buah segar.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem monitoring laju respirasi secara *real-time* berbasis sistem tertutup untuk produk buah segar, dan mengevaluasi kinerja sistem monitoring yang dikembangkan melalui pengujian akurasi pengukuran gas CO_2 serta pengukuran laju respirasi pada komoditas buah dengan karakteristik fisiologis yang berbeda, yaitu tomat dan mangga selama masa simpan.

2. Metodologi

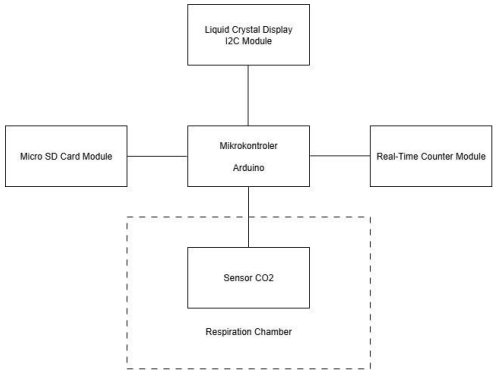
Alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



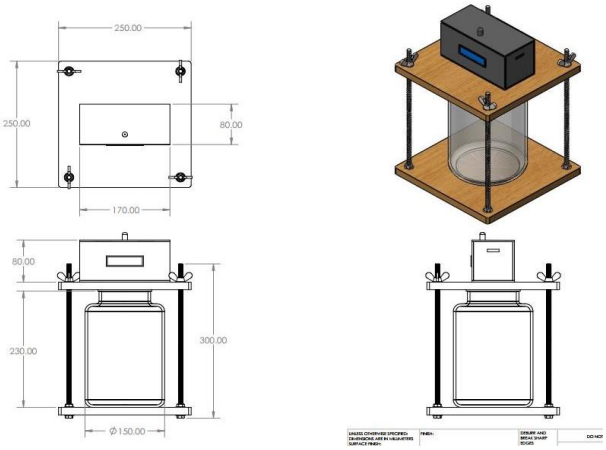
Gambar 1. Diagram Alir Penelitians

Perancangan Sistem Monitoring Laju Respirasi

Sistem monitoring laju respirasi terdiri dari dua bagian utama, yaitu sistem instrumentasi dan *respiration chamber*. Skema diagram sistem instrumentasi dapat dilihat pada Gambar 2, sementara rancangan bentuk *respiration chamber* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Diagram Skema Sistem Instumentasi



Gambar 3. Rancangan Respiration Chamber

Sistem monitoring laju respirasi yang dikembangkan terdiri atas *respiration chamber*, sensor CO_2, mikrokontroler Arduino Uno, modul *Real-Time Clock* (RTC), LCD 16 x 2 I2C, dan modul Micro SD Card yang bekerja secara terintegrasi untuk melakukan pengukuran respirasi buah secara *real-time*.

Sampel buah ditempatkan di dalam *respiration chamber* berbahan kaca dengan volume 3 liter yang dirancang kedap udara sehingga perubahan konsentrasi gas di dalam ruang hanya dipengaruhi oleh aktivitas respirasi produk. Selama proses respirasi berlangsung, buah menghasilkan gas karbon dioksida (CO_2) yang kemudian dideteksi oleh sensor CO_2 dan dikonversi menjadi sinyal listrik. Data hasil pengukuran selanjutnya dikirim ke mikrokontroler Arduino Uno yang berfungsi sebagai pusat kendali sistem untuk melakukan akuisisi data, pengolahan sinyal, serta perhitungan parameter laju respirasi berdasarkan perubahan konsentrasi CO_2 terhadap waktu. Konversi perubahan konsentrasi CO_2 terhadap waktu menggunakan Persamaan 1 [8]. Dimana persamaan tersebut dimasukan kedalam pemograman pada mikrokontroller arduino uno.

$$R_{CO_2} = \frac{\left(y^{tf}_{CO_2} - y^{ti}_{CO_2}\right) . V}{100\ .\ M . \left(t_f - t_i\right)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Keterangan:
RCO2 = laju respirasi (m3/kg/dt)
y = konsentrasi volumetric (%, v/v)
ti = waktu awal (dt)
tf = waktu akhir (dt)
M = berat produk (kg)
V = *volume head space* (m3)

Untuk menjamin ketepatan pencatatan waktu pengukuran, sistem dilengkapi dengan modul RTC yang menyediakan informasi tanggal dan waktu secara sehingga setiap data yang direkam memiliki timestamp yang sesuai. Selain itu hasil pengukuran juga ditampilkan secara langsung pada LCD I2C 16 x 2 sebagai *output display* yang memungkinkan pemantauan konsentrasi CO_2 dan laju respirasi secara *real-time*. Dimana baris pertama pada LCD menunjukan konsentrasi gas CO_2 dalam satuan persen, sementara baris kedua memuat nilai laju respirasi dalam satuan m^3/kg/dt.

Selain itu, seluruh data hasil pengukuran beserta informasi waktunya disimpan secara otomatis pada modul Micro SD Card setiap tiga jam sekali, sehingga dapat digunakan untuk analisis lanjutan, validasi sistem, dan dokumentasi hasil pengujian.

Evaluasi Sistem Monitoring Laju Respirasi

Kinerja sistem monitoring laju respirasi dievaluasi dengan membandingkan hasil pengukuran konsentrasi gas CO_2 yang diperoleh dari sistem yang dikembangkan dengan hasil pengukuran menggunakan alat *gas analyzer* sebagai alat referensi. Pengujian dilakukan pada rentang konsentrasi CO_2 sebesar 0–2% untuk merepresentasikan berbagai kondisi pengukuran yang mungkin terjadi selama proses monitoring laju respirasi produk segar. Setiap data hasil pembacaan sistem dibandingkan secara langsung dengan nilai referensi sehingga dapat dilakukan analisis terhadap tingkat akurasi, deviasi, hubungan linier, dan besarnya kesalahan pengukuran sistem secara keseluruhan.

Nilai akurasi dan deviasi dilakukan untuk mengevaluasi kedekatan hasil pengukuran sistem terhadap nilai referensi. Nilai akurasi digunakan untuk menunjukkan tingkat ketepatan pengukuran sistem dalam merepresentasikan konsentrasi CO_2 yang sebenarnya, sedangkan nilai deviasi digunakan untuk menunjukkan besarnya penyimpangan relatif hasil pengukuran sistem terhadap alat referensi. Perhitungan nilai deviasi dan akurasi dilakukan menggunakan Persamaan) dan Persamaan 3. Selain itu, rata-rata nilai deviasi dari seluruh titik pengujian digunakan sebagai indikator kesalahan relatif keseluruhan sistem atau *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), sehingga dapat memberikan gambaran umum mengenai tingkat ketelitian sistem pada seluruh rentang pengukuran.

$$Dev = |Nilai\ Ref - Nilai\ Sensor| \ldots (2)$$

Keterangan:
Dev : Nilai Deviasi
Nilai Ref : Nilai Referensi / Pembanding
Nilai Sensor : Nilai Pembacaan Sensor

$$Akurasi = \left(1 - \frac{Dev}{Nilai\ Ref}\right).100\% \ldots\ldots\ldots (3)$$

Keterangan:
Akurasi : Nilai Akurasi (%)
Dev : Nilai Deviasi
Nilai Ref : Nilai Referensi

Untuk mengevaluasi kesesuaian pola pengukuran antara sistem yang dikembangkan dan alat referensi, dilakukan analisis regresi linier sederhana. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan hubungan linier antara kedua data pengukuran serta mengidentifikasi adanya bias sistematis yang mungkin terjadi pada sistem. Hasil analisis regresi dinyatakan dalam bentuk persamaan linier sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (4), serta koefisien determinasi (R^2) yang digunakan untuk menunjukkan tingkat kemampuan data hasil pengukuran sistem dalam mengikuti perubahan nilai yang terukur oleh gas analyzer.

$$y = ax + b \ldots\ldots (4)$$

Keterangan
a : slope
b : intersep
y : nilai konsentrasi CO2 sistem monitoring
x : nilai konsentrasi CO2 referensi

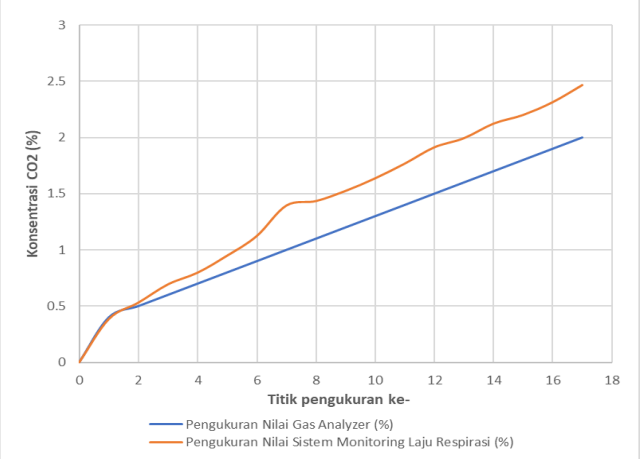
Selain itu, kinerja sistem juga dievaluasi menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengukur tingkat ketepatan absolut sistem secara keseluruhan dan memberikan informasi mengenai besarnya kesalahan pengukuran yang masih terjadi setelah mempertimbangkan seluruh data pengujian.

Setelah proses validasi konsentrasi gas CO_2 melalui pengujian akurasi, deviasi, regresi linier, dan RMSE selesai dilakukan, sistem selanjutnya diaplikasikan untuk memantau laju respirasi produk hortikultura segar. Pengujian dilakukan pada buah tomat dan mangga yang disimpan pada suhu 7°C, 17°C, dan suhu ruang selama 5 hari.

3. Pembahasan

Hasil nilai Deviasi, Akurasi, Regresi, dan RMSE Pengukuran Konsentrasi Gas CO2

Hasil pengukuran konsentrasi gas CO_2 dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Pengukuran Konsentrasi Gas CO2

Pengujian kinerja sistem monitoring laju respirasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran konsentrasi CO_2 yang diperoleh sistem terhadap hasil pengukuran Gas Analyzer sebagai alat referensi. Pengujian dilakukan pada rentang konsentrasi CO_2 sebesar 0 –2 % dengan total 17 titik pengukuran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai konsentrasi CO_2 yang diukur oleh sistem memiliki pola perubahan yang serupa dengan nilai yang diperoleh *Gas Analyzer*. Pada konsentrasi rendah (0 – 0,60%), selisih pengukuran relatif kecil dengan nilai akurasi mencapai 84,33 – 96,25%.

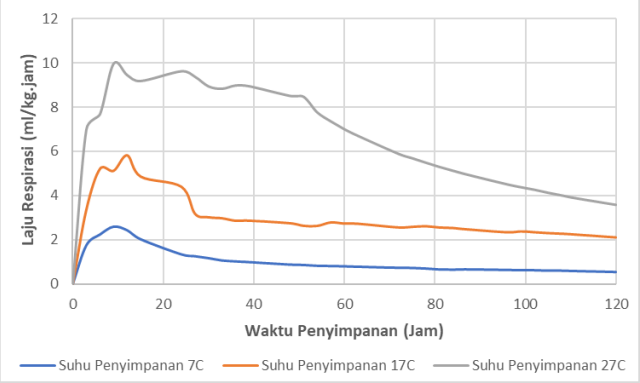
Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, sistem cenderung menghasilkan pembacaan yang lebih besar dibandingkan alat referensi sehingga nilai akurasi mengalami penurunan. Grafik hasil pengujian menunjukkan bahwa kedua kurva memiliki kecenderungan meningkat secara linier, tetapi kurva sistem monitoring berada di atas kurva Gas Analyzer pada sebagian besar titik pengukuran, mengindikasikan adanya kecenderungan *overestimation*.

Sementara itu, hasil perhitungan, sistem monitoring yang dikembangkan menghasilkan nilai akurasi rata-rata sebesar 77,83% dengan nilai deviasi rata-rata sebesar 22,17%. Nilai deviasi tersebut menunjukkan bahwa rata-rata penyimpangan hasil pengukuran sistem terhadap alat *gas analyzer* masih berada pada kisaran 22,17% dari nilai referensi. Selain itu, diperoleh nilai MAE (*Mean Absolute Error*) sebesar 0,271% dan RMSE (*Root Mean Square Error*) sebesar 0,314%. Nilai RMSE yang relatif dekat dengan MAE menunjukkan bahwa distribusi kesalahan pengukuran cukup konsisten dan tidak didominasi oleh beberapa kesalahan ekstrem. Analisis regresi linier menghasilkan persamaan y = 1,2711x − 0,0375y dengan koefisien determinasi R^2 = 0,993. Nilai R^2 yang sangat tinggi menunjukkan bahwa sistem mampu mengikuti tren perubahan konsentrasi CO_2 yang diukur oleh Gas Analyzer dengan tingkat korelasi yang sangat kuat.

Kinerja sistem yang dikembangkan menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengikuti perubahan konsentrasi CO_2, yang ditunjukkan oleh nilai R^2 sebesar 0,993. Meskipun demikian, nilai akurasi rata-rata sebesar 77,83% dan deviasi rata-rata sebesar 22,17% masih lebih rendah dibandingkan beberapa penelitian terkini yang menerapkan teknik kalibrasi lanjutan pada sensor CO_2. Penelitian oleh Araújo et al. (2023) menunjukkan bahwa penerapan algoritma *Extremely Randomized Trees* mampu meningkatkan kualitas data sensor CO_2 biaya rendah secara signifikan melalui proses kalibrasi. Penelitian tersebut menegaskan bahwa faktor kalibrasi memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap peningkatan akurasi sensor CO_2 [8]. Selain itu, beberapa studi terbaru juga menunjukkan bahwa faktor eksternal seperti suhu dan kelembapan pada respiration chamber mempengaruhi kinerja sensor CO_2 [9] [10].

Laju Respirasi Tomat Pada Berbagai Suhu Penyimpanan

Gambar 5 menunjukkan perubahan laju respirasi tomat selama penyimpanan 5 hari (120 jam) pada suhu 7°C, 17°C, dan 27°C. Secara umum, seluruh perlakuan menunjukkan pola respirasi klimakterik yang ditandai oleh peningkatan laju respirasi pada awal penyimpanan hingga mencapai puncak respirasi (*climacteric peak*), kemudian diikuti oleh penurunan secara bertahap. Perbedaan suhu penyimpanan memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap besarnya laju respirasi yang dihasilkan. Tomat yang disimpan pada suhu 27°C memiliki laju respirasi tertinggi dengan nilai puncak mencapai sekitar 60 ml/kg·jam pada 20–25 jam penyimpanan. Sebaliknya, tomat yang disimpan pada suhu 17°C menunjukkan laju respirasi maksimum sekitar 29 ml/kg·jam, sedangkan pada suhu 7°C hanya mencapai sekitar 16 ml/kg·jam. Setelah melewati fase klimakterik, laju respirasi pada seluruh perlakuan mengalami penurunan hingga akhir penyimpanan, namun tomat yang disimpan pada suhu 27°C tetap memiliki laju respirasi yang lebih tinggi dibandingkan suhu lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu penyimpanan mempercepat aktivitas metabolisme dan respirasi tomat sehingga konsumsi substrat respirasi berlangsung lebih cepat [11].

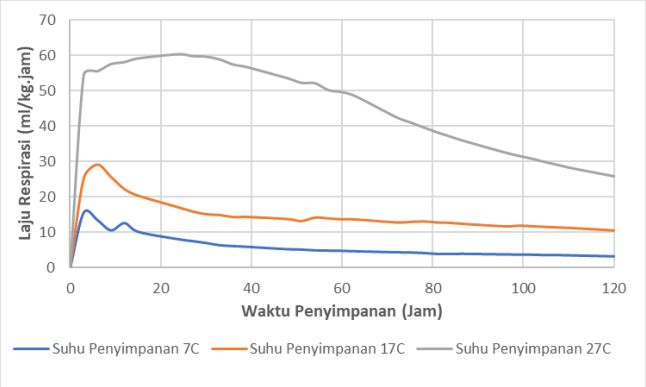


Gambar 5. Laju Respirasi Tomat pada Berbagai Suhu Penyimpanan

Peningkatan laju respirasi pada suhu yang lebih tinggi berkaitan erat dengan meningkatnya aktivitas enzim yang berperan dalam proses metabolisme pascapanen [12]. Kenaikan suhu penyimpanan akan mempercepat reaksi biokimia yang terlibat dalam respirasi dan pematangan, sehingga produksi CO_2 meningkat secara signifikan. Sebaliknya, penyimpanan pada suhu rendah mampu menekan aktivitas enzim respirasi dan memperlambat pemecahan cadangan substrat, sehingga laju respirasi menjadi lebih rendah [13]. Pada penelitian ini, laju respirasi tomat pada suhu 7°C cenderung stabil setelah fase awal penyimpanan dan mengalami penurunan secara perlahan hingga mencapai sekitar 3 ml/kg·jam pada akhir pengamatan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa suhu rendah efektif dalam memperlambat proses senesens dan mempertahankan kualitas produk lebih lama dibandingkan penyimpanan pada suhu 17°C maupun suhu ruang.

Laju Respirasi Mangga pada Berbagai Suhu Penyimpanan

Gambar 6. menunjukkan perubahan laju respirasi mangga selama penyimpanan selama 120 jam pada suhu 7°C, 17°C, dan 27°C. Secara umum, laju respirasi pada ketiga perlakuan menunjukkan pola respirasi klimakterik yang ditandai dengan peningkatan respirasi pada awal penyimpanan, mencapai puncak respirasi, kemudian menurun secara bertahap hingga akhir pengamatan. Perbedaan suhu penyimpanan memberikan pengaruh yang nyata terhadap besarnya laju respirasi yang dihasilkan. Mangga yang disimpan pada suhu 27°C memiliki laju respirasi tertinggi dengan nilai puncak sekitar 60 ml CO_2/kg·jam pada rentang 15–25 jam penyimpanan. Sementara itu, pada suhu 17°C laju respirasi maksimum hanya mencapai sekitar 29 ml CO_2/kg·jam, sedangkan pada suhu 7°C sekitar 16 ml CO_2/kg·jam. Setelah mencapai puncak klimakterik, laju respirasi pada seluruh perlakuan mengalami penurunan secara bertahap hingga akhir penyimpanan. Namun demikian, laju respirasi mangga pada suhu 27°C tetap lebih tinggi dibandingkan suhu 17°C dan 7°C sepanjang masa simpan.



Gambar 6. Laju Respirasi Mangga pada Berbagai Suhu Penyimpanan

Pola respirasi yang diperoleh pada penelitian ini sesuai dengan karakteristik mangga sebagai buah klimakterik yang mengalami peningkatan respirasi selama proses pematangan. Penelitian oleh Rahayu dkk. pada buah klimakterik, termasuk mangga, menunjukkan bahwa suhu penyimpanan merupakan faktor dominan yang memengaruhi laju respirasi [14]. Pada suhu yang lebih tinggi, aktivitas enzim respirasi meningkat sehingga konsumsi substrat dan produksi CO_2 berlangsung lebih cepat dibandingkan pada suhu rendah. Penelitian tersebut melaporkan bahwa laju respirasi mangga yang disimpan pada suhu 28°C secara konsisten lebih tinggi dibandingkan suhu 15°C dan 10°C, serta menunjukkan hubungan yang kuat antara suhu dan laju respirasi yang dapat dimodelkan menggunakan persamaan Arrhenius. Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian ini, di mana laju respirasi tertinggi diperoleh pada suhu 27°C, diikuti oleh suhu 17°C dan 7°C. Selain itu, Triardianto et al. (2026) menjelaskan bahwa laju respirasi produk klimaterik, meningkat seiring meningkatnya suhu penyimpanan dan ketersediaan oksigen, karena suhu berpengaruh langsung terhadap aktivitas metabolisme sel pascapanen [15].

4. Kesimpulan

Sistem monitoring laju respirasi yang dikembangkan menghasilkan nilai akurasi pengukuran konsentrasi gas CO_2 rata-rata sebesar 77,83%, nilai deviasi rata-rata sebesar 22,17%, MAE sebesar 0,271%, RMSE sebesar 0,314%, serta persamaan regresi linier $y = 1{,}2711x - 0{,}0375$ dengan koefisien determinasi

R^2 = 0,993. Sementara itu, sistem monitoring dapat mengukur laju respirasi pada produk segar tomat dan mangga, dimana hasil pengukuran menunjukan laju respirasi menurun seiring dengan menurunnya suhu penyimpanan, dimana suhu 7°C menghasilkan laju respirasi terendah, diikuti suhu 17°C dan suhu ruang (27°C).

5. Daftar Pustaka

[1] D. Triardianto and N. Bintoro, "The Effect of Gaseous Ozone Exposure and Storage Room Temperatures on Ethylene Production, Peel Colour, and Total Soluble Solid Content of Banana Fruit (Musa acuminata) During Storage," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 828, no. 1, Art. no. 012044, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/828/1/012044.

[2] D. M. Pharr and A. A. Kattan, "Effects of Air Flow Rate, Storage Temperature, and Harvest Maturity on Respiration and Ripening of Tomato Fruits," *Plant Physiology*, vol. 48, no. 1, pp. 53–55, 1971, doi: 10.1104/pp.48.1.53.

[3] R. Hasbullah, "Teknik Pengukuran Laju Respirasi Produk Hortikultura pada Kondisi Atmosfir Terkendali Bagian 2: Open System Method," Jurnal Keteknikan Pertanian, vol. 22, no. 1, pp. 1–8, 2008, doi: 10.19028/jtep.022.1.%25p.

[4] E. Collings, J. A. García Cas, J. O. Ortiz, and L. A. Terry, "A New Real-Time Automated Method for Measuring In Situ Respiration Rates of Fresh Produce," Acta Horticulturae, vol. 1012, pp. 1147–1154, 2013, doi: 10.17660/ActaHortic.2013.1012.155.

[5] A. Fatharani, N. Bintoro, and A. D. Saputro, "Pemodelan laju respirasi buah kolang-kaling (Arenga pinnata) pada penyimpanan modified atmospheric packaging (MAP)," AgriTECH, vol. 40, no. 2, pp. 124–132, 2020, doi: 10.22146/agritech.50247.

[6] N. Keshri, I. Truppel, W. B. Herppich, M. Geyer, and P. V. Mahajan, "In situ real-time measurement of respiration rate of fresh produce using a newly developed modular respirometer," Acta Horticulturae, vol. 1386, pp. 309–314, 2024, doi: 10.17660/ActaHortic.2024.1386.42.

[7] A. Lamberty and J. Kreyenschmidt, "Ambient Parameter Monitoring in Fresh Fruit and Vegetable Supply Chains Using Internet of Things-Enabled Sensor and Communication Technology," Foods, vol. 11, no. 12, p. 1777, 2022, doi: 10.3390/foods11121777.

[8] T. Araújo, L. Silva, A. Aguiar, and A. Moreira, "Calibration Assessment of Low-Cost Carbon Dioxide Sensors Using the Extremely Randomized Trees Algorithm," Sensors, vol. 23, no. 13, p. 6153, Jul. 2023, doi: 10.3390/s23136153.

[9] C. Wang, Y. Liu, and H. B. Rijal, "A Compensation Model for an NDIR-Based CO_2 Sensor and Its Energy Implication on Demand Control Ventilation in a Hot and Humid Climate," Energy and Buildings, vol. 281, p. 112738, 2023.

[10] M. V. Narayana, D. Jalihal, and S. Nagendra, "EEATC: A Novel Calibration Approach for Low-Cost Sensors," 2023. Available: arXiv:2308.13572.

[11] D. Wulandari and E. Ambarwati, "Laju Respirasi Buah Tomat (Lycopersicon esculentum Mill.) yang Dilapisi dengan Kitosan Selama Penyimpanan," Vegetalika, vol. 11, no. 2, pp. 135–150, 2022, doi: 10.22146/veg.53561.

[12] D. Triardianto and N. Bintoro, "The effect of different time durations of ozone treatment and storage temperatures on postharvest quality of banana (Musa acuminata)," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 759, no. 1, Art. no. 012012, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/759/1/012012

[13] C. A. Salingkat, A. Noviyanty, dan Syamsiar, "Pengaruh Jenis Bahan Pengemas, Suhu dan Lama Penyimpanan terhadap Karakteristik Mutu Buah Tomat," Agroland: Jurnal Ilmu-ilmu Pertanian, vol. 27, no. 3, pp. 289–298, 2020, doi: 10.22487/agrolandnasional.v27i3.606.

[14] D. Rahayu, N. Bintoro, and A. D. Saputro, "Pemodelan laju respirasi buah klimakterik selama penyimpanan pada suhu yang bervariasi," Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian, vol. 15, no. 1, pp. 80–91, 2021, doi: 10.21107/agrointek.v15i1.7625.

[15] D. Triardianto, Y. Subaktillah, A. S. A. I. Rosyadi, A. U. Choirun, and S. Widyaningtyas, "Respiration rate modeling of Cavendish banana (Musa acuminata cv. Cavendish) under various storage temperatures," BIO Web of Conferences, vol. 210, Art. no. 02010, 2026. doi: 10.1051/bioconf/202621002010.