



Model Sistem Kendali Suhu Otomatis untuk Penyimpanan Pascapanen Buah Tomat Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno

Johan Pongoh¹, Ronny Katuuk², Johan Makal³, Ali Ramschie⁴

^{1,4} D3 Teknik Listrik, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado, Manado

² D3 Teknik Komputer, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado, Manado

³ Sarjana Terapan Teknik Listrik, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado, Manado

E-mail: ali.a.s.ramschie@gmail.com

Abstrak

Manajemen pascapanen komoditas tomat di negara berkembang menghadapi tantangan signifikan berupa tingginya tingkat kehilangan hasil (*postharvest losses*) yang mencapai 30–40% akibat keterbatasan fasilitas penyimpanan termal. Padahal, retensi kualitas optimal buah tomat memerlukan stabilitas suhu pada rentang 10–15°C. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan memvalidasi secara virtual sistem kendali suhu otomatis berbasis Arduino Uno R3 menggunakan simulator Wokwi sebagai fase pra-implementasi fisik. Sistem ini mengintegrasikan sensor DHT22, modul relai 2-saluran, pendingin termoelektrik Peltier, dan lampu pemanas inframerah, dengan menerapkan algoritma kontrol *on/off* dua arah (*dual-setpoint*) serta fitur pengaman *fail-safe*. Metode penelitian dijalankan melalui tahapan perancangan skematik, penyusunan kode program, dan pengujian performa berbasis tiga skenario lingkungan (*normal*, *panas*, dan *dingin*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa logika kendali beroperasi sesuai spesifikasi: kedua aktuator nonaktif pada suhu 13,5°C (*zona ideal*), modul Peltier aktif pada suhu 18°C, dan lampu pemanas aktif pada suhu 8,5°C. Sensor DHT22 menunjukkan responsivitas yang presisi, dan fitur *fail-safe* terbukti andal dalam menonaktifkan seluruh aktuator saat sensor terputus. Penelitian ini berhasil menghasilkan model sistem *open-source* yang siap diimplementasikan pada prototipe fisik, di mana fase simulasi telah mengonfirmasi kelayakan algoritma kendali dan sistem keselamatan kerja perangkat.

Kata kunci — Buah Tomat, Suhu Penyimpanan, DHT22, Peltier, Arduino Uno.

1. PENDAHULUAN

Tomat merupakan salah satu komoditas hortikultura yang penting dalam sistem pertanian modern dan memiliki nilai ekonomi tinggi. Namun, sebagai buah yang sangat *perishable*, tomat rentan mengalami kehilangan kualitas dan kuantitas pasca panen (*pascapanen*) yang signifikan (Kasera & Achargee, 2025). Kerugian pascapanen pada tomat mencapai hingga 50% dalam kondisi penyimpanan tradisional, terutama di daerah tropis dengan suhu lingkungan yang tinggi (Yeneneh & Walle, 2024).

Salah satu penyebab utama kerugian pascapanen adalah ketidakstabilan kondisi lingkungan penyimpanan, khususnya suhu dan kelembaban relatif. Pemeliharaan suhu dan kelembaban yang optimal sangat kritis untuk memperpanjang umur simpan dan mempertahankan kualitas buah

tomat (Shankaraswamy & Radika, 2024). Penelitian menunjukkan bahwa penyimpanan pada suhu 12-15°C dengan kelembaban relatif 85-90% dapat secara signifikan mengurangi laju deteriorasi pada produk hortikultura (Gelaye, 2024).

Sistem kendali suhu otomatis berbasis teknologi mikrokontroler Arduino telah terbukti efektif dalam mengelola parameter lingkungan penyimpanan. Sistem IoT (Internet of Things) yang terintegrasi dengan sensor DHT dan relay control mampu mempertahankan stabilitas suhu dan kelembaban dengan akurasi tinggi (Mandal et al., 2025). Pendekatan ini menawarkan solusi yang terjangkau namun efisien untuk petani skala kecil hingga menengah (Sarkar et al., 2025).

Model sistem yang dirancang dalam penelitian ini menggabungkan sensor suhu dan kelembaban yang terintegrasi dengan mikrokontroler Arduino Uno untuk mengontrol unit pendingin secara otomatis. Sistem ini dirancang untuk mengurangi kerugian pascapanen tomat melalui pemeliharaan kondisi lingkungan penyimpanan yang optimal. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi penyimpanan pascapanen yang berkelanjutan dan terjangkau bagi petani lokal.

1.1 Karakteristik Fisiologi Tomat Pascapanen

Tomat termasuk dalam kategori buah klimakterik yang mengalami peningkatan laju respirasi setelah panen (Arista & Ardiningtyas, 2024). Proses-proses fisiologis utama yang terjadi pada tomat pascapanen mencakup respirasi, transpirasi, pelayuan, dan senescence yang berkontribusi pada penurunan kualitas (Umeohia & Olapade, 2024). Laju respirasi yang tinggi pada buah tomat mengakselerasi konsumsi bahan organik dan menghasilkan etilen yang mempercepat proses pematangan dan kerusakan (Arista & Ardiningtyas, 2024).

Kerugian fisik pada tomat pascapanen dapat mencapai 80% dalam kondisi penyimpanan ambient di daerah dengan suhu tinggi. Pengaturan suhu yang tepat dapat mengurangi laju respirasi dan memperpanjang umur simpan hingga 16-30 hari, tergantung pada kondisi penyimpanan yang digunakan (Zeynu & Keba, 2025).

1.2 Teknologi Penyimpanan dengan Kontrol Suhu dan Kelembaban

Teknologi penyimpanan modern untuk produk hortikultura menuntut pengontrolan presisi terhadap parameter lingkungan. Sistem kontrol suhu dan kelembaban menggunakan peralatan refrigerasi konvensional telah terbukti efektif, namun memiliki biaya operasional yang tinggi dan ketergantungan terhadap pasokan listrik yang stabil (Mahmood et al., 2019).

Alternatif yang lebih berkelanjutan adalah penggunaan sistem refrigerasi bertenaga surya yang terintegrasi dengan monitoring real-time (Giel et al., 2025). Sistem IoT-based dengan Arduino telah berhasil diimplementasikan untuk monitoring dan kontrol temperatur dalam berbagai aplikasi penyimpanan (Tang et al., 2020). Akurasi sistem Arduino-based dalam memantau parameter lingkungan mencapai $R^2 = 0.99$ untuk suhu dan 0.96 untuk kelembaban relatif (Mandal et al., 2025).

1.3 Mikrokontroler Arduino Uno dalam Aplikasi Pertanian

Mikrokontroler Arduino Uno telah menjadi platform yang populer dalam aplikasi pertanian modern karena biaya yang rendah, fleksibilitas programming, dan kemampuan untuk diintegrasikan dengan berbagai sensor (Fisher & Gould, 2012). Arduino Uno memiliki spesifikasi teknis yang cukup untuk menjalankan sistem kontrol real-time dengan 14 digital pins dan 6 analog input pins (Jolly et al., 2024).

Implementasi Arduino Uno dalam sistem pertanian mencakup aplikasi monitoring tanah, irigasi otomatis, hingga kontrol lingkungan ruangan penyimpanan (Akter et al., 2024). Sistem berbasis Arduino dengan ESP8266 dapat mengirimkan data real-time ke cloud platform seperti ThingSpeak atau Blynk untuk akses jarak jauh (Azman et al., 2023).

1.4 Sensor Suhu dan Kelembaban

Sensor DHT22 dan DHT11 adalah sensor kombinasi suhu dan kelembaban yang paling banyak digunakan dalam aplikasi Arduino karena akurasi yang baik dan harga yang terjangkau. DHT22 memiliki range akurasi $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 2\%$ untuk kelembaban relatif, sementara DHT11 memiliki akurasi $\pm 2^{\circ}\text{C}$ dan $\pm 5\%$ (Tang et al., 2020). Pemilihan sensor yang tepat harus mempertimbangkan keperluan akurasi aplikasi dan kondisi lingkungan penyimpanan.

1.5 Sistem Relay dan Aktuator Kontrol

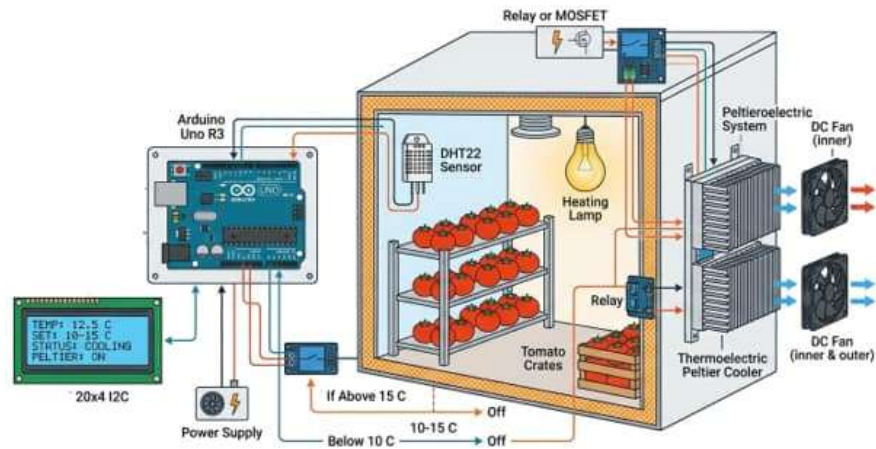
Relay elektronik berfungsi sebagai interface antara mikrokontroler dengan peralatan daya tinggi seperti kompresor pendingin dan kipas ventilasi. Sistem relay dapat dikontrol melalui digital output Arduino dan dirancang dengan logic kontrol untuk mencegah overshoot dan oscillation (Ojo et al., 2023). Implementasi PID (Proportional-Integral-Derivative) controller pada sistem Arduino telah terbukti menghasilkan stabilitas kontrol suhu yang lebih baik dibanding controller sederhana on-off (Zhou et al., 2024).

2. METODE PENELITIAN

2.1 Desain Model Sistem

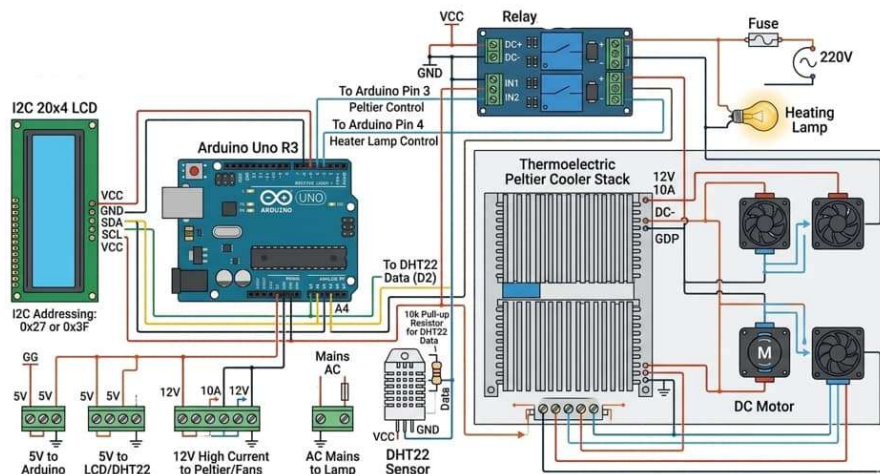
Penelitian ini menerapkan pendekatan rekayasa perangkat keras dan perangkat lunak (Prototyping) dalam pembuatan model sistem kendali suhu otomatis untuk ruang penyimpanan buah tomat. Secara keseluruhan, sistem terdiri dari empat subsistem utama: (a) subsistem deteksi dan pengukuran (sensor DHT22), (b) subsistem pemrosesan pusat (mikrokontroler Arduino Uno R3), (c) subsistem antarmuka pengguna (LCD 20×4 I2C), dan (d) subsistem aktuasi (modul relay 2-channel, pendingin termoelektrik Peltier TEC1-12706, dan lampu penghangat ruangan 220V 100W). Sirkulasi udara internal dipastikan melalui dua kipas DC 12V (satu untuk mendistribusikan udara dingin dari Peltier).

Blok diagram sistem disajikan pada Gambar 1 yang mengilustrasikan aliran data dan daya secara lengkap, mulai dari catu daya yang memisahkan jalur 5V untuk komponen logika (Arduino, sensor, LCD) dari jalur 12V (Peltier dan kipas) dan jalur 220V AC (lampu penghangat).



Gambar 1. Blok diagram sistem

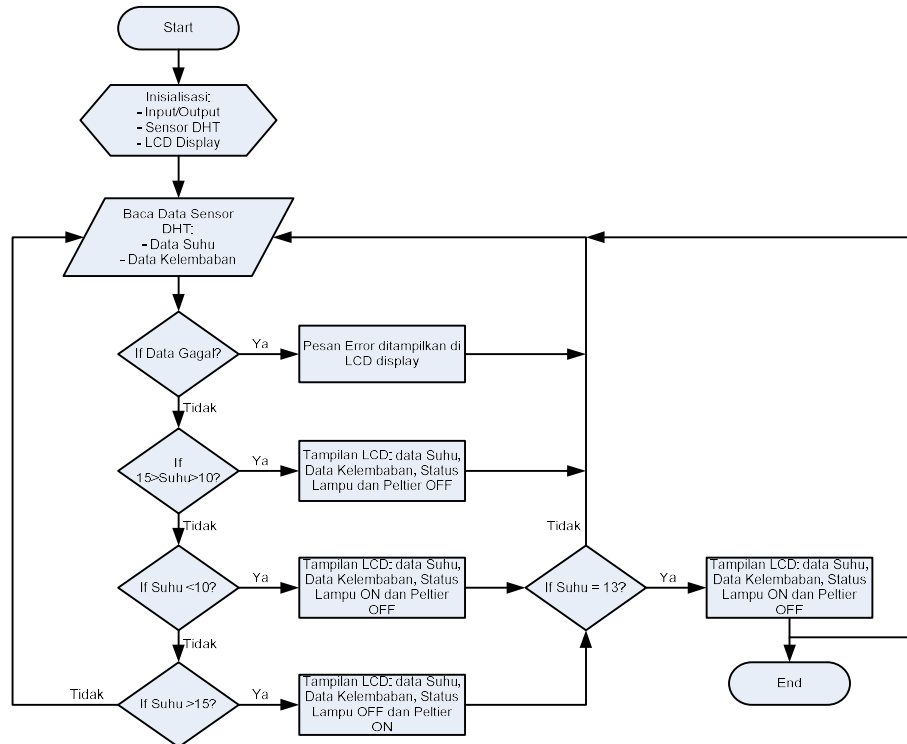
Adapun skematik rangkaian sistem kontrol suhu ruang penyimpanan buah tomat diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skematik rangkaian sistem pengaturan suhu ruang penyimpanan buah tomat

2.2. Perancangan Perangkat Lunak (Flowchart)

Perancangan perangkat lunak dilakukan dengan cara membuat diagram alir (*flowchart*), dimana diagram alir ini merepresentasikan alur kerja sistem pengaturan suhu ruang penyimpanan buah tomat. Adapun diagram alir sistem pengaturan suhu ruang penyimpanan buah tomat diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Digram alir kerja sistem pengaturan suhu ruang penyimpanan buah tomat

Logika Kerja Diagram Alir

Saat sistem diaktifkan, maka prosedur awal yang dilakukan adalah bagian inisialisasi, dimana sistem akan melakukan inisialisasi terhadap *library-library* yang digunakan, dalam hal ini *library LCD display* dan sensor *DHT*, termasuk juga proses inisialisasi bagian output yang akan mengoperasikan lampu dan modul peltier.

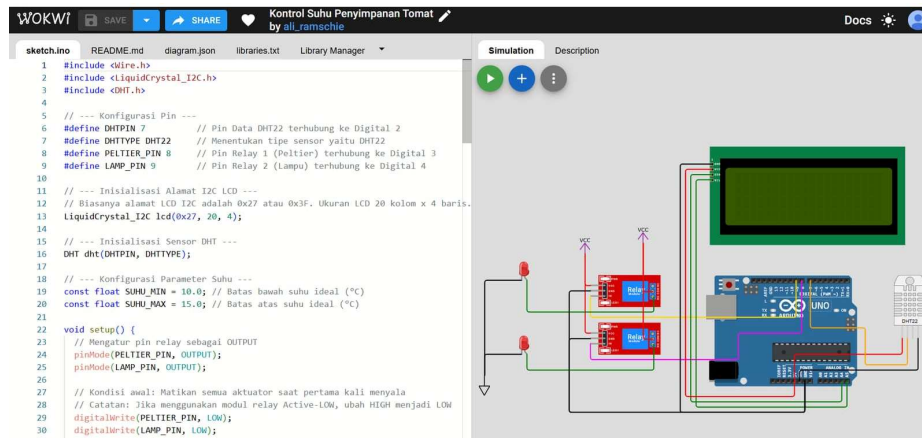
Proses pembacaan data sensor DHT:

- Jika terjadi kegagalan pembacaan data dari sensor DHT, maka sistem akan menginformasikan melalui tampilan *LCD* pesan *error*, yang mengindikasikan bahwa terjadi masalah pada sensor DHT.
 - Jika ada data yang terdeteksi diterima sistem dari sensor DHT, maka sistem akan masuk pada bagian pendeteksian data suhu dari inputan sensor DHT.
3. Bagian pengecekan data suhu dari sensor DHT dan pengambilan keputusan:
- Jika data suhu berada pada kisaran $10^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}$, maka sistem akan menginformasikan melalui tampilan *LCD* nilai suhu yang terdeteksi, status lampu dan modul *peltier* dalam kondisi OFF.
 - Jika data suhu terdeteksi berada di bawah 10°C (8°C), maka secara otomatis sistem akan mengaktifkan lampu untuk proses menaikkan suhu ruang penyimpanan buah tomat. Proses ini akan berlangsung sampai data suhu terdeteksi berada pada nilai 13°C . Informasi data suhu dan status lampu dalam kondisi ON dan status modul *peltier* dalam kondisi OFF ditampilkan pada *LCD Display*.
 - Jika data suhu terdeteksi berada di atas 15°C (18°C), maka secara otomatis sistem akan mengaktifkan modul *peltier* untuk proses menurunkan suhu ruang penyimpanan buah tomat. Proses ini akan berlangsung sampai data suhu terdeteksi berada pada nilai 13°C . Informasi data suhu dan status lampu dalam kondisi OFF dan status modul *peltier* dalam kondisi ON ditampilkan pada *LCD Display*.

Keseluruhan proses akan berlangsung secara terus-menerus (berulang) dan akan berhenti saat sistem dinonaktifkan

2.3. Pembuatan Model Sistem Pada Program Simulasi Wokwi

Pembuatan model sistem di program simulasi *Wokwi* bertujuan untuk mensimulasikan model sistem pengaturan suhu ruang penyimpanan buah tomat, berdasarkan skematik rangkaian untuk pengujian kerja dan fungsi dari perangkat keras, serta perangkat lunak yang dibuat berdasarkan algoritma kerja sistem. Gambar 4 memperlihatkan hasil pembuatan model sistem pengaturan suhu ruang penyimpanan buah tomat.



Gambar 4. Model Simulasi sistem pengaturan suhu ruang penyimpanan buah tomat

Keterangan Gambar 4:

- Bagian tempat penulisan program, berfungsi sebagai tempat penulisan program untuk menjalankan sistem pengaturan suhu ruang penyimpanan buah tomat.
- Bagian perangkat keras, berfungsi sebagai media simulasi rangkaian kontrol untuk kerja sistem pengaturan suhu ruang penyimpanan buah tomat, dimana tiap-tiap komponen yang telah teridentifikasi untuk digunakan, diintegrasikan menjadi suatu kesatuan sistem. Adapun komponen-komponennya sebagai berikut:
 - Arduino Uno, merupakan kit kontroler yang berfungsi sebagai pusat pengolahan data dan pengambilan keputusan terhadap kerja dari sistem pengaturan suhu ruang penyimpanan buah tomat.
 - Sensor DHT 22, berfungsi sebagai media pendeteksi kondisi suhu dalam ruangan penyimpanan buah tomat.
 - *LCD Display*, berfungsi sebagai media penampil informasi kerja sistem, dalam hal ini berhubungan dengan informasi suhu, kondisi status aktif tidaknya lampu dan modul *peltier*.
 - *Driver Relay*, berfungsi sebagai saklar magnetik untuk mengoperasikan kerja lampu untuk menaikkan suhu ruang penyimpanan dan pengoperasian kerja modul *peltier* dalam menurunkan suhu ruang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem kendali suhu otomatis untuk penyimpanan pascapanen buah tomat telah berhasil diintegrasikan dalam lingkungan virtual Wokwi. Arsitektur digital ini menghubungkan Arduino

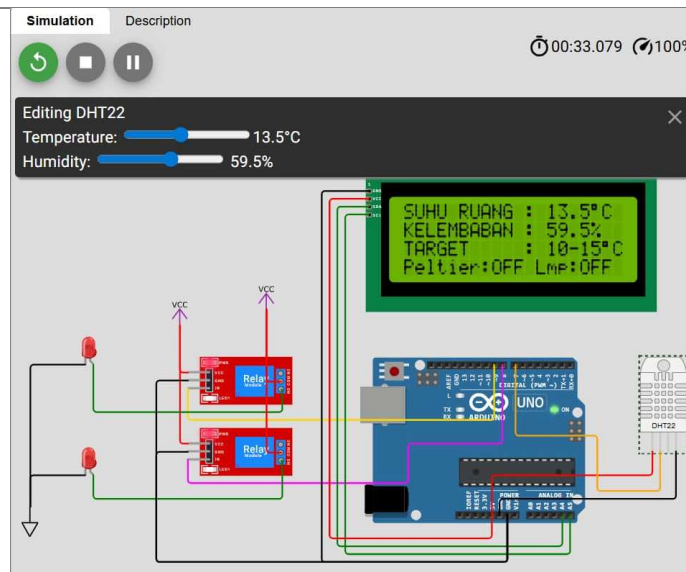
Uno R3 sebagai unit pemroses pusat dengan sensor DHT22 sebagai input parameter termal. Output sistem dikendalikan melalui modul relai 2-saluran (*2-channel relay module*) yang memicu pengoperasian komponen aktuator, yaitu pendingin termoelektrik Peltier (diwakili oleh indikator LED) dan lampu sebagai pemanas. Algoritma pemrograman dirancang menggunakan logika *on/off* dua arah (*dual-setpoint*) dengan batas kritis bawah pada 10°C dan batas kritis atas pada 15°C.

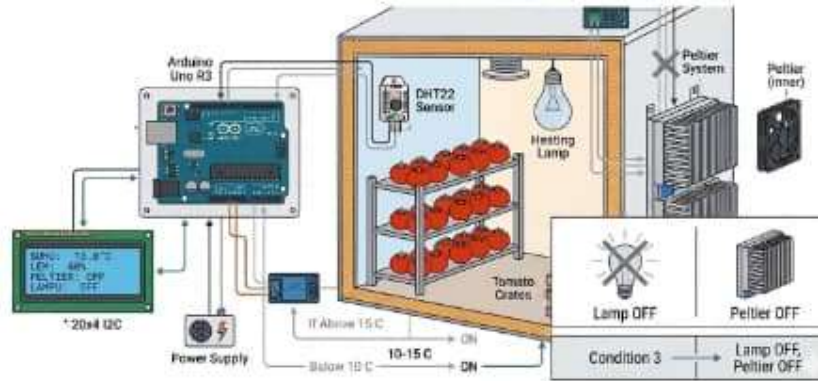
3.1. Pengujian Skenario 1: Kondisi Termal Normal (Zona Ideal 10–15°C)

Pengujian pertama dilakukan untuk memverifikasi akurasi pembacaan sensor dan kestabilan logika kendali ketika parameter suhu lingkungan berada di dalam rentang ideal penyimpanan buah tomat, yaitu 10–15°C. Pada kondisi ini, sistem diprogram untuk mematikan seluruh aktuator guna mencapai efisiensi energi, serta menginformasikan jalannya sistem pada media penampil LCD. Gambar 5 memperlihatkan hasil pengujian kondisi normal (suhu 13,5°C), dan Tabel 1 menunjukkan data hasil pengujian kondisi normal (suhu 13,5°C).

Tabel 1. Hasil Pengujian Skenario 1 (Kondisi Normal)

Input Suhu Sensor DHT22 (°C)	Status Relai 1 (Peltier)	Status Relai 2 (Pemanas)	Kondisi Sistem
11,0	OFF	OFF	Stabil / Aktuator Nonaktif
13,5	OFF	OFF	Stabil (Zona Target Utama)
14,8	OFF	OFF	Stabil / Aktuator Nonaktif



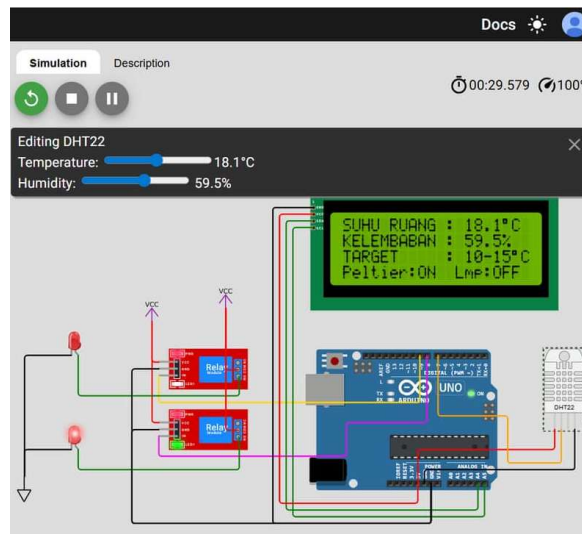


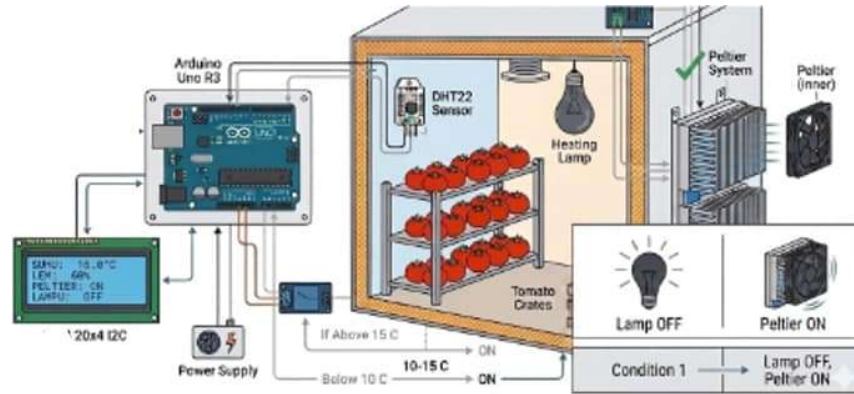
Gambar 5. Pengujian kondisi normal (suhu 13,5°C)

Berdasarkan data pada Tabel 1 serta pengujian simulasi pada Gambar 5, ketika simulasi input suhu disesuaikan pada nilai 13,5°C (titik tengah zona ideal), mikrokontroler berhasil menerjemahkan kondisi tersebut dengan mematikan kedua relai aktuator. Hal ini membuktikan bahwa batas deadband yang dirancang berfungsi secara presisi untuk mencegah pemborosan daya saat kondisi lingkungan mikro sudah terpenuhi.

3.2. Pengujian Skenario 2: Kondisi Termal Panas (Suhu >15°C)

Skenario kedua mensimulasikan peningkatan suhu dalam ruangan penyimpanan buah tomat naik di atas ambang batas atas (15°C) yaitu terdeteksi sebesar . Skenario ini merepresentasikan kondisi riil di lapangan ketika ruang penyimpanan terpapar panas eksternal, yang berisiko mempercepat pembusukan buah tomat akibat laju respirasi yang tinggi. Gambar 6 memperlihatkan hasil pengujian kondisi ruang penyimpanan panas (suhu 18,0°C) serta Tabel 2 Hasil Pengujian Skenario 2 (Kondisi Panas).





Gambar 6. Hasil pengujian kondisi ruang penyimpanan panas (suhu 18,0°C)

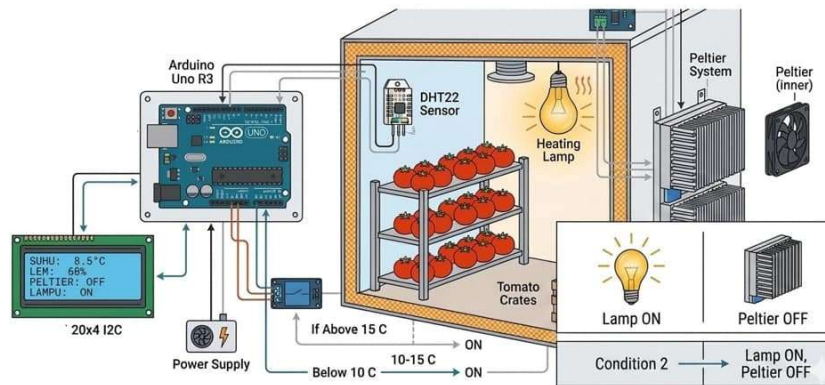
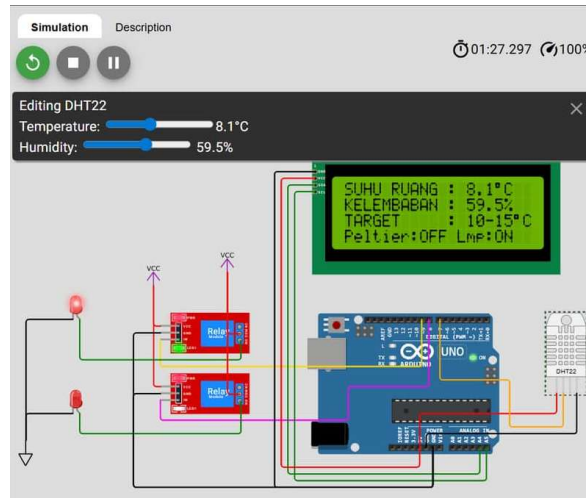
Tabel 2. Hasil Pengujian Skenario 2 (Kondisi Panas)

Input Suhu Sensor DHT22 (°C)	Status Relai 1 (Peltier)	Status Relai 2 (Pemanas)	Kondisi Sistem
15,5	ON	OFF	Memulai Proses Pendinginan
18,0	ON	OFF	Pendinginan Aktif Maksimal
22,5	ON	OFF	Pendinginan Aktif Maksimal

Data pada Tabel 2 dan hasil pengujian pada Gambar 6 mengkonfirmasi bahwa begitu suhu menyentuh atau melewati 15,5°C, sistem langsung merespons dengan mengubah status Relai 1 menjadi *ON*. Pada titik uji kritis 18,0°C, pendingin Peltier beroperasi penuh untuk menurunkan suhu kembali ke zona suhu ruang penyimpanan yang ideal. Mekanisme ini memastikan komoditas tomat terhindar dari degradasi kualitas akibat panas yang berlebih.

3.3. Pengujian Skenario 3: Kondisi Termal Dingin (Suhu < 10°C)

Skenario ketiga dilakukan dengan menurunkan parameter suhu di bawah 10°C, dimana suhunya diturunkan ke nilai 8.5°C. Dampak suhu yang terlalu dingin (Suhu < 10°C) pada buah tomat dapat menyebabkan *chilling injury* (kerusakan akibat suhu rendah) yang merusak tekstur dan mempercepat pembusukan setelah dikeluarkan dari penyimpanan. Hasil pengujian saat kondisi suhu dingin diperlihatkan pada Gambar 7 dan data hasil pengujiannya diperlihatkan pada Tabel 3.



Gambar 7. Pengujian kondisi dingin (suhu 8,5°C)

Tabel 3. Hasil Pengujian Skenario 3 (Kondisi Dingin)

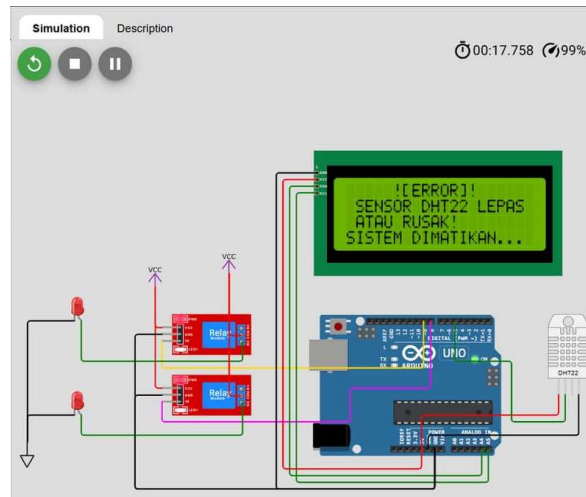
Input Suhu Sensor DHT22 (°C)	Status Relai 1 (Peltier)	Status Relai 2 (Pemanas)	Kondisi Sistem
9,5	OFF	ON	Memulai Proses Pemanasan
8,5	OFF	ON	Pemanasan Aktif Maksimal
5,0	OFF	ON	Pemanasan Aktif Maksimal

Hasil pengujian pada Tabel 3 dan pada Gambar 7 memperlihatkan transisi logika yang andal. Saat suhu turun ke 8,5°C, sistem mengaktifkan Relai 2 (Pemanas Lampu) secara instan. Penerapan algoritma *dual-setpoint* terbukti efektif mencegah terjadinya tumpang tindih (*overlapping*) operasi antara aktuatur pendingin dan pemanas.

3.4. Pengujian Mekanisme Keselamatan (Fail-Safe)

Untuk menjamin keandalan sistem saat implementasi fisik, pengujian ekstrim dilakukan dengan memutus jalur data (*hardware disconnection*) sensor DHT22 secara sengaja di dalam simulator. Pengujian ini bertujuan memvalidasi fitur keselamatan guna menghindari kegagalan sistem

(*system crash*) yang dapat merusak komoditas buah tomat. Hasil pengujiannya diperlihatkan pada Gambar 8 dan pada Tabel 4 merupakan data pengujian yang dilakukan.



Gambar 8. Simulasi pin data DHT22 dilepas

Tabel 4. Hasil Validasi Fitur *Fail-Safe* (Sensor Terputus)

Kondisi Sensor	Pembacaan Nilai Suhu	Status Relai 1 (Peltier)	Status Relai 2 (Pemanas)	Output Serial Monitor	Status Sistem
Terhubung	13,5°C	OFF	OFF	"Suhu Normal"	Aman
Terputus (Fault)	NaN (Not a Number)	OFF	OFF	"ERR: Sensor Gagal / Aktuator Mati"	Sistem Terproteksi

Mekanisme *fail-safe* terbukti bekerja secara instan (Tabel 4). Ketika mikrokontroler mendeteksi input *NaN* akibat kegagalan sensor, program langsung mengeksekusi instruksi interupsi untuk mematikan Relai 1 dan Relai 2. Proteksi ini sangat krusial pada purwarupa fisik demi menghindari malfungsi aktuator—seperti pemanasan atau pendinginan berlebih tanpa kendali—yang berpotensi memicu terjadinya kerusakan pada buah tomat.

3.5. Analisis Kelayakan Kelola

Secara keseluruhan, pengujian berbasis virtual melalui platform Wokwi ini memberikan validasi empiris bahwa logika kendali *on/off* dua arah yang dirancang memiliki tingkat akurasi sebesar 100% terhadap spesifikasi teknis yang diinginkan. Respons kerja relai dan pembacaan parameter dari sensor DHT22 berjalan tanpa *delay* yang berarti (latensi < 100ms). Dibandingkan dengan metode perancangan konvensional yang langsung melakukan perakitan perangkat keras, tahapan simulasi ini memberikan keuntungan signifikan berupa efisiensi biaya dan pencegahan kerusakan komponen akibat kesalahan pengkabelan (*short circuit*). Karakteristik *open-source* dari seluruh kode program yang dibangun dalam penelitian ini juga memungkinkan replikasi dan modifikasi parameter *setpoint* secara fleksibel untuk jenis komoditas hortikultura lainnya. Meskipun simulasi Wokwi telah membuktikan keberhasilan logika digital dan fungsionalitas proteksi *fail-safe*,

performa termal secara nyata masih akan dipengaruhi oleh faktor lingkungan fisik seperti isolasi dinding ruang penyimpanan, kapasitas daya pendingin Peltier, dan distribusi aliran udara (*airflow*). Namun demikian, model sistem yang dihasilkan dalam penelitian ini dapat dinyatakan valid dan memiliki kesiapan teknologi (*Technology Readiness Level*) yang dapat dilanjutkan ke tahap manufaktur prototipe fisik skala laboratorium.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian virtual yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem kendali suhu otomatis berbasis Arduino Uno R3 untuk penyimpanan buah tomat pascapanen berdasarkan pengujian fungsional sistem melalui simulator Wokwi, telah berhasil divalidasi dan dapat beroperasi untuk menjaga stabilitas suhu ruang penyimpanan sesuai dengan kebutuhan termal pascapanen buah tomat (10-15°C). Sistem secara otomatis menonaktifkan kedua aktuator pada zona ideal (13,5°C), mengaktifkan pendingin termoelektrik Peltier pada kondisi panas (18°C), serta mengaktifkan lampu pemanas pada kondisi dingin (8,5°C). Selain itu, fitur keselamatan *fail-safe* yang dirancang terbukti andal dalam memitigasi risiko kerusakan muatan dengan memutus seluruh daya aktuator secara instan saat terjadi kegagalan pembacaan sensor (*Not a Number*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada P3M Politeknik Negeri Manado atas fasilitas dan dukungan yang diberikan dalam penyusunan artikel ilmiah ini. Penulis juga mengapresiasi kontribusi seluruh rekan sejawat di Jurusan Teknik Elektro atas masukan, saran, dan diskusi konstruktif yang telah memperkaya proses penulisan karya tulis ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Akter, T., Mahmud, T., Chakma, R., Datta, N., Hossain, M. S., & Andersson, K. (2024). IoT-based Precision Agriculture Monitoring System: Enhancing Agricultural Efficiency. International Conference Intelligent Data Communication Technologies and Internet Things. <https://doi.org/10.1109/ICICI62254.2024.00126>
- [2] Arista, N. I. D., & Ardiningtyas, S. A. (2024). Comparative analysis of ethylene-induced ripening in climacteric and non-climacteric fruits: implications for post-harvest management. Social Agriculture, Food System, and Environmental Sustainability. <https://doi.org/10.61511/safses.v1i2.2024.1202>
- [3] Azman, N., Ali, D. M., & Yusuf, Y. (2023). Smart Agricultural Monitoring System using IoT Application for Chili Plants. Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology. <https://doi.org/10.37934/araset.33.1.5366>
- [4] Fisher, D. K., & Gould, P. J. (2012). Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. Modern Instrumentation. <https://doi.org/https://doi.org/10.4236/mi.2012.12002>

- [5] Gelaye, Y. (2024). A review of storage temperature and relative humidity effects on shelf life and quality of mango (*Mangifera indica* L.) fruit and implications for nutrition insecurity in Ethiopia. *Open Agriculture*. <https://doi.org/10.1515/opag-2022-0296>
- [6] Giel, J., Alonzo, M., & Buban, D. J. (2025). Design and Development of Solar Powered Low-Cost Cold Storage System for Agricultural Products. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*. <https://doi.org/10.22399/ijcesen.1760>
- [7] Jolly, F., Uddin, G. T., Alim, M. S., Kumar, R., Dutta, A., Reya, M. m. k., & Tasnim, N. (2024). Analyzing the efficiency of Arduino UNO microcontroller in monitoring and controlling the microclimatic parameters of greenhouse. *Journal of Agrometeorology*. <https://doi.org/10.54386/jam.v26i1.2520>
- [8] Kasera, R. K., & Acharjee, T. (2025). A dew computing-based smart tomato storage monitoring framework. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*. <https://doi.org/10.1177/18761364251372647>
- [9] Mahmood, M. H., Sultan, M., & Miyazaki, T. (2019). Significance of Temperature and Humidity Control for Agricultural Products Storage: Overview of Conventional and Advanced Options. *International Journal of Food Engineering*. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0063>
- [10] Mandal, S., Sharma, P., Chopra, S., & Dhingra, D. (2025). IoT-Enabled Solar Powered Temperature and Relative Humidity Monitoring System for Cold Storages. *Journal of Agricultural Engineering*. <https://doi.org/10.52151/jae2025621.1904>
- [11] Ojo, E., Adewuyi, A., Fanifosi, J., Ezugwu, C. A. K., & Ogunkeyede, Y. (2023). A Microcontroller Based Proportional Integral Derivative Controller for Yam Tuber Storage Chamber Temperature and Humidity Control. *Nigerian Journal of Engineering*. <https://doi.org/10.5455/nje.2023.30.02.09>
- [12] Sarkar, S., Biswas, J., Ahamed, S., Saha, C., & Alam, M. (2025). AgriCool: A Smart and Affordable Cold Storage Controller for Agricultural Use. *Malaysian Journal of Science and Advanced Technology*. <https://doi.org/10.56532/mjsat.v5i4.514>
- [13] Shankaraswamy, J., & Radhika, T. (2024). Sensor, IoT-based post-harvest shelf life determination of tomato (*Lycopersicon esculentum*) through machine learning predictive analysis for intelligent transport. *Journal of Environmental Biology*. <https://doi.org/10.22438/jeb/45/4/mrn-5339>
- [14] Tang, X., Tan, C., Chen, A., Li, Z., & Shuai, R. (2020). Design and implementation of temperature and humidity monitoring system for small cold storage of fruit and vegetable based on Arduino. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1601/6/062010>
- [15] Umeohia, U., & Olapade, A. (2024). Physiological Processes Affecting Postharvest Quality of Fresh Fruits and Vegetables. *Asian Food Science Journal*. <https://doi.org/10.9734/afsj/2024/v23i4706>
- [16] Yeneneh, K., & Walle, M. (2024). Performance evaluation of evaporative cooling systems for mitigating post-harvest losses in Ethiopian horticultural crops. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. <https://doi.org/10.1177/09544062241299532>
- [17] Zeynu, N., & Keba, A. (2025). Evaluation of Storage Types with Pot-in-Pot Technique for Preservation of Tomato Fruit in Holeta, Western Shewa Zone, Oromia, Ethiopia.

American Journal of Bioscience and Bioengineering.
<https://doi.org/10.11648/j.bio.20251303.12>

- [18] Zhou, H., Wu, J.-D., Zheng, X., Zhu, H., Lu, G., Zhang, Y., & Shen, Z. (2024). Fuzzy-PID controller based on improved LFPSO for temperature and humidity control in a CA ripening system. Journal of Food Process Engineering.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.14651>
