



Research Articles

Rancang Bangun Sistem Pendingin Air Nutrisi Berbasis Peltier untuk Optimasi Pertumbuhan Tanaman Hidroponik

Design and Development of a Peltier-Based Nutrient Water Cooling System for Optimizing Hydroponic Plant Growth

Oki Saputra^{*}, Sirajuddin H. Abdullah, Joko Sumarsono, Asih Priyati, Gagassage Nanaluh de Side, Guyup Mahardhian Dwi Putra, Diah Ajeng Setiawati, Wenny Amaliah, Endang Purnama Dewi, Reza Kusuma Nurrohman, Muhammad Ilham Zamzami, Nurwan Sani

Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri, Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, INDONESIA.

**corresponding author, email: okisaputrakerinci@gmail.com*

Manuscript received: 10-04-2025. Accepted: 16-06-2025

ABSTRAK

Suhu lingkungan yang tinggi di dalam greenhouse wilayah tropis dapat menyebabkan suhu air nutrisi pada sistem hidroponik vertikal meningkat secara signifikan, sehingga mengganggu efisiensi penyerapan hara dan menurunkan produktivitas tanaman. Penelitian ini berfokus pada rancang bangun sistem pendingin air nutrisi (chiller) berbasis dua modul termoelektrik tipe TEC1-12706 (Peltier) yang dirangkai secara seri untuk meningkatkan efisiensi proses pelepasan panas. Air nutrisi disirkulasikan dari bak utama ke tabung pendingin menggunakan pompa DC 12 V dan dialirkan kembali ke sistem dalam konfigurasi tertutup. Sistem pendingin ini dikendalikan secara otomatis oleh dua timer digital DH48S yang bekerja bersamaan: satu mengaktifkan Peltier 1, sementara timer lainnya mengatur Peltier 2 melalui jalur NC (aktif 5 menit) dan pompa melalui jalur NO (aktif 30 detik), sehingga sirkulasi dan pendinginan berlangsung bergantian secara terprogram. Seluruh sistem chiller hanya diaktifkan pada pukul 08.00–18.00 WITA menggunakan pengatur waktu KG316T, menyesuaikan dengan periode suhu ekstrem dalam greenhouse. Hasil pengujian menunjukkan bahwa meskipun suhu udara di dalam greenhouse mencapai 39,4 °C dan kelembapan turun hingga 47,6%, sistem chiller mampu mempertahankan suhu air nutrisi stabil di kisaran 27–30 °C. Rancang bangun ini terbukti efektif dalam menurunkan dan menstabilkan suhu larutan nutrisi pada lingkungan mikro bersuhu tinggi. Dengan desain sederhana, otomatis, dan hemat energi, sistem pendingin ini sangat potensial diterapkan dalam sistem hidroponik vertikal rumah tangga dan urban farming berbasis greenhouse di daerah tropis.

Kata kunci: sistem pendingin; chiller nutrisi; TEC1-12706; hidroponik vertikal; greenhouse; kontrol timer; peltier

ABSTRACT

High ambient temperatures inside tropical greenhouses can significantly raise nutrient solution temperatures in vertical hydroponic systems, disrupting nutrient uptake and reducing plant productivity. This study focuses on the design and development of a nutrient cooling system (chiller) using two TEC1-12706 thermoelectric modules (Peltier) arranged in series to enhance heat dissipation performance. The nutrient solution is pumped from the reservoir to the cooling chamber using a 12 V DC pump and recirculated in a closed-loop configuration. The chiller system is fully automated, controlled by two DH48S digital timers operating simultaneously: one activates Peltier 1, while the other controls Peltier 2 via the NC output (5 minutes) and the pump via the NO output (30 seconds), enabling alternating programmed cooling and circulation. The entire chiller unit is active only from 08:00 to 18:00 WITA using a KG316T programmable timer, corresponding to peak thermal stress hours inside the greenhouse. Results showed that despite greenhouse temperatures reaching up to 39.4 °C with relative humidity dropping to 47.6%, the chiller system maintained nutrient solution temperatures within the optimal 27–30 °C range. This design proved effective in reducing and stabilizing nutrient temperature under high heat microclimates. With its simple, automated, and energy-efficient architecture, the chiller system offers a promising solution for small-scale vertical hydroponics and greenhouse-based urban farming in tropical regions.

Key words: cooling system; nutrient chiller; TEC1-12706; vertical hydroponics; greenhouse; timer control; Peltier module.

PENDAHULUAN

Pertanian modern saat ini menghadapi tantangan besar dalam menghadirkan sistem budidaya tanaman yang efisien, berkelanjutan, dan adaptif terhadap perubahan iklim ekstrem. Sistem hidroponik vertikal, yang mengedepankan efisiensi lahan dan air, menjadi salah satu solusi unggulan, khususnya di kawasan urban dan tropis. Namun, keterbatasan dalam mengatur suhu larutan nutrisi, terutama di lingkungan bersuhu tinggi seperti dalam greenhouse, masih menjadi kendala utama yang berpengaruh langsung terhadap kesehatan zona perakaran dan pertumbuhan tanaman.

Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa suhu air atau larutan nutrisi yang tinggi dapat menurunkan konsentrasi oksigen terlarut, menghambat penyerapan unsur hara oleh akar, dan menyebabkan stres fisiologis pada tanaman. Kondisi ini pada akhirnya berdampak negatif terhadap biomassa, produktivitas, dan hasil panen. Suhu larutan yang optimal mampu mendukung metabolisme tanaman, mengaktifkan ekspresi gen pertumbuhan, serta menjaga kestabilan sistem fotosintesis (Cortella et al., 2014; Thakulla et al., 2021).

Dalam konteks pengelolaan suhu nutrisi, pendekatan berbasis sistem pendingin aktif menjadi perhatian banyak peneliti. Teknologi pendingin air berbasis modul termoelektrik TEC1-12706 (Peltier) dinilai sebagai solusi praktis dan hemat energi yang cocok digunakan di skala kecil maupun rumah tangga. Sistem ini bekerja dengan prinsip perpindahan panas langsung dan dapat dirancang modular sesuai kebutuhan. Penggunaan dua modul Peltier secara seri dapat meningkatkan efisiensi pendinginan, seperti yang juga dibuktikan oleh (Ayob et al., 2022) dalam studi tentang sistem pendingin hidroponik berbasis IoT.

Selain itu, sistem kontrol otomatis dengan pemrograman waktu kerja Peltier dan pompa air juga turut meningkatkan efisiensi operasional pendinginan. Dalam pengaturan yang digunakan dalam penelitian ini, dua timer DH48S mengatur siklus kerja Peltier dan pompa air secara bersamaan, di mana satu timer mengendalikan Peltier pertama, dan timer lainnya

mengatur siklus aktif Peltier kedua serta pompa sirkulasi dengan pengaturan waktu 5 menit aktif untuk pendingin dan 30 detik untuk pompa. Timer ini hanya bekerja selama periode suhu ekstrim (08:00–18:00 WITA), yang dikendalikan menggunakan timer harian KG316T.

Rancang bangun sistem ini sangat relevan untuk diterapkan di lokasi bersuhu tinggi. Dalam studi oleh (Fordyce et al., 2023), disimpulkan bahwa pengendalian mikroklimat di akar memiliki efek besar terhadap efisiensi penggunaan air dan fotosintesis tanaman. Sementara itu, beberapa penelitian menekankan bahwa pengelolaan suhu perakaran yang terkontrol dapat menstimulasi pertumbuhan akar lateral dan mengurangi stres lingkungan (Hikashi et al., n.d.; Pasos-Panqueva et al., 2024; Tan et al., 2002).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem chiller air nutrisi berbasis dua modul TEC1-12706 dalam sistem hidroponik vertikal di lingkungan tropis. Evaluasi dilakukan terhadap efektivitas sistem dalam menurunkan suhu air nutrisi serta stabilitas suhu dan kelembapan lingkungan selama waktu operasional. Diharapkan sistem ini dapat menjadi solusi teknis yang terjangkau, efisien, dan adaptif untuk budidaya tanaman di iklim panas serta memperkuat praktik pertanian presisi berkelanjutan.

BAHAN DAN METODE

Waktu, Kondisi, dan Tempat Percobaan

Penelitian ini merupakan percobaan eksperimental yang dilakukan pada sistem hidroponik vertikal di greenhouse yang terletak di Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia, pada koordinat 8°34'47.19" LS dan 116°05'47.91" BT, dengan ketinggian lokasi sekitar 16 meter di atas permukaan laut. Penelitian dilaksanakan pada bulan Juni 2025, saat suhu lingkungan pada siang hari mencapai kondisi ekstrem, berkisar antara 35 °C hingga 39 °C, dengan kelembapan udara antara 48% hingga 78%. Lokasi ini dipilih karena merepresentasikan tantangan suhu tinggi yang umum terjadi di kawasan tropis dan berpotensi memengaruhi suhu air nutrisi dalam sistem hidroponik.

Bahan dan Peralatan

Sistem ini menggunakan larutan nutrisi hidroponik AB Mix dan air bersih yang difiltrasi. Pendinginan air nutrisi dilakukan dengan dua buah modul termoelektrik Peltier TEC1-12706, yang dirancang sebagai sistem pendingin (chiller) berbasis seri. Air nutrisi dipompa secara sirkulatif dari box nutrisi menuju box chiller dan kembali lagi. Baik box nutrisi maupun box chiller dibuat dari bahan styrofoam untuk mempertahankan suhu dan meminimalkan kehilangan panas akibat konduksi dari lingkungan sekitar.

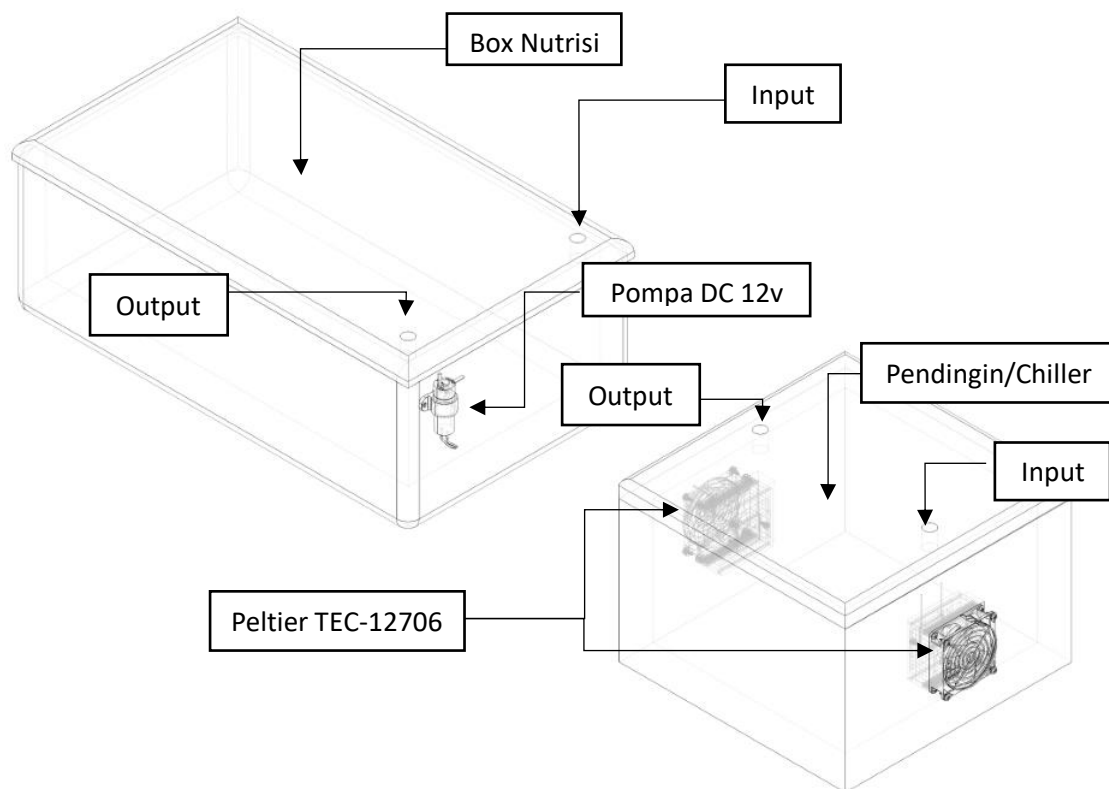
Komponen yang digunakan dalam sistem pendinginan meliputi:

1. 2 unit modul Peltier TEC1-12706 terpasang pada dinding tabung aluminium di dalam box chiller.
2. Pompa DC 12V, untuk mengalirkan air dari box nutrisi ke box chiller.
3. 2 unit Timer Digital DH48S-S: satu mengendalikan Peltier 1, dan satu lagi mengatur siklus kerja Peltier 2 (kontak NC) dan pompa (kontak NO) secara bergantian.
4. 1 unit Timer harian KG316T yang membatasi operasional kedua timer hanya pada pukul 08.00 hingga 18.00 WITA.

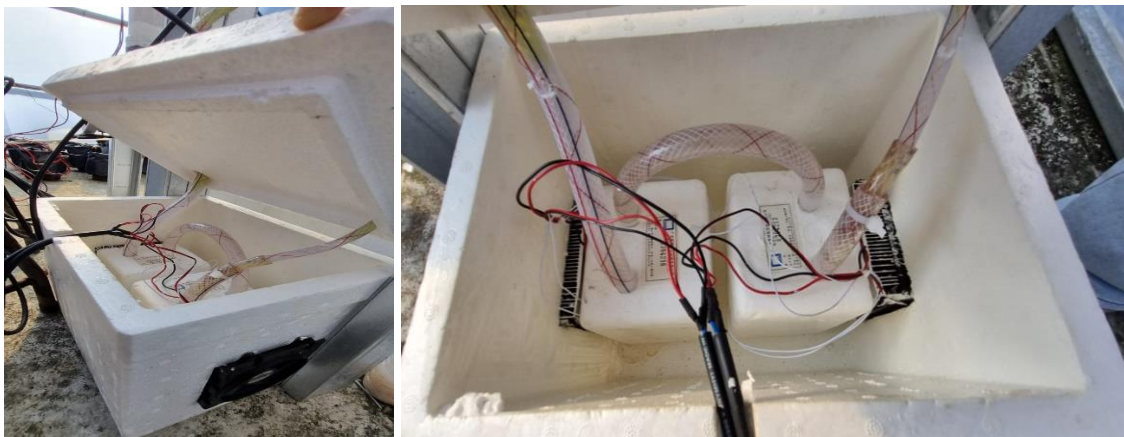
5. Heatsink dan kipas pendingin tambahan untuk meningkatkan efisiensi pelepasan panas dari sisi panas modul Peltier.
6. Sensor suhu air (DS18B20), suhu udara dan kelembapan (DHT22), serta luxmeter (DFRobot SEN0390).

Rancang Bangun Sistem Pendingin (Chiller)

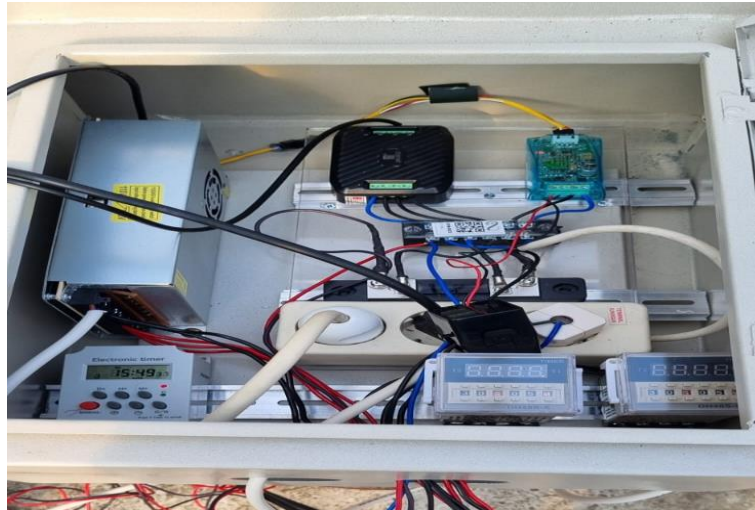
Sistem pendingin (chiller) dirancang untuk menurunkan suhu air nutrisi secara sirkulatif. Air dari box nutrisi dipompa ke tabung chiller dengan dua tahap pendinginan secara berurutan (seri) oleh dua modul Peltier.



Gambar 1 Desain sistem pendingin air nutrisi(chiller) hidroponik vertical



Gambar 2 Chiller hidroponik dengan dua pendingin peltier TEC-12706



Gambar 3 Sistem kontrol pendingin air nutrisi hidroponik vertical

Prinsip Kerja Sistem

- Peltier 1 menyala terus-menerus selama 5 menit (kontrol DH48S pertama)
- Peltier 2 dan Pompa DC dikendalikan oleh DH48S kedua, dengan pengaturan:
 - Kontak NC: Peltier 2 menyala selama 5 menit
 - Kontak NO: Pompa menyala selama 30 detik, menyirkulasikan air

Timer harian KG316T mengaktifkan siklus pendinginan hanya dari pukul 08.00–18.00 WITA.

Parameter yang Diamati

1. Suhu air nutrisi (T_{air}) dalam $^{\circ}\text{C}$
2. Suhu udara (T_{udara}) dan kelembapan (RH) dalam %
3. Intensitas cahaya (Lux)

Rumus dan Analisis

Evaluasi performa sistem pendingin (*chiller*) dilakukan melalui analisis perbedaan suhu air nutrisi terhadap suhu udara lingkungan, dengan mempertimbangkan kelembapan dan intensitas cahaya sebagai variabel pengganggu (*confounding variables*).

1. Efektivitas Pendinginan Berdasarkan Selisih Suhu (ΔT)

Efektivitas sistem pendingin dapat dihitung menggunakan rumus selisih suhu rata-rata:

$$\Delta T = T_{\text{udara rata-rata}} - T_{\text{air nutrisi rata-rata}}$$

Rumus ini digunakan dalam studi pengendalian suhu air nutrisi untuk sistem hidroponik oleh (Ayob et al., 2022), yang menyatakan bahwa ΔT yang besar menunjukkan efisiensi pendinginan tinggi dalam kondisi lingkungan ekstrem.

2. Efektivitas Relatif Terhadap Lingkungan

Untuk melihat seberapa besar pengaruh lingkungan terhadap performa chiller, digunakan pendekatan efektivitas relatif:

$$Efektivitas_{\text{relatif}} = \frac{\Delta T}{I_{\text{lux}} * RH}$$

Dimana:

- I_{lux} : intensitas cahaya dalam satuan lux
- RH : kelembapan udara dalam persen
- ΔT : selisih suhu antara udara dan air nutrisi

Rumus ini merupakan bentuk modifikasi dari pendekatan korelasi antara suhu lingkungan dan performa sistem pendinginan berbasis Peltier yang juga digunakan dalam studi *Energy Conversion and Management* (Sarbu & Dorca, 2018) pada konteks penyejuk ruangan berbasis TEC.

Pengumpulan dan Analisis Data

Data direkam setiap 5 menit selama waktu operasi (08:00–18:00). Data dianalisis secara deskriptif menggunakan:

- Grafik suhu air vs. suhu lingkungan vs. waktu
- Rata-rata, standar deviasi, dan tren suhu
- Evaluasi efektivitas berdasarkan efisiensi pendinginan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Efektivitas Termal Sistem Pendingin (Chiller) terhadap Suhu Air Nutrisi

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pendingin air nutrisi berbasis teknologi Thermoelectric Cooler (TEC) Peltier yang dirancang dan diimplementasikan dalam sistem hidroponik vertikal mampu menurunkan suhu air secara signifikan dibandingkan dengan suhu udara lingkungan greenhouse. Selama durasi pengamatan dari pukul 10:59 hingga 17:55 WITA, suhu rata-rata air nutrisi tercatat sebesar 28,64 °C, sementara suhu lingkungan rata-rata mencapai 35,25 °C. Hal ini menghasilkan selisih suhu rata-rata (ΔT) sebesar 6,61 °C. Selisih ini menjadi indikator bahwa sistem pendingin yang digunakan memiliki performa yang cukup efektif dalam menjaga kestabilan suhu air nutrisi di tengah suhu udara yang tinggi, yang sangat umum terjadi pada greenhouse dengan kondisi iklim tropis seperti di Mataram, Nusa Tenggara Barat.

Dalam konteks agronomi dan fisiologi tanaman, suhu air nutrisi yang optimal sangat penting, terutama dalam sistem hidroponik yang sangat bergantung pada efisiensi zona akar dalam menyerap air dan nutrisi. Dari beberapa penelitian menyatakan bahwa zona akar yang terpapar suhu tinggi dapat mengalami stres termal, menurunkan respirasi akar, dan mengganggu proses penyerapan unsur hara (Kawasaki et al., 2014; Tan et al., 2002). Penurunan efisiensi penyerapan nutrisi ini dapat berdampak langsung pada pertumbuhan biomassa tanaman. Dengan mempertahankan suhu air nutrisi pada kisaran di bawah 30 °C, sistem chiller yang digunakan dalam penelitian ini berhasil menekan risiko stres termal dan mendukung stabilitas fisiologi tanaman.

Tabel 1. Rata-rata dan Selisih Suhu

Parameter	Nilai Rata-rata (°C)
Suhu Lingkungan	35,25
Suhu Air Nutrisi	28,64
ΔT (Selisih Suhu)	6,61

2. Karakteristik Dinamis Suhu dan Kinerja Pendinginan

Data dianalisis secara deskriptif menggunakan grafik suhu air vs. suhu lingkungan terhadap waktu, dengan tambahan penghitungan rata-rata, standar deviasi, dan tren suhu harian. Visualisasi grafik suhu (Gambar 4) menunjukkan bahwa suhu lingkungan mengalami fluktuasi cukup signifikan sepanjang hari, dengan puncak suhu mencapai lebih dari 39 °C pada sekitar pukul 13:00 hingga 14:00 WITA. Sebaliknya, suhu air nutrisi cenderung meningkat secara bertahap dan tidak mengikuti fluktuasi ekstrem yang terjadi pada suhu udara. Stabilitas ini menandakan bahwa sistem pendingin memiliki respons termal yang baik dalam menghadapi beban panas yang terus meningkat pada siang hari.

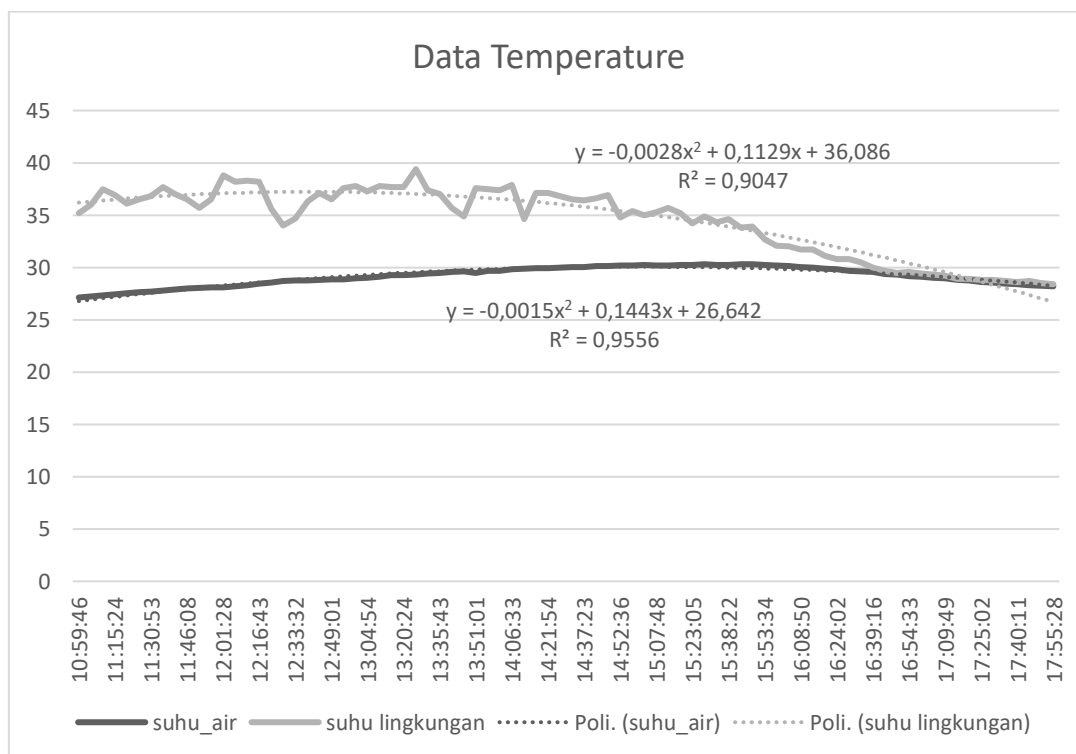
Kurva suhu air dan suhu lingkungan kemudian dimodelkan dengan regresi polinomial derajat dua. Model suhu air dituliskan sebagai:

$$y = -0,0015x^2 + 0,1443x + 26,642$$

Sedangkan model suhu lingkungan:

$$y = -0,0028x^2 + 0,1129x + 36,086$$

Kedua model ini memiliki koefisien determinasi tinggi, masing-masing sebesar $R^2 = 0,9556$ dan $R^2 = 0,9047$. Hal ini menunjukkan bahwa pola perubahan suhu baik pada air nutrisi maupun udara lingkungan dapat dijelaskan secara statistik dengan baik menggunakan model kuadratik. Kecenderungan pola ini mengindikasikan bahwa suhu air mengalami perubahan secara terkendali, dan puncak suhu air terjadi pada waktu yang lebih lambat dibanding suhu lingkungan, menunjukkan adanya efek buffering oleh sistem pendingin.



Gambar 4 Tren Perubahan Suhu Air Nutrisi dan Suhu Lingkungan

3. Pengaruh Kondisi Lingkungan terhadap Efektivitas Pendinginan

Untuk menilai efisiensi sistem pendingin dalam mengurangi suhu air nutrisi dibandingkan suhu lingkungan, digunakan pendekatan kuantitatif dengan indikator yang disebut sebagai efektivitas relatif pendinginan. Parameter ini dihitung dengan membandingkan selisih suhu (ΔT) terhadap produk antara intensitas cahaya dan kelembapan udara, yang dirumuskan sebagai:

$$Efektivitas_{relatif} = \frac{\Delta T}{I_{lux} * RH}$$

Dengan menggunakan nilai rata-rata dari hasil pengukuran yaitu $\Delta T = 6,61$ °C, intensitas cahaya rata-rata $I_{lux} = 51092,48$ lux, dan kelembapan rata-rata $RH = 56,37\%$, maka diperoleh:

$$Efektivitas_{relatif} = \frac{6,61}{51092,48 * 56,37} \approx 2,28 * 10^{-6}$$

Nilai efektivitas relatif ini tidak memiliki satuan (non-dimensional) dan digunakan sebagai ukuran efisiensi relatif pendinginan pada suatu kondisi lingkungan tertentu. Semakin besar nilai ini, maka semakin efektif sistem pendingin bekerja dalam mengatasi beban panas lingkungan. Pendekatan ini memungkinkan perbandingan antar berbagai sistem pendingin dengan kondisi lingkungan yang berbeda, sehingga dapat menjadi alat evaluasi kinerja yang sederhana namun informatif.

4. Relevansi Teknologi Peltier dalam Sistem Pertanian Presisi

Penggunaan teknologi Thermoelectric Cooler (TEC) seperti Peltier TEC1-12706 dalam konfigurasi seri memberikan fleksibilitas tinggi dalam desain sistem pendingin skala kecil hingga menengah. Dibandingkan sistem chiller berbasis kompresi uap yang mahal dan memerlukan ruang besar, sistem ini lebih hemat energi, kompak, dan mudah diterapkan di lingkungan greenhouse rumah tangga atau institusi pendidikan.

Sejalan dengan hasil ini, (Ayob et al., 2022) menunjukkan bahwa sistem pendingin berbasis Peltier mampu menurunkan suhu air nutrisi hingga 4–6 °C dalam sistem hidroponik NFT dengan kontrol waktu sederhana. Dalam penelitian ini, performa pendinginan tercatat mencapai selisih rata-rata 6,61 °C, menegaskan bahwa sistem chiller yang dikembangkan layak menjadi alternatif sistem pendingin berbiaya rendah namun efektif untuk aplikasi pertanian presisi.

Keunggulan teknologi ini tidak hanya pada aspek termal, tetapi juga pada kemampuannya untuk diintegrasikan dengan sistem kontrol otomatis, sistem energi surya, dan Internet of Things (IoT), yang selanjutnya memungkinkan dikembangkannya sistem manajemen lingkungan berbasis data real-time.

5. Implikasi Agronomis dan Prospek Pengembangan

Secara agronomis, kestabilan suhu air yang dicapai oleh sistem chiller ini memiliki implikasi positif dalam mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Zona akar yang sejuk mendorong respirasi yang optimal, penyerapan nutrisi yang efisien, dan mengurangi risiko penyakit akibat patogen akar yang berkembang pada suhu tinggi. Dengan menghindari

fluktuasi ekstrem suhu air, sistem ini dapat menjaga keberlangsungan metabolisme tanaman dan meningkatkan kualitas hasil panen.

Prospek pengembangan sistem ini sangat terbuka, terutama dengan menambahkan sistem kontrol suhu berbasis sensor digital dan aktuator otomatis. Integrasi dengan sistem energi terbarukan seperti panel surya akan semakin meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan teknologi ini, sejalan dengan visi pertanian cerdas dan ramah lingkungan.

Seperti disebutkan oleh (Cortella et al., 2014; Dennison et al., 2025; Wu et al., 2025), integrasi antara sistem pendingin, kontrol berbasis sensor, dan algoritma machine learning memungkinkan terciptanya sistem hidroponik pintar yang tidak hanya adaptif terhadap lingkungan, tetapi juga prediktif dalam penyesuaian kondisi iklim.

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa sistem pendingin berbasis Thermoelectric Cooler (TEC) Peltier yang dirancang secara sederhana namun efektif, mampu menurunkan suhu air nutrisi dalam sistem hidroponik vertikal secara signifikan dibandingkan dengan suhu lingkungan dalam greenhouse bersuhu tinggi. Selama pengamatan dari pukul 10:59 hingga 17:55 WITA, sistem ini mempertahankan suhu air pada rata-rata 28,64 °C, jauh lebih rendah dibandingkan suhu lingkungan yang mencapai rata-rata 35,25 °C, dengan selisih sebesar 6,61 °C.

Stabilitas suhu air nutrisi ini sangat penting dalam menjaga performa zona akar tanaman dan mendukung pertumbuhan tanaman hidroponik secara optimal. Efektivitas sistem juga ditunjukkan melalui grafik tren suhu dan model regresi kuadratik yang menunjukkan pola termal yang terkendali. Perhitungan efektivitas relatif pendinginan menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan efisiensi pendinginan yang konsisten walaupun berada dalam beban panas tinggi dan fluktuatif.

Penerapan teknologi pendingin berbasis Peltier memberikan solusi yang terjangkau, hemat energi, dan kompatibel dengan sistem IoT dan energi terbarukan. Hal ini menegaskan potensinya sebagai komponen penting dalam pengembangan sistem pertanian presisi masa depan. Dengan pengembangan lebih lanjut melalui integrasi sistem kontrol otomatis dan algoritma cerdas, sistem ini dapat dikembangkan menjadi solusi agrikultur berkelanjutan yang adaptif dan efisien di era perubahan iklim.

Ucapan Terimakasih

Tim peneliti mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri (FATEPA), Universitas Mataram atas pendanaan penelitian yang diberikan melalui skema PNPB tahun 2024.

DAFTAR PUSTAKA

- Ayob, N. A., Setumin, S., Fathoni, K., Ani, A. I. C., & Maruzuki, M. I. F. (2022). Development of an IoT-based Water Temperature Control and Monitoring System for Hydroponics. *2022 2nd International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (ESmarTA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/eSmarTA56775.2022.9935490>
- Cortella, G., Saro, O., De Angelis, A., Ceccotti, L., Tomasi, N., Costa, L. D., Manzocco, L., Pinton, R., Mimmo, T., & Cesco, S. (2014). Temperature control of nutrient solution in

- floating system cultivation. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 1055–1065. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.068>
- Dennison, M. S., Kumar, P. S., Wamyil, F., Meji, M. A., & Ganapathy, T. (2025). The role of automation and robotics in transforming hydroponics and aquaponics to large scale. In *Discover Sustainability* (Vol. 6, Issue 1). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-00908-4>
- Fordyce, S. I., Carr, P. M., Jones, C., Eberly, J. O., Sigler, W. A., Ewing, S., & Powell, S. L. (2023). Sentinel-2-based predictions of soil depth to inform water and nutrient retention strategies in dryland wheat. *Agricultural Water Management*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108524>
- Hikashi, M., Ishikawa, K., Mori, M., & Yasutake, D. (n.d.). *Control of Viscosity in Different Concentrations and Temperatures of Nutrient Solution for Hydroponic System*.
- Kawasaki, Y., Matsuo, S., Kanayama, Y., & Kanahama, K. (2014). Effect of Root-zone Heating on Root Growth and Activity, Nutrient Uptake, and Fruit Yield of Tomato at Low Air Temperatures. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 83, 295–301. <https://doi.org/10.2503/jjshs1.MI-001>
- Pasos-Panqueva, J., Baker, A., & Camargo-Valero, M. A. (2024). Unravelling the impact of light, temperature and nutrient dynamics on duckweed growth: A meta-analysis study. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 366). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121721>
- Sarbu, I., & Dorca, A. (2018). A comprehensive review of solar thermoelectric cooling systems. *International Journal of Energy Research*, 42, 395–415. <https://doi.org/10.1002/er.3795>
- Tan, L., He, J., & Lee, S.-K. (2002). Effects of root-zone temperature on the root development and nutrient uptake of *Lactuca sativa* L. “Panama” grown in an aeroponic system in the tropics. *Journal of Plant Nutrition - J PLANT NUTR*, 25, 297–314. <https://doi.org/10.1081/PLN-100108837>
- Thakulla, D., Dunn, B., Hu, B., Goad, C., & Maness, N. (2021). Nutrient solution temperature affects growth and° brix parameters of seventeen lettuce cultivars grown in an NFT hydroponic system. *Horticulturae*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090321>
- Wu, B., Zuo, J., Niu, H., Jia, R., Li, Q., Chen, X., Yang, Z., Zhang, C., Sun, F., & Xi, Y. (2025). Transcriptome and metabolome analyses reveal the potential mechanism of root zone temperature regulates the growth rhythm of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) seedlings. *Industrial Crops and Products*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121041>