

EVALUASI KINERJA COOLING SYSTEM DALAM MENSTABILKAN SUHU DAN KELEMBABAN PADA SMART GREENHOUSE DI KEBUN PERCOBAAN WAILAN

*Evaluation of Cooling System Performance in Stabilizing Temperature and Humidity
in A Smart Greenhouse at Wailan Experimental Farm*

Stevani Seren Tamburian¹⁾, David P. Rumambi²⁾, Daniel P.M. Ludong²⁾

Email korespondensi: epid_dpr@yahoo.com

Email: serentamburian30@gmail.com, danielludong@unsrat.ac.id

¹⁾Mahasiswa Prodi Teknik Pertanian, ²⁾Dosen Prodi Teknik Pertanian
Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian Unsrat Manado

ABSTRAK

Penelitian bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem pendingin (*cooling system*) dalam menstabilkan suhu dan kelembaban di dalam *Smart Greenhouse* di Kebun Percobaan Wailan, Tomohon. Metode yang digunakan adalah Observasi Langsung dengan pengambilan data suhu, kelembaban, dan intensitas cahaya tiga kali sehari (pagi, siang, sore) selama tujuh hari berturut-turut pada bulan Juni 2025. Data diperoleh dari sensor *Smart Greenhouse* dan *Termohigrometer Digital HTC 2*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *cooling system* (yang terdiri dari *cooling pad*, *exhaust fan*, *drum fan*, *blower*, dan ventilasi otomatis) berpengaruh signifikan terhadap iklim mikro. Sistem terbukti efektif menurunkan suhu siang hari yang tinggi (rata-rata 31,2°C, puncak 40,5°C) secara drastis dalam waktu 10 - 30 menit, mendekati kisaran optimal 20 - 28°C pada sore hari (rata-rata 24,28°C). Sistem juga mampu memulihkan kelembaban yang turun pada siang hari (rata-rata 59%, terendah 49%), menjaga rata-rata pagi dan sore dalam rentang ideal 70 - 80%. Kondisi lingkungan yang dihasilkan (suhu 20 - 30°C, kelembaban 65 - 80%, intensitas cahaya 10.000 - 20.000 lux) sesuai untuk pertumbuhan optimal berbagai tanaman hortikultura seperti: Selada, Pakcoy, Kangkung, Sawi, dan Bayam. Disimpulkan bahwa *cooling system* berkinerja efektif dalam menstabilkan iklim mikro, meski pengaturan *setpoint* yang lebih rendah dan optimasi kelembaban pada siang hari disarankan untuk hasil yang lebih optimal.

Kata kunci: Iklim mikro, pengendalian kelembaban, rumah kaca pintar, sistem pendingin, stabilitas suhu

ABSTRACT

Research aims to evaluate the performance of the cooling system in stabilizing temperature and humidity inside a smart greenhouse at the Wailan Experimental Farm, Tomohon. The method used was direct observation, with data on temperature, humidity, and light intensity collected three times a day (morning, noon, afternoon) for seven consecutive days in June 2025. Data was obtained from smart greenhouse sensors and a Digital Thermo-hygrometer HTC 2. Results showed that the cooling system (consisting of a cooling pad, exhaust fan, drum fan, blower, and automatic ventilation) significantly affects the microclimate. The system has proved effective in drastically reducing high daytime temperatures (average 31.2°C, peak 40.5°C) within 10-30

minutes, bringing them close to the optimal range of 20 - 28°C in the afternoon (average 24.28°C). The system was also able to recover humidity that dropped during the day (average 59%, lowest 49%), maintaining morning and afternoon averages within the ideal range of 70 - 80%. The environmental conditions (such as temperature 20 - 30°C, humidity 65 - 80%, light intensity 10,000 - 20,000 lux) are suitable for the optimal growth of various horticultural crops such as lettuce, pakcoy, water spinach, mustard greens, and spinach. It is concluded that the cooling system performs effectively in stabilizing the microclimate, although a lower setpoint adjustment and optimization of daytime humidification are recommended for more optimal results.

Keywords: Microclimate, humidity control, smart greenhouse, cooling system, temperature stability.

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global telah menjadi tekanan signifikan bagi ketahanan pangan, yang ditandai dengan meningkatnya frekuensi cuaca ekstrem, fluktuasi suhu yang tidak terduga, dan pola curah hujan yang tidak menentu (Hakim *et al.*, 2025; Ninasari, 2024). Kondisi ini mengganggu stabilitas produksi pertanian konvensional, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia, sehingga mendorong adopsi solusi pertanian yang lebih terkontrol dan tahan iklim. Pertanian modern pun semakin beralih pada teknologi canggih seperti *Smart Greenhouse* (rumah kaca pintar), yaitu sebuah sistem budidaya tertutup yang terintegrasi dengan sensor dan aktuator untuk mengotomatisasi pengendalian faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, cahaya, dan nutrisi (Armando *et al.*, 2024; Shamshiri *et al.*, 2018). Dengan menciptakan iklim mikro yang optimal secara presisi, teknologi ini berpotensi mendekatkan kondisi pertumbuhan ke tingkat ideal, meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil panen, serta memungkinkan produksi sepanjang tahun tanpa bergantung pada musim. Investasi dalam infrastruktur *Smart Greenhouse*, bagaimanapun tidaklah kecil. Biaya konstruksi, instalasi sistem pendukung, dan operasional yang tinggi menuntut agar fasilitas ini beroperasi pada kinerja puncak untuk menjamin keberlanjutan ekonomi dan pencapaian tujuannya sebagai solusi pertanian modern (Singh *et al.*, 2022).

Dalam konteks iklim tropis, tantangan operasional terbesar adalah mengelola beban panas yang tinggi akibat radiasi matahari yang intens. Suhu dalam *greenhouse* dapat melonjak dengan cepat melebihi ambang toleransi tanaman, menyebabkan stres termal, gangguan fisiologis seperti fotosintesis yang terhambat, dan pada akhirnya penurunan hasil (Katzin *et al.*, 2021). Oleh karena itu, sistem pendingin (*cooling system*) bukan lagi komponen pendukung, melainkan sistem kritis yang menentukan keberhasilan

operasional *Smart Greenhouse* di daerah tropis. Sistem pendingin yang umum diadopsi, khususnya di daerah dengan kelembaban relatif rendah hingga sedang, adalah sistem pendinginan evaporatif yang dipasangkan dengan ventilasi paksa. Prinsip dasarnya, yang telah dipelajari secara luas untuk aplikasi pertanian selama beberapa dekade, melibatkan penarikan udara luar melalui media *cooling pad* yang basah. Proses penguapan air mendinginkan udara sebelum disalurkan ke dalam *greenhouse*, sementara *exhaust fan* menciptakan tekanan negatif untuk membuang udara panas dan lembap (Franco *et al.*, 2014; Mallick *et al.*, 2022). Untuk menyempurnakannya, kipas sirkulasi internal (*drum fan* atau *blower*) ditambahkan untuk menghomogenkan suhu dan kelembapan di seluruh area kanopi tanaman, mencegah stratifikasi dan memastikan kondisi yang seragam (Baxevanou *et al.*, 2018). Integrasi komponen-komponen ini—*cooling pad*, *exhaust fan*, *blower*, dan ventilasi otomatis—menjadi satu sistem yang dikendalikan oleh logika berbasis sensor merupakan inti dari pendekatan smart greenhouse.

Meskipun prinsip teknis sistem pendingin evaporatif telah mapan dan efektivitas komponen individualnya telah banyak dilaporkan, terdapat kesenjangan pengetahuan yang signifikan ketika teknologi ini diimplementasikan secara terpadu dalam kondisi lingkungan spesifik Indonesia. Pertama, literatur yang ada seringkali berfokus pada evaluasi kinerja komponen tunggal dalam kondisi laboratorium atau iklim yang berbeda, bukan pada kinerja sistem secara keseluruhan dalam operasi nyata di lapangan (Dhamangaonkar & Shinde, 2020). Bagaimana sinergi seluruh komponen pendingin mempengaruhi dinamika suhu dan kelembapan di dalam *Smart Greenhouse* tropis secara real-time masih kurang didokumentasikan. Kedua, tantangan unik di iklim tropis lembap adalah keseimbangan yang rumit antara menurunkan suhu dan mengelola kelembapan.

Sistem pendingin evaporatif berisiko meningkatkan kelembaban relatif ke tingkat yang dapat mendorong perkembangan penyakit jamur (Malado *et al.*, 2024). Oleh karena itu, efektivitas sistem harus dinilai berdasarkan kemampuannya untuk secara simultan menjaga kedua parameter dalam rentang optimal, bukan hanya suhu saja. Ketiga, terdapat jarak antara data kinerja teknis dan rekomendasi agronomis yang aplikatif. Belum ada pemetaan yang jelas antara kondisi mikroklimat hasil kerja sistem pendingin tertentu dengan jenis tanaman hortikultura yang paling adaptif dan produktif di dalam sistem tersebut. Informasi ini sangat penting bagi petani dan pengambil

kebijakan untuk menjustifikasi investasi dan merencanakan usaha tani. Berdasarkan identifikasi kesenjangan ini, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja menyeluruh dari sistem pendingin terpadu dalam mengondisikan lingkungan sebuah smart greenhouse di Kebun Percobaan Wailan, Tomohon.

Fokus penelitian adalah pada kinerja sistem sebagai satu kesatuan, bukan bagian-bagiannya. Dengan demikian, penelitian ini dirumuskan untuk menjawab pertanyaan berikut: (1) Bagaimana pengaruh operasional sistem pendingin terpadu terhadap profil diurnal (harian) suhu dan kelembaban udara di dalam smart greenhouse? (2) Seberapa efektifkah kombinasi komponen *cooling pad*, *exhaust fan*, *drum fan*, *blower*, dan ventilasi otomatis dalam menciptakan dan mempertahankan iklim mikro yang stabil sesuai setpoint yang diinginkan? dan (3) Berdasarkan kondisi iklim mikro yang berhasil dipertahankan, jenis tanaman hortikultura apa saja yang memiliki kebutuhan agroklimat sesuai sehingga diprediksi dapat tumbuh optimal di dalam sistem ini?

Tujuan penelitian ini adalah: 1) Untuk mengkuantifikasi pengaruh sistem pendingin aktif terhadap fluktuasi suhu dan kelembapan relatif di dalam *Smart Greenhouse*, 2) Untuk menganalisis efektivitas dan stabilitas sistem pendingin terpadu dalam mencapai kondisi iklim mikro yang ditargetkan, dan 3) Untuk mengidentifikasi jenis-jenis tanaman sayuran daun dan buah yang potensial untuk dibudidayakan secara optimal berdasarkan kesesuaian parametrik antara kebutuhan tanaman dan kondisi lingkungan yang dihasilkan oleh sistem. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis untuk optimasi sistem pendingin dan rekomendasi agronomis untuk pemilihan komoditas, sehingga berkontribusi pada pengembangan *Smart Greenhouse* yang efisien dan produktif di Indonesia.

METODOLOGI PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Kelurahan Wailan, Kecamatan Tomohon Utara, Kota Tomohon, Indonesia pada bulan Juni sampai Juli 2025.

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan adalah *Smart Greenhouse* dilengkapi dengan sensor suhu, kelembaban, dan intensitas cahaya, *Termohigrometer Digital HTC 2*, Perangkat lunak untuk analisis data *Microsoft Excel* atau *software* statistik lainnya.

Metode Penelitian

Metode yang digunakan adalah Pengamatan Langsung dalam lingkungan *Smart Greenhouse*. Penelitian dilakukan dengan menjalankan sistem pendingin dalam berbagai skenario operasional yang mensimulasikan kondisi beban panas, sementara parameter iklim mikro direkam untuk dianalisis lebih lanjut. Pengambilan data dilakukan tiga kali sehari, yaitu pagi hari (06:00-08:00), siang hari (12:00-02:00), dan sore hari (17:00-19:00).

Prosedur Kerja

Tahapan penelitian dilaksanakan berikut ini: Persiapan *Smart Greenhouse*, Pengaturan Sistem Kontrol, Pengambilan Data, Analisis Data, dan Penyusunan Laporan.

Variabel Pengamatan

Meliputi: suhu, kelembaban, dan intensitas cahaya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja Sistem Pendingin dalam Menstabilkan Suhu

Pengukuran selama tujuh hari menunjukkan pola suhu harian yang konsisten di dalam *Smart Greenhouse*. Suhu rata-rata meningkat secara signifikan dari 22,12°C pada pagi hari menjadi 31,2°C pada siang hari, kemudian turun menjadi 24,28°C pada sore hari setelah aktivasi *cooling system*. Suhu puncak tertinggi tercatat 40,5°C pada siang hari pertama. Uji statistik (Uji-T berpasangan) mengonfirmasi bahwa kenaikan suhu dari pagi ke siang sangat signifikan ($p < 0,01$). Setelah diaktifkan, sistem secara konsisten menurunkan suhu dalam 10 - 30 menit. Dibandingkan dengan suhu luar, *greenhouse* mempertahankan suhu dalam yang rata-rata 2,7°C lebih tinggi pada siang hari, namun perbedaan ini berhasil diatasi oleh sistem pendingin pada sore hari.

Kinerja Sistem Pendingin dalam Memodulasi Kelembaban

Kelembaban relatif menunjukkan pola fluktuasi harian yang terbalik dengan suhu. Rata-rata kelembaban tertinggi terjadi pada pagi (76%) dan sore (70%), dan terendah pada siang hari (59%), dengan nilai minimum absolut 49% pada hari ke-4. Analisis statistik (ANOVA satu arah) menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan ($p <$

0,001) antara ketiga periode pengukuran. Aktivasi *cooling system* selalu diikuti oleh peningkatan kelembaban yang cepat. Pada periode siang, *greenhouse* secara statistik mampu mempertahankan kelembaban yang sedikit lebih tinggi (59%) dibandingkan kondisi luar (57%).

Kondisi Lingkungan Mikro yang Dipertahankan

Intensitas cahaya alami di dalam *greenhouse* berkisar antara 10.000 hingga 21.000 lux pada siang hari. Secara keseluruhan, sistem pendingin berhasil mempertahankan kondisi lingkungan pasca-intervensi pada kisaran suhu 20 – 30°C, kelembaban 65 – 80%, dan intensitas cahaya yang memadai untuk fotosintesis.

Identifikasi Kesesuaian Tanaman

Berdasarkan profil iklim mikro yang dicapai, sebanyak 23 spesies tanaman hortikultura, terutama sayuran daun dan herba, teridentifikasi memiliki kebutuhan agroklimat yang sesuai untuk dibudidayakan di dalam sistem ini (Resh, 2022).

Temuan utama penelitian ini membuktikan bahwa sistem pendingin terpadu (*cooling pad*, *exhaust fan*, *blower*, ventilasi otomatis) efektif menstabilkan iklim mikro *Smart Greenhouse* tropis, khususnya dengan menurunkan suhu siang hari yang ekstrem dan memulihkan kelembaban dengan cepat, sehingga menciptakan lingkungan yang sesuai untuk budidaya berbagai tanaman hortikultura.

Efektivitas penurunan suhu yang drastis membuktikan kerja sinergis komponen sistem sesuai prinsip pendinginan evaporatif dan pertukaran udara paksa (Mallick *et al.*, 2022). Kemampuan sistem memulihkan kelembaban segera setelah diaktifkan juga konsisten dengan mekanisme pengembaban dari *cooling pad* (Franco *et al.*, 2014). Namun, temuan turunnya kelembaban hingga hampir 50% pada siang hari sebelum aktivasi sistem menyoroti tantangan spesifik di iklim tropis, yang lebih ekstrem dibandingkan laporan di iklim Mediterania (Baxevanou *et al.*, 2018). Hal ini disebabkan oleh radiasi dan suhu luar yang lebih tinggi, yang mempercepat penguapan di dalam *greenhouse*. Kondisi ini mengindikasikan bahwa logika kontrol berbasis *setpoint* suhu tunggal mungkin kurang optimal, dan diperlukan strategi berbasis multi-parameter (suhu dan kelembaban) untuk pencegahan dini (Katzin *et al.*, 2021).

Profil lingkungan akhir yang berhasil dipertahankan (suhu 20 - 30°C, kelembaban >65%) secara meyakinkan membuka peluang budidaya intensif. Kesesuaian dengan kebutuhan sejumlah tanaman seperti selada dan pakcoy (Manurung & Yulianti, 2018)

menunjukkan potensi aplikasi yang praktis. Stabilitas iklim mikro ini merupakan kunci untuk meminimalkan stres abiotik dan mendukung produktivitas tanaman, sebagaimana diungkapkan dalam prinsip smart greenhouse (Armando *et al.*, 2024).

Penelitian ini memiliki keterbatasan berupa durasi pengamatan yang singkat dan belum mencakup analisis ekonomi (biaya energi), serta validasi agronomi langsung melalui Uji Tanam. Kelemahan ini sekaligus menjadi dasar rekomendasi penelitian mendatang. Kesimpulannya, sistem pendingin terpadu terbukti sebagai komponen kritis yang efektif. Kebaruan studi ini terletak pada dokumentasi kuantitatif real-time kinerja sistem terintegrasi dalam mengatasi fluktuasi iklim mikro tropis, sekaligus memberikan dasar ilmiah untuk seleksi komoditas. Untuk pengembangan selanjutnya, penelitian jangka panjang, analisis efisiensi energi, dan uji agronomi tanaman terpilih sangat disarankan untuk memvalidasi kelayakan teknis dan ekonomi sistem secara menyeluruh.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Sistem pendingin terpadu terbukti efektif menstabilkan iklim mikro *Smart Greenhouse* dengan menurunkan suhu siang hari yang ekstrem dan memulihkan kelembapan dengan cepat, sehingga menciptakan lingkungan ideal bagi pertumbuhan berbagai sayuran daun dan herba. Penelitian ini memberikan validasi kinerja sistem dan dasar pemilihan komoditas. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan uji coba penanaman jangka panjang untuk memvalidasi produktivitas tanaman secara empiris.

Saran

Untuk pengembangan sistem, disarankan optimasi *setpoint* kontrol suhu dan mekanisme pelembapan guna mencegah kondisi ekstrem. Penelitian lanjutan perlu mencakup evaluasi jangka panjang (satu siklus tanam), analisis konsumsi energi, dan uji agronomi tanaman terpilih untuk memvalidasi produktivitas serta kelayakan ekonomi sistem secara komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

Armando, J., Langi, Y.A.R., Tenda, E., & Ketaren, E. 2024. Purwarupa Sistem

- Pengendalian Greenhouse Tanaman Tomat Menggunakan Raspberry Pi dan Fuzzy Logic. *Jurnal Times*, 13(2): 309-318.
- Hakim, D.R., Rahmiwati, A., & Flora, R. 2025. Menjelajahi Dinamika Pangan di Era Perubahan Iklim Terhadap Dampak di Indonesia dan Proyeksi Masa Depan: A Systematic Review. *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 7(3):1703-1720.
- Malado, M., Purnamasari, R., Nuryono, N., Monica, R.D., Lestari, S., Bahri, S., Putri, K. A., Palupi, D., Suhadi, S., dan Faizah, H. 2024. Pengendalian Hama dan Penyakit Tanaman Pertanian. CV. Gita Lentera.
- Manurung, A.N.H. dan Yulianti, F. 2018. Pertumbuhan Caisim (*Brassica juncea* (L.) Czern.) pada Beberapa Konsentrasi Larutan Hidroponik Sistem NFT. *Jurnal Pertanian Presisi (Journal of Precision Agriculture)*, 1(1).
- Ninasari, A. 2024. Analisis dampak perubahan iklim terhadap pola pertumbuhan dan produktivitas tanaman gandum. *Jurnal Review Pendidikan Dan Pengajaran (JRPP)*, 7(3): 8022-8028.
- Resh, H.M. 2022. *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. Florida: CRC Press.
- Widodo, S., Setiawan, F.H., Solahudin, M., dan Sucahyo, L. 2022. Pertumbuhan dan Efisiensi Penggunaan Energi pada Budidaya Selada dalam Plant factory dengan Beberapa Perlakuan Fotoperiode. *Journal of Tropical Agricultural Engineering and Biosystems-Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*, 10(2): 154-161.