

e-ISSN : 3031-0342
Diterima : 22 Januari 2026
Disetujui : 26 Maret 2026
Tersedia online di <https://journal.unram.ac.id/index.php/agent>

**RANCANG BANGUN SISTEM PEMANTAUAN IKLIM CERDAS
PADA BUDIDAYA TANAMAN PAKCOY
DI SMART GREENHOUSE SISTEM HIDROPONIK VERTIKAL FARMING**

*Design and Development of a Smart Climate Monitoring System for Pakcoy Cultivation in
Vertikal Hydroponic Smart Greenhouse*

Ikhda Zakira^{1*}, Guyup Mahardhian Dwi Putra¹, Gagassage Nanaluih De Side¹

¹Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri, Universitas
Mataram

email^{*}: zakiraikhda16@gmail.com

ABSTRACT

Vertical cultivation is an alternative form of sustainable agriculture for areas with limited land availability. This study aims to design and develop an ESP32-based temperature and relative humidity (RH) monitoring system, evaluate its performance, and analyze the growth of pakcoy plants in a smart-climate greenhouse. The research employed an experimental method through field trials conducted in a 4×3 m greenhouse using a vertical hydroponic system. The study utilized DHT22 sensors to measure air temperature and humidity, and an LDR sensor to monitor light intensity, with a total of 96 pakcoy plant samples. Observed parameters included air temperature, air humidity, light intensity, plant height, number of leaves, and root length. The results show that the automated system was able to monitor and control greenhouse environmental conditions in real time. Calibration of the DHT22 sensor produced an RMSE value of 2.17 for temperature and 3.67 for air humidity, while the LDR sensor showed an RMSE of 6.14 lux. Daytime temperatures inside the greenhouse reached up to 42.3°C, with humidity levels ranging from 60% to 100%. Light intensity inside the greenhouse was lower than outside, particularly during midday. Plant growth results indicate that the controlled temperature treatment produced better plant height and leaf number, with a maximum height of 24.86 cm and up to 15 leaves. In contrast, the greenhouse treatment resulted in the highest root length, with an average of 30.98 cm. The ESP32-based monitoring system demonstrated satisfactory accuracy, and the implementation of a controlled climate in the greenhouse positively affected root growth, but was less optimal for plant height and leaf development.

Keywords: Smart greenhouse; vertical farming; pakcoy; ESP32; climate monitoring

ABSTRAK

Penanaman vertikultural merupakan alternatif pertanian berkelanjutan bagi wilayah dengan keterbatasan lahan. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem pemantauan suhu dan kelembapan relatif (RH) berbasis ESP32, menguji kinerjanya, serta menganalisis pertumbuhan tanaman pakcoy dalam greenhouse beriklim cerdas. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental melalui percobaan lapangan di greenhouse berukuran 4×3 m dengan sistem hidroponik vertikal. Penelitian menggunakan sensor DHT22 untuk suhu dan kelembapan udara serta sensor LDR untuk intensitas cahaya, dengan total 96 sampel tanaman pakcoy. Parameter yang diamati meliputi suhu udara, kelembapan udara, intensitas cahaya, tinggi tanaman, jumlah daun, dan panjang akar. Hasil penelitian menunjukkan sistem otomatis mampu memantau dan mengendalikan kondisi lingkungan greenhouse secara real-time. Kalibrasi sensor DHT22 menghasilkan nilai RMSE

suhu sebesar 2,17 dan kelembapan udara sebesar 3,67, sedangkan sensor LDR memiliki RMSE sebesar 6,14 lux. Suhu di dalam greenhouse pada siang hari dapat mencapai 42,3°C, dengan kelembapan berkisar 60–100%. Intensitas cahaya di dalam greenhouse lebih rendah dibandingkan luar greenhouse, terutama pada siang hari. Pertumbuhan tanaman menunjukkan bahwa perlakuan suhu kontrol menghasilkan tinggi tanaman dan jumlah daun lebih baik, dengan tinggi maksimum 24,86 cm dan jumlah daun hingga 15 helai. Sebaliknya, perlakuan greenhouse memberikan hasil terbaik pada panjang akar dengan rata-rata 30,98 cm. Sistem pemantauan berbasis ESP32 dinyatakan memiliki akurasi yang cukup baik, dan penerapan iklim terkontrol dalam greenhouse berpengaruh positif terhadap pertumbuhan akar, namun kurang optimal untuk tinggi tanaman dan jumlah daun.

Kata Kunci: Smart greenhouse; hidroponik vertical; pakcoy; ESP32; pemantauan iklim

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Kebutuhan masyarakat perkotaan akan produk pertanian, khususnya sayuran yang rendah kandungan pestisida dan pupuk kimia, terus mengalami peningkatan. (Nuani, 2022). Penurunan di bidang pertanian adalah masalah dalam memenuhi kebutuhan produksi pertanian, menurut Badan Pusat Statistik tahun 2019-2020 menjelaskan bahwa sektor pertanian mendominasi jumlah mata pencaharian masyarakat Indonesia hingga mencapai 27, 33 % atau setara dengan 33,4 juta jiwa. Konversi negara yang lebih tinggi telah mencegah peningkatan produksi pertanian. Pemadaman tanaman vertikultural adalah alternatif untuk kegiatan pertanian yang berkelanjutan di negara-negara kecil atau terbatas (Kusumastuti, 2018). Sejumlah faktor yang mendukung pertanian vertikal menjadikannya pilihan bagi komunitas perkotaan, karena pertanian vertikal di daerah perkotaan dapat meningkatkan keamanan gizi di tingkat rumah tangga (Wachdijono, 2019).

Masyarakat di daerah perkotaan yang ingin menerapkan metode hidroponik di bidang pertanian memiliki hambatan dalam mengendalikan dan memantau kondisi tanaman mereka. Penduduk perkotaan biasanya memiliki aktivitas yang kuat dan tidak memiliki banyak waktu untuk secara langsung memantau pengembangan sistem hidroponik model vertikal yaitu menggunakan tanaman pakcoy, manfaat dari hidroponik vertikal adalah dapat digunakan pada lahan yang sempit. Masalah ini membutuhkan solusi untuk memastikan bahwa masyarakat di perkotaan dapat mengelola dengan baik tanpa mengorbankan kegiatan lain.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dibutuhkan sistem pemantauan iklim mikro yang mampu mengukur parameter lingkungan secara *real-time* dan memberikan informasi langsung kepada pengguna. Dengan adanya sistem pemantauan yang cerdas, pengguna dapat mengetahui kondisi tanaman secara aktual, mendapatkan peringatan saat terjadi perubahan ekstrem, serta mengaktifkan perangkat pengendali seperti pompa secara otomatis. Sistem pemantauan seperti ini menjadi sangat penting untuk mendukung keberhasilan budidaya hidroponik vertikal farming pada tanaman pakcoy (*Brassica rapa* L.), yang sangat sensitif terhadap perubahan iklim mikro (Barbosa, 2015). Oleh karena itu, penelitian mengenai rancang bangun sistem pemantauan iklim mikro cerdas diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dan hasil produksi pada sistem pertanian modern tersebut.

Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang bangun sistem pemantauan suhu dan RH berbasis ESP32, menguji kinerja sistem pemantauan suhu dan RH berbasis ESP32, dan menganalisis pertumbuhan tanaman di dalam *greenhouse* dengan iklim cerdas

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini di antaranya netpot, arduino uno, selang, laptop, smartphone, alat tulis, lem pipa, stop kontak kabel, selang, kain flannel, thermohyrometer, sensor

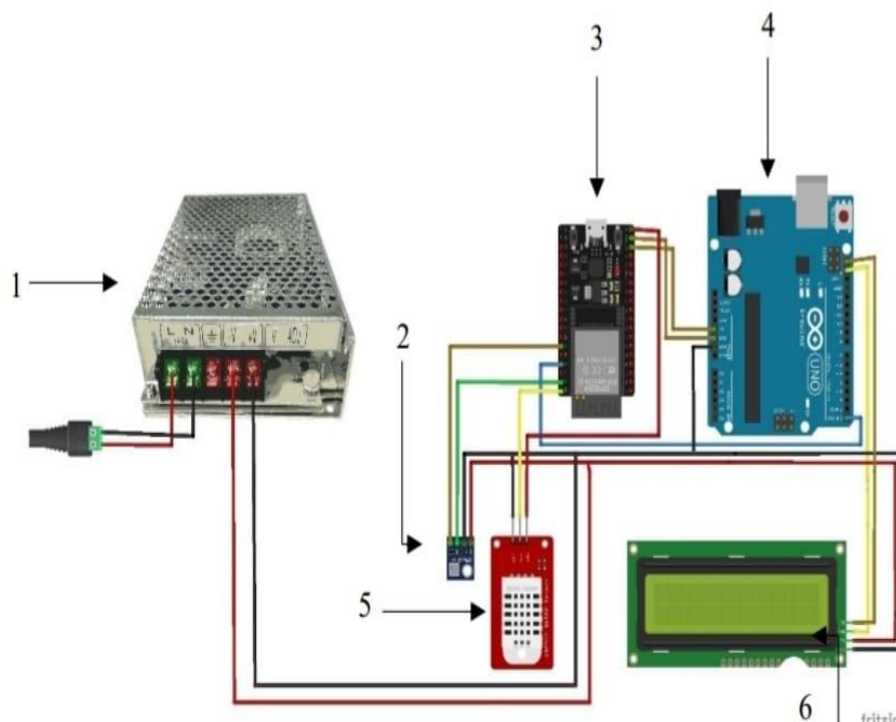
DHT22, sensor ESP32, Sensor LDR dan kabel jumper. Sedangkan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah benih pakcoy Shanghai, Nutrisi AB mix dan air.

Metode

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode eksperimental dengan percobaan lapangan di dalam Greenhouse ukuran 4x3 m menggunakan sistem hidroponik vertikal. Penelitian ini menggunakan sensor DHT22 dan sensor LDR untuk pemantauan iklim secara otomatis pada tanaman pakcoy yang berjumlah 96 sampel tanaman. Pada penelitian ini terdapat 2 perlakuan yaitu perlakuan di dalam greenhouse dan perlakuan control (luar greenhouse), setiap perlakuan terdiri dari empat tower hidroponik vertikal, masing-masing di beri kode A1, A2, A3, dan A4, dan setiap tower digunakan 6 sampel tanaman.

Parameter Penelitian

Beberapa parameter yang diukur dalam penelitian ini, yaitu kelembapan udara, suhu udara, Intensitas cahaya, tinggi tanaman, jumlah daun dan panjang akar.

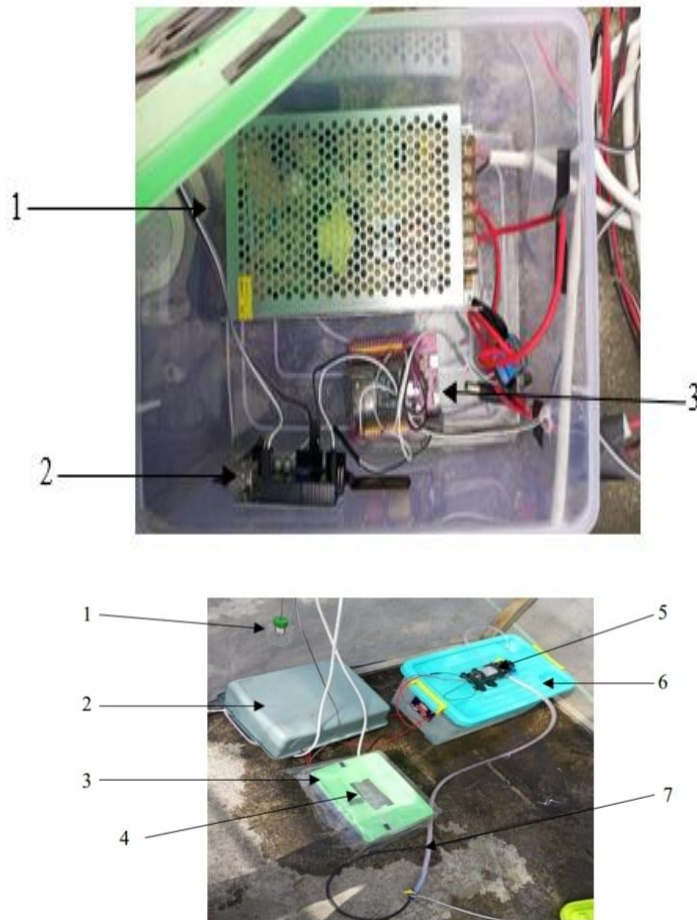


Gambar 1. Skematik Rangkaian Sistem Pemantauan Iklim (1) *Power supply*, (2) Sensor LDR (Cahaya), (3) mikrokontroler ESP32, (4) Arduino Uno, (5) Sensor DHT22, (6) LCD (Ukuran 16 x 2)

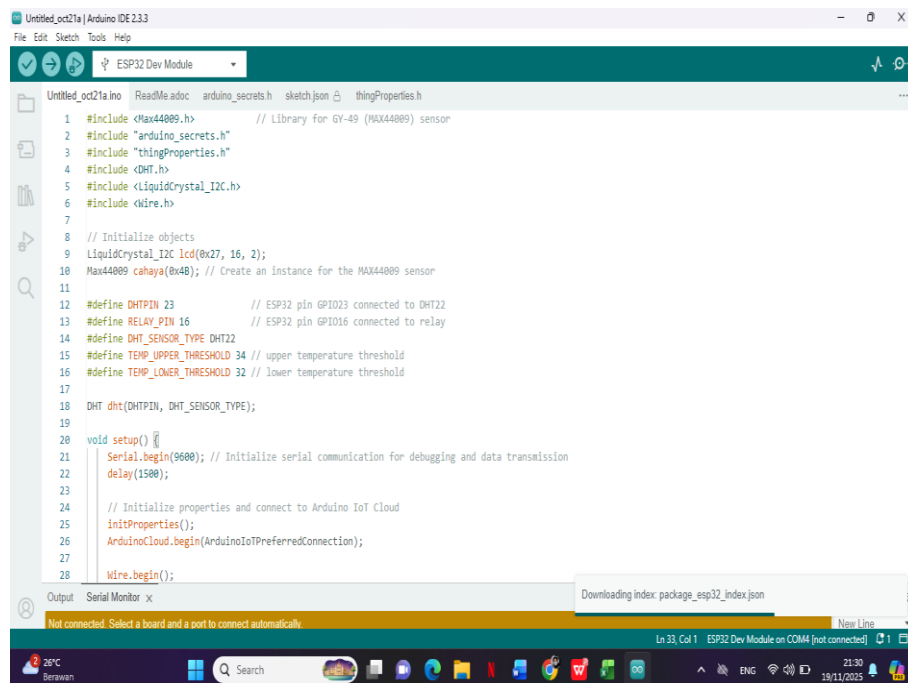
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perancangan Rangkaian Elektronikk

Hasil perancangan rangkaian elektronikPerancangan rangkaian alat system pemantauan iklim di dalam greenhouse bertujuan untuk menciptakan lingkungan tumbuh yang optimal bagi tanaman dengan mengatur parameter seperti suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya secara otomatis. Sistem ini dirancang dengan mengintegrasikan berbagai sensor, seperti sensor suhu (DHT22), sensor cahaya (LDR). Data dari sensor akan diproses oleh mikrokontroler untuk mengaktifkan aktuator yang sesuai, misalnya menyalakan kipas saat suhu melebihi batas yang ditentukan. Dengan perancangan ini, proses pemantauan dan pengendalian iklim di dalam greenhouse menjadi lebih efisien, presisi, dan dapat berjalan secara otomatis tanpa perlu pengawasan terus-menerus.



Gambar 3. Rangkaian alat pemantauan dalam *Greenhouse*



Gambar 4. Tampilan Bahasa Pemrograman pada Sensor

Program di atas ditulis dalam bahasa C++ untuk mikrokontroler Arduino dan berfungsi sebagai sistem monitoring serta kontrol otomatis berbasis sensor. Pada bagian setup (), Arduino mengaktifkan komunikasi serial, menghubungkan perangkat ke Arduino IoT Cloud, menginisialisasi

komunikasi I2C, mempersiapkan pin relay sebagai output, mengaktifkan sensor DHT untuk membaca suhu dan kelembaban, serta menyalakan LCD I2C yang digunakan untuk menampilkan data. Pada bagian loop (), Arduino secara berkala memperbarui koneksi cloud, membaca suhu dan kelembaban dari sensor DHT22, kemudian memeriksa apakah pembacaan sensor valid. Jika valid, program akan mengontrol relay secara otomatis berdasarkan ambang batas suhu yang telah ditentukan: relay menyala jika suhu melebihi batas atas dan mati jika suhu berada di bawah batas bawah. Selain itu, sensor LDR digunakan untuk membaca intensitas cahaya dalam satuan lux. Semua data sensor suhu, kelembaban, dan cahaya ditampilkan ke LCD. Data yang sama juga dikirim melalui komunikasi serial dalam format "suhu, kelembaban, cahaya" agar dapat digunakan oleh perangkat lain seperti Arduino Uno.

Cara kerja *Smart greenhouse*

Smart greenhouse merupakan sistem otomatis yang dirancang untuk mengendalikan kondisi lingkungan di dalam greenhouse secara real-time dengan memanfaatkan sensor DHT22 dan sensor LDR, di mana sensor DHT22 berfungsi untuk mengukur parameter suhu dan kelembaban udara, sedangkan sensor LDR digunakan untuk mendeteksi intensitas cahaya yang masuk ke dalam greenhouse data yang dihasilkan dari kedua sensor ini kemudian diolah oleh mikrokontroler seperti Arduino dan ESP32.

Percobaan Sensor DHT22 Suhu

Percobaan sensor DHT22 bertujuan untuk mengetahui bahwa data suhu dan kelembaban yang diperoleh dari sensor memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Hasil kalibrasi sensor DHT22 menunjukkan nilai RMSE sebesar 2,17 dengan total square of error sebesar 23,69 dan jumlah data (n) sebanyak 5. Hasil tersebut menggambarkan tingkat kesalahan rata-rata antara hasil pengukuran sensor dengan data acuan. Semakin mendekati nol nilai RMSE, semakin tinggi tingkat akurasi sensor, sehingga nilai RMSE 2,17 mengindikasikan bahwa sensor memiliki akurasi yang cukup baik, meskipun belum sepenuhnya presisi. Menurut (Burhan et al., 2024) nilai RMSE yang jauh dari angka 0 (nol) menunjukkan bahwa hasil prediksi yang diperoleh kurang akurat atau kurang baik.

Percobaan Sensor DHT22 Kelembaban

Hasil kalibrasi sensor DHT22 pada pengukuran kelembaban udara menunjukkan nilai RMSE sebesar 3,67 dengan total square of error sebesar 67,43 dan jumlah data (n) sebanyak 5. Nilai ini menunjukkan bahwa terdapat selisih rata-rata sebesar 3,67 antara hasil pembacaan sensor dengan data acuan. Meskipun terdapat sedikit perbedaan, nilai RMSE tersebut cukup akurat, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor DHT22 memiliki tingkat ketelitian yang cukup baik dalam mengukur kelembaban udara. Menurut (Kahfi et al., 2023) nilai RMSE sebesar 3,67 menunjukkan rata-rata kesalahan prediksi dalam penelitian menggunakan Rapidminer sekitar 3,67 satuan terhadap variabel yang diukur, dalam hal ini prediksi tingkat kelembaban yang dipengaruhi oleh suhu udara rata-rata menunjukkan nilai RMSE tersebut memberikan prediksi yang cukup akurat.

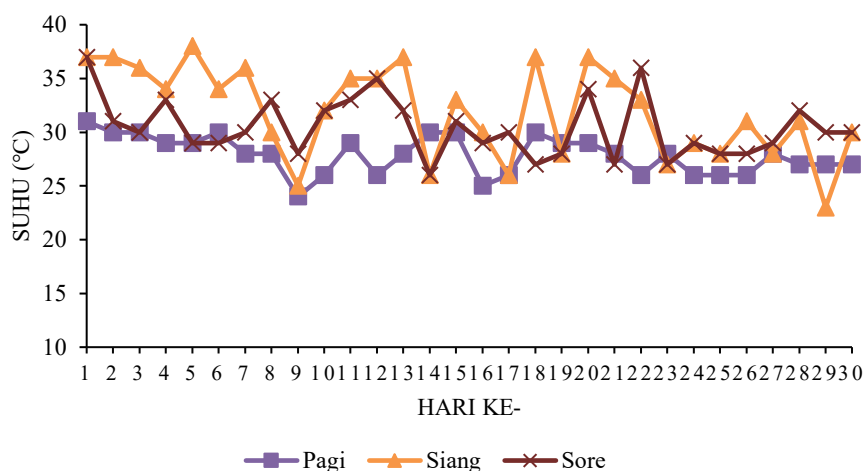
Percobaan Sensor LDR

Percobaan sensor LDR bertujuan untuk mengetahui bahwa sensor dapat mengukur intensitas cahaya secara akurat dan konsisten sesuai dengan kondisi sebenarnya di lokasi penelitian. Hasil kalibrasi sensor LDR (*Light Dependent Resistor*) menunjukkan nilai RMSE sebesar 6,14 lux dengan total square of error sebesar 189 dan jumlah data (n) sebanyak 5. dengan selisih pembacaan antara 2 hingga 14 dan nilai RMSE sebesar 6,14 lux. Meskipun nilai RMSE 6,14 tergolong lebih besar dibandingkan sensor suhu dan kelembaban, hasil ini masih dapat dianggap kurang baik.

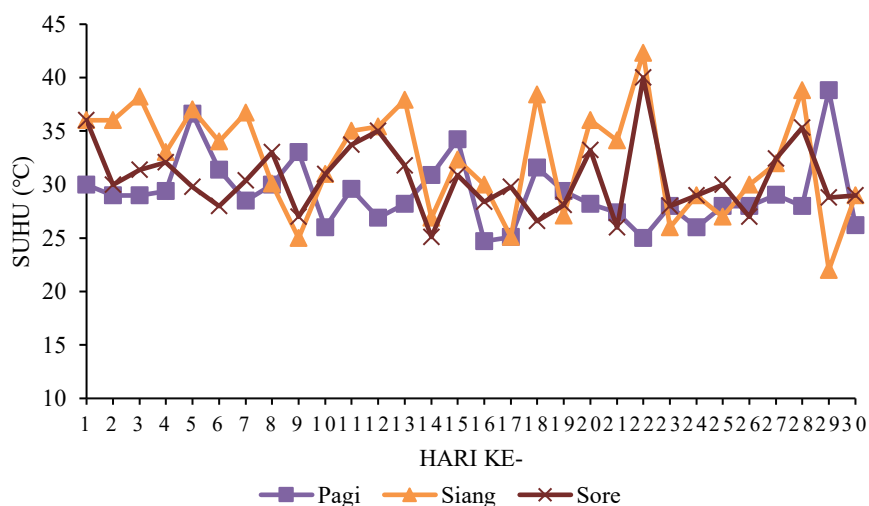
Suhu udara

Suhu merupakan faktor lingkungan yang penting untuk pertumbuhan tanaman. Data suhu udara di dalam greenhouse dan suhu udara kontrol (luar greenhouse) dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Suhu pada pagi hari umumnya berada di kisaran 22–26°C, sedangkan pada siang hari meningkat cukup signifikan hingga mencapai puncak sekitar 38°C, dan pada sore hari suhu mulai menurun kembali hingga 26°C. Meskipun terjadi variasi suhu harian, secara umum suhu kontrol masih berada dalam kondisi optimal untuk pertumbuhan pakcoy yaitu 20–30°C.

Perubahan suhu yang terjadi pada lingkungan luar greenhouse (perlakuan kontrol) menunjukkan bahwa kondisi tersebut bersifat lebih terbuka dan alami, sehingga terjadi keseimbangan antara energi panas yang diterima dengan panas yang dilepaskan ke atmosfer. Keadaan ini menyebabkan terjadinya fluktuasi suhu yang bersifat normal, namun tetap mampu mendukung berbagai aktivitas fisiologis tanaman. Kondisi tersebut berbeda dengan lingkungan di dalam greenhouse, yang umumnya menunjukkan suhu lebih tinggi akibat adanya akumulasi panas pada ruang tertutup, terutama pada periode siang hari. Kestabilan suhu yang relatif lebih baik pada perlakuan kontrol dibandingkan dengan di dalam greenhouse memberikan kondisi yang lebih menguntungkan bagi pertumbuhan tanaman pakcoy. Suhu yang terlalu tinggi, seperti yang sering terjadi pada greenhouse tanpa sistem pendinginan yang memadai berpotensi menghambat aktivitas enzim fotosintetik, meningkatkan laju kehilangan air melalui transpirasi berlebih, dan pada akhirnya menurunkan kecepatan pertumbuhan tanaman. (Andriani dan karmila, 2019) menyatakan bahwa suhu optimal adalah titik dimana kemampuan berbagai tahap dalam fotosintesis berjalan optimal dan seimbang.



Gambar 5. Grafik Suhu Kontrol (Luar *Greenhouse*)



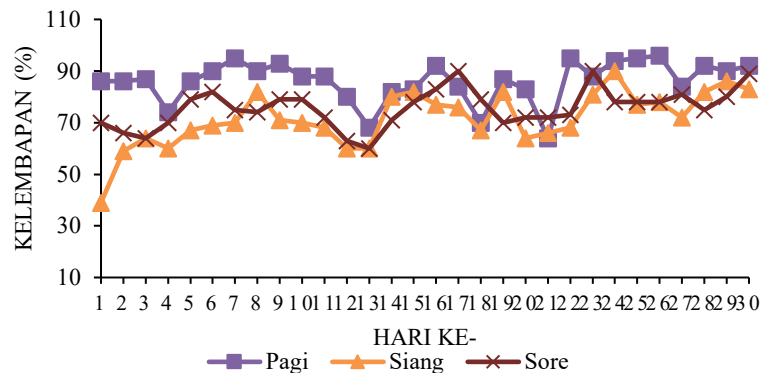
Gambar 6. Grafik Suhu didalam *Greenhouse*

Suhu di dalam greenhouse selama 30 hari, terlihat bahwa suhu cenderung lebih tinggi dan fluktuatif dibandingkan dengan suhu di luar greenhouse. Suhu siang hari mendominasi grafik dengan nilai yang sering kali melebihi 35°C, bahkan mencapai 42,3°C pada hari ke 22. Sementara itu, suhu pagi dan sore hari umumnya berada di kisaran 25,1–40,01°C, yang tetap lebih tinggi dari kisaran suhu optimal untuk pertumbuhan pakcoy, yaitu 20–30°C. Kondisi suhu yang cenderung tinggi ini disebabkan oleh ruang greenhouse yang tertutup, sehingga panas dari sinar matahari

terperangkap dan menyebabkan efek rumah kaca. Tanaman hanya bisa tumbuh dan berkembang dengan baik pada suhu optimum. (Andriani dan Karmila 2019) pada suhu minimum tanaman akan terganggu pertumbuhannya, sedangkan pada suhu maksimum pertumbuhan akan terganggu dan juga dapat mengakibatkan tumbuhan mati.

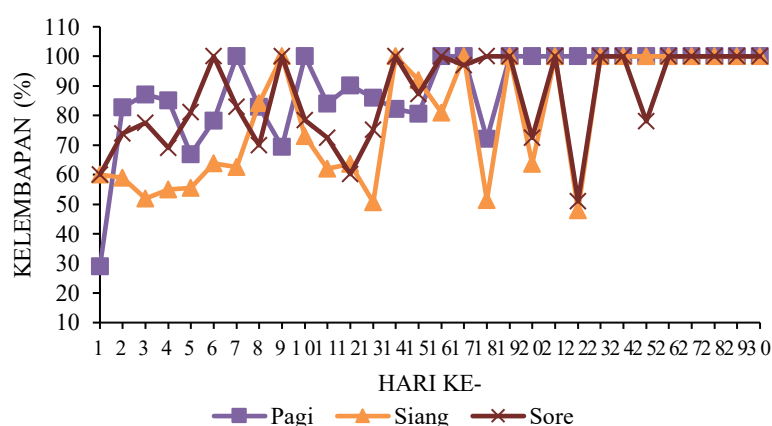
Kelembapan Udara

Grafik kelembapan udara kontrol (diluar *greenhouse*) dan didalam *greenhouse* dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Grafik Kelembapan Kontrol (Luar *Greenhouse*)

Grafik kelembapan kontrol selama 30 hari, terlihat bahwa kelembapan relatif lingkungan luar *greenhouse* cenderung bervariasi tergantung waktu pengukuran, yaitu pagi, siang, dan sore hari. Kelembapan pada pagi hari umumnya berada di kisaran tinggi, yaitu sekitar 80–95%, sementara pada siang hari mengalami penurunan hingga kisaran 39–90%, kemudian kembali meningkat pada sore hari ke angka sekitar 60–90%. Kelembapan yang tinggi di luar *greenhouse* dipengaruhi oleh fluktuasi cuaca harian, seperti angin dan intensitas cahaya matahari yang tinggi, kondisi lingkungan yang lebih terbuka memungkinkan sirkulasi udara yang baik dan penguapan yang stabil, sehingga menciptakan iklim mikro yang mendukung proses transpirasi dan penyerapan air oleh tanaman. Fardany & Rahmi, 2022 menyatakan bahwa kelembapan ideal untuk pertumbuhan tanaman hortikultura seperti pakcoy berada di kisaran 70–90%, dan kondisi tersebut lebih mudah dicapai dalam sistem.



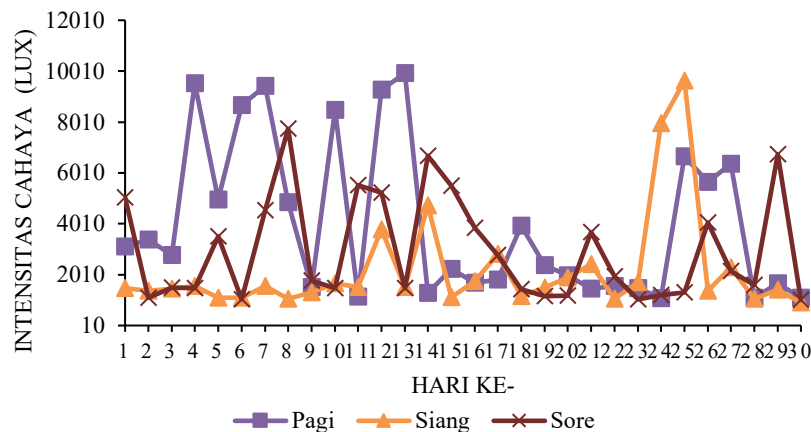
Gambar 8. Grafik Kelembapan didalam *Greenhouse*

Grafik kelembapan udara pada *greenhouse* selama 30 hari. Pengamatan dilakukan pada tiga waktu yang berbeda, yaitu pagi, siang, dan sore hari. Secara umum, kelembapan udara pada pagi dan sore hari cenderung lebih tinggi dan stabil dibandingkan pada siang hari. Hal ini dapat diamati dari

garis grafik pada pagi hari dan sore hari yang mencapai angka 80–100%, sementara pada siang hari lebih fluktuatif, bahkan beberapa kali turun di bawah 60%. Kelembapan tertinggi pada pagi dan sore hari berkisar antara 80% hingga 100%, yang menunjukkan kondisi kelembapan udara pada greenhouse cukup mendukung pertumbuhan tanaman, terutama karena kelembapan yang tinggi dapat mengurangi penguapan air dari tanaman.

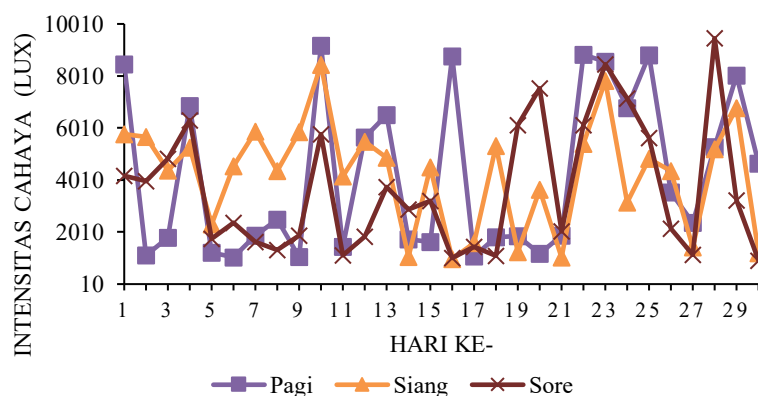
Intensitas Cahaya

Intensitas cahaya merupakan salah satu faktor lingkungan yang sangat berpengaruh terhadap proses fisiologis tanaman, terutama dalam kegiatan fotosintesis. Grafik intensitas cahaya dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10.



Gambar 9. Grafik Intensitas Cahaya Kontrol (Luar *Greenhouse*)

Intensitas cahaya matahari di luar greenhouse pada pagi hari mencapai 9521 lux, selanjutnya pada siang hari mencapai 9628 lux dan pada sore hari mengalami penurunan yaitu sebesar 7740 lux. Intensitas cahaya tertinggi umumnya terjadi pada siang hari, diikuti oleh pagi hari, sementara sore hari menunjukkan nilai paling rendah dan lebih stabil. Pola ini menunjukkan bahwa lahan kontrol menerima intensitas cahaya tinggi tanpa pelindung, sehingga berpotensi meningkatkan suhu dan menurunkan kelembapan secara drastis, yang pada akhirnya dapat memengaruhi proses fisiologis tanaman seperti fotosintesis dan transpirasi. Tanaman pakcoy sendiri membutuhkan intensitas cahaya optimal antara 8000–15000 lux untuk menunjang proses fotosintesis maksimal (Hikmawati & Syarif, 2021).



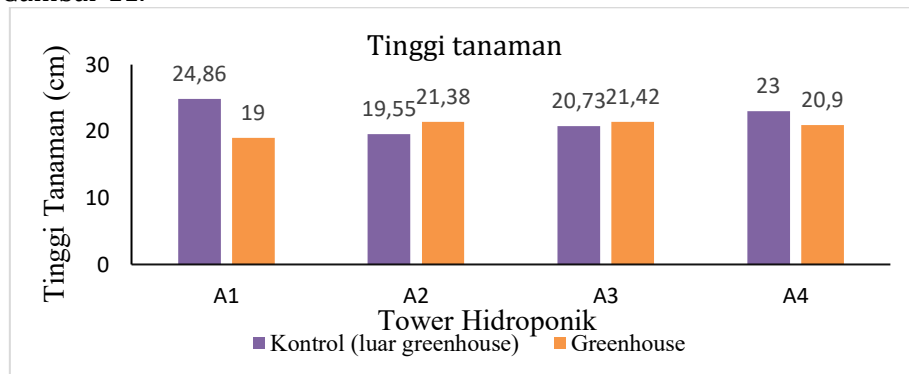
Gambar 10. Grafik Intensitas Cahaya didalam *Greenhouse*

Intensitas cahaya matahari di dalam greenhouse pada pagi hari mencapai 9180 lux, selanjutnya pada siang hari mencapai 8440 lux dan pada sore hari mencapai 8461 lux. Nilai intensitas cahaya tertinggi terjadi pada siang hari, disusul sore dan pagi hari, namun secara umum

nilainya lebih rendah dibandingkan dengan lahan kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa struktur greenhouse mampu mereduksi intensitas cahaya matahari yang masuk ke dalamnya. Keberadaan atap plastik atau penutup greenhouse berfungsi sebagai penyaring cahaya, sehingga mengurangi paparan langsung terhadap sinar matahari yang berlebihan. Hal ini penting untuk menciptakan lingkungan tumbuh yang stabil bagi tanaman, karena intensitas cahaya yang terlalu tinggi dapat meningkatkan suhu dan menyebabkan stres pada tanaman.

Tinggi Tanaman

Tinggi tanaman merupakan salah satu parameter penting dalam mengukur pertumbuhan tanaman secara morfologis. Rata-rata tinggi tanaman setiap sampel pada tower hidroponik dapat dilihat pada Gambar 11.

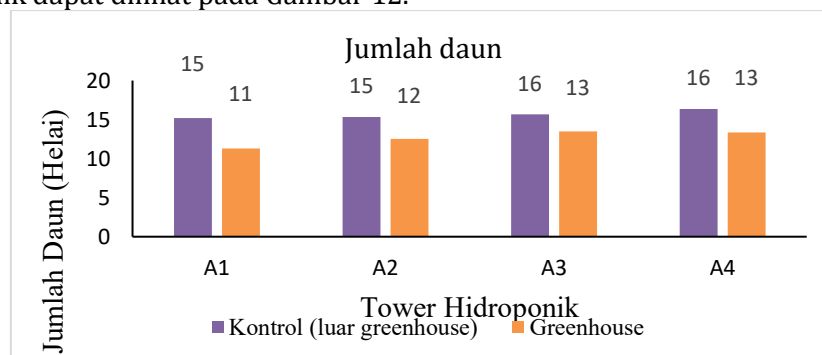


Gambar 11. Rata-rata Tinggi Tanaman Setiap Sampel pada Tower

Berdasarkan hasil yang didapatkan tinggi tanaman terbaik (maksimum) pada perlakuan suhu kontrol lebih tinggi dibandingkan perlakuan *greenhouse* terutama pada tower A1 dengan nilai rata-rata mencapai 24,86 cm. sedangkan tinggi tanaman terendah (minimum) sebesar 17,42 cm, dengan rata-rata tinggi tanaman mencapai 21,64 cm. Sementara itu, pada perlakuan *greenhouse*, tinggi tanaman maksimum sebesar 22,35 cm, tinggi minimum 15,27 cm, dan rata-rata 18,84 cm. Hal ini mendukung proses fotosintesis dan transpirasi tanaman secara lebih efektif. Sedangkan di dalam *greenhouse*, suhu cenderung lebih tinggi dan kelembaban juga meningkat akibat ruang yang tertutup, sehingga dapat menyebabkan stres pada tanaman dan menghambat pertumbuhan. Hal ini sejalan dengan penelitian (Muhadiansyah *et al.*, 2016) yang menyatakan bahwa apabila suhu yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan kelayuan pada tanaman.

Jumlah Daun

Daun berperan sebagai organ utama dalam proses fotosintesis, sehingga jumlah daun yang banyak umumnya menunjukkan pertumbuhan yang baik. Rata-rata jumlah daun setiap sampel pada tower hidroponik dapat dilihat pada Gambar 12.



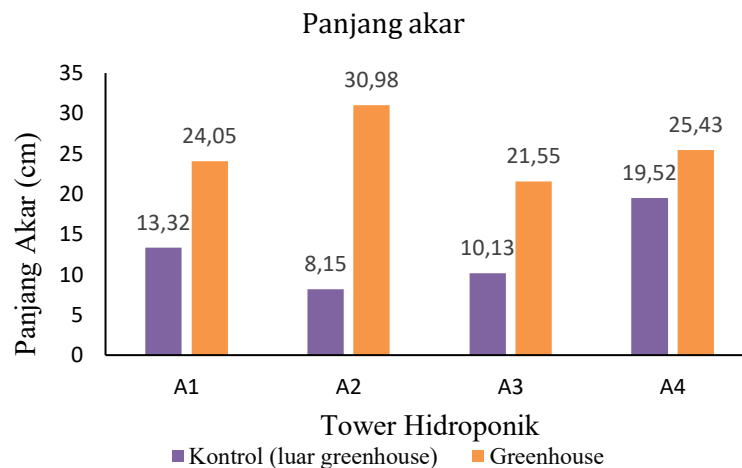
Gambar 12. Rata-rata Jumlah Daun Setiap Sampel pada Tower

Jumlah daun tanaman menunjukkan perbedaan antar sampel pada setiap tower hidroponik (A1–A4) yang diberi perlakuan suhu kontrol dan *greenhouse*. Secara umum, jumlah daun pada perlakuan suhu kontrol cenderung lebih tinggi dibandingkan perlakuan *greenhouse* di semua tower.

Pada tower A1, jumlah daun pada suhu kontrol mencapai sekitar 15 helai daun, sedangkan jumlah daun terendah (minimum) tercatat pada tower A1 pada *greenhouse* dengan 11 helai daun. Sementara itu, pada perlakuan *greenhouse*, jumlah daun maksimum diperoleh pada tower A3 dan A4 dengan 13 helai daun, dan jumlah daun minimum tercatat pada tower A1 dengan 11 helai daun, di mana suhu kontrol menghasilkan jumlah daun yang lebih banyak dibandingkan *greenhouse*. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh fluktuasi suhu dan kelembapan di dalam *greenhouse* yang memengaruhi proses fotosintesis serta metabolisme tanaman

Panjang Akar

Akar berfungsi dalam penyerapan air dan unsur hara, serta menunjang kestabilan tanaman. Rata-rata panjang akar setiap sampel pada tower hidroponik dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 12. Rata-rata Panjang Akar Setiap Sampel pada Tower

Panjang akar tanaman pada setiap tower hidroponik (A1–A4) menunjukkan perbedaan yang cukup terlihat antara perlakuan suhu kontrol dan *greenhouse*. Tower A2 menunjukkan panjang akar tertinggi dengan nilai rata-rata mencapai 30,98 cm pada *greenhouse*, sedangkan panjang akar minimum tercatat pada tower A3 yaitu 21,55 cm, menghasilkan rata-rata keseluruhan sepanjang 28,41 cm. Sementara itu, pada perlakuan suhu kontrol, panjang akar tertinggi tercatat pada tower A4 dengan 19,52 cm, dan panjang akar terendah pada tower A2 sebesar 8,15 cm, dengan rata-rata keseluruhan 17,38 cm. Hal yang sama juga terlihat pada tower A1. Hal ini dikarenakan lingkungan *greenhouse* memberikan kondisi yang lebih mendukung perkembangan sistem perakaran, karena kelembapan udara dan suhu yang lebih tinggi di dalam *greenhouse* merangsang pertumbuhan akar secara lebih aktif. Rata-rata panjang akar terbaik dikarenakan daya serap air dan nutrisi lebih baik. (Kurniati *et al.*, 2024) menyatakan bahwa semakin panjang akar maka semakin optimal tanaman menyerap nutrisi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan dapat ditarik kesimpulan yaitu : sistem pemantauan suhu serta kelembapan relatif (RH) berbasis ESP32 berhasil dirancang dan dibangun dengan mengintegrasikan sensor DHT22, sehingga mampu memantau kondisi iklim mikro di dalam *greenhouse* secara real-time, hasil uji kinerja menunjukkan bahwa sistem pemantauan suhu dan RH berbasis ESP32 untuk tanaman pakcoy mencapai tingkat akurasi yang cukup baik. Berdasarkan hasil perhitungan RMSE (Root Mean Square Error) sensor DHT22 pada suhu menunjukkan nilai RMSE sebesar 0,948°C dan nilai RMSE sensor DHT22 pada RH sebesar 2,689%. Hal ini menunjukkan bahwa sensor DHT22 memiliki tingkat akurasi yang baik dalam mengukur suhu dan RH dan penerapan sistem pemantauan iklim pada pertumbuhan tanaman pakcoy di dalam *greenhouse* menunjukkan bahwa iklim terkontrol di dalam *greenhouse* memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan akar, tetapi kurang optimal untuk pertumbuhan jumlah daun dan tinggi tanaman.

Respon tanaman tidak seragam karena dipengaruhi oleh variasi cahaya, kelembapan, serta sirkulasi udara pada masing-masing tower. Dengan demikian, pengaturan iklim di greenhouse perlu dioptimalkan agar dapat mendukung seluruh parameter pertumbuhan tanaman secara lebih seimbang.

Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu sistem perlu dikembangkan lebih lanjut dengan melakukan uji coba jangka panjang pada berbagai jenis tanaman, serta mengintegrasikan sistem monitoring dengan aplikasi berbasis web atau mobile untuk meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi pemantauan.

DAFTAR REFERENSI

- A. Rakhmi, "Rancang Bangun Smart Greenhouse untuk Budidaya Tanaman Cabai (*Capsicum Annum* L.) Berbasis Android," Laporan Tugas Akhir, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2018.
- Adrian, M., Hidayat, J., & Amrullah, A. Z. (2022). Sistem Kontrol dan Monitoring Tanaman Hidroponik Berbasis Internet of Things (Iot) Menggunakan Nodemcu Esp32. *Jurnal SAINTEKOM (Sains, Teknologi, Komputer dan Manajemen)*, 12(1), 23-32. <https://10.33020/saintekom.v12i1.223>.
- Ahamed, M. F., Atique, S., Munshi, M. A. K., & Koiranen, T. (2016). The Fluid Structure Interaction Analysis of A Peristaltic Pump: Basics and Analysis. *American Journal of Engineering Research*, 5(12), 155-167.
- Alamsyah, N., Rahmani, H. F & Yeni. (2022). Lampu Otomatis Menggunakan Sensor Cahaya Berbasis Arduino Uno Dengan Alat Sensor LDR. *Formosa Journal Of Applied Sciences (FJAS)*, 1(5), 703-712.
- Ansori, I. A. A., Putra, G. M. D & Side, G. N. D. (2025). Analisis Regresi Berganda yang Mempengaruhi Produksi Tanaman Pakcoy (*Brassica rapa* L.). *J-AGENT*, 3(3), 270-277.
- Aswad, I.A.H., Armono, H.D., Rahmawati, S., Ridlwan, A. & Ariefianto, R.M. 2021. Pemodelan Tinggi Gelombang Laut untuk Kajian Energi Gelombang Laut di Perairan Barat Provinsi Lampung. *Wave: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, 15(2), 75–84.
- Burhan, R., & Herlambang, M. B. (2024). Implementasi Predictive Maintenance pada Bearing dengan Menggunakan Machine Learning untuk Memprediksi Temperatur. *Repository Institut Teknologi Indonesia*, 9(1), 1-54.
- Ema Sastri Puspita, L. Y. (2016). Perancangan Sistem Peramalam Cuaca Berbasis Logika Fuzzy. *Media Infotama*, 12(1), 1–10.
- Fardany, H. R., & Rahmi, H. (2022). Pengaruh pemberian air fermentasi limbah organik terhadap pertumbuhan tanaman pakcoy (*Brassica rapa* L.) varietas Nauli F1. *Jurnal Ilmu Pertanian*, 5(2), 1–5. <https://doi.org/10.35334/jpen.v5i2.2767>.
- Fauzan, A., & Fahlefie, R. (2022). Sistem Monitoring Hidroponik Berbasis Arduino Uno. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Kendali dan Listrik*, 3(1), 84–94. <https://Doi.Org/10.33365/jimel.V1i1>.
- Grey M. Bonde, Daniel P. M. Ludong, Meicsy E. I. Najooan, (2021). Smart Agricultural System in Greenhouse Based on Internet of Things For Lettuce (*Lactuca Sativa* L.). *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 10(1):9-16.
- Hariady, S. 2014. Analisa Kerusakan Pompa Sentrifugal 53-101c WTU Sungai Gerong PT. Pertamina RU III Plaju. *Jurnal Desiminasi Teknologi*, 2(1): 29-42.
- Hamdanah, F. H., & Fitrihanah, D. (2021). Analisis Performansi Algoritma Linear Regression dengan Generalized Linear Model untuk Prediksi Penjualan pada Usaha Mikra, Kecil, dan Menengah. *Jurnal Nasional Pendidikan Teknik Informatika: JANAPATI*, 10(1), 23-32.
- Hutasoit, Y. G. (2023). Optimalisasi Pemanfaatan Otomasi Greenhouse Dan Hydroponic Dalam Meningkatkan Produksi Dan Keberhasilan Terhadap Pertanian Budidaya Pakcoy Di PT Inamas Sintesis Teknologi. *Jurnal Kajian dan Penelitian Umum*, 1(2), 76-86. <https://doi.org/10.47861/jkpu-nalanda.v1i2.285>

- Imran, A. (2020). Pengembangan Tempat Sampah Pintar Menggunakan Esp32. *Media Elektrik*, 17(2), 1907-1728.
- Isbaktiar, I. (2022). Perancangan Sistem Kendali Peralatan Listrik Jarak Jauh Melalui Internet Berbasis Mikrokontroler. *Jurnal Pendidikan Sains Dan Komputer*, 2(02), 337-340. <https://doi.org/10.47709/jpsk.v2i02.1743>
- Junaidi, & Prabowo, Y. D. 2018. *Project Sistem Kendali Elektronik Berbasis Arduino*. Bandar Lampung: AURA.
- Khairiyah, H., & Luki, H. (2023). Smart Greenhouse Untuk Budidaya Tanaman Hidroponik Menggunakan Arduino Berbasis Telegram. *Jurnal Quancom*, 1(1), 21-26.
- Kamelia, L., Sukmawiguna, Y & Adiningsih, N. U. (2017). Rancang Bangun Sistem Exhaust Fan Otomatis Menggunakan Sensor Light Dependent Resistor (LDR). *Jurnal Istek*, 10(1), 154-169.
- Kahfi, M., Falgenti, K., Rizqi, L. D., & Megawulan, D. (2023). Analisis pengaruh suhu udara rata-rata terhadap kelembaban di wilayah DKI Jakarta menggunakan Regresi Linear. *CENTIVE*, 3(1), 852-859.
- Muhadiansyah, T. O., Setyono, & Adimihardja, S. A. (2016). Efektivitas Pencampuran Pupuk Organik Cair dalam Nutrisi Hidroponik pada Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Selada (*Lactuca Sativa* L.). *J. Agronida*, 2(1), 37-46. <https://doi.org/10.30997/jag.v2i1.749>
- Jumrianto., Wahyudi & Syakur, A. (2020). Kalibrasi Sensor Tegangan dan Sensor Arus dengan Menerapkan Rumus Regresi Linear menggunakan Software Bascom AVR. *Journal of Systems, Information Technology, and Electronics Engineering*, 1(1), 1-14. <https://doi.org/10.31331/jsitee.v1i1.7525-1>.
- Ménard, A. 2017. How Can We Recognize The Real Power Of The Internet Of Things. Retrieved From <https://www.mckinsey.com/businessfunctions/digital-mckinsey/our-insights/howcan-we-recognize-the-real-power-of-the-internet-of-things>.
- Meutia, Ernita Dewi. 2015. Internet Of Things – Keamanan Dan Privasi. *Seminar Nasional dan Expo Teknik Elektro*, 85-89.
- Pagar, G. J., Varade, B. V. 2016. An Overview Of Vibrational Analysis Of Peristaltic Pump International. *Journal Of Recent Trends In Engineering & Research*, 2 (12): 211-214.
- Project Hub. 2016, Temperature Monitoring With DHT22 & Arduino.
- Ramadhini, F., Rohman, A. M., & Ulya, A. (2024). Optimalisasi Pertanian melalui Pemanfaatan Lahan Sempit dan Pengolahan Sampah Organik di Kampung Cicere, Cigudeg. *Jurnal Pusat Inovasi Masyarakat (PIM)*, 6(1), 53-61. <https://doi.org/10.29244/jpim.6.1.53-61>.
- Riani, I. N., Syamsuri & Pratama, R. R. (2017). Simulasi Numerik Aliran Melewati Nozzle Ejector Converging-Diverging dengan Variasi Diameter Exit Nozzle. *REM(Rekayasa Energi Manufaktur) Journal*, 2(1), 24. <https://doi.org/10.21070/r.e.m.v2i1.796>.
- Rukmana, R. 2012. *Bertanam Petsai dan Sawi*. Kanisius. Yogyakarta.
- Wagya, A., & Rahmat. 2019. Prototype Modul Praktikum untuk Pengembangan Aplikasi Internet Of Things (Iot). *Jurnal Ilmiah Setrum*, 8(2), 240-241. <http://dx.doi.org/10.36055/setrum.v8i2.6561>.