

e-ISSN : 3031-0342
Diterima: : 11 Agustus 2025
Disetujui : 14 Desember 2025
Tersedia online di <https://journal.unram.ac.id/index.php/agent>

AKURASI PENGUKURAN LUAS DAUN TANAMAN PAKCOY (*BRASSICA RAPA L.*) BERBASIS PENGOLAHAN CITRA DIGITAL PADA SISTEM HIDROPONIK VERTIKAL DENGAN SUHU DINGIN PADA DAERAH PERAKARAN

*Measurement Accuracy of Pakcoy (*Brassica rapa L.*) Leaf Area Using Digital Image Processing
in a Vertical Hydroponic System with Root Zone Cooling*

Elza Widia Lingga¹, Guyup Mahardian Dwi Putra¹, Ida Ayu Widhiantari¹

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

email: elzawily6856@gmail.com

ABSTRACT

Leaf area is an important indicator in assessing plant growth because it directly affects photosynthetic efficiency and nutrient absorption. Manual measurement methods are considered inefficient, so the use of digital image processing technology is a fast and accurate alternative solution. This study aims to: (1) assess the effect of cold temperatures on the root zone on pakcoy plant growth, (2) analyze the accuracy of digital image processing in measuring leaf area using Easy Leaf Area and ImageJ, and (3) analyze the relationship between leaf area and plant growth. The study was conducted over 30 days using two temperature treatments (cold and control) in a vertical hydroponic system with 48 plants. The observed parameters included environmental parameters (water temperature in the cold temperature treatment, environmental temperature and humidity, light intensity, and nutrient solution concentration) and growth parameters (plant height, number of leaves, root length, and leaf area using Easy Leaf Area and ImageJ). The results showed that the water temperature in the cold treatment was 22°C–24°C, environmental temperature and humidity were 29.47–32.28°C; 72.9–84.3%, light intensity was 2420–3904 lux, and nutrient solution concentration was 926–1338 ppm; for plant height growth of 25.96 cm in the cold treatment, 21.10 cm in the control, number of leaves 15 in the cold treatment, 14 in the control, root length 18–22 cm in the cold treatment, 8–19 cm in the control, and leaf area using Easy Leaf Area 206.87–714.35 cm², ImageJ 288.42–773.23 cm². Cold temperatures significantly affect pakcoy growth parameters, particularly leaf area. The Mean Absolute Percentage Error (MAPE) value of 13.11% indicates high accuracy (10% ≤). Thus, digital image processing has proven to be accurate and can be applied for real-time monitoring of plant growth in vertical hydroponic systems.

Keywords: cold temperature; digital image; leaf area; pakcoy; vertical hydroponics

ABSTRAK

Luas daun menjadi indikator penting dalam menilai pertumbuhan tanaman karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi fotosintesis dan penyerapan nutrisi. Metode pengukuran manual dinilai kurang efisien, sehingga penggunaan teknologi pengolahan citra digital menjadi solusi

alternatif yang cepat dan akurat. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menilai pengaruh suhu dingin pada daerah perakaran terhadap pertumbuhan tanaman pakcoy, (2) menganalisis akurasi pengolahan citra digital dalam mengukur luas daun menggunakan *Easy Leaf Area* dan *ImageJ*, serta (3) menganalisis hubungan antara luas daun dengan pertumbuhan tanaman. Penelitian dilakukan selama 30 hari menggunakan dua perlakuan suhu (dingin dan kontrol) pada sistem hidroponik vertikal menggunakan 48 tanaman. Parameter yang diamati terdiri dari, parameter lingkungan (suhu air pada perlakuan suhu dingin, suhu dan kelembapan lingkungan, intensitas cahaya, dan konsentrasi larutan nutrisi) dan parameter pertumbuhan (tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar, dan luas daun menggunakan *Easy Leaf Area* dan *ImageJ*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu air pada perlakuan suhu dingin yaitu 22°C-24°C, suhu dan kelembapan lingkungan 29,47–32,28°C; 72,9–84,3%, intensitas cahaya 2420–3904 lux, serta konsentrasi larutan nutrisi 926–1338 ppm; untuk pertumbuhan tinggi tanaman 25,96 cm dingin, 21,10 cm kontrol, jumlah daun 15 helai dingin, 14 kontrol, panjang akar 18–22 cm dingin, 8–19 kontrol, dan luas daun *Easy Leaf Area* 206,87–714,35 cm², *ImageJ* 288,42–773,23 cm². Suhu dingin berpengaruh terhadap parameter pertumbuhan pakcoy, terutama luas daun. Nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 13,11%, menunjukkan tingkat akurasi tinggi (10% ≤). Dengan demikian, pengolahan citra digital terbukti akurat dan dapat diterapkan dalam pemantauan pertumbuhan tanaman secara *real-time* pada sistem hidroponik vertikal.

Kata Kunci: citra digital; hidroponik vertical; luas daun; suhu dingin; pakcoy

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pakcoy dalam sistem hidroponik Nutrient Film Technique (NFT) menunjukkan pertumbuhan optimal melalui parameter seperti tinggi tanaman, jumlah daun, lebar daun, berat basah dan kering, serta luas daun yang penting untuk produktivitas (Nofitria, Silfani, Nattasha, & Fevria, 2023). Luas daun menjadi indikator krusial karena berkaitan langsung dengan kapasitas fotosintesis dan penyerapan nutrisi tanaman. Namun, metode konvensional pengukuran luas daun dinilai tidak efisien dan kurang akurat. Penelitian menunjukkan bahwa metode digital dapat memberikan hasil yang lebih cepat dan akurat dibandingkan teknik destruktif (Umam et al., 2023).

Faktor lingkungan seperti suhu juga memengaruhi pertumbuhan pakcoy. Suhu rendah dapat menghambat proses fisiologis tanaman, termasuk luas daun . (Tamala, 2023) (Balai Penelitian Sayuran, 2020). Oleh karena itu, penggunaan teknologi seperti pengolahan citra digital menjadi solusi efisien dalam mengukur parameter

pertumbuhan tanaman. Metode ini terbukti akurat dalam mengukur klorofil, tinggi tanaman, dan luas daun pada berbagai fase pertumbuhan pakcoy (Marselina, 2023).

Teknologi pertanian presisi kini berkembang dengan integrasi aplikasi Android dan *Internet of Things* (IoT), yang mampu mengurangi kesalahan pengukuran secara signifikan (Prayogo & Basith, 2021). Selain itu, kecerdasan buatan juga memungkinkan deteksi hama dan penyakit secara otomatis (Alami, Herdiyeni, Kusuma, Tjahjono, & Siregar, 2023)serta memberikan data pertumbuhan tanaman yang lebih komprehensif (Cahyono & Hariono, 2021).

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan mengintegrasikan metode pengolahan citra digital berbasis Android untuk mengukur luas daun pakcoy secara efisien dalam sistem hidroponik vertikal bersuhu terkendali.

Tujuan

- Tujuan dari penelitian ini yaitu:
- Untuk menilai pengaruh suhu dingin terhadap pertumbuhan tanaman pakcoy (*Brassica rapa L.*) dalam sistem hidroponik vertikal.

2. Untuk menganalisis akurasi pengolahan citra digital dalam mengukur luas daun pakcoy (*Brassica rapa L.*) pada suhu dingin dalam sistem hidroponik vertikal.
3. Untuk menganalisis hubungan luas daun pakcoy dengan hasil produksi tanaman atau pertumbuhan tanaman.

Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian dibatasi pada hal – hal berikut:

1. Penelitian ini hanya difokuskan pada tanaman pakcoy (*Brassica rapa L.*) yang dibudidayakan dalam sistem hidroponik vertikal.
2. Perlakuan yang diberikan terbatas pada dua kondisi suhu daerah perakaran, yaitu:
 - Suhu dingin (dengan tambahan es batu).
 - Suhu kontrol (mengikuti suhu lingkungan tanpa perlakuan pendinginan).
3. Parameter pertumbuhan tanaman yang diamati mencakup:
 - Tinggi tanaman.
 - Jumlah daun.
 - Panjang akar.
 - Luas daun.
4. Pengukuran luas daun dilakukan dengan dua metode pengolahan citra digital, yaitu:
 - Aplikasi *ImageJ* (sebagai metode referensi),
 - Aplikasi *Easy Leaf Area* (sebagai metode pengukuran utama).
5. Analisis akurasi difokuskan pada perbandingan nilai pengukuran luas daun dari kedua aplikasi menggunakan pendekatan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE).
6. Penelitian dilaksanakan dalam rentang waktu 30 hari dan menggunakan jumlah sampel sebanyak 48 tanaman, dengan 10 sampel acak digunakan untuk perbandingan metode pengolahan citra.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 25 Oktober sampai dengan 23 November 2024 di Lantai 2 Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri, Universitas Mataram.

Alat dan Bahan Penelitian

1. Alat

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini, yaitu laptop, *smartphone*, alat tulis, pompa air, netpot, rockwool, kain planel, penggaris, sistem hidroponik vertikal, hygrometer digital HTC 2, bak penampung hidroponik (*styrofoam*), TDS-3 meter, dan thermometer. Selain itu, digunakan perangkat lunak *Easy Leaf Area* dan *ImageJ* yang diinstal pada smartphone dan laptop untuk keperluan pengolahan citra digital dalam pengukuran luas daun tanaman pakcoy.

2. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini, yaitu benih pakcoy, air dingin, es batu dan nutrisi AB mix.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan eksperimen dengan desain terkontrol pada sistem hidroponik vertikal yang menggunakan dua perlakuan, yaitu suhu dingin (dengan es batu untuk menjaga suhu perakaran 20–28 °C) dan suhu kontrol (tanpa pendinginan). Sebanyak 48 tanaman pakcoy dibagi rata ke dalam dua perlakuan, masing-masing terdiri dari empat tower hidroponik yang setiap tower memuat enam tanaman. Pengamatan dilakukan selama 30 hari terhadap tinggi tanaman, jumlah daun, dan luas daun secara harian, sedangkan panjang akar diukur pada akhir masa tanam. Pengukuran luas daun dilakukan menggunakan aplikasi Easy Leaf Area. Selain itu, pada hari ke-20, citra dari 10 tanaman sampel diambil secara acak dan dianalisis dengan ImageJ untuk

membandingkan akurasi kedua metode pengolahan citra digital tersebut.

Parameter Penelitian

Dalam penelitian ini, parameter yang diamati dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu parameter lingkungan dan parameter pertumbuhan.

Parameter Lingkungan

1. Suhu air pada daerah perakaran (°C)

Suhu air diukur menggunakan termometer batang yang ditempatkan langsung ke dalam bak nutrisi pada masing-masing tower. Pengukuran dilakukan tiga kali sehari yaitu, pagi, siang, dan sore selama 30 hari pengamatan. Suhu ini penting karena memengaruhi kesehatan akar dan pemyerapan nutrisi.

2. Suhu lingkungan (°C)

Suhu lingkungan diukur setiap hari menggunakan alat termohygrometer yang diletakkan di tengah area penelitian. Pengukuran dilakukan setiap hari pada tiga waktu (pagi, siang dan sore) bersamaan dengan pengukuran suhu air, untuk memastikan keterkaitan kondisi mikrolimat secara menyeluruh. Parameter suhu ini penting karena dapat memengaruhi fotosintesis dan laju pertumbuhan tanaman.

3. Kelembapan lingkungan (%)

Kelembapan lingkungan diukur menggunakan termohygrometer digital. Pengukuran dilakukan setiap hari tiga kali sehari (pagi, siang dan sore) bersamaan dengan suhu lingkungan, selama masa penelitian. Kelembapan lingkungan yang sesuai membantu menjaga keseimbangan air pada tanaman.

4. Intensitas cahaya (Lux)

Intensitas cahaya diukur dengan menggunakan alat lux meter. Alat diarahkan pada tanaman secara tegak lurus dari arah datangnya cahaya. Pengukuran dilakukan setiap hari tiga kali sehari (pagi, siang, dan sore) selama 30 hari pengamatan. hasil pengukuran dalam satuan lux dicatat secara konsisten dan tanpa bayangan. Cahaya yang cukup sangat penting untuk proses fotosintesis

5. Konsentrasi Larutan Nutrisi (ppm)

Konsentrasi larutan nutrisi diperiksa secara berkala dengan TDS meter. Pengukuran dilakukan dua kali sehari, yaitu pagi (sebelum larutan disirkulasikan ke tanaman) pada pukul 07.00 WITA, dan sore hari (setelah tanaman menerima larutan selama beberapa jam) pada pukul 17.00 WITA, dilakukan secara rutin selama 30 hari masa pengamatan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui fluktuasi konsentrasi nutrisi akibat penyerapan oleh akar.

Parameter Pertumbuhan

1. Tinggi tanaman (cm)

Tinggi tanaman diukur menggunakan penggaris plastik berukuran 30 cm. Pengukuran dilakukan dari pangkal batang hingga titik tumbuh tertinggi. Data diambil setiap hari pada pukul 07.00 WITA selama 30 hari masa pengamatan, dimulai sejak umur tanaman 1 hari setelah tanaman (HST). Pengukuran dilakukan secara vertikal dan konsisten dari arah yang sama untuk menjaga akurasi dan menghindari kesalahan pengamatan.

2. Jumlah daun (helai)

Jumlah helai daun dihitung dengan cara menghitung seluruh daun yang telah membuka sempurna. Pengamatan parameter pertumbuhan jumlah daun dilakukan setiap hari pada pukul 07.00 WITA, bersamaan dengan pengukuran tinggi tanaman.

3. Panjang akar (cm)

Panjang akar diukur menggunakan penggaris pada akhir masa tanam, yaitu hari ke-30. Pengukuran dilakukan setelah tanaman dicabut dari netpot dan akar dibersihkan dari sisa media tanam. Panjang akar diukur dari pangkal batang hingga ujung akar terpanjang secara lurus.

4. Luas daun (cm²)

Luas daun diukur menggunakan metode pengolahan citra digital dengan dua jenis aplikasi, yaitu *Easy Leaf Area* dan *ImageJ*, guna membandingkan hasil akurasi dan efisiensinya dalam pengukuran pertumbuhan tanaman.

- *Easy Leaf Area*

Pengukuran luas daun harian dilakukan menggunakan aplikasi *Easy Leaf*

Area yang diinstal pada smartphone Android. Citra daun diambil setiap hari pada jarak ±30 cm secara tegak lurus, menggunakan latar belakang putih dan pencahayaan alami agar tetap konsisten. Aplikasi ini secara otomatis menghitung luas daun berdasarkan perbedaan warna antara daun dan area referensi (berwarna merah 4x2 cm). Hasil pengukuran ini digunakan sebagai data pertumbuhan harian tanaman.

- *ImageJ*

Untuk kebutuhan analisis akurasi, pada hari ke-20 dilakukan pengambilan citra terhadap 10 sampel tanaman yang dipilih secara acak. Gambar kemudian diproses menggunakan aplikasi *ImageJ* melalui komputer, dengan teknik konversi citra ke format biner dan kalibrasi skala menggunakan refrensi panjang aktual. Pengukuran dilakukan sebagai pembanding terhadap hasil *Easy Leaf Area*.

Penggunaan dua aplikasi ini bertujuan untuk membandingkan tingkat akurasi, kemudahan penggunaan, dan efisiensi waktu dalam pengukuran luas daun tanaman pakcoy yang dibudidayakan secara hidroponik vertikal.

Prosedur Penelitian

Pelaksanaan penelitian meliputi persiapan alat dan bahan, penyemaian, pengaturan kondisi lingkungan, pengukuran parameter pertumbuhan, pengambilan gambar daun, analisis luas daun (*ImageJ* dan *Easy Leaf Area*) dan analisis data.

Persiapan Alat dan Bahan

Penelitian dimulai dengan tahap mempersiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan, setelah itu merancang desain percobaan yang akan dilakukan dengan merancang perlakuan yang akan diberikan, jumlah sampel dan parameter yang diamati. Pilih lokasi penelitian yang sesuai dengan kondisi lingkungan yang stabil. Siapkan sistem hidroponik vertikal dan media tanam yang akan digunakan untuk menanam pakcoy.

Penyemaian Benih

Tanam benih pakcoy dalam sistem hidroponik sesuai dengan petunjuk penanaman. Pastikan benih ditanam pada kedalaman yang tepat dan dalam jumlah yang cukup untuk memperoleh sampel yang representatif. Penyemaian dilakukan menggunakan media tanam rockwool. Setelah berumur sekitar 14 hari atau telah tumbuh 2–3 helai daun sejati, bibit pakcoy dipindahkan ke dalam sistem hidroponik vertikal sesuai dengan perlakuan yang telah ditentukan, yaitu suhu dingin dan suhu kontrol.

Penanaman dan Pemeliharaan

Tahap penanaman merupakan tahap dimana benih yang sudah tumbuh dipindah ke sistem hidroponik vertikal. Setelah itu dilakukan pemeliharaan dengan pemantauan lingkungan, monitor suhu dan kelembaban secara berkala menggunakan alat pengukur digital serta pemberian nutrisi dalam larutan hidroponik selama periode pertumbuhan.

Pengukuran Parameter Pertumbuhan Tanaman

Pengukuran tanaman meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, dan luas daun, yang dilakukan secara rutin selama masa penelitian. Seluruh data dicatat dengan teliti sebagai dasar untuk analisis lebih lanjut.

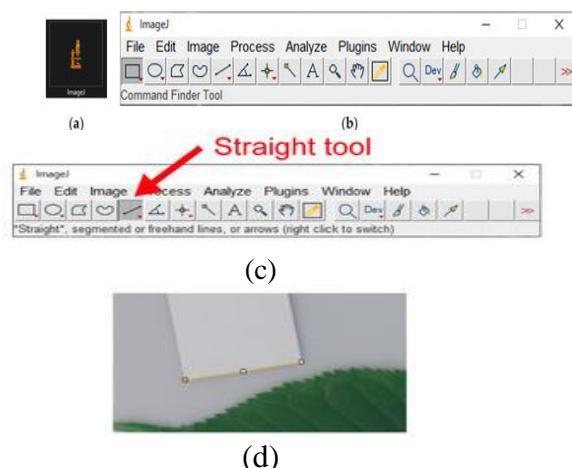
Pengambilan Gambar Daun

Mengambil gambar daun pakcoy dengan kamera digital dalam pencahayaan yang konsisten. Pastikan sudut pengambilan gambar seragam untuk akurasi analisis.

Analisis Luas Daun

Analisis pengukuran luas daun dalam penelitian ini di bagi menjadi dua metode, yaitu:

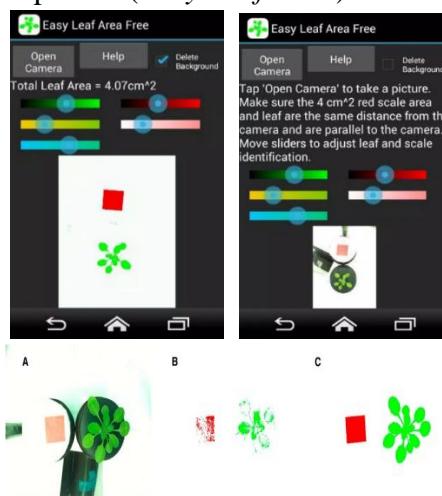
1. Citra Digital (*ImageJ*)



Gambar 5. Cara Penggunaan Aplikasi *ImageJ* (a) Tampilan awal, (b) Toolbar, (c) Straight tool, (d) Kalibrasi skala pada penggaris atau objek refrensi.

Gambar 5 menunjukkan tampilan antarmuka aplikasi *ImageJ* yang digunakan dalam penelitian ini. Subgambar (a) merupakan ikon aplikasi saat pertama kali dijalankan, sedangkan (b) dan (c) menampilkan toolbar utama, termasuk alat penting seperti Straight Tool yang digunakan untuk kalibrasi skala pada gambar. Subgambar (d) memperlihatkan contoh penerapan kalibrasi menggunakan objek referensi berupa penggaris yang telah diketahui ukurannya. Kalibrasi ini penting untuk memastikan bahwa hasil pengukuran luas daun yang diperoleh benar-benar mewakili satuan riil dalam cm^2 , bukan sekadar piksel.

2. Aplikasi (*Easy Leaf Area*)



Gambar 6. Cara Penggunaan Aplikasi *Easy Leaf Area* (a) Sebelum diproses, (b) setelah pemilihan piksel terhijau dan termerah, (c) Setelah pemrosesan otomatis akhir

Gambar 6 menunjukkan tahapan penggunaan aplikasi *Easy Leaf Area* dalam proses pengolahan citra daun secara otomatis. Subgambar (a) memperlihatkan tampilan awal aplikasi sebelum gambar diproses, sementara (b) menunjukkan hasil setelah aplikasi berhasil mendeteksi dan memisahkan piksel hijau daun serta referensi merah. Subgambar (c) menggambarkan hasil akhir proses otomatis setelah aplikasi menghitung luas daun berdasarkan warna hijau yang terdeteksi. Warna merah pada gambar berfungsi sebagai kalibrasi skala, sehingga hasil pengukuran dapat dikonversi langsung ke satuan cm^2 . Proses ini menjadikan *Easy Leaf Area* sebagai alat yang praktis dan efisien untuk mendeteksi dan mengukur luas daun tanpa intervensi manual yang kompleks.

Aplikasi ini digunakan melalui beberapa langkah sebagai berikut: pertama, Aplikasi *Easy Leaf Area* dibuka di *smartphone*. Gambar diambil langsung melalui fitur kamera dalam aplikasi (*open camera*) atau impor dari gambar yang sudah tersedia. Daun diletakkan di atas kertas putih dengan jarak kamera sekitar 30 cm dan posisi tegak lurus untuk memastikan kontras yang jelas. Pencahayaan dijaga agar merata dan bayangan yang mengganggu dihindari. Setelah itu, warna daun ditentukan, lalu dikenali secara otomatis oleh aplikasi sebagai area hijau yang dipisahkan dari latar belakang. Luas daun kemudian dihitung secara otomatis oleh aplikasi dan ditampilkan dalam satuan cm^2 . Hasil pengukuran dapat disimpan sebagai referensi.

Analisis Data

Pada penelitian ini, data luas daun

tanaman pakcoy dianalisis menggunakan dua metode pengolahan citra digital, yaitu *ImageJ* dan Easy Leaf Area. Kedua metode digunakan untuk menghitung luas daun berdasarkan citra daun tanaman yang diambil pada umur 20 hari setelah tanam. Sampel citra diambil dari 10 tanaman yang dipilih secara acak dari perlakuan suhu dingin. Analisis dilakukan untuk membandingkan tingkat akurasi dan konsistensi hasil antara kedua aplikasi digital tersebut. Evaluasi dilakukan dengan menghitung *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) (Nurani, Setiawan, & Susanto, 2023) sebagai indikator besarnya deviasi hasil pengukuran antara metode. Dapat dilihat pada persamaan (1).

a. *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE)

Rumus MAPE digunakan untuk menghitung persentase rata-rata kesalahan antara hasil pengukuran otomatis menggunakan *Easy Leaf Area* dan hasil pengukuran refrensi menggunakan *ImageJ*:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_t - Y'_t}{Y_t} \right| \times 100\% \quad \dots\dots(1)$$

Keterangan:

- Y_t : Luas daun hasil pengukuran *Easy Leaf Area*
- Y'_t : Luas daun hasil pengukuran menggunakan *ImageJ*
- N : Jumlah sampel

Nilai MAPE yang lebih kecil menunjukkan bahwa hasil pengukuran luas daun menggunakan dua metode pengolahan citra digital (*Easy Leaf Area* dan *ImageJ*) semakin akurat dan konsisten. Perbandingan ini mirip dengan penelitian (Easlon & Bloom, 2014), di mana *Easy Leaf Area* dibandingkan dengan *ImageJ* sebagai metode refrensi digital, menunjukkan kesalahan pengukuran yang sangat rendah (di bawah 4%). Menurut klasifikasi yang dikemukakan oleh (Mahsup et al., 2024), nilai MAPE dapat diklasifikasikan ke dalam empat kategori tingkat akurasi, sebagaimana ditunjukkan Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Nilai MAPE

| Persentase | Kategori |
|------------------|---------------|
| < 10% | Sangat Akurat |
| 10% ≤ MAPE < 20% | Akurat |
| 20% ≤ MAPE < 50% | Kurang Akurat |
| ≥ 50% | Tidak Akurat |

Tabel 1 menunjukkan kriteria klasifikasi tingkat akurasi berdasarkan nilai MAPE yang dibagi ke dalam empat kategori, yaitu sangat akurat, akurat, kurang akurat, dan tidak akurat. Kategori ini didasarkan pada persentase nilai MAPE yang diperoleh dari hasil perbandingan antara data hasil pengukuran dengan data referensi. Semakin kecil nilai MAPE, maka metode pengukuran dianggap semakin akurat. Klasifikasi ini menjadi dasar dalam menilai sejauh mana keakuratan metode pengolahan citra digital yang digunakan dalam penelitian ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh suhu dingin pada daerah perakaran terhadap pertumbuhan tanaman pakcoy serta akurasi pengukuran luas daun menggunakan citra digital. Pendekatan yang digunakan adalah perbandingan kuantitatif antara dua perlakuan (suhu dingin dan kontrol), dengan analisis data untuk mengidentifikasi perbedaan signifikan pada parameter pertumbuhan.

Pengamatan parameter lingkungan dilakukan untuk memahami kondisi mikroklimat yang memengaruhi pertumbuhan tanaman dalam sistem hidroponik vertikal. Salah satu parameter utama adalah suhu air di daerah perakaran, yang diukur tiga kali sehari selama 30 hari. Hasil pengukuran suhu rata-rata per minggu digunakan untuk menilai kestabilan suhu dan dampaknya terhadap aktivitas akar dalam penyerapan nutrisi.

Tabel 2. Rata-rata Suhu Air pada Perlakuan Suhu Dingin

| Minggu ke- | Rentang Hari | Rata-Rata Suhu (°C) |
|------------|--------------|---------------------|
| 1 | 1-7 | 24,04 |
| 2 | 8-14 | 22,00 |
| 3 | 15-21 | 24,42 |
| 4 | 22-30 | 23,85 |

Berdasarkan Tabel 2, suhu air pada minggu pertama dan ketiga tercatat di atas kisaran optimal untuk pertumbuhan akar pakcoy, yaitu masing-masing 24,04°C dan 24,42°C, sementara minggu kedua dan keempat lebih mendekati suhu ideal, yakni 22°C–23°C. Penelitian (Christofel et al., 2023) menyatakan bahwa suhu 20°C pada zona perakaran selama 4 jam per hari mampu menghasilkan pertumbuhan pakcoy yang optimal dalam sistem hidroponik wick. Suhu di atas 24°C

diketahui dapat menurunkan laju pertumbuhan akar dan meningkatkan risiko stres akar. Hal serupa juga ditemukan oleh (Maludin et al., 2020) yang menyebutkan bahwa suhu di atas 27°C dalam sistem rakit apung menurunkan biomassa akar dan meningkatkan tingkat stres tanaman.

Penurunan suhu pada minggu kedua dan keempat kemungkinan dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti curah hujan atau kelembaban yang lebih tinggi, maupun pendinginan pasif dari sistem. Secara keseluruhan, suhu air pada zona akar cenderung masih melebihi kisaran ideal, sehingga penggunaan sistem pendingin aktif seperti peltier, aerator suhu rendah, atau sirkulasi air es direkomendasikan untuk menjaga kestabilan suhu perakaran dalam kisaran optimal.

Suhu dan Kelembapan Lingkungan

Suhu dan kelembapan merupakan faktor lingkungan penting yang sangat memengaruhi pertumbuhan tanaman, khususnya dalam sistem hidroponik yang sensitif terhadap perubahan mikroklimat. Suhu optimal mendukung proses

fotosintesis, respirasi, dan penyerapan nutrisi, sedangkan kelembapan yang sesuai menjaga keseimbangan transpirasi dan menghindari stres fisiologis pada tanaman. Dalam penelitian ini, pengamatan suhu dan kelembapan lingkungan dilakukan setiap hari selama 30 hari. Data rata-rata suhu dan kelembapan per minggu disajikan dalam Tabel 3 sebagai dasar evaluasi terhadap kondisi mikroklimat yang memengaruhi pertumbuhan pakcoy.

Tabel 3. Rata-rata Suhu dan Kelembapan Lingkungan Suhu Dingin

| Minggu ke- | Rata-rata suhu lingkungan (°C) | Rata-rata Kelembapan (%) |
|------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1 | 32,28 | 72,09 |
| 2 | 30,23 | 76,00 |
| 3 | 29,47 | 77,42 |
| 4 | 29,85 | 84,03 |

Berdasarkan Tabel 3, suhu lingkungan selama penelitian menunjukkan tren penurunan dari minggu pertama hingga ketiga, dengan kenaikan kembali di minggu keempat. Suhu tertinggi tercatat sebesar 32,28°C (minggu pertama), dan terendah 29,47°C (minggu ketiga). Kelembapan meningkat secara bertahap, dari 72,09% pada minggu pertama hingga mencapai 84,03% pada minggu keempat. Perubahan ini berpotensi memengaruhi pertumbuhan tanaman pakcoy dalam sistem hidroponik vertikal yang sensitif terhadap fluktuasi mikroklimat.

Suhu optimal untuk tanaman hidroponik umumnya berada di kisaran 20°C–30°C. (Rahayu et al., 2019) mencatat bahwa suhu 30°C dengan kelembapan 90% mendukung pertumbuhan *Fusarium verticillioides*, mengindikasikan bahwa suhu tinggi dapat memicu aktivitas organisme tertentu. Namun, suhu lingkungan yang terlalu tinggi dalam sistem hidroponik dapat mengurangi kadar oksigen terlarut, menghambat penyerapan nutrisi, dan meningkatkan risiko penyakit, sedangkan suhu rendah memperlambat metabolisme tanaman.

Kelembapan udara juga berperan penting dalam menjaga keseimbangan transpirasi. (Setiawan & Hariyono, 2022) menunjukkan bahwa kelembapan memberikan pengaruh signifikan terhadap produktivitas tanaman jahe, dengan kontribusi berkisar antara 50% hingga 61,1% di beberapa wilayah. Kelembapan yang terlalu rendah menyebabkan stomata menutup dan menghambat fotosintesis, sementara kelembapan tinggi meningkatkan risiko penyakit tanaman.

Untuk menjaga suhu dan kelembapan tetap optimal, (Khriswanti et al., 2022) mengembangkan sistem pengendali berbasis Arduino dengan metode regresi linier berganda, yang mampu menyesuaikan kondisi lingkungan secara otomatis dengan akurasi pembacaan suhu sebesar 98,71% dan kelembapan 98,37%.

Intensitas Cahaya

Intensitas cahaya merupakan faktor krusial dalam budidaya tanaman hidroponi. Cahaya berperan penting dalam proses fotosintesis, yang secara langsung mempengaruhi pertumbuhan dan hasil tanaman. Pengamatan intensitas cahaya dilakukan setiap hari selama 30 hari. Hasil rata-rata intensitas cahaya per minggu ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rata-rata Intensitas Cahaya Tanaman Pakcoy (lux)

| Minggu ke- | Suhu Dingin | Suhu Kontrol |
|------------|-------------|--------------|
| 1 | 3240 | 3501 |
| 2 | 3904 | 3890 |
| 3 | 2420 | 2420 |
| 4 | 2792 | 2595 |

Berdasarkan Tabel 4, intensitas cahaya pada perlakuan suhu dingin dan kontrol bervariasi setiap minggunya. Nilai tertinggi pada suhu dingin tercatat pada minggu ke-2 sebesar 3904 lux, dan pada kontrol 3890 lux. Minggu ke-3 menunjukkan nilai yang sama (2420 lux), sementara

minggu ke-4 suhu dingin kembali lebih tinggi (2792 lux) dibanding kontrol (2595 lux). Variasi ini kemungkinan dipengaruhi oleh orientasi letak tower, bayangan struktur sekitar, sistem pendingin, kondisi cuaca, dan posisi matahari saat pengamatan.

Intensitas cahaya alami berperan penting dalam fotosintesis tanaman daun seperti pakcoy. Berdasarkan (Hayati et al. 2024), kisaran optimalnya adalah 2000–4000 lux, yang mendukung pertumbuhan tanpa menyebabkan stres cahaya. Pada minggu pertama dan kedua, intensitas cahaya berada dalam kisaran ini, sehingga diyakini mendukung pertumbuhan optimal. Sebaliknya, penurunan intensitas pada minggu ke-3 kemungkinan menurunkan efisiensi fotosintesis dan menghambat pertumbuhan. Fluktuasi ini dapat memengaruhi parameter pertumbuhan seperti tinggi, jumlah, dan luas daun pada masing-masing perlakuan.

Hasil pengamatan selama 30 hari pada sistem hidroponik vertikal menunjukkan bahwa fluktuasi intensitas cahaya alami dapat terjadi meski lokasi sama. Penggunaan sensor cahaya otomatis, seperti sensor PAR atau lux meter berbasis IoT, memungkinkan pencatatan real-time dengan interval pendek. (Dong & Hansen 2024) melaporkan bahwa sensor SI 1145 dengan filter optik memiliki korelasi tinggi ($R^2 \approx 0,96$) terhadap sensor referensi (LI 190R), namun dengan biaya hanya 20% dari sensor konvensional. Teknologi ini meningkatkan akurasi data mikro-lingkungan dan pemahaman pengaruh cahaya terhadap pertumbuhan pakcoy.

Larutan Nutrisi

Larutan nutrisi berperan krusial dalam sistem hidroponik sebagai sumber utama unsur hara. Pada penelitian ini, konsentrasi nutrisi dipantau secara berkala menggunakan TDS meter setiap pagi dan sore untuk memastikan kecukupan nutrisi bagi pertumbuhan optimal pakcoy. Pemantauan ini juga bertujuan melihat variasi kebutuhan nutrisi antar perlakuan

seiring waktu. Rata-rata data mingguan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rata-rata Kebutuhan Nutrisi (ppm)

| Minggu ke- | Suhu Dingin | Suhu Kontrol |
|------------|-------------|--------------|
| 1 | 926 | 927 |
| 2 | 1338 | 987 |
| 3 | 1131 | 1031 |
| 4 | 1102 | 1096 |

Berdasarkan Tabel 5, kebutuhan nutrisi tanaman pakcoy mengalami fluktuasi dari minggu pertama hingga keempat pada kedua perlakuan. Minggu pertama menunjukkan nilai hampir sama: 926 ppm (suhu dingin) dan 927 ppm (kontrol). Namun, minggu kedua terjadi peningkatan signifikan pada suhu dingin (1338 ppm), sedangkan kontrol hanya 987 ppm, mengindikasikan bahwa tanaman pada suhu dingin membutuhkan lebih banyak nutrisi di fase awal pertumbuhan.

Pada minggu ketiga, kebutuhan nutrisi pada suhu dingin menurun menjadi 1131 ppm, sedangkan kontrol meningkat sedikit menjadi 1031 ppm. Minggu keempat, keduanya menurun: 1102 ppm (suhu dingin) dan 1096 ppm (kontrol). Secara umum, tanaman pada suhu dingin cenderung membutuhkan nutrisi lebih tinggi, terutama di fase awal pertumbuhan, kemungkinan karena peningkatan aktivitas metabolisme dalam beradaptasi dengan suhu rendah di zona akar. Kondisi ini juga memicu peningkatan kebutuhan nutrisi akibat perubahan viskositas air dan penyerapan unsur hara. Penurunan kebutuhan pada minggu ketiga dan keempat mengindikasikan stabilisasi pertumbuhan atau adaptasi terhadap lingkungan.

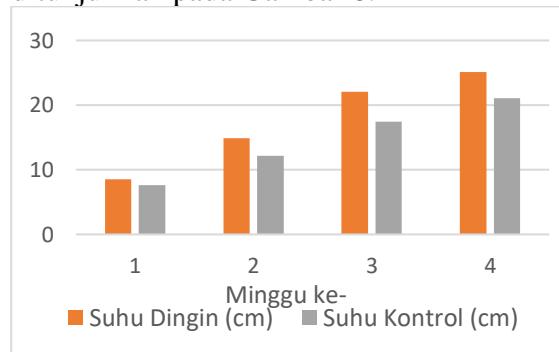
Konsentrasi nutrisi dalam larutan hidroponik sangat berpengaruh terhadap produktivitas tanaman. (Perwita et al. 2023) menyebutkan bahwa kisaran ideal untuk pakcoy adalah 1000–1200 ppm, yang menghasilkan pertumbuhan tinggi dan luas daun lebih optimal dibandingkan dengan konsentrasi di bawah 900 ppm. Rentang ini dinilai mendukung metabolisme dan

fotosintesis secara efisien. Penelitian tersebut juga menekankan pentingnya pengelolaan volume, konsentrasi, dan pH larutan secara rutin untuk menjaga kondisi akar yang ideal. Konsentrasi terlalu tinggi dapat menyebabkan stres osmotik, sedangkan terlalu rendah menyebabkan defisiensi unsur hara penting. Dengan rata-rata 961–1199 ppm, larutan nutrisi dalam penelitian ini berada dalam kisaran optimal yang mampu menunjang pertumbuhan pakcoy secara maksimal di sistem hidroponik vertikal.

Kestabilan konsentrasi larutan nutrisi dalam hidroponik sangat penting untuk memastikan ketersediaan unsur hara makro dan mikro secara seimbang. Karena sistem ini tanpa tanah, tanaman sepenuhnya bergantung pada larutan nutrisi sebagai sumber utama hara. Fluktuasi atau ketidakseimbangan konsentrasi dapat menyebabkan defisiensi atau toksitas, yang berdampak pada penurunan pertumbuhan dan produktivitas.

Tinggi Tanaman

Pengamatan tinggi tanaman dilakukan setiap hari selama 30 hari. Hasil rata-rata tinggi tanaman per minggu ditunjukkan pada Gambar 8.



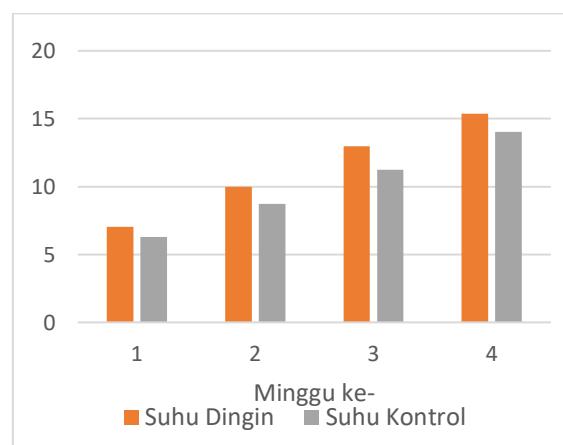
Gambar 8. Grafik Rata-rata Tinggi Tanaman Pakcoy

Gambar 8 menyajikan grafik rata-rata tinggi tanaman pakcoy berdasarkan pengamatan mingguan. Sumbu X menunjukkan waktu pengamatan (minggu ke-1 hingga ke-4 setelah tanam), sedangkan sumbu Y menunjukkan rata-rata tinggi tanaman dalam satuan sentimeter. Grafik ini menggambarkan pola pertumbuhan vertikal pakcoy pada perlakuan suhu dingin dan kontrol selama empat minggu.

Tanaman pada perlakuan suhu dingin menunjukkan pertumbuhan tinggi yang lebih baik dibandingkan kontrol. Pada minggu ke-4, tinggi rata-rata tanaman mencapai 25,09 cm (suhu dingin) dan 21,00 cm (kontrol), dengan tren yang konsisten sejak minggu pertama (8,55 cm vs. 7,59 cm). Pendinginan akar diduga menciptakan kondisi optimal untuk penyerapan nutrisi dan mendukung pertumbuhan vegetatif. (Lassim & Gobilik 2020) juga melaporkan bahwa pengaturan suhu perakaran meningkatkan tinggi tanaman pakcoy secara signifikan dalam sistem hidroponik. Penurunan suhu akar membantu menjaga kestabilan fisiologis dan efisiensi penyerapan nutrisi, sejalan dengan hasil penelitian ini.

Jumlah Daun

Jumlah daun merupakan indikator penting pertumbuhan vegetatif karena berperan dalam fotosintesis. Pada penelitian ini, jumlah daun diamati harian selama 30 hari untuk melihat dinamika pertambahan dan membandingkan pengaruh suhu dingin dan suhu kontrol terhadap perkembangan daun pakcoy. Rata-rata jumlah daun ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Rata-rata Jumlah Daun (Helai)

Gambar 9 menunjukkan grafik rata-rata jumlah daun pakcoy berdasarkan pengamatan mingguan. Sumbu X menggambarkan waktu pengamatan (minggu ke-1 hingga ke-4 setelah tanam), sedangkan sumbu Y menunjukkan rata-rata jumlah daun (helai) dari setiap menara percobaan. Grafik

ini menggambarkan pola pertambahan jumlah daun pada perlakuan suhu dingin dan kontrol selama empat minggu.

Berdasarkan Gambar 9, tanaman pakcoy pada suhu dingin menghasilkan rata-rata 15 helai daun, lebih banyak dibandingkan kontrol yang mencapai 14 helai. Ini menunjukkan bahwa suhu zona akar yang lebih rendah dapat merangsang pertumbuhan daun melalui peningkatan efisiensi penyerapan unsur hara, terutama nitrogen. Nitrogen penting dalam pembentukan klorofil dan jaringan daun, sehingga lingkungan yang mendukung penyerapan nutrisi berkontribusi langsung terhadap peningkatan jumlah daun.

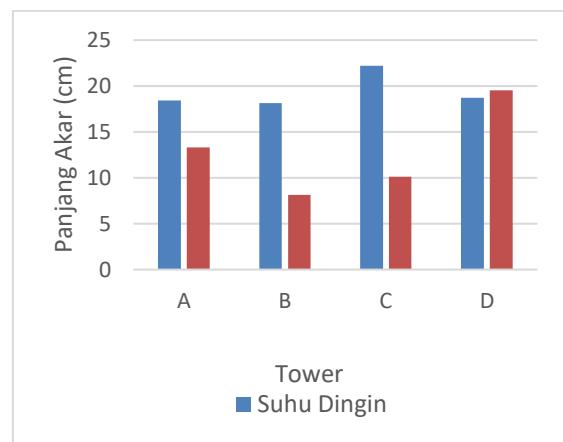
Penelitian (Rahmawati et al. 2024) menunjukkan bahwa kombinasi AB Mix 1200 ppm dan pupuk daun 250 ppm dalam sistem rakit apung meningkatkan jumlah daun pakcoy pada minggu keempat. Meski sistem dan perlakuan berbeda, hasil tersebut mendukung temuan bahwa ketersediaan nutrisi, khususnya nitrogen, berperan penting dalam pembentukan daun. Dalam penelitian ini, suhu dingin diduga meningkatkan efisiensi penyerapan nitrogen dari larutan AB Mix yang sama, sehingga mendukung pertambahan jumlah daun.

Studi (Hermanto et al. 2021) menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi AB Mix dalam hidroponik meningkatkan jumlah daun pakcoy secara signifikan, rata-rata mencapai 11 helai pada minggu keempat. (Ulfah et al. 2025) juga menegaskan peran penting nitrogen dalam pembentukan organ vegetatif, termasuk daun, karena terlibat dalam sintesis protein dan klorofil. Dengan demikian, peningkatan jumlah daun pada perlakuan suhu dingin dalam penelitian ini kemungkinan disebabkan oleh efisiensi penyerapan nitrogen yang lebih tinggi, sehingga mendukung pertumbuhan vegetatif pakcoy secara optimal.

Panjang Akar

Panjang akar merupakan salah satu indikator penting dalam menilai kemampuan tanaman menyerap air dan nutrisi dari larutan

hidroponik. Dalam sistem hidroponik vertikal, kondisi suhu di daerah perakaran sangat memengaruhi pertumbuhan akar, karena suhu yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat menghambat aktivitas metabolisme akar. Pada akhir masa tanam (hari ke-30), dilakukan pengukuran panjang akar pada setiap tanaman dari kedua perlakuan. Hasil rata-rata panjang akar per tower ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik Rata-rata Panjang Akar

Gambar 10 menunjukkan grafik rata-rata panjang akar pakcoy berdasarkan hasil pengamatan pada masing-masing perlakuan. Pengukuran panjang akar ini khusus dilakukan pada akhir masa tanam, yaitu di hari ke-30. Sumbu X pada grafik ini merepresentasikan setiap tower pengamatan, yang ditunjukkan dengan angka A, B, C, dan D. Sementara itu, sumbu Y menunjukkan rata-rata panjang akar tanaman dalam satuan sentimeter (cm).

Berdasarkan Gambar 10, tanaman pakcoy pada perlakuan suhu dingin cenderung memiliki panjang akar lebih tinggi dibandingkan kontrol, terutama pada tower A hingga C. Tower C mencatat panjang akar tertinggi pada suhu dingin (22,21 cm) dibanding kontrol (10,13 cm). Tower A dan B juga menunjukkan hasil serupa, namun pada tower D, suhu kontrol justru mencatat panjang akar lebih panjang (19,51 cm) dibanding suhu dingin (18,71 cm). Variasi ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan mikroklimat, distribusi nutrisi, atau respons tanaman individu.

Secara umum, data ini mendukung bahwa pendinginan zona akar dapat meningkatkan penyerapan nutrisi dan pertumbuhan akar. Levine et al. (2023) juga melaporkan bahwa suhu perakaran optimal sekitar 25 °C menghasilkan pertumbuhan dan volume akar lebih besar dibandingkan suhu ekstrem (15 °C atau 35 °C), yang dapat menghambat pertumbuhan dan mengurangi berat kering akar secara signifikan.

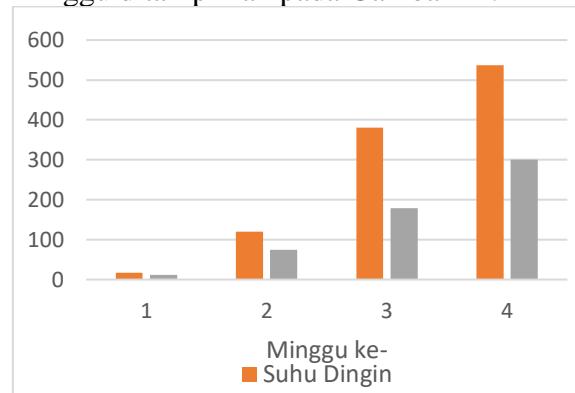
Selain itu, penelitian (Hayashi et al. 2024) menemukan bahwa peningkatan suhu zona akar 3 °C di atas suhu udara dapat meningkatkan berat kering dan panjang akar tanaman hidroponik, serta kandungan klorofil dan metabolit penting lainnya, yang mendukung pertumbuhan optimal. Sebaliknya, penelitian (Mildaerizanti & Pangestuti 2016) melaporkan bahwa suhu rendah pada zona akar juga mampu memperpanjang sistem perakaran pakcoy. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian ini, di mana perlakuan suhu dingin menunjukkan panjang akar lebih tinggi, yang berkontribusi pada penyerapan nutrisi dan pertumbuhan daun.

Luas Daun (cm^2)

Luas daun merupakan salah satu parameter fisiologis yang mencerminkan kemampuan tanaman dalam melakukan fotosintesis dan menyerap cahaya matahari secara optimal. Dalam sistem budidaya hidroponik, luas daun yang besar menjadi indikator keberhasilan pertumbuhan karena berkontribusi langsung terhadap laju pertumbuhan tanaman. Faktor lingkungan, khususnya suhu di zona perakaran, dapat memengaruhi perkembangan daun baik dari segi jumlah maupun luas permukaannya. Pada penelitian ini, pengukuran luas daun dilakukan menggunakan dua pendekatan berbasis teknologi pengolahan citra digital, yaitu aplikasi *Easy Leaf Area* berbasis Android dan perangkat lunak *ImageJ*. Pengukuran menggunakan *Easy Leaf Area* dimulai dengan pengambilan gambar daun melalui kamera smartphone, dengan pencahayaan yang merata dan latar belakang putih. Gambar juga disertai objek referensi

berupa kertas berwarna merah berukuran 8 cm². Aplikasi kemudian secara otomatis mendeteksi piksel hijau untuk mengidentifikasi daun dan membandingkannya dengan piksel merah sebagai acuan pengukuran. Hasil dari aplikasi ini berupa file gambar dan file CSV yang memuat informasi luas daun dalam satuan cm².

Sementara itu, proses pengolahan citra digital dengan aplikasi ImageJ dilakukan melalui tahapan teknis yang sistematis. Pertama, gambar daun dikonversi menjadi citra grayscale, kemudian dilakukan proses segmentasi dengan metode thresholding untuk memisahkan objek daun dari latar belakang. Setelah kontur daun terdefinisi secara jelas, ImageJ menghitung jumlah piksel yang merepresentasikan area daun. Jumlah piksel ini selanjutnya dikalibrasi berdasarkan skala referensi yang telah ditetapkan sebelumnya, sehingga diperoleh nilai luas daun dalam satuan sentimeter persegi (cm²). Kedua pendekatan ini dibandingkan pada hari ke-20 setelah tanam guna mengevaluasi akurasi pengukuran luas daun secara digital. Penelitian oleh (Andrian et al. 2022) menunjukkan bahwa perangkat lunak *Easy Leaf Area* memiliki tingkat akurasi yang tinggi, dengan rata-rata kesalahan pengukuran kurang dari 5%, sehingga sangat bermanfaat sebagai alat pemantauan pertumbuhan tanaman secara non-destructif. Meskipun demikian, kualitas gambar, posisi kamera, dan pencahayaan tetap menjadi faktor krusial yang memengaruhi ketepatan hasil pengukuran. Rata-rata luas daun per minggu ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Grafik Rata-rata Luas Daun

Gambar 11 menggambarkan grafik perkembangan rata-rata luas daun tanaman pakcoy berdasarkan hasil pengamatan selama empat minggu. Sumbu X pada grafik menunjukkan waktu pengamatan, yang dibagi menjadi minggu ke-1 hingga minggu ke-4 setelah tanam. Sedangkan sumbu Y merepresentasikan rata-rata luas daun dalam satuan sentimeter persegi (cm²). Grafik ini memperlihatkan tren pertumbuhan luas daun dari awal masa tanam hingga minggu keempat pada dua kondisi perlakuan, yaitu suhu dingin dan suhu kontrol, sehingga dapat dibandingkan pengaruh masing-masing perlakuan terhadap perkembangan daun tanaman pakcoy.

Berdasarkan Gambar 11, terlihat bahwa perlakuan suhu dingin memberikan dampak positif yang signifikan terhadap peningkatan luas daun tanaman pakcoy jika dibandingkan dengan perlakuan suhu kontrol. Pada minggu pertama setelah tanam, rata-rata luas daun tanaman yang tumbuh pada suhu dingin tercatat sebesar 16,63 cm², sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan kontrol yang hanya mencapai 12,19 cm². Selisih ini terus meningkat pada minggu-minggu selanjutnya. Misalnya, pada minggu kedua, luas daun tanaman pada suhu dingin melonjak menjadi 120,1 cm², sedangkan pada kontrol hanya sebesar 74,5 cm². Perbedaan paling mencolok tampak pada minggu keempat, di mana tanaman yang tumbuh pada suhu dingin mencapai luas daun rata-rata sebesar 536,33 cm², hampir dua kali lipat dibandingkan tanaman pada suhu kontrol yang hanya mencapai 300,36 cm². Pertambahan luas daun ini merupakan indikator penting karena berkaitan erat dengan kapasitas fotosintetik tanaman. Seperti dijelaskan oleh (Ginting et al. 2006), suhu perakaran yang optimal mampu merangsang aktivitas enzim di akar dan meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap pertumbuhan bagian atas tanaman termasuk luas daun. Selain itu, suhu akar yang lebih rendah cenderung memperpanjang fase vegetatif tanaman, memberikan waktu lebih lama bagi daun

untuk tumbuh dan berkembang secara maksimal.

Data nilai RGB menunjukkan bahwa tanaman pada suhu dingin memiliki nilai R dan B yang lebih rendah dibanding kontrol, menandakan kondisi daun yang sehat tanpa klorosis atau stres tinggi. Peningkatan luas daun pada suhu dingin mendukung keterkaitan antara luas permukaan fotosintesis dan efisiensi fisiologis tanaman. Temuan ini sejalan dengan penelitian Yu et al. (2019) yang menunjukkan bahwa suhu akar memengaruhi produksi metabolit sekunder dan perkembangan luas daun pada tanaman hidroponik.

Analisis Nilai RGB Tanaman Pakcoy

Analisis warna daun pakcoy dilakukan menggunakan pendekatan RGB (*Red, Green, Blue*) untuk mengevaluasi kondisi visual tanaman yang berkaitan dengan kadar klorofil dan kesehatan daun (Granwehr & Hofer, 2021). Citra daun diambil pada umur 20 hari menggunakan kamera digital, dengan latar belakang merah dan pencahayaan seragam untuk meningkatkan kontras. Pengolahan citra menggunakan perangkat lunak berbasis desktop, dimulai dari segmentasi warna berdasarkan nilai piksel RGB, kemudian dikonversi ke citra biner guna memisahkan daun dari latar belakang secara kuantitatif.



Gambar 12. Hasil Binersasi Citra Daun Pakcoy pada Hari ke-20 (Perlakuan Suhu Dingin)

Nilai RGB yang diperoleh dari area daun kemudian dinormalisasi menjadi nilai nRGB (normalized RGB) menggunakan rumus: $nR = R / (R + G + B)$, $nG = G / (R + G + B)$, dan $nB = B / (R + G + B)$. Proses ini dilakukan secara otomatis oleh perangkat lunak

pengolahan citra berbasis desktop yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil normalisasi menunjukkan proporsi relatif setiap kanal warna terhadap total intensitas warna pada piksel, dengan rentang nilai antara 0 hingga 1. Nilai nG yang tinggi menunjukkan dominasi warna hijau yang umumnya berkorelasi positif dengan kandungan klorofil dan kesehatan tanaman. Sebaliknya, jika nilai nR lebih dominan, hal itu dapat menunjukkan indikasi stres pada tanaman (Bodor-Pesti et al., 2025). Hasil analisis RGB ini digunakan untuk membandingkan kondisi visual tanaman antara perlakuan suhu dingin dan kontrol dalam sistem hidroponik vertikal. Hasil rata-rata nilai RGB dari kedua perlakuan disajikan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Rata-rata Nilai RGB Tanaman Pakcoy

| Komponen | Suhu Dingin | Suhu Kontrol |
|------------------|-------------|--------------|
| Red (R) | 98,3 | 101,86 |
| Green (G) | 152,87 | 159,51 |
| Blue (B) | 69,41 | 76,66 |

Berdasarkan Tabel 6, daun pakcoy pada suhu dingin memiliki nilai rata-rata komponen warna RGB yang lebih rendah dibandingkan suhu kontrol: G (152,87 vs 159,51), R (98,30 vs 101,86), dan B (69,41 vs 76,66). Nilai G yang lebih tinggi mencerminkan warna hijau cerah, namun bisa disebabkan oleh jaringan daun yang lebih tipis atau kandungan air tinggi, bukan hanya klorofil. Nilai R dan B yang lebih rendah pada suhu dingin mengindikasikan kondisi fisiologis tanaman yang lebih stabil, tanpa gejala stres seperti klorosis atau kekurangan nutrisi.

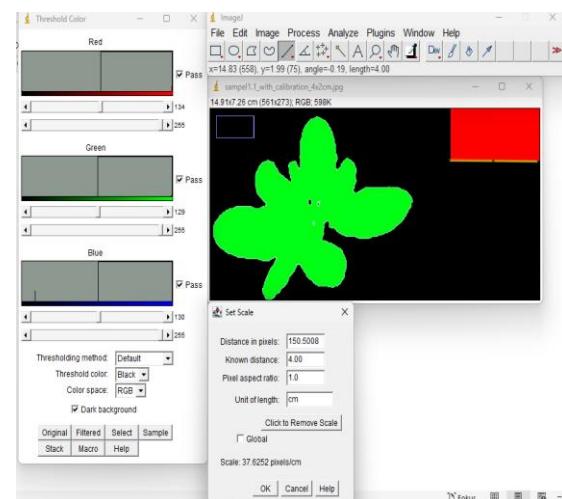
Secara umum, analisis nilai RGB mendukung hasil pengamatan bahwa suhu dingin memberikan kondisi pertumbuhan yang lebih stabil dan sehat bagi tanaman pakcoy. Meskipun nilai G sedikit lebih rendah, kombinasi rendahnya nilai R dan B menunjukkan daun yang tetap hijau pekat tanpa tanda stres. Hal ini sejalan dengan peningkatan luas dan jumlah daun pada perlakuan suhu dingin. Nilai R dan B yang

lebih rendah juga menandakan stabilitas fisiologis yang lebih baik, sebagaimana ditemukan oleh (Hayashi et al. 2024) pada selada hidroponik. Dengan demikian, nilai RGB dapat menjadi indikator tambahan untuk mengevaluasi kondisi tanaman secara non-destruktif melalui pencitraan digital, serta berpotensi diintegrasikan ke dalam sistem monitoring otomatis pertanian presisi berbasis teknologi.

Analisis Akurasi Luas Kanopi dengan Pengolahan Citra Digital

Penelitian ini menggunakan sistem pengolahan citra digital untuk mengukur luas daun tanaman pakcoy secara non-destruktif dan efisien. Dua metode digunakan, yaitu aplikasi *Easy Leaf Area* berbasis Android dan perangkat lunak *ImageJ*, guna mengevaluasi akurasi pengukuran. Pada *Easy Leaf Area*, gambar daun diambil menggunakan kamera smartphone dari jarak ± 30 cm secara tegak lurus dengan latar belakang kertas putih dan pencahayaan merata. Warna daun (biasanya hijau) ditetapkan sebagai objek utama, sementara warna referensi seperti kertas merah digunakan sebagai kalibrasi konversi piksel ke cm^2 . Aplikasi kemudian memproses gambar dan menampilkan luas daun secara otomatis.

Sementara itu, metode *ImageJ* dilakukan di komputer dengan tahapan teknis yang lebih fleksibel. Gambar daun diimpor, lalu dikalibrasi menggunakan objek berukuran 8 cm (seperti penggaris) untuk menetapkan skala. Gambar dikonversi ke *grayscale*, dilanjutkan *thresholding* untuk memisahkan daun dari latar. Area daun kemudian ditandai dan diukur menggunakan fungsi *Analyze > Measure* untuk mendapatkan luas dalam cm^2 . Hasil metode ini dibandingkan dengan *Easy Leaf Area* menggunakan parameter MAPE guna menilai akurasi. Metode ini memungkinkan pengukuran sistematis dan efisien tanpa merusak sampel.



Gambar 13. Analisis Konversi Pixel ke cm^2

Dengan metode ini, diperoleh data luas daun yang kemudian dibandingkan menggunakan dua parameter evaluasi akurasi, yaitu Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sebagaimana disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Hasil Pengukuran Luas Daun Tanaman Pakcoy dengan Nilai MAPE (%) pada Daerah Perakaran

| Sampel | Easy Leaf Area (8cm^2) | ImageJ (cm^2) | MAPE (%) |
|-----------|--------------------------------------|--------------------------|----------|
| 1 | 361,86 | 347,86 | 3,87 |
| 2 | 581,95 | 591,55 | 1,65 |
| 3 | 289,27 | 296,43 | 2,48 |
| 4 | 425,11 | 499,88 | 17,59 |
| 5 | 334,77 | 397,06 | 18,61 |
| 6 | 714,35 | 773,23 | 8,24 |
| 7 | 455,92 | 465,86 | 2,18 |
| 8 | 309,81 | 388,34 | 25,35 |
| 9 | 206,87 | 288,42 | 39,42 |
| 10 | 261,88 | 292,58 | 11,72 |
| Rata-rata | | | 13,11 |

Berdasarkan Tabel 7, diperoleh hasil bahwa pengukuran luas daun tanaman

pakcoy menggunakan pengolahan citra digital pada sistem hidroponik vertikal dengan perlakuan suhu dingin menghasilkan rata-rata nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 13,11%, yang berada dalam rentang $10\% \leq MAPE < 20\%$. Berdasarkan klasifikasi pada Tabel 7, nilai tersebut termasuk dalam kategori “akurat”. Selanjutnya, pada beberapa sampel, seperti sampel 1, 2, dan 3, nilai MAPE tercatat sangat rendah (masing-masing 3,87%, 1,65%, dan 2,48%) yang menunjukkan bahwa hasil pengolahan citra *ImageJ* cukup mendekati nilai referensi dari *Easy Leaf Area*. Namun, pada sampel 8 dan 9, terjadi peningkatan kesalahan yang cukup signifikan, dengan MAPE masing-masing sebesar 25,35% dan 39,42%. Hal ini mengindikasikan adanya deviasi besar antara hasil pengukuran *ImageJ* dan *Easy Leaf Area* pada beberapa kondisi tertentu.

Variasi nilai MAPE antar sampel dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis, seperti pencahayaan saat pengambilan gambar, akurasi kalibrasi skala pada *ImageJ*, serta bentuk dan posisi daun. Faktor utama yang paling berpengaruh adalah bentuk dan posisi daun yang saling menumpuk atau memiliki kontras rendah terhadap latar, sehingga menyulitkan segmentasi citra. Akibatnya, sebagian area daun bisa tidak terdeteksi atau terhitung ganda, memengaruhi hasil pengukuran. Meski pencahayaan dan kalibrasi juga berpengaruh, kesalahan segmentasi akibat morfologi daun dan latar belakang menjadi penyebab dominan tingginya nilai MAPE pada sampel tertentu.

Penelitian (Koyama, 2023) mendukung temuan ini, menunjukkan bahwa teknik clear folder—meletakkan daun di antara dua plastik bening—dapat menghasilkan citra yang rapi dengan nilai MAPE hanya 4,20% dan $R^2 > 0,98$ dibanding hasil scanner. Sementara itu, penelitian (Das et al. 2022) menggunakan pendekatan *machine learning* (*Gradient Boosting Regression*) untuk mengukur luas daun *Dendrobium nobile* dan memperoleh RMSE $< 1,11 \text{ cm}^2$, membuktikan bahwa algoritma

kecerdasan buatan mampu memberikan estimasi yang sangat akurat, meski lebih kompleks dari metode konvensional.

Dalam skala praktis seperti penelitian ini, penggunaan *ImageJ* tetap layak digunakan, terutama jika kalibrasi dan segmentasi citra dilakukan secara teliti dan konsisten. Penelitian oleh (Umam et al. 2023) menegaskan bahwa *ImageJ* memiliki potensi besar untuk pengukuran luas daun di lapangan (*on-farm*), dengan hasil yang sangat berkorelasi dengan metode konvensional seperti kertas milimeter. Rata-rata selisih persentasenya hanya 4,67% dengan standar deviasi 6%, meskipun akurasi ini bergantung pada kondisi pencitraan yang optimal dan lingkungan yang terkontrol.

Di sisi lain, keterbatasan metode *ImageJ* juga ditegaskan oleh (Xing et al., 2022), yang menyatakan bahwa dalam kondisi pencahayaan yang tidak konsisten serta struktur kanopi tanaman yang kompleks, akurasi pengukuran berbasis citra digital dapat menurun. Meskipun penelitian tersebut menggunakan pendekatan 3D untuk mengestimasi ukuran daun tomat, nilai RMSE yang dihasilkan tetap menunjukkan adanya kesalahan signifikan. Sebagai solusi terhadap permasalahan tersebut, (Jayasuriya et al., 2025) mengembangkan model estimasi luas daun berbasis *deep learning* yang menunjukkan kinerja lebih baik dibandingkan metode tradisional seperti *ImageJ*, dengan nilai R^2 mencapai 0,81. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis kecerdasan buatan memiliki potensi besar dalam meningkatkan akurasi dan efisiensi pengukuran.

Lebih lanjut, penelitian dari (Easlon & Bloom, 2014) menunjukkan bahwa dalam pengukuran luas daun menggunakan *ImageJ* dari citra hasil pemindaian scanner flatbed, bayangan yang terbentuk selama proses pemindaian dapat menyebabkan overestimasi. Namun, dengan menggunakan scanner yang memiliki pencahayaan difus, kesalahan tersebut dapat diminimalkan. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keakuratan pengukuran luas daun menggunakan *ImageJ*,

perlu dilakukan optimalisasi dalam tahapan akuisisi citra, termasuk pengaturan pencahayaan, pemilihan latar belakang dengan kontras tinggi, serta kalibrasi skala yang tepat dan konsisten. Alternatif lain yang lebih canggih adalah menggunakan aplikasi khusus seperti Easy Leaf Area atau metode berbasis machine learning yang telah terbukti memberikan hasil yang lebih stabil dan akurat dalam berbagai kondisi pencitraan.

Temuan lain yang mendukung efektivitas pengolahan citra digital dalam sistem hidroponik ditunjukkan oleh (Nasution et al., 2021), yang menggunakan metode segmentasi *distance transform-watershed* untuk mengukur luas daun pakcoy secara non-destruktif. Hasilnya menunjukkan akurasi tinggi dengan nilai MAPE rendah, melebihi akurasi pengukuran menggunakan *ImageJ*. Temuan ini relevan dengan tantangan pada penelitian ini, terutama terkait segmentasi daun yang tumpang tindih dalam sistem vertikal.

Perbandingan Pertumbuhan Tanaman pada Dua Perlakuan

Penelitian ini membandingkan pengaruh suhu dingin dan suhu kontrol terhadap pertumbuhan pakcoy dalam sistem hidroponik vertikal, dengan mengamati tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar, dan luas daun. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana suhu dingin pada zona perakaran memengaruhi akumulasi hasil pertumbuhan, serta menilai efektivitasnya dalam mendorong pertumbuhan vegetatif dibandingkan perlakuan kontrol.

Hasil menunjukkan bahwa perlakuan suhu dingin secara konsisten menghasilkan nilai yang lebih tinggi pada seluruh parameter pertumbuhan dibandingkan dengan suhu kontrol. Hal ini diduga karena suhu yang lebih rendah di zona perakaran mampu meningkatkan efisiensi metabolisme akar, penyerapan nutrisi, dan stabilitas fisiologis tanaman. Tabel 8 menyajikan perbandingan pertumbuhan tanaman pakcoy antara perlakuan suhu dingin dan kontrol berdasarkan parameter tinggi tanaman,

jumlah daun, panjang akar, dan luas daun. Nilai yang ditampilkan merupakan rata-rata mingguan yang paling tertinggi di setiap parameter, sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya.

Tabel 8. Rata-rata Perbandingan Pertumbuhan pada Dua Perlakuan

| parameter | Suhu Dingin | Suhu Kontrol |
|---------------------|------------------------|------------------------|
| Tinggi | 25,96 cm | 21,10 cm |
| Tanaman | | |
| Jumlah Daun | 15 helai | 14 helai |
| Panjang Akar | 18-22 cm rata-rata | 8-19 cm rata-rata |
| Luas Daun | 536,33 cm ² | 300,36 cm ² |

Berdasarkan Tabel 8, perlakuan suhu dingin menunjukkan hasil pertumbuhan yang lebih baik pada semua parameter dibandingkan kontrol. Pada minggu ke-4, rata-rata tinggi tanaman mencapai 25,09 cm (kontrol 21,10 cm), jumlah daun 15 helai (kontrol 14 helai), dan luas daun menunjukkan perbedaan paling mencolok, yaitu 536,33 cm² dibandingkan 300,36 cm² pada kontrol.

Suhu dingin di zona perakaran diduga menciptakan lingkungan mikro yang lebih stabil, sehingga meningkatkan penyerapan air dan nutrisi. Hal ini sejalan dengan Ginting et al. (2006) yang menyebutkan suhu akar optimal (20–25°C) dapat memperbaiki aktivitas metabolisme akar dan status klorofil tanaman. Selain itu, suhu dingin juga mendorong perkembangan akar yang lebih baik, ditunjukkan oleh panjang akar yang lebih besar, yang mendukung penyerapan hara dan pertumbuhan tajuk.

Menurut (Mildaerizanti & Pangestuti, 2016) juga menyatakan, tanaman pakcoy yang mengalami cekaman suhu tinggi atau suhu yang fluktuatif menunjukkan penurunan berat segar dan panjang akar. Sebaliknya, pengendalian suhu perakaran memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan pertumbuhan vegetatif tanaman. Oleh karena itu, penggunaan air

dingin sebagai perlakuan dalam sistem hidroponik vertikal dapat dianggap sebagai strategi yang efektif untuk meningkatkan performa tanaman secara keseluruhan. Selain dari sisi fisiologis, efek suhu dingin juga berdampak pada nilai RGB daun yang menunjukkan intensitas warna hijau lebih pekat pada suhu dingin. Hal ini mengindikasikan bahwa kandungan klorofil daun juga lebih stabil, yang memperkuat hasil bahwa suhu dingin memberikan efek positif pada fotosintesis dan produksi biomassa daun.

Secara keseluruhan, perbandingan antara dua perlakuan membuktikan bahwa penggunaan suhu dingin pada daerah perakaran memberikan keuntungan nyata dalam meningkatkan pertumbuhan pakcoy, terutama dalam sistem hidroponik vertikal yang memungkinkan pengaturan kondisi lingkungan secara presisi. Temuan ini sejalan dengan (Hasibuan, 2024) yang menyatakan bahwa pengaturan suhu pada sistem hidroponik vertikal dapat meningkatkan hasil panen secara signifikan, terutama pada tanaman daun seperti pakcoy.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengamatan dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa perlakuan suhu dingin pada daerah perakaran secara signifikan meningkatkan pertumbuhan tanaman pakcoy dalam sistem hidroponik vertikal, ditunjukkan dengan peningkatan tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar, dan luas daun dibandingkan perlakuan kontrol. Pengukuran luas daun menggunakan aplikasi Easy Leaf Area menunjukkan akurasi yang lebih baik dibandingkan metode alternatif, dengan nilai MAPE rata-rata sebesar 13,11%. Selain itu, analisis warna RGB daun menunjukkan bahwa suhu dingin menghasilkan daun yang lebih sehat dengan tingkat stres rendah dan kandungan klorofil yang lebih stabil, sehingga mendukung kualitas pertumbuhan dan fotosintesis tanaman.

Saran

Pengolahan citra daun untuk pengukuran luas dikembangkan dengan peningkatan standar teknis, seperti penggunaan background kontras tinggi, pencahayaan yang seragam, serta kamera beresolusi tinggi untuk memperoleh hasil yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Alami, T., Herdiyeni, Y., Kusuma, W. A., Tjahjono, B., & Siregar, I. Z. (2023). Kecerdasan Buatan Untuk Monitoring Hama Dan Penyakit Pada Tanaman Eucalyptus: Systematic Literature Review. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Agri-Informatika*, 10(2), 224–237. <Https://Doi.Org/10.29244/Jika.10.2.224-237>
- Balai Penelitian Sayuran. (2020).
- Cahyono, D. Y., & Hariono, T. (2021). Monitoring Kondisi Tanaman Hidroponik Dalam Bentuk Citra Melalui IoT Dengan Modul Esp 32 Cam. *Exact Papers In Compilation (Epic)*, 3(1), 453–458. <Https://Doi.Org/10.32764/Epic.V3i1.583>
- Easlon, H. M., & Bloom, A. J. (2014). Easy Leaf Area: Automated Digital Image Analysis For Rapid And Accurate Measurement Of Leaf Area. *Applications In Plant Sciences*, 2(7), 2–5. <Https://Doi.Org/10.3732/Apps.1400033>
- Mahsup, Febriani, P. A., Syaharuddin, Mandailina, V., Abdillah, & Ibrahim. (2024). Accuracy Rate Of Least Square Support Vector Machine Method And Its Various Modifications: A Forecasting Evaluation On Multi-Type Data. *Ingenierie Des Systemes d'Information*, 29(3), 1209–1218. <Https://Doi.Org/10.18280/Isi.290337>
- Marselina, A. S. (2023). Akurasi Pengolahan Citra Digital Untuk Mengukur Pertumbuhan Tanaman Pakcoy (*Brassica Rapa L.*). Akurasi Pengolahan Citra Digital Untuk Mengukur Pertumbuhan Tanaman

- Pakcoy (*Brassica Rapa L.*).
Nofitria, A. S., Silfani, N., Nattasha, O., & Fevria, R. (2023). Budidaya Pakcoy (*Brassica Rapa L.*) Dengan Teknik Hidroponik Sistem Nutrient Films Technique (NFT). *Prosiding Semnas Bio*, 1293–1299.
- Nurani, A. T., Setiawan, A., & Susanto, B. (2023). Perbandingan Kinerja Regresi Decision Tree Dan Regresi Linear Berganda Untuk Prediksi BMI Pada Dataset Asthma. *Jurnal Sains Dan Edukasi Sains*, 6(1), 34–43. <Https://Doi.Org/10.24246/Juses.V6i1p> 34-43
- Prayogo, L. M., & Basith, A. (2021). Perbandingan Metode Roberts' Filter, Segmentasi Dan Band Ratio Pada Citra Landsat 8 Untuk Analisis Garis Pantai. *Rekayasa*, 14(3), 353–359. <Https://Doi.Org/10.21107/Rekayasa.V14i3.10300>
- Tamala, E. (2023). *BUDIDAYA PAKCOY (Brassica Rapa L.) DENGAN MENGGUNAKAN TEKNIK HIDROPONIK SISTEM NUTRIENT FILMS TECHNIQUE (NFT) DI KEBUN HIDROPONIK TIRTA TANI FARM GOWA*. Bosowa.
- Umam, C., Putri, S. A., Milyani, J., Aurelita, S. K., Suryawati, S., & Purwaningsih, Y. (2023). Perhitungan Luas Daun Berbasis Pemrosesan Citra Digital. *Teknotan*, 17(2), 115. <Https://Doi.Org/10.24198/Jt.Vol17n2.5>