

Analisis Produktivitas dan Kualitas Buah Stroberi *var. Sujarli* (Rosalinda) Berdasarkan Model Budidaya dan Pengolahan Citra Digital

Analysis of Productivity and Fruit Quality of Strawberry *var. Sujarli* (Rosalinda) Based on Cultivation Models and Digital Image Processing

Sri Handayani Nofiyanti^{1*}, Yohanes Setiyo¹, Nur Ida Winni Yosika², Mukhes Sri Muna¹, I Putu Surya Wirawan¹

¹Department of Agricultural Engineering and Biosystem, Faculty of Agricultural Technology, Udayana University, Indonesia.

²Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agricultural Technology, Jember University, Indonesia
Email*): handayaninofiyanti@unud.ac.id

Received:
16 June 2025

Revised:
11 September 2025

Accepted:
11 September 2025

Published:
29 September 2025

DOI:
10.29303/jrpb.v13i2.1187

ISSN 2301-8119, e-ISSN
2443-1354

Available at
<http://jrpb.unram.ac.id/>

Abstract: Strawberry (*Fragaria* sp.) is a high-value horticultural commodity with broad market potential, particularly in tropical highland areas such as Bedugul, Bali. However, its productivity and fruit quality are often constrained by climatic fluctuations and limited application of appropriate cultivation technologies. This study aimed to evaluate the productivity and fruit quality of Sujarli (Rosalinda) strawberry variety under four cultivation models: conventional open field, *tunnel*, fertigated open field, and *greenhouse*. In addition, a predictive model for Total Soluble Solids (TSS) content was developed using fruit color parameters obtained through digital image analysis. A total of 100 strawberry samples across five ripening stages were analyzed for biometrical characteristics (length, diameter, and weight), pH, and TSS. Image analysis was performed in two color spaces, namely RGB and HSV, and the corresponding color values were used as input variables in a multiple linear regression (MLR) model to predict TSS values. The results showed that the fertigated open field system produced strawberries with good physical and chemical quality, making it a feasible option for small-scale farmers. The MLR model based on HSV color space outperformed the RGB-based model, achieving R² values of 0.826 (training) and 0.775 (testing), with lower RMSE values as well. These findings support the use of digital color data as a non-destructive indicator for assessing the quality of strawberries during postharvest evaluation.

Keywords: digital image analysis; HSV color space; fertigated cultivation; multiple linear regression strawberry; Total Soluble Solids (TSS)

Abstrak: Stroberi (*Fragaria* sp.) merupakan komoditas hortikultura yang bernilai ekonomi dan memiliki prospek pasar yang luas, terutama di wilayah dataran tinggi tropis seperti Bedugul, Bali. Namun, produktivitas dan mutu buah masih dipengaruhi oleh fluktuasi iklim serta keterbatasan penerapan teknologi budidaya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi produktivitas dan kualitas buah stroberi varietas Sujarli (Rosalinda) pada empat model budidaya berbeda, yaitu lahan terbuka konvensional, *tunnel*, fertigasi terbuka, dan *greenhouse*. Selain itu, dilakukan pengembangan model prediksi kadar *Total Soluble Solids* (TSS) berdasarkan parameter warna dari analisis citra digital. Pengamatan dilakukan terhadap 100 sampel buah pada lima tahap kematangan. Parameter yang diukur meliputi karakteristik biometrik (panjang, diameter, dan berat buah), dan kadar TSS. Analisis citra dilakukan menggunakan dua ruang warna, yaitu RGB dan HSV. Nilai warna dari masing-masing *channel* digunakan sebagai variabel input dalam model regresi linier berganda (MLR) untuk memprediksi nilai TSS. Hasil menunjukkan bahwa sistem fertigasi di lahan terbuka menghasilkan mutu buah yang baik dan layak dipertimbangkan untuk skala budidaya petani. Model MLR berbasis ruang warna HSV menunjukkan performa prediksi yang lebih baik dibandingkan model RGB, dengan nilai R² masing-masing sebesar 0,826 dan 0,775 pada tahap pelatihan dan pengujian. Nilai RMSE juga lebih rendah dibandingkan

model RGB. Hasil ini mendukung pemanfaatan data warna dari citra digital untuk mendukung penilaian mutu buah stroberi.

Kata kunci: analisis citra digital; fertigasi; HSV; regresi linier berganda; stroberi; *Total Soluble Solids* (TSS)

PENDAHULUAN

Stroberi (*Fragaria* sp.) merupakan salah satu komoditas hortikultura strategis di kawasan Bedugul, Bali, yang tidak hanya bernilai ekonomi tinggi (harga jual Rp45.000–Rp70.000/kg di pasar lokal) tetapi juga menjadi daya tarik wisata agrikultural. Berdasarkan data BPS Bali (2024), kunjungan wisatawan mencapai 4.8 juta orang pada 2023. Meskipun data spesifik mengenai kunjungan wisata ke kawasan agroekowisata Bedugul belum tersedia secara resmi, kawasan ini dikenal sebagai salah satu destinasi utama wisata minat khusus, khususnya untuk aktivitas petik stroberi. Di sisi lain, produktivitas budidaya stroberi oleh petani lokal di wilayah ini masih relatif rendah, yaitu berkisar antara 8 hingga 12 ton per hektar per tahun. Angka ini berada jauh di bawah potensi hasil maksimal secara genetik yang dapat mencapai 20–25 ton per hektar per tahun dalam kondisi budidaya optima (Dinas Pertanian Provinsi Bali, 2023). Rendahnya produktivitas ini disebabkan oleh fluktuasi iklim tropis, serangan hama *Tetranychus urticae* (menginfeksi 40–60% tanaman musiman), serta ketidakkonsistenan mutu buah akibat praktik budidaya konvensional yang kurang presisi.

Dalam upaya mempertahankan kontinuitas produksi dan meningkatkan kualitas buah, inovasi dalam teknik budidaya menjadi sebuah keharusan. Salah satu pendekatan yang banyak diterapkan adalah sistem budidaya dengan kombinasi teknologi fertigasi dan penggunaan struktur pelindung, seperti *greenhouse*, *tunnel*, atau naungan plastik UV. Fertigasi memungkinkan pemberian air dan nutrisi yang lebih terkontrol sehingga terbukti dapat meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi hingga 30% dibandingkan metode tradisional (Mehriya et al., 2020). Sementara itu, penggunaan struktur pelindung berperan dalam memodifikasi iklim mikro, melindungi tanaman dari curah hujan berlebih, serta mengurangi intensitas radiasi yang dapat mengganggu proses fotosintesis (Janke et al., 2017). Misalnya,

greenhouse dengan penutup plastik UV 50% mampu menurunkan suhu mikro 2-4°C dan meningkatkan ukuran buah 15-20% (Katsoulas et al., 2020).

Studi sebelumnya yang dilakukan melalui Program Hi-Link (2010–2012) menunjukkan bahwa penerapan sistem LEISA (*Low External Input Sustainable Agriculture*), yaitu integrasi antara pupuk organik (10 ton/ha) dan pupuk kimia berimbang (NPK 150 kg/ha), disertai penggunaan mulsa plastik yang menunjukkan peningkatan hasil produktivitas mendekati optimal dengan kisaran 18 ton/ha. Namun, adopsi teknologi budidaya modern masih terbatas pada 23% petani di Bedugul akibat keterbatasan modal awal (42% responden), akses teknologi (35%), dan pendampingan teknis (Dinas Pertanian Provinsi Bali, 2023). Penelitian-penelitian terdahulu juga mengungkapkan bahwa budidaya stroberi di *greenhouse* dapat meningkatkan ukuran dan berat buah, serta menurunkan insidensi penyakit yang disebabkan oleh curah hujan berlebih (J. W. Yang & Kim, 2024). *Greenhouse* yang dilengkapi sistem fertigasi telah terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 30% dan meningkatkan hasil panen sebesar 25–40% dibandingkan dengan budidaya konvensional (Wu et al., 2020). Dalam konteks penelitian ini, istilah *greenhouse* merujuk pada bangunan tertutup berstruktur permanen dengan dinding dan atap plastik UV; *tunnel* adalah struktur setengah lingkaran memanjang dengan penutup plastik UV tanpa dinding permanen; sedangkan naungan plastik UV adalah atap pelindung sederhana tanpa dinding. Ketiganya berfungsi memodifikasi iklim mikro, tetapi memiliki perbedaan desain dan tingkat perlindungan yang signifikan. Oleh karena itu, diperlukan kajian lebih lanjut untuk menilai efektivitas berbagai model budidaya di tingkat petani lokal, sehingga rekomendasi teknologi dapat disesuaikan dengan kondisi sosial-ekonomi masyarakat.

Seiring kemajuan teknologi, pendekatan digital seperti pengolahan citra (*image processing*) mulai dimanfaatkan dalam penilaian mutu buah secara objektif dan prediksi parameter kualitas buah, seperti *Total Soluble Solids* (TSS). Selama ini, pengamatan visual terhadap perkembangan buah stroberi dari tahap muda hingga matang dilakukan secara manual dan sangat bergantung pada subjektivitas pengamat. Dengan penerapan teknologi pengolahan citra digital, karakteristik buah seperti ukuran, warna, bentuk, dan tingkat kematangan stroberi dapat dianalisis secara kuantitatif dan konsisten pada setiap tahap pertumbuhan (Amirullah et al., 2019). Penggunaan analisis citra berbasis ruang warna (RGB, HSV) memungkinkan evaluasi objektif terhadap tingkat kematangan dan potensi mutu buah secara non-destruktif. Integrasi antara model budidaya dan analisis citra digital diharapkan dapat memberikan solusi prediktif yang efisien dan adaptif untuk sistem produksi stroberi tropis. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengkajian produktivitas dan mutu buah varietas Sujarli (Rosalinda) di wilayah Candikuning, Bedugul, Bali, pada tiga model naungan berbeda (*greenhouse*, *tunnel*, dan naungan plastik UV) dengan sistem fertigasi, yang belum pernah dilaporkan sebelumnya. Penelitian ini juga mengintegrasikan analisis citra digital berbasis ruang warna sebagai metode non-destruktif untuk prediksi mutu buah di tingkat petani, sehingga diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknologi yang aplikatif bagi pengembangan stroberi di wilayah tropis pegunungan dengan karakter agroklimat serupa.

Tujuan

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengkaji produktivitas dan kualitas buah stroberi dari berbagai model budidaya, menganalisis perubahan biometrik dan kandungan TSS menggunakan pendekatan citra digital berbasis RGB dan HSV, serta mengembangkan model prediktif TSS menggunakan regresi linier berganda (MLR) berdasarkan parameter warna digital pada ruang warna RGB dan HSV. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi budidaya stroberi yang efektif dan adaptif, serta menyediakan sistem pemantauan mutu buah yang modern dan aplikatif, khususnya untuk diterapkan oleh petani di kawasan agrowisata seperti Bedugul.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah dataran tinggi Desa Candikuning, Kecamatan Baturiti, Kabupaten Tabanan, Provinsi Bali. Lokasi tersebut berada pada koordinat geografis 08°15'40" LS dan 115°09'49" BT, dengan ketinggian sekitar 1.247 meter di atas permukaan laut. Berdasarkan data klimatologi dari Stasiun Meteorologi setempat (Arsa, 2013), wilayah ini memiliki karakteristik iklim tropis basah dengan curah hujan tahunan berkisar antara 2.500 hingga 3.000 mm. Curah hujan pada musim basah mencapai 2-3,9 mm per hari, sedangkan suhu udara berkisar antara 12,4°C (minimum) hingga 24,5°C (maksimum). Kecepatan angin rata-rata pada ketinggian 3 m tercatat 3-7 knot, dengan kecepatan maksimum mencapai 11-29 knot. Tingkat penyinaran matahari per bulan bervariasi antara 23% hingga 86%, sedangkan kelembaban relatif berkisar antara 83% hingga 92%. Penelitian ini berlangsung selama periode Maret hingga awal September 2023, yang mencakup musim hujan akhir dan peralihan ke musim kemarau.

Rancangan dan Prosedur Percobaan Percobaan Model Budidaya

Penelitian ini dirancang menggunakan empat kombinasi model budidaya stroberi yang berbeda sebagai perlakuan, yaitu: (A) budidaya di lahan terbuka tanpa perlindungan plastik UV dan tanpa sistem fertigasi, (B) budidaya di lahan terbuka tanpa naungan tetapi dilengkapi dengan sistem fertigasi, (C) budidaya di lahan terbuka yang dilengkapi dengan naungan plastik UV tanpa sistem fertigasi, dan (D) budidaya dalam *greenhouse* dengan penerapan sistem fertigasi. Masing-masing perlakuan dilakukan pada petak seluas 1 are, yang terdiri atas 20 baris tanam. Setiap baris disusun dengan jarak antarbaris sejauh 40 cm, dan jarak antar tanaman dalam baris adalah 25 cm. Untuk memudahkan pemeliharaan dan panen, disisipkan jarak tambahan 40 cm setiap dua baris tanam. Dua baris tanam tersebut dianggap sebagai satu unit ulangan, sehingga dalam setiap perlakuan terdapat 10 ulangan.

Pengamatan dilakukan terhadap dua kelompok parameter, yaitu produktivitas dan mutu buah. Produktivitas dinilai berdasarkan total jumlah dan berat buah per tanaman. Sementara itu, mutu dinilai dari berat rata-rata buah dan jumlah buah yang mengalami kerusakan atau pembusukan. Sebanyak delapan tanaman dipilih secara acak dari setiap unit ulangan, sehingga total sampel per perlakuan mencapai 80 tanaman, yang mewakili sekitar 10% dari keseluruhan populasi. Penimbangan dilakukan menggunakan timbangan analitik untuk memastikan ketepatan hasil pengukuran.

Metode Analisis Citra Digital

Untuk mendukung evaluasi kualitas buah secara objektif, dilakukan analisis citra digital terhadap buah stroberi dari berbagai tahap pertumbuhan, mulai dari muda hingga matang. Pengambilan gambar dilakukan menggunakan kamera digital dalam kondisi pencahayaan alami yang seragam, dengan latar belakang hitam untuk memudahkan segmentasi. Gambar dianalisis menggunakan perangkat lunak Python. Parameter visual yang dianalisis meliputi ukuran buah dengan menghitung luas proyeksi buah (dalam mm²), bentuk buah yang dinilai berdasarkan rasio panjang-lebar dan indeks *circularity*, dan warna buah yang memiliki nilai rata-rata kanal warna RGB digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kematangan buah. Segmentasi dilakukan secara semi-otomatis untuk memisahkan buah dari latar. Perubahan warna dari hijau ke merah diamati secara kuantitatif sebagai indikator pematangan buah. Tingkat kematangan buah ditentukan menggunakan parameter kimia berupa *Total Soluble Solids* (TSS, °Brix) yang diukur dengan refraktometer digital. Pendekatan ini mengacu pada konsep *maturity index* yang secara umum menggunakan rasio TSS/TA (InTechOpen, 2019), namun pada penelitian ini hanya komponen TSS yang digunakan karena parameter TA tidak

diukur. Nilai TSS digunakan sebagai indikator tingkat kematangan relatif antar perlakuan dan dibandingkan dengan parameter visual hasil analisis citra digital.

HASIL DAN PEMBAHASAN

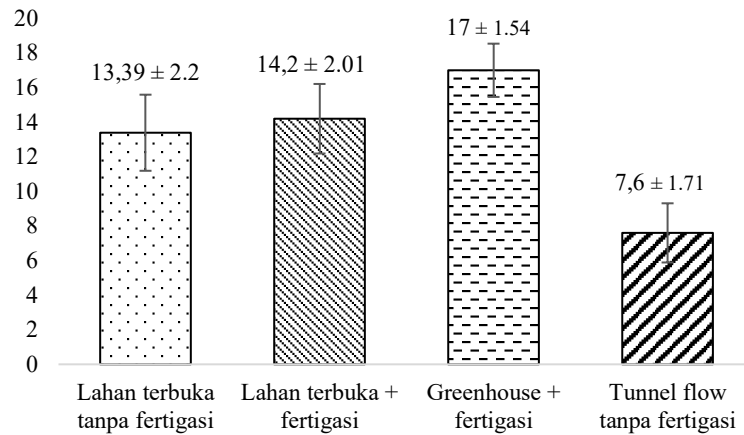
Berdasarkan data pada Tabel 1, rata-rata jumlah buah yang dipanen setiap tiga hari berkisar antara 1,0 hingga 1,8 buah per tanaman, dengan simpangan baku antara 0,27 hingga 0,51. Perlakuan budidaya di lahan terbuka yang menerapkan sistem fertigasi tercatat menghasilkan jumlah buah tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Sebaliknya, hasil panen terendah diperoleh dari budidaya menggunakan naungan plastik UV dengan model *tunnel*.

Tingginya intensitas cahaya matahari dan efisiensi penyerapan unsur hara melalui sistem fertigasi menjadi faktor utama yang mendorong peningkatan jumlah buah pada perlakuan lahan terbuka. Tanaman yang dibudidayakan di ruang terbuka memperoleh penyinaran penuh, yang mendukung proses fotosintesis secara optimal dan mengarahkan hasil asimilasi ke dalam pembentukan buah. Pemberian nutrisi secara terukur dan langsung melalui fertigasi turut mempercepat konversi unsur hara menjadi cadangan makanan dalam bentuk buah (Hutchinson et al., 2024). Sementara itu, pada sistem budidaya yang menggunakan naungan—baik *tunnel* maupun *greenhouse*—jumlah energi cahaya yang tersedia untuk proses sintesis mengalami pengurangan. Naungan plastik UV mampu menahan sebagian radiasi matahari, dengan estimasi reduksi energi antara 15 hingga 25%, sehingga menurunkan efisiensi fotosintesis dan berdampak pada jumlah buah yang dihasilkan (ForjÃn et al., 2009).

Tabel 1. Rerata Produksi Buah Stroberi

Perlakuan Budidaya	Produksi Buah per 8 Pohon
Lahan terbuka tanpa fertigasi	1.6 ± 0.45
Lahan terbuka dengan fertigasi	1.8 ± 0.30
<i>Greenhouse</i> dengan fertigasi	1.0 ± 0.51
<i>Tunnel Flow</i> tanpa fertigasi	1.6 ± 0.27

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa perlakuan budidaya menggunakan *greenhouse* yang dilengkapi dengan sistem fertigasi menghasilkan berat total buah tertinggi pada delapan tanaman sampel dibandingkan dengan tiga model budidaya lainnya, yaitu budidaya di lahan terbuka tanpa fertigasi, dengan fertigasi, dan budidaya menggunakan naungan model *tunnel*. Delapan tanaman yang dipilih secara acak dari perlakuan *greenhouse* menunjukkan berat total buah rata-rata sebesar 190,48 gram, dengan simpangan baku sebesar 32,7 gram. Sebaliknya, perlakuan budidaya dengan naungan plastik UV tanpa sistem fertigasi (*tunnel flow*) memberikan hasil terendah, dengan berat total buah rata-rata hanya sebesar 65,62 g dan standar deviasi sebesar 38,1 g.



Gambar 1. Berat total rata-rata buah stroberi yang diperoleh dari delapan tanaman sampel (g)

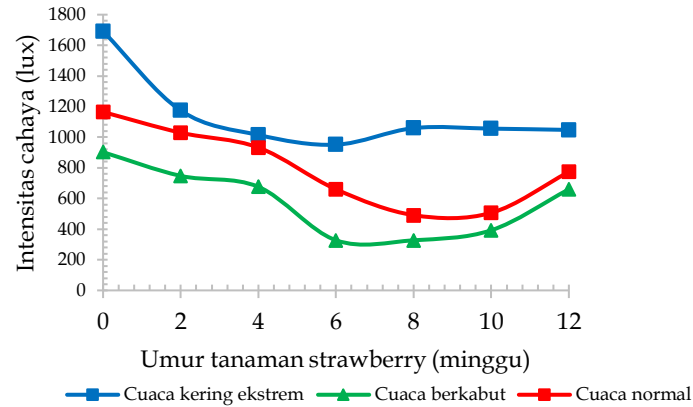
Penerapan sistem fertigasi terbukti meningkatkan berat total buah stroberi. Hal ini disebabkan oleh tersedianya unsur hara dalam bentuk yang lebih mudah diserap tanaman, sehingga mendukung proses pembentukan dan pembesaran buah secara optimal. Efek positif fertigasi ini terlihat jelas pada perlakuan di lahan terbuka maupun di dalam *greenhouse*, di mana produktivitas dan ukuran buah meningkat dibandingkan dengan perlakuan tanpa fertigasi. Dengan adanya nutrisi dalam bentuk larutan yang cepat diserap akar akan mendukung proses pembentukan buah. Hal ini diperkuat oleh (Silva et al., 2022) yang melaporkan rata-rata berat buah 425,27 g per tanaman menggunakan fertigasi penuh. (Wu et al., 2020) juga menemukan bahwa kombinasi air dan nutrisi secara optimal dalam *greenhouse* meningkatkan produktivitas dan ukuran buah stroberi. Selain itu, penelitian oleh (Massa et al., 2023) menunjukkan bahwa penggunaan sistem fertigasi berbasis sensor meningkatkan efisiensi hara dan berat buah secara signifikan.

Mikroklimat dalam Budidaya Stroberi

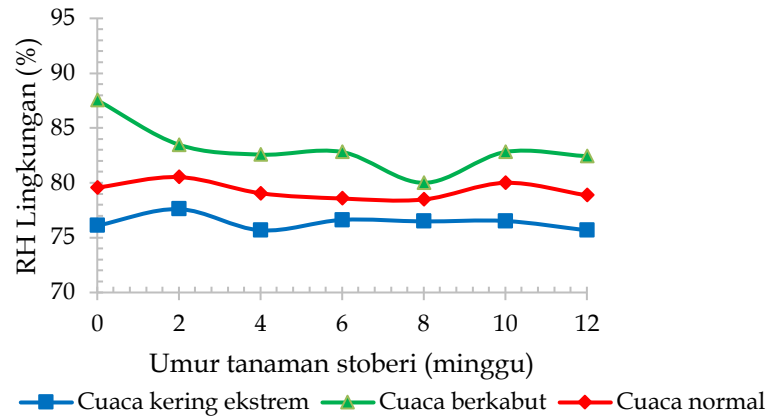
Perubahan cuaca memiliki dampak langsung terhadap intensitas radiasi matahari yang diterima oleh tanaman stroberi. Gambar 2 menunjukkan bahwa intensitas penyinaran yang diterima oleh tanaman stroberi sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Pada cuaca kering ekstrem, intensitas cahaya cenderung lebih tinggi dan stabil, terutama setelah minggu ke-2, dengan nilai rata-rata berkisar antara 950 hingga 1050 lux. Sebaliknya, cuaca berkabut menunjukkan penurunan drastis intensitas cahaya hingga mencapai titik terendah sekitar 400–500 lux pada minggu ke-6 hingga ke-10, sebelum mengalami kenaikan menjelang minggu ke-12. Kondisi cahaya pada cuaca normal berada di antara dua ekstrem tersebut. Tingginya intensitas cahaya pada cuaca kering ekstrem dapat meningkatkan proses fotosintesis tanaman, meskipun risiko stres akibat suhu tinggi dan defisit air juga meningkat. Sebaliknya, intensitas cahaya yang terlalu rendah pada cuaca berkabut dapat membatasi aktivitas fotosintetik dan berdampak negatif terhadap pertumbuhan generatif tanaman (Choi & Kang, 2018). Selain itu (Guiamba et al., 2022) menegaskan bahwa intensitas cahaya optimal ($\approx 250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, setara 1.800–2.000 lux) diperlukan untuk mencapai efisiensi fotosistem II dan pertumbuhan biomassa yang maksimal pada stroberi.

Kondisi kelembaban relatif lingkungan juga menunjukkan perbedaan signifikan antar jenis cuaca sebagaimana yang terlihat pada Gambar 3. Cuaca berkabut cenderung menghasilkan RH tertinggi (sekitar 85–90%), sementara cuaca kering ekstrem menunjukkan RH terendah (sekitar 72–76%). RH pada cuaca normal berada pada kisaran menengah. Kelembaban yang tinggi dapat menguntungkan untuk pertumbuhan vegetatif stroberi, tetapi juga berisiko memicu infeksi patogen jika tidak diimbangi dengan sirkulasi udara yang baik

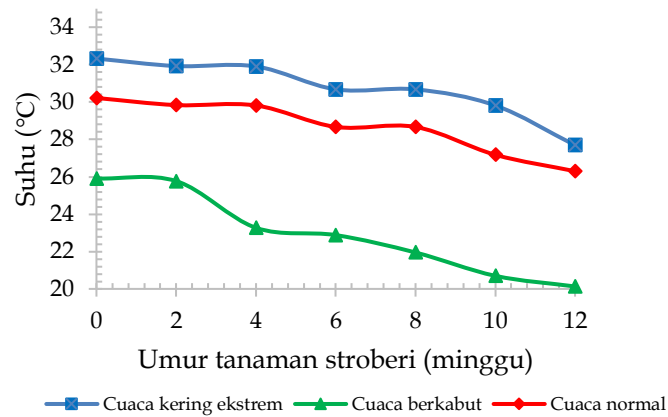
(Yamanaka et al., 2024). Sementara itu, kelembaban rendah pada cuaca kering dapat menyebabkan peningkatan evapotranspirasi, yang berisiko menyebabkan stres air jika tidak disertai manajemen irigasi yang memadai (P. Yang et al., 2025).



Gambar 2. Intensitas penyinaran yang diterima oleh tanaman stroberi



Gambar 3. Perubahan RH lingkungan selama masa pertumbuhan tanaman stroberi



Gambar 4. Perubahan suhu rata-rata selama masa pertumbuhan tanaman stroberi

Gambar 4 memperlihatkan pola perubahan suhu rata-rata lingkungan pada berbagai kondisi cuaca selama masa pertumbuhan tanaman stroberi. Cuaca kering ekstrem menunjukkan suhu tertinggi dibandingkan kondisi lainnya, dengan suhu awal sekitar 33,5°C dan menurun secara bertahap hingga 26,5°C pada minggu ke-12. Suhu tinggi ini konsisten dengan minimnya awan dan kelembaban di atmosfer, yang memungkinkan radiasi matahari mencapai permukaan secara langsung dan intensif. Pada cuaca normal, suhu berkisar antara

30°C di awal pertumbuhan hingga menurun perlahan menjadi sekitar 26°C. Sementara itu, cuaca berkabut menunjukkan suhu terendah, mulai dari 26°C dan terus menurun hingga sekitar 22°C pada minggu ke-12. Rendahnya suhu pada kondisi berkabut disebabkan oleh tingginya kelembaban dan rendahnya intensitas cahaya, yang menghambat pemanasan udara di sekitar kanopi tanaman. Perbedaan suhu antar kondisi cuaca ini berpengaruh signifikan terhadap fisiologi tanaman stroberi. Suhu yang terlalu tinggi, seperti pada kondisi kering ekstrem, dapat mempercepat proses respirasi dan menyebabkan stres abiotik, sehingga mengganggu pembentukan buah. Studi terbaru oleh (Ullah et al., 2024) menemukan bahwa suhu di atas 30 °C pada tanaman stroberi dapat meningkatkan aktivitas respirasi, menurunkan kestabilan membran, dan mengakibatkan stres oksidatif, yang selanjutnya menurunkan hasil panen dan kualitas buah. Sebaliknya, suhu rendah seperti pada cuaca berkabut dapat memperlambat laju metabolisme tanaman, termasuk aktivitas fotosintesis dan akumulasi hasil asimilasi, yang pada akhirnya dapat menurunkan produktivitas dan kualitas buah (Aazami et al., 2021).

Data mikroklimat ini menunjukkan bahwa cuaca sangat berpengaruh terhadap efisiensi fotosintesis, pembentukan buah, dan kualitas akhir hasil panen stroberi. Perbedaan antara jumlah buah tertinggi pada lahan terbuka fertigasi dan berat total buah tertinggi pada *greenhouse* fertigasi menunjukkan adanya perbedaan strategi alokasi asimilat yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan fisiologi tanaman. Pada lahan terbuka fertigasi, paparan radiasi matahari penuh ($\approx 100\%$ PAR) mendorong aktivitas fotosintesis yang tinggi dan memicu pembungaan lebih banyak melalui peningkatan sintesis giberelin dan sitokinin yang menginduksi diferensiasi meristem generatif (Bangerth, 2000). Akibatnya, jumlah buah yang terbentuk lebih banyak. Namun, fluktuasi suhu, kelembaban, dan curah hujan yang lebih besar di lahan terbuka meningkatkan *Vapour Pressure Deficit* (VPD), yang dapat mempercepat transpirasi tetapi membatasi akumulasi biomassa pada masing-masing buah. Hal ini menyebabkan bobot rata-rata per buah cenderung lebih rendah. Sebaliknya, pada *greenhouse* fertigasi, meskipun intensitas cahaya berkurang 15–25% akibat penutup UV, kondisi mikroklimat yang lebih stabil (kelembapan terjaga, suhu dalam rentang optimal 20–26 °C, dan VPD rendah) mengurangi stres abiotik dan meningkatkan efisiensi konversi fotosintat ke organ sink, khususnya buah yang sedang membesar. Lingkungan terkendali ini juga mempertahankan aktivitas enzim invertase dan sukrosa sintase lebih lama selama fase pembesaran buah, sehingga memungkinkan akumulasi karbohidrat dan air lebih banyak per buah (Aazami et al., 2021). Akibatnya, jumlah buah lebih sedikit, tetapi bobot per buah meningkat secara signifikan. Fenomena ini sejalan dengan temuan Fan et al. (2024) dan Sim et al. (2020) yang melaporkan bahwa pengendalian iklim mikro di *greenhouse* dapat meningkatkan ukuran dan kualitas buah meskipun jumlahnya lebih rendah. Dengan demikian, perbedaan pola hasil antara kedua sistem budidaya mencerminkan *trade-off* antara kuantitas dan ukuran buah yang diatur oleh interaksi antara faktor lingkungan, fisiologi tanaman, dan distribusi asimilat.

Analisis data mikroklimat seperti yang terlihat pada Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4 menunjukkan bahwa variasi intensitas cahaya, kelembapan relatif (RH), dan suhu udara antar kondisi cuaca berkontribusi langsung terhadap perbedaan performa tanaman pada masing-masing model budidaya. Pada lahan terbuka dengan fertigasi, intensitas cahaya yang diterima tanaman relatif tinggi dan stabil, berkisar 950–1050 lux pada kondisi cuaca kering ekstrem. Tingkat radiasi ini mendukung laju fotosintesis maksimum, sehingga mengoptimalkan pembentukan buah dan menghasilkan jumlah buah tertinggi. Namun, tingginya suhu rata-rata (30–33 °C) di lahan terbuka juga berpotensi meningkatkan respirasi, yang dapat membatasi akumulasi biomassa pada buah dan menjelaskan mengapa berat total buah tidak setinggi di *greenhouse*.

Sebaliknya, pada *greenhouse* dengan fertigasi, intensitas cahaya tereduksi sekitar 15–25% dibandingkan lahan terbuka, yang dapat menurunkan potensi laju fotosintesis. Namun,

kondisi ini diimbangi oleh suhu dan kelembapan yang lebih moderat (26–28 °C dan RH 78–82%), yang meminimalkan stres panas dan mempertahankan turgor sel, sehingga mendukung pembesaran buah. Faktor ini menjelaskan capaian berat total buah tertinggi pada perlakuan ini meskipun jumlah buahnya lebih rendah.

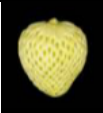
Pada model *tunnel* tanpa fertigasi, intensitas cahaya cenderung rendah terutama saat cuaca berkabut (<500 lux) dengan RH tinggi (>85%), yang membatasi fotosintesis dan meningkatkan risiko infeksi patogen. Ditambah tidak adanya suplai nutrisi terkontrol melalui fertigasi, hal ini berkontribusi terhadap hasil terendah baik dari sisi jumlah maupun berat total buah. Dengan demikian, hubungan antara kondisi mikroklimat dan performa panen menunjukkan bahwa kombinasi intensitas cahaya yang memadai, suhu moderat, dan pasokan nutrisi terkontrol merupakan faktor kunci untuk memaksimalkan hasil stroberi. Oleh karena itu, strategi budidaya yang adaptif seperti penggunaan naungan UV selektif, pengaturan kelembapan mikroklimat, serta penerapan sistem irigasi presisi seperti fertigasi, sangat penting untuk menjaga performa tanaman selama kondisi iklim yang fluktuatif.

Perubahan Karakteristik Biometrik, Nilai TSS, dan Komponen Warna RGB dan HSV pada Budidaya Buah Stroberi di Lahan Fertigasi

Berdasarkan pengamatan pada percobaan budidaya lahan untuk buah stroberi, maka analisis karakteristik hasil pemanenan buah stroberi menggunakan hasil dari budidaya di lahan fertigasi. Hal ini dipilih berdasarkan berat buah rata-rata untuk lahan fertigasi lebih besar dibandingkan berat buah di lahan lainnya.

Buah stroberi tersebut dipanen pada lima tahap kematangan, yaitu tahap belum matang (TK1), mulai berubah warna merah (TK2), setengah merah (TK3), merah cerah (TK4), dan merah penuh (TK5), yang didasarkan pada perkembangan warna kulit buah dari putih hingga merah tua. Contoh khas buah stroberi dari kelima tahap kematangan ditunjukkan pada Tabel 2. Pada setiap tahap kematangan, sebanyak 100 buah dikumpulkan dan diberi nomor untuk keperluan pengukuran karakteristik biometrik, penentuan nilai TSS dan pengambilan citra.

Tabel 2. Tahapan kematangan berdasarkan karakteristik visual dan data biometrik stroberi

Parameter	Belum Matang	Mulai berubah warna	Setengah merah	Merah cerah	Merah penuh
Gambar RGB					
Nilai R	206.33	218.29	200.28	214.9	181.51
Nilai G	206.32	169.30	126.94	88.55	62.92
Nilai B	119.21	104.99	72.22	46.82	43.16
Nilai H	29.77	18.45	16.38	8.96	10.54
Nilai S	113.82	134.82	170.08	204.59	198.89
Nilai V	207.01	216.28	200.29	214.9	181.51
Panjang (mm)	35.17	46.09	38.9	42.68	34.51
Diameter (mm)	29.17	38.66	31.82	33.27	34.23
TSS (°Brix)	5.27	6.99	7.36	8.11	8.86

Dalam penelitian ini, sebanyak 500 sampel buah stroberi dikumpulkan untuk dianalisis karakteristik biometriknya (panjang, diameter) dan total zat padat terlarut (TSS) pada lima tahap kematangan yang berbeda. Tabel 3 menyajikan ringkasan statistik dari masing-masing parameter yang diukur. Panjang, diameter, dan TSS menunjukkan perubahan yang signifikan antar tahap kematangan, dengan variasi paling mencolok terjadi pada nilai TSS. Sebaliknya,

perubahan panjang, diameter, dan berat tidak selalu signifikan di semua tahap kematangan pada tingkat yang sama.

Tabel 3. Karakteristik biometrik dan total zat padat terlarut (TSS) buah stroberi pada lima tahap kematangan

Tahapan Kematangan	Panjang	Diameter	TSS (°Brix)
Belum Matang	36.83 ± 1.21 ^a	30.97 ± 1.21 ^a	5.97 ± 0.46 ^a
Mulai berubah warna	37.04 ± 3.31 ^a	31.03 ± 2.54 ^a	6.48 ± 0.24 ^a
Setengah merah	39.01 ± 2.41 ^b	31.13 ± 1.41 ^{ab}	7.13 ± 0.35 ^{ab}
Merah cerah	43.11 ± 4.17 ^c	32.49 ± 1.46 ^{bc}	8.17 ± 0.41 ^{bc}
Merah penuh	42.84 ± 2.92 ^c	33.02 ± 2.71 ^c	9.05 ± 0.32 ^c

Berdasarkan analisis terhadap 100 sampel di setiap tahap, ditemukan perbedaan signifikan khususnya antara tahap belum matang, mulai berubah warna merah, setengah merah, merah cerah, dan merah penuh untuk parameter panjang dan diameter. Hasil ini sejalan dengan fakta bahwa proses pertumbuhan dan pematangan berlangsung secara simultan pada buah stroberi (Perkins Veazie, 1987). (Abeles & Takeda, 1990) melaporkan bahwa fase pertumbuhan stroberi varietas 'Tribute' meningkat dari tahap putih ke tahap merah. Varietas lain seperti 'Pajaro', 'Chandler', dan 'Selva' juga menunjukkan pola yang serupa (Doymaz, 2008; Ferreyra et al., 2007; Figueroa et al., 2008). Secara umum, buah stroberi yang dikumpulkan pada tahap kematangan yang berbeda memperlihatkan karakteristik biometrik yang baik.

Nilai TSS pada stroberi meningkat secara konsisten dari tahap putih hingga merah tua dengan signifikansi statistik yang tinggi. Kadar *Total Soluble Solids* (TSS) buah stroberi hasil penelitian ini berkisar antara 5,97 hingga 9,05 °Brix, dan nilai tersebut berada dalam rentang yang telah dilaporkan dalam berbagai studi sebelumnya untuk tahap-tahap kematangan buah stroberi, yaitu 4,8 hingga 10,9 °Brix (Kafkas et al., 2007; Karlidag et al., 2009). Selama proses pematangan, pati dalam buah mengalami degradasi menjadi komponen TSS melalui hidrolisis enzimatis oleh enzim α -amilase dan β -amilase (Nascimento et al., 2000). (Villanueva et al., 2004) menyatakan bahwa kandungan gula total meningkat seiring pematangan buah, sementara aktivitas enzim invertase menurun. Peningkatan kadar TSS tersebut menunjukkan akumulasi gula sederhana yang berkontribusi terhadap peningkatan mutu organoleptik buah, khususnya rasa manis, sehingga parameter ini dapat dijadikan indikator kualitas konsumsi segar dan kesesuaian buah untuk pasar.

Tabel 4. Nilai warna RGB (Merah: R, Hijau: G, Biru: B) dan HSV (*Hue, Saturation, dan Value*) pada buah stroberi pada lima tahap kematangan

Tahapan Kematangan	R	G	B	H	S	V
Belum Matang	201.47 ± 3.42 ^a	202.34 ± 6.12 ^a	123.05 ± 10.99 ^a	29.71 ± 0.30 ^a	109.24 ± 10.15 ^a	202.28 ± 7.62 ^a
Mulai berubah warna	206.29 ± 4.18 ^b	187.92 ± 10.96 ^b	110.09 ± 10.41 ^b	22.53 ± 1.74 ^b	126.28 ± 12.29 ^b	209.53 ± 3.17 ^b
Setengah merah	207.32 ± 9.03 ^b	130.73 ± 9.18 ^c	79.27 ± 9.88 ^c	15.96 ± 0.98 ^c	167.42 ± 10.70 ^c	208.43 ± 4.25 ^b
Merah cerah	208.06 ± 5.70 ^b	82.09 ± 7.95 ^d	44.96 ± 5.87 ^d	9.53 ± 0.65 ^d	205.12 ± 3.91 ^d	230.15 ± 5.50 ^b
Merah penuh	183.41 ± 6.54 ^c	54.17 ± 5.02 ^e	36.74 ± 3.04 ^e	9.65 ± 1.42 ^e	206.08 ± 3.28 ^d	191.62 ± 3.56 ^c

Nilai warna RGB dan HSV yang diperoleh dari 100 gambar buah stroberi (n = 100) pada setiap tahap kematangan dinyatakan sebagai rata-rata ± simpangan baku. Nilai-nilai yang tidak memiliki huruf yang sama dalam kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$).

Berdasarkan analisis ragam (ANOVA), hasil penelitian menunjukkan bahwa stroberi pada lima tahap kematangan memiliki variasi nilai warna yang sangat signifikan (Tabel 4). Warna stroberi berkembang dari hijau muda hingga merah tua selama proses pematangannya

(Janurianti et al., 2021). Pada warna RGB, nilai R meningkat secara signifikan pada tahap TK3, TK4, dan TK5 dibandingkan dengan TK1. Namun, pada tahap TK 5, nilai R justru menurun secara mencolok. Selain itu, nilai G dan B menurun secara bertahap dari tahap hijau muda hingga merah tua, dan variasinya signifikan pada seluruh tahap kematangan stroberi (Tabel 4). Perubahan serupa dalam ruang warna juga dilaporkan pada buah stroberi varietas 'Selva' yang sedang matang (Ferreira et al., 2007). Fenomena penurunan nilai R pada tahap kematangan penuh (TK5) dibandingkan dengan tahap merah cerah (TK4), meskipun secara visual buah tampak berwarna merah lebih pekat, dapat dijelaskan melalui sifat optik pigmen buah. Pada tahap kematangan penuh, konsentrasi antosianin mencapai tingkat maksimum sehingga penyerapan radiasi pada panjang gelombang merah meningkat secara signifikan. Peningkatan penyerapan ini mengakibatkan berkurangnya intensitas reflektansi merah yang terekam oleh sensor kamera, sehingga nilai numerik R menurun. Selain itu, pada ruang warna HSV, tahap merah penuh dicirikan oleh nilai *saturation* (S) yang tinggi dan *value* (V) yang lebih rendah dibanding tahap merah cerah, menghasilkan persepsi visual warna merah pekat pada penglihatan manusia, namun direpresentasikan dalam citra digital sebagai penurunan nilai R.

Dalam ruang warna HSV, nilai *Hue* (H) pada stroberi mengalami penurunan terus-menerus dari TK1 hingga TK4. Nilai H pada awalnya dihitung mengalami penurunan sebesar 65% pada tahap TK4 dibandingkan dengan TK1. (Ferreira et al., 2007) dan (Ornelas-Paz et al., 2013) juga melaporkan penurunan *Hue* secara kontinu selama tahap kematangan. Selain itu, nilai *Saturation* (S) juga menurun secara signifikan pada semua tahap, sementara nilai *Value* (V) menunjukkan tingkat perubahan yang bervariasi (Tabel 4). Perubahan nilai warna pada ruang RGB dan HSV yang berkorelasi positif dengan TSS mengindikasikan bahwa atribut visual permukaan buah dapat berfungsi sebagai prediktor non-destruktif mutu buah, sekaligus menjadi acuan objektif untuk menentukan tahap kematangan optimal sebelum panen.

Kinerja Model MLR untuk Prediksi TSS

Hubungan linier antara variabel independen dan dependen merupakan dasar penting dalam pengembangan model prediktif berbasis regresi linier (Basak et al., 2020). Beberapa studi memilih model linier sederhana karena kemudahannya dalam penerapan serta kemudahan dalam menginterpretasikan hasil prediksi (Arulmozhi et al., 2021; Madhavi et al., 2022; Zhao & Xue, 2011). Model *Multiple Linear Regression* (MLR) digunakan dalam penelitian ini untuk memprediksi kadar *Total Soluble Solids* (TSS) buah stroberi berdasarkan karakteristik warna yang diperoleh dari citra digital pada ruang warna RGB dan HSV. Pemilihan metode *Multiple Linear Regression* (MLR) dalam penelitian ini didasarkan pada pertimbangan kemudahan implementasi, interpretasi yang lebih sederhana, dan kebutuhan data pelatihan yang relatif lebih sedikit dibandingkan metode non-linear seperti PLSR, SVR, atau ANN. MLR juga memungkinkan identifikasi kontribusi masing-masing variabel independen (komponen warna RGB dan HSV) terhadap variabel dependen (TSS) secara eksplisit, sehingga memudahkan evaluasi hubungan linier antara parameter visual dan kandungan TSS. Meskipun metode berbasis *machine learning* canggih seperti SVR atau ANN berpotensi menghasilkan akurasi prediksi yang lebih tinggi, metode tersebut memerlukan jumlah data yang lebih besar, proses pelatihan yang lebih kompleks, serta perangkat komputasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, MLR dipilih sebagai pendekatan awal yang efisien dan relevan untuk menguji kelayakan prediksi TSS berbasis pengolahan citra digital.

Tabel 5. Parameter kinerja (R^2 dan RMSE) dari model prediksi TSS buah stroberi pada tahap training dan testing.

Model	Dataset	Training		Testing	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE
Multiple Linier Regression	RGB	0.785	0.574	0.741	0.610
	HSV	0.826	0.445	0.775	0.580

Nilai R^2 dan RMSE yang disajikan pada Tabel 5 diperoleh melalui prosedur validasi silang (*k-fold cross-validation*) dengan $k = 10$ pada data pelatihan. Dataset dibagi menjadi 10 subset dengan ukuran seimbang, di mana 9 subset digunakan untuk pelatihan dan 1 subset digunakan untuk pengujian secara bergantian hingga seluruh subset digunakan sebagai data uji. Pendekatan ini digunakan untuk meminimalkan bias akibat pemisahan data tunggal dan memperkuat kemampuan generalisasi model prediksi TSS. Nilai kinerja yang dilaporkan merupakan rata-rata dari seluruh iterasi validasi silang.

Dalam hal prediksi TSS sebagaimana yang terlihat pada Table 5, nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi diperoleh dari model MLR berbasis ruang warna HSV, yaitu sebesar 0,826 pada tahap *training* dan 0,775 pada tahap *testing*. Hal ini menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan hingga 82,6% dan 77,5% variasi antara nilai TSS aktual dengan nilai prediksi pada masing-masing tahap. Sebaliknya, performa terendah ditunjukkan oleh model berbasis RGB, dengan nilai $R^2 = 0,785$ dan RMSE = 0,574 °Brix pada *training*, serta $R^2 = 0,741$ dan RMSE = 0,610 °Brix pada *testing* (Tabel 5).

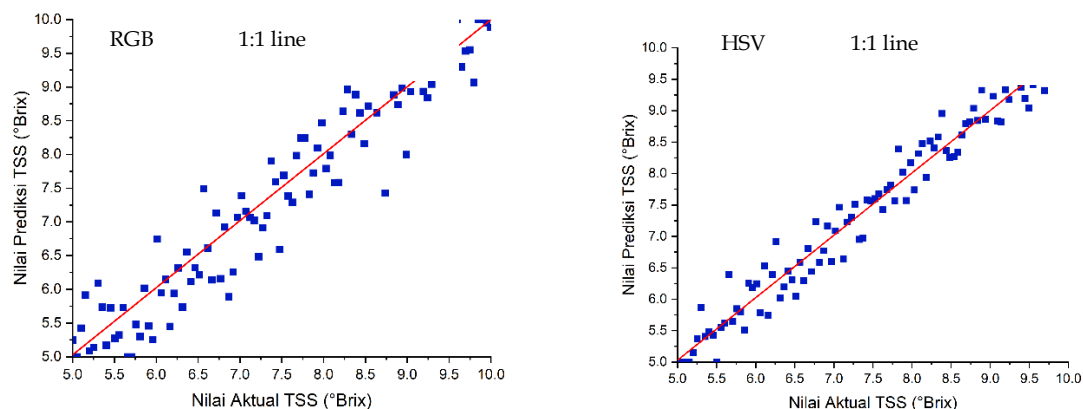
Dibandingkan model RGB, penggunaan ruang warna HSV menghasilkan peningkatan akurasi sebesar 5,2% pada *training* dan 4,6% pada *testing*, serta penurunan kesalahan prediksi (RMSE) sebesar 22,5% dan 4,9% pada tahap *training* dan *testing* secara berturut-turut. Hasil ini mengindikasikan bahwa ruang warna HSV lebih sensitif dalam merepresentasikan perubahan warna buah stroberi yang berkorelasi dengan akumulasi zat padat terlarut selama proses pematangan. Hal ini dimungkinkan karena HSV memisahkan komponen warna (*hue*) dari intensitas (*value*), sehingga memberikan kestabilan terhadap variasi pencahayaan dan bayangan saat pengambilan gambar. Meskipun ruang warna HSV menunjukkan kinerja prediksi TSS yang lebih baik dibandingkan RGB, metode ini memiliki keterbatasan jika pencahayaan saat pengambilan gambar tidak distandarisasi secara kuantitatif. Perubahan intensitas atau spektrum cahaya, terutama pada pengambilan citra di lapangan, dapat memengaruhi nilai *hue* dan *saturation*, sehingga menimbulkan variasi yang tidak terkait langsung dengan tingkat kematangan buah. Mengingat HSV relatif sensitif terhadap kondisi pencahayaan yang tidak stabil, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan sistem pencahayaan terkontrol atau prosedur kalibrasi warna guna meminimalkan potensi bias ini.

Beberapa studi sebelumnya telah mencoba memprediksi kadar TSS stroberi menggunakan teknik non-destruktif lainnya, dengan hasil yang bervariasi (Agulheiro-Santos et al., 2022; Shen et al., 2018). (Agulheiro-Santos et al., 2022) melaporkan model regresi *Partial Least Squares* (PLSR) berbasis NIRS dengan nilai $R^2 = 0,669$ (*training*) dan $R^2 = 0,520$ (*testing*). Sementara itu, (Shen et al., 2018) memperoleh hasil sedikit lebih baik menggunakan metode *Partial Least Square Discriminant Analysis* (PLS-DA), dengan nilai R^2 sebesar 0,733 pada tahap *testing*.

Meskipun metode *Vis-NIR spectroscopy* dapat memberikan hasil yang layak untuk estimasi TSS, keterbatasan metode ini antara lain adalah tidak tersedianya informasi spasial, serta biaya peralatan yang relatif tinggi (Manley, 2014). Sebaliknya, pendekatan menggunakan pengolahan citra digital dan model MLR berbasis ruang warna HSV dalam studi ini menawarkan alternatif prediksi TSS yang lebih murah, cepat, dan tetap akurat.

Hasil prediksi TSS oleh model MLR divisualisasikan dalam bentuk grafik sebar sebagaimana yang terlihat pada Gambar 5. Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai prediksi dan nilai aktual memiliki kesesuaian yang baik, terutama pada model HSV, yang ditunjukkan

oleh kedekatan sebaran titik terhadap garis 1:1. Hal ini mengonfirmasi bahwa model MLR berbasis ruang warna HSV memiliki akurasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan RGB dalam estimasi kadar TSS buah stroberi.



Gambar 5. Perbandingan antara nilai aktual dan nilai prediksi oleh model MLR berbasis ruang warna RGB dan HSV terhadap prediksi TSS pada tahap pengujian, divisualisasikan dalam grafik sebaran dengan garis 1:1

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa model budidaya fertigasi di lahan terbuka berpotensi meningkatkan mutu fisik dan kimia buah stroberi varietas Sujarli (Rosalinda), dengan pendekatan yang lebih sesuai secara ekonomis bagi petani di wilayah tropis. Hasil analisis citra digital terhadap buah dari sistem tersebut menunjukkan bahwa model regresi linier berganda (MLR) berbasis ruang warna HSV mampu memprediksi kadar *Total Soluble Solids* (TSS) dengan tingkat akurasi yang tinggi. Model ini mencapai nilai R^2 sebesar 0,826 (pelatihan) dan 0,775 (pengujian) serta RMSE yang lebih rendah dibandingkan model RGB. Dengan demikian, kombinasi antara sistem fertigasi terbuka yang relatif terjangkau dan metode evaluasi mutu berbasis citra digital memberikan solusi potensial yang dapat diterapkan secara luas dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi produksi stroberi di lapangan.

Saran

Sistem fertigasi terbuka dapat direkomendasikan sebagai alternatif teknologi budidaya yang efisien dan ekonomis untuk meningkatkan kualitas buah stroberi, terutama bagi petani dengan keterbatasan akses terhadap sistem *greenhouse*. Pendekatan citra digital berbasis HSV dapat mulai dikembangkan sebagai alat bantu non-destruktif untuk prediksi TSS, baik dalam proses panen maupun sortasi mutu pascapanen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan selama pelaksanaan penelitian ini. Secara khusus, apresiasi diberikan kepada program studi Teknik Pertanian dan Biosistem Universitas Udayana, para petani mitra yang telah berpartisipasi dalam pengambilan data, serta rekan-rekan sejawat yang turut memberikan masukan dalam penyusunan naskah.

PENDANAAN

Penelitian ini dilaksanakan secara mandiri tanpa dukungan pendanaan dari lembaga pemerintah, swasta, maupun sumber eksternal lainnya. Seluruh biaya operasional ditanggung oleh peneliti sebagai bentuk komitmen terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang agrikultur dan teknologi pengolahan citra.

CONFLICT OF INTEREST

Penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan dengan pihak mana pun dalam pelaksanaan maupun pelaporan penelitian ini. Penelitian dan penulisan artikel ini tidak menerima pendanaan dari pihak mana pun, serta tidak melibatkan pihak eksternal dalam perancangan penelitian; pengumpulan, analisis, atau interpretasi data; penulisan naskah; maupun pengambilan keputusan untuk memublikasikan hasil penelitian.

DAFTAR REFERENSI

- Aazami, M. A., Asghari-Aruq, M., Hassanpouraghdam, M. B., Ercisli, S., Baron, M., & Sochor, J. (2021). Low Temperature Stress Mediates the Antioxidants Pool and Chlorophyll Fluorescence in *Vitis vinifera* L. Cultivars. *Plants (Basel, Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/plants10091877>
- Abeles, F. B., & Takeda, F. (1990). Cellulase activity and ethylene in ripening strawberry and apple fruits. *Scientia Horticulturae*, 42(4), 269–275. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-4238\(90\)90050-O](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-4238(90)90050-O)
- Agulheiro-Santos, A. C., Ricardo-Rodrigues, S., Laranjo, M., Melgão, C., & Velázquez, R. (2022). Non-destructive prediction of total soluble solids in strawberry using near infrared spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(11), 4866–4872. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.11849>
- Amirullah, I., Areni, I. S., & Arifin, N. (2019). Klasifikasi Kematangan Stroberi Berbasis Segmentasi Warna dengan Metode HSV. *Jurnal Penelitian Enjiniring*, 23(2), 113–116. <https://doi.org/10.25042/jpe.112019.03>
- Arulmozhi, E., Moon, B. E., Basak, J. K., Sihalath, T., Park, J., & Kim, H. T. (2021). Machine learning-based microclimate model for indoor air temperature and relative humidity prediction in a swine building. *Animals*, 11(1), 1–24. <https://doi.org/10.3390/ani11010222>
- Badan Pusat Statistik Provinsi Bali. (2024). *Banyaknya wisatawan mancanegara bulanan ke Bali menurut pintu masuk*. <https://bali.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTA2IzI=/banyaknya-wisatawan-mancanegara-bulanan-ke-bali-menurut-pintu-masuk.html>
- Basak, J. K., Okyere, F. G., Arulmozhi, E., Park, J., Khan, F., & Kim, H. T. (2020). Artificial neural networks and multiple linear regression as potential methods for modelling body surface temperature of pig. *Journal of Applied Animal Research*, 48(1), 207–219. <https://doi.org/10.1080/09712119.2020.1761818>
- Choi, Hyo Gil, & Kang, Nam Jun. (2018). Effect of light and carbon dioxide on photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and fruit yield in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) plants. *Journal of Berry Research*, 9(1), 51–61. <https://doi.org/10.3233/JBR-18303>
- Dinas Pertanian Provinsi Bali. (2023). *Laporan tahunan subsektor hortikultura tahun 2023*. Denpasar: Dinas Pertanian Provinsi Bali
- Doymaz, İ. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(5), 914–919. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.02.003>
- Fan, Z., Verma, S., Lee, H., Jang, Y. J., Wang, Y., Lee, S., Whitaker, V. M. (2024). Strawberry soluble solids QTL with inverse effects on yield. *Horticulture Research*, 11, 1-8.

- <https://doi.org/10.1093/hr/uhad271>
- Ferreira, R. M., Viña, S. Z., Mugridge, A., & Chaves, A. R. (2007). Growth and ripening season effects on antioxidant capacity of strawberry cultivar Selva. *Scientia Horticulturae*, 112(1), 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.001>
- Figueroa, C. R., Pimentel, P., Gaete-Eastman, C., Moya, M., Herrera, R., Caligari, P. D. S., & Moya-León, M. A. (2008). Softening rate of the Chilean strawberry (*Fragaria chiloensis*) fruit reflects the expression of polygalacturonase and pectate lyase genes. *Postharvest Biology and Technology*, 49(2), 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.01.018>
- Forján, E., Vázquez, C., Casal, C., Gálvez, A. C., & de la Morena, B. A. (2009). STRAWBERRY CROP UNDER PLASTIC FILMS THAT ATTENUATE UV AND/OR PAR AND/OR INFRARED (IR) RADIATIONS: PLANT DEVELOPMENT AND FRUIT PRODUCTIVITY AND QUALITY. *Acta Horticulturae*, 842, 181–184. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.842.24>
- Guiamba, H. D. S. S., Zhang, X., Sierka, E., Lin, K., Ali, M. M., Ali, W. M., Lamlo, S. F., Kalaji, H. M., Telesiński, A., Yousef, A. F., & Xu, Y. (2022). Enhancement of photosynthesis efficiency and yield of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) plants via LED systems. *Frontiers in Plant Science*, 13, 918038. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918038>
- Hutchinson, G. K., Nguyen, L. X., Rubio Ames, Z., Nemali, K., & Ferrarezi, R. S. (2024). Sensor-controlled fertigation management for higher yield and quality in greenhouse hydroponic strawberries. *Frontiers in Plant Science*, 15(January), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1469434>
- Janke, R. R., Altamimi, M. E., & Khan, M. (2017). The Use of High Tunnels to Produce Fruit and Vegetable Crops in North America. *Agricultural Sciences*, 08(07), 692–715. <https://doi.org/10.4236/as.2017.87052>
- Janurianti, N. M. D., I Made Supartha Utama, & Ida Bagus Wayan Gunam. (2021). Colour and Quality of Strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch.) at Different Levels of Maturity. *SEAS (Sustainable Environment Agricultural Science)*, 5(1), 22–28. <https://doi.org/10.22225/seas.5.1.3166.22-28>
- Kafkas, E., Koşar, M., Paydaş, S., Kafkas, S., & Başer, K. H. C. (2007). Quality characteristics of strawberry genotypes at different maturation stages. *Food Chemistry*, 100(3), 1229–1236. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.12.005>
- Karlidag, H., Yildirim, E., & Turan, M. (2009). Exogenous applications of salicylic acid affect quality and yield of strawberry grown under antifrost heated greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(2), 270–276. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800058>
- Katsoulas, N., Bari, A., & Papaioannou, C. (2020). Plant responses to UV blocking greenhouse covering materials: A review. *Agronomy*, 10(7), 1–17. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071021>
- Madhavi, B. G. K., Basak, J. K., Paudel, B., Kim, N. E., Choi, G. M., & Kim, H. T. (2022). Prediction of Strawberry Leaf Color Using RGB Mean Values Based on Soil Physicochemical Parameters Using Machine Learning Models. *Agronomy*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy12050981>
- Manley, M. (2014). Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials. *Chemical Society Reviews*, 43(24), 8200–8214. <https://doi.org/10.1039/C4CS00062E>
- Massa, D., Incrocci, L., & Thompson, R. B. (2023). Innovations and insights into fertigation management for a protected cultivation in transition. *Acta Horticulturae*, 1377, 709–724. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1377.87>
- Mehriya, M. L., Neelam Geat, Sarita, Singh, H., Mattar, M. A., & Elansary, H. O. (2020). of Drip Response Irrigation of Drip and Fertigation Irrigation and on Fertigation on Response

- of Drip Irrigation and Fertigation on Cumin Cumin Yield , Quality , Efficiency E ffi
ciency Grown under Grown under Arid Grown Climatic under Conditions Arid Cli.
Agronomy, 10(1711), 1–16.
- Nascimento, G. G. F., Locatelli, J., Freitas, P. C., & Silva, G. L. (2000). Antibacterial activity of
plant extracts and phytochemicals on antibiotic-resistant bacteria. In *Brazilian Journal
of Microbiology* (Vol. 31). scielo .
- Ornelas-Paz, J. de J., Yahia, E. M., Ramírez-Bustamante, N., Pérez-Martínez, J. D., Escalante-
Minakata, M. del P., Ibarra-Junquera, V., Acosta-Muñiz, C., Guerrero-Prieto, V., &
Ochoa-Reyes, E. (2013). Physical attributes and chemical composition of organic
strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch, Cv. Albion) at six stages of ripening. *Food
Chemistry*, 138(1), 372–381.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.006>
- Perkins Veazie, P. (1987). Growth and Ripening of Strawberry Fruit Under Field Conditions.
Proc. Fla. State Hort. Soc., 17, 267–297.
- Shen, F., Zhang, B., Cao, C., & Jiang, X. (2018). On-line discrimination of storage shelf-life and
prediction of post-harvest quality for strawberry fruit by visible and near infrared
spectroscopy. *Journal of Food Process Engineering*, 41(7), e12866.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpe.12866>
- Silva, L. I. da, Oliveira, I. P. de, Jesus, E. da C., Pereira, M. C., Pasqual, M., Araújo, R. C. de, &
Dória, J. (2022). Fertilizer of the Future: Beneficial Bacteria Promote Strawberry
Growth and Yield and May Reduce the Need for Chemical Fertilizer. *Agronomy*, 12(10).
<https://doi.org/10.3390/agronomy12102465>
- Sim, H. S., Kim, D. S., Ahn, M. G., Ahn, S. R., Kim, S. K. (2020). Prediction of Strawberry
Growth and Fruit Yieldbased on Environmental and Growth Data in a Greenhouse for
Soil Cultivation with AppliedAutonomous Facilities. *Horticultural Science and
Technology*, 38 (6). <https://doi.org/10.7235/HORT.20200076>
- Ullah, I., Toor, M. D., Yerlikaya, B. A., Mohamed, H. I., Yerlikaya, S., Basit, A., & Rehman, A.
U. (2024). High-temperature stress in strawberry: understanding physiological,
biochemical and molecular responses. *Planta*, 260(5), 118.
<https://doi.org/10.1007/s00425-024-04544-6>
- Villanueva, M. J., Tenorio, M. D., Esteban, M. A., & Mendoza, M. C. (2004). Compositional
changes during ripening of two cultivars of muskmelon fruits. *Food Chemistry*, 87(2),
179–185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.11.009>
- Wu, Y., Li, L., Li, M., Zhang, M., Sun, H., & Sigrimis, N. (2020). Optimal fertigation for high
yield and fruit quality of greenhouse strawberry. *PLoS ONE*, 15(4), 1–17.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224588>
- Yamanaka, R., Yano, T., Hikawa-Endo, M., Yoshikoshi, H., Kawashima, H., Tojo, M., & Wada,
T. (2024). Effects of Humidification Based on Vapor Pressure Deficit (VPD) on Plant
Growth, Fruit Yield, and Fruit Quality Traits in June-bearing Strawberry. *The
Horticulture Journal*, 93(4), 377–388. <https://doi.org/10.2503/hortj.QH-114>
- Yang, J. W., & Kim, H. Il. (2024). An Overview of Recent Advances in Greenhouse Strawberry
Cultivation Using Deep Learning Techniques: A Review for Strawberry Practitioners.
Agronomy, 14(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy14010034>
- Yang, P., Drohan, P. J., Zhang, X., Long, H., Soulis, K. X., & Shi, X. (2025). Impacts of Deficit
Irrigation on Strawberry Physiology, Water Productivity, Quality, and Yield.
Sustainability (Switzerland), 17(2), 1–11. <https://doi.org/10.3390/su17020675>
- Zhao, T., & Xue, H. (2011). Regression analysis and indoor air temperature model of greenhouse
in northern dry and cold regions. *IFIP Advances in Information and Communication
Technology*, 345 AICT(PART 2), 252–258. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18336-2_30