

Pemantauan Kehijauan Daun Padi Sawah dengan *Drone* RGB dan Algoritma VARI: Validasi Indeks SPAD

Monitoring of Rice Leaf Greenness Using RGB Drone and VARI Algorithm: Validation with SPAD Index

R.H. Anasiru^{1*}, Harry Hartono¹, Arief Wicaksono¹, Andy Saryoko¹, Andi Apriany Fatmawati², Abdul Haris Bahrun³

¹Program Studi Tata Air Pertanian, Politeknik Enjiniring Pertanian Indonesia, Tangerang 15388, Indonesia

²Jurusan Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Serang 42163, Indonesia

³Jurusan Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin, Makassar 90245, Indonesia

*Email: rhanasiru@gmail.com

Diterima: 19 November 2025; Disetujui: 28 Maret 2026

ABSTRAK

Pemantauan pertumbuhan tanaman padi secara akurat dan real-time menjadi kebutuhan mendesak dalam mendukung program peningkatan produktivitas dan indeks pertanaman (IP) di Indonesia. Namun, teknologi pemantauan berbasis *drone* multispektral dengan sensor *Near-Infrared* (NIR) masih terkendala biaya tinggi dan akses terbatas di lapangan. Penelitian ini menawarkan alternatif ekonomis dengan mengembangkan metode pemantauan kehijauan daun menggunakan *drone* non-multispektral berbasis kamera RGB dan algoritma *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI). Pengambilan data dilakukan menggunakan *drone* DJI Mavic Pro 1 yang menghasilkan 597 citra udara resolusi tinggi (4000 × 3000 piksel) dengan *Ground Sampling Distance* (GSD) 1,21 cm/piksel pada lahan sawah seluas 4 hektar. Citra diproses dengan perangkat lunak Agisoft Metashape dan ArcGIS untuk menghasilkan peta orthomosaic dan nilai VARI pada empat petak sawah. Pemantauan kehijauan daun menunjukkan nilai rata-rata VARI antara 0,069 hingga 0,217. Validasi menggunakan pengukuran indeks SPAD-502 Plus menghasilkan nilai rata-rata antara 40,6 hingga 42,3. Analisis regresi linear menunjukkan korelasi yang sangat kuat ($R^2 = 0,934$) antara nilai VARI dan indeks SPAD, yang menegaskan reliabilitas metode ini. Temuan ini menunjukkan bahwa algoritma VARI berbasis *drone* RGB dapat menjadi solusi praktis, cepat, dan ekonomis untuk pemantauan pertanian presisi. Pendekatan ini berpotensi mendukung optimalisasi pengelolaan lahan sawah, sekaligus memperkuat upaya peningkatan produktivitas padi dan ketahanan pangan nasional.

Kata kunci: *Drone* RGB; kehijauan daun; pertanian presisi; SPAD; VARI

ABSTRACT

Accurate and real-time monitoring of rice growth has become an urgent necessity to support national programs for increasing productivity and cropping index (IP) in Indonesia. However, monitoring technologies based on multispectral drones with Near-Infrared (NIR) sensors remain costly and less accessible for field applications. This study proposes an economical alternative by developing a method for estimating leaf greenness using non-multispectral drones equipped with RGB cameras and the Visible Atmospherically Resistant Index (VARI). Data acquisition was carried out using a DJI Mavic Pro 1 drone, producing 597 high-resolution aerial images (4000 × 3000 pixels) with a Ground Sampling Distance (GSD) of 1.21 cm/pixel over 3 hectares of rice fields. The images were processed with Agisoft Metashape and ArcGIS to generate orthomosaic maps and calculate VARI values for four field plots. Leaf greenness estimation showed average VARI values ranging from 0.069 to 0.217. Validation using the SPAD-502 Plus chlorophyll meter resulted in average SPAD index values between 40.6 and 42.3. Linear regression analysis revealed a very strong correlation ($R^2 = 0.934$) between VARI and SPAD values, confirming the reliability of this method. These findings demonstrate that the VARI algorithm derived from RGB drone imagery can serve as a practical, rapid, and cost-effective tool for precision agriculture monitoring. This approach holds significant potential to support the optimization of rice field management and strengthen efforts to improve rice productivity and national food security.

Keywords: *RGB Drone; Leaf Greenness; Precision Agriculture; SPAD; VARI*

PENDAHULUAN

Produktivitas padi nasional dan peningkatan indeks pertanaman (IP) merupakan prioritas dalam kebijakan strategis pemerintah, seperti melalui program Optimalisasi Lahan Rawa (OPLAH) dan Cetak Sawah Rakyat (CSR) (Kementerian Pertanian, RI, 2023; Peraturan Menteri Pertanian No 12 Tahun 2024). Keberhasilan program ini sangat bergantung pada ketersediaan data kondisi lahan yang akurat dan terkini, sehingga diperlukan metode pemantauan pertumbuhan tanaman yang efisien dan presisi.

Teknologi *drone* dengan sensor multispektral, terutama berbasis *Near-Infrared* (NIR), telah terbukti efektif dalam memantau kehijauan tanaman. Namun, keterbatasan biaya, akses, dan operasional alat menjadi hambatan bagi adopsi luas di tingkat petani atau lembaga lapangan (Ihsan & Sugandi, 2019). Keterbatasan teknologi satelit seperti Sentinel-2 atau Landsat-8 terletak pada resolusi spasial yang rendah (10-30 meter) yang tidak mampu menangkap heterogenitas pada petak sawah kecil (Mulia, 2013). Disisi lain, sensor multispektral tingkat tinggi seperti MicaSense RedEdge memiliki harga yang sangat mahal (diatas Rp. 150.000.000), sehingga sulit dijangkau oleh institusi lokal

atau kelompok tani (Bending *et al.*, 2015). Sebagai alternatif, penggunaan *drone* non-multispektral dengan kamera RGB dan algoritma *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI) menawarkan pendekatan yang lebih terjangkau, tanpa mengabaikan akurasi secara signifikan (Colomina & Molina, 2014).

Vegetation Index berbasis kanal visible seperti VARI telah diperkenalkan oleh Gitelson *et al.* (2002) sebagai pendekatan sederhana namun efektif dalam mengestimasi kehijauan daun karena relatif tahan terhadap gangguan atmosfer dibandingkan indeks RGB lain (Dai *et al.*, 2024). Selain itu, Hunt *et al.* (2013) mengembangkan *Triangular Greenness Index* (TGI) yang juga berbasis kanal visible, sehingga memperkuat potensi penggunaan kamera RGB non-multispektral untuk pemantauan fisiologi tanaman. Seiring berkembangnya teknologi UAV dan fotogrametri digital, platform ini semakin banyak dimanfaatkan untuk high-throughput phenotyping di bidang pertanian (Araus *et al.*, 2024, Liao *et al.*, 2025). Lebih lanjut studi terbaru menunjukkan bahwa citra UAV dengan kamera RGB dapat menghasilkan indeks vegetasi yang sensitif untuk pemantauan pertumbuhan tanaman, khususnya pada lahan persawahan (Liu *et al.*, 2023)."

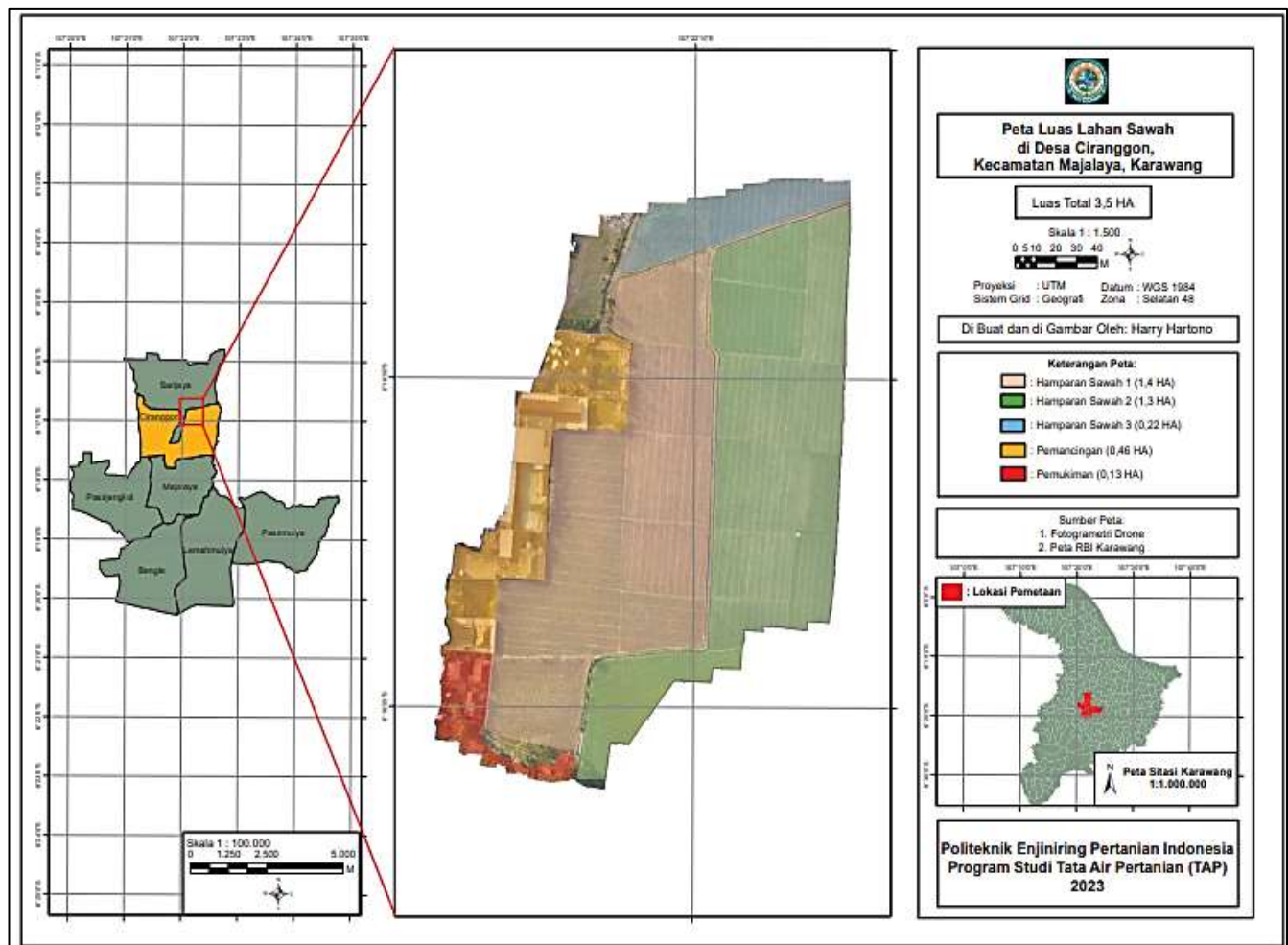
VARI merupakan indeks vegetasi berbasis kanal warna tampak (visible light) yang dirancang untuk tahan terhadap variasi atmosferik dan pencahayaan, menjadikannya cocok digunakan pada citra RGB biasa (Gitelson *et al.*, 1996). Untuk memastikan keandalannya, metode ini perlu divalidasi menggunakan parameter fisiologis tanaman, salah satunya adalah indeks SPAD—yang mengukur kandungan klorofil daun sebagai indikator langsung dari tingkat fotosintesis dan

kesehatan tanaman klorofil daun sebagai indikator langsung dari tingkat fotosintesis dan kesehatan tanaman.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, dirasa perlu mengembangkan metode pemantauan kehijauan daun padi berbasis *drone* RGB dan algoritma VARI (Hunt *et al.*, 2013), selanjutnya memvalidasi hasil pemantauan dengan pengukuran indeks SPAD, serta menerapkan analisis spasial dalam pemetaan kehijauan lahan sawah secara representatif. Melalui pendekatan ini, diharapkan tercipta metode pemantauan tanaman yang presisi, real-time, dan ekonomis, guna mendukung pengambilan keputusan berbasis data di sektor pertanian.

METODOLOGI

Penelitian dilaksanakan pada kawasan wilayah kerja Unit Pelayanan Tugas Dinas (UPTD) Pengelolaan Pertanian Kecamatan Majalaya, di Desa Ciranggon, Kecamatan Majalaya. Dengan koordinat lokasi pemetaan 6°16'48.7"S 107°22'08.1"E Gambar 1). Lokasi ini dipilih berdasarkan penggunaan lahan daerah sekitar wilayah kerja yang merupakan lahan persawahan yang merupakan sentra produksi padi. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif dengan pendekatan korelasional. Pendekatan ini dipilih untuk memvalidasi akurasi data penginderaan jarak jauh (indeks vegetasi) dengan data aktual lapangan (*ground truth*) berupa indeks SPAD, untuk memastikan apakah sensor RGB dapat menjadi proksi yang valid untuk kehijauan tanaman.



Gambar 1. Lokasi penelitian, UPT Kec. Majalaya



Gambar 2. Pengaturan terbang drone

Prosedur Penelitian

Ruang lingkup penelitian dimulai dengan pemotretan area merupakan data citra drone di lahan sawah, dilanjutkan dengan pengolahan citra untuk menghasilkan peta orthomosaic dan perhitungan nilai VARI sebagai indikator kehijauan daun (Mulla, 2013). Adapun tahapan pengolahan citranya berupa (1) Foto penyelarasan, menentukan orientasi kamera dan posisi relatif antar foto; (2) *Bulid Dense Colud*, menghasil titik-titik ordinat 3D yang rapat untuk detail morfologi lahan; (3) Ororektifikasi, menghilangkan distorsi perspektif dan kemiringan sensor agar citra memiliki skala yang konsistensi dan dapat diukur secara spasial; (4) Perhitungan raster, menghitung rumus VARI di setiap pixel untuk merubah nilai digital (GRB) menjadi informasi biofisik tanaman. Selanjutnya, dilakukan pengukuran indeks SPAD pada sampel tanaman sebagai data validasi fisiologis. Data hasil pengolahan citra dan pengukuran lapangan kemudian dianalisis secara statistik untuk mengkaji korelasi dan validitas metode. Akhirnya, hasil analisis digunakan untuk klasifikasi tingkat kehijauan daun dan interpretasi kondisi tanaman, yang menjadi dasar rekomendasi pengelolaan lahan pertanian secara lebih efektif dan efisien.

Pengumpulan dilakukan dengan observasi survei lapangan secara real time didukung dengan data primer maupun sekunder berupa observasi melalui citra drone untuk citra dengan resolusi yang tinggi. Pemilihan empat petak sawah sebagai sampel dalam penelitian pemantauan tingkat kehijauan daun pada tanaman padi didasarkan pada beberapa pertimbangan yakni dapat merepresentasikan Variasi Kondisi Lapangan sesuai dengan tujuan utama pemilihan sampel adalah untuk mewakili variasi kondisi nyata di lapangan. Keempat petak ini berbeda karakteristiknya, sehingga penelitian dapat menangkap variasi spasial dan kondisi heterogen yang ada di lahan sawah secara lebih representatif. Hal ini penting agar hasil pemantauan kehijauan daun tidak bias hanya pada satu kondisi tertentu, melainkan mencerminkan kondisi umum di area penelitian.

Pengaturan Terbang Drone

Perencanaan drone ini yaitu dua kali terbang dengan pengaturan 80% *front overlap* dan 75% *side overlap* dan luasan cakupan sampai dengan 4 Ha. Selama akuisisi citra UAV, parameter kamera seperti white balance dan exposure dikunci untuk menghindari bias akibat kondisi atmosfer, karena variabilitas iluminasi terbukti signifikan memengaruhi

nilai indeks vegetasi (Plant Methods, 2023). Selain itu dalam pengaturan lanjutannya dapat mengatur *overlap* gambar citra drone, agar sesuai dengan data yang akan diambil (Gambar 2).

Konfigurasi Kamera Drone

Dalam proses akuisisi citra udara, pengaturan kamera drone dilakukan secara manual dan konsisten untuk memastikan kualitas citra yang seragam dan minim bias pencahayaan (Richardson *et al.*, 2002). Kamera drone DJI Mavic Pro 1 yang digunakan memiliki spesifikasi resolusi 12 MP, ukuran sensor 1/2.3", dan panjang fokus ekuivalen 26 mm. Pengambilan citra dilakukan dengan drone DJI Mavic Pro 1 pada ketinggian 30 m, menghasilkan 5 970 gambar resolusi tinggi (4000 × 3000 px) dengan GSD ≈ 1.21 cm px⁻¹, mengikuti prosedur yang diterapkan pada penelitian biomassa padi berbasis UAV-RGB (Zhang *et al.*, 2025).

Untuk menghasilkan data fotogrametri yang optimal, parameter kamera dikunci (manual mode) dengan konfigurasi sebagai berikut:

1. **Exposure Mode: Manual**
Pengaturan ini dipilih untuk menghindari perubahan eksposur otomatis yang dapat menyebabkan inkonsistensi pencahayaan antar *frame* citra.
2. **ISO: 100**
Nilai ISO rendah digunakan untuk meminimalkan noise digital dan mempertahankan kejernihan detail citra, khususnya pada tekstur daun.
3. **Shutter Speed: 1/1000 – 1/1250 detik**
Kecepatan rana tinggi dipilih untuk menghindari efek blur akibat getaran drone atau pergerakan tanaman akibat angin.
4. **Aperture: f/2.2 (bawaan tetap)**
Aperture bawaan kamera DJI Mavic Pro 1 bersifat tetap dan mendukung *depth of field* yang cukup untuk permukaan tanaman.
5. **White Balance (WB): Locked (Sunny/Daylight Mode)**
White balance dikunci dalam mode "Sunny" untuk menjaga konsistensi warna hijau daun pada semua citra dan menghindari perubahan tonal akibat otomatisasi perangkat.
6. **Focus: Manual Focus**
Fokus dikunci pada awal misi terbang untuk memastikan ketajaman citra merata di seluruh frame, terutama pada ketinggian terbang 30 meter.
7. **Image Format: JPEG + DNG (RAW)**
Seluruh citra disimpan dalam format RAW untuk keperluan pengolahan lanjutan serta JPEG untuk dokumentasi cepat dan visualisasi.
8. **Geotagging: Aktif**
Informasi koordinat GPS secara otomatis terintegrasi dalam metadata setiap citra, untuk mempercepat proses *align* dan georeferensi di Agisoft Metashape.

Pengambilan foto udara dilakukan dalam kondisi pencahayaan optimal (pagi hari pukul 08.00–10.00 WIB) untuk meminimalkan bayangan panjang dan *overexposure*. Pengaturan kamera dikunci sebelum misi dimulai dan tidak diubah selama penerbangan untuk menjaga kualitas data tetap seragam.

Kerangka Konseptual Algoritma VARI

Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) merupakan indeks vegetasi berbasis kanal spektrum cahaya tampak yang dirancang untuk memantau tingkat kehijauan tanaman dengan memanfaatkan perbedaan reflektansi pada

kanal merah (R), hijau (G), dan biru (B). Indeks ini dirumuskan sebagai $VARI = (G - R) / (G + R - B)$, di mana nilai reflektansi kanal hijau yang lebih tinggi dibanding kanal merah menjadi indikator vegetasi sehat, sedangkan kanal biru digunakan sebagai faktor koreksi untuk mengurangi pengaruh variabilitas atmosfer seperti kabut tipis, kelembapan udara, atau partikel debu.

VARI dirancang khusus untuk meminimalkan gangguan atmosfer tanpa memerlukan kanal inframerah dekat (NIR). Penambahan kanal Biru (B) dalam pembagi berfungsi sebagai faktor koreksi hamburan cahaya yang sering terjadi pada lapisan atmosfer bawah. Hal ini memungkinkan estimasi fraksi vegetasi hijau yang lebih stabil dibandingkan dengan indeks RGB sederhana seperti ExG (Excess Green) (Gitelson., dkk 2002).

Lebih lanjut Algoritma Indeks VARI yang dirumuskan oleh Gitelson merupakan indeks vegetasi yang dirancang khusus untuk mengestimasi fraksi vegetasi hijau hanya menggunakan kanal spektrum (RGB). Konsep dasar VARI berpijak pada karakteristik reflektansi tanaman tanaman pada tiga pita gelombang sebagai berikut: (1) Kontras Hijau dan Merah ($G - R$), tanaman sehat memiliki konsentrasi klorofil yang tinggi, yang secara aktif menyerap energi pada saluran merah (R) untuk fotosintesis dan memantulkan energi secara kuat pada kanal hijau (G). Selisih antara Hijau dan Merah merupakan indikator utama dari pengungkapan klorofil dan biomassa hijau; (2) Kana Biru (B) sebagai Koreksi Atmosfer, inovasi utama VARI dibandingkan dengan indeks RGB lainnya (seperti ExG atau GLI) terletak pada penggunaan saluran Biru sebagai koreksi. Cahaya biru sangat sensitif terhadap hamburan atmosfer yang disebabkan oleh aerosol dan uap air. Dengan menyertakan kanal Biru dalam penyebut ($G + R - B$), algoritma ini mampu meminimalkan variasi nilai yang disebabkan oleh kondisi pencahayaan yang tidak konsisten atau gangguan atmosfer yang tipis; (3) Normalisasi, Pembagian selisih ($G - R$) dan jumlah ($G + R - B$) berfungsi untuk menormalisasi nilai indeks, sehingga hasilnya tetap stabil dalam rentang -1 dan +1, terlepas dari perbedaan intensitas cahaya matahari saat pengambilan data di lapangan.

Dalam konteks presisi pertanian, VARI terbukti sangat efektif untuk mendeteksi variasi kehijauan tanaman di tingkat kanopi. Meskipun tidak memiliki kanal inframerah (NIR) seperti NDVI, VARI memiliki sensitivitas yang sangat baik terhadap perubahan pigmen klorofil pada fase vegetatif tanaman, menjadikannya alternatif yang sangat akurat dan ekonomis untuk konsumen *drone* yang hanya dibekali kamera standar.

Prinsip dasar VARI adalah memanfaatkan rasio relatif antar kanal warna, sehingga hasilnya lebih tahan terhadap perbedaan intensitas pencahayaan dibandingkan penggunaan nilai reflektansi tunggal. Keunggulan lain dari VARI adalah kemampuannya mempertahankan stabilitas nilai indeks pada kondisi pencahayaan bervariasi dan ketinggian terbang rendah, seperti pada operasi *drone* di bawah 120 meter.

Meskipun demikian, kondisi atmosfer ekstrem, bayangan tajam, atau pantulan cahaya permukaan air tetap dapat memengaruhi akurasi. Dalam konteks penelitian ini, penggunaan VARI sangat relevan karena *drone* yang digunakan (DJI Mavic Pro 1) hanya memiliki sensor RGB tanpa kanal NIR, sehingga metode ini menjadi alternatif ekonomis untuk menggantikan NDVI.

SPAD502 Plus Chlorophyll Meter

SPAD502 Plus Chlorophyll Meter merupakan Soil Plant Analysis Development yaitu alat bantu pengukuran suatu

kandungan klorofil yang terdapat pada daun tanaman, alat ini bekerja tanpa merusak daun yang akan diukur nilai klorofilnya (konica minolta, n.d.) (Gambar 3).



Gambar 3. SPAD-502 plus chlorophyll meter

Indeks SPAD efektif untuk mengukur kandungan klorofil daun sebagai indikator fisiologis tanaman, namun instrumen ini memiliki beberapa keterbatasan khususnya pada kebutuhan kalibrasi SPAD pada spesies berbeda, namun menurut Coste et al. (2010) untuk skala luas, dapat menggunakan SPAD502-Plus sebagai alat validasi lapangan. Nilai SPAD juga dapat dievaluasi terhadap estimasi kandungan klorofil aktual melalui berbagai metode konversi, sebagaimana ditelaah secara komprehensif oleh Zhang et al., (2022).

Pengukuran SPAD hanya merepresentasikan area kecil pada permukaan daun sehingga tidak selalu menggambarkan kondisi seluruh kanopi, selain itu nilainya sangat dipengaruhi oleh fase pertumbuhan, posisi penjepitan, dan pemilihan daun sampel. Pada konsentrasi klorofil yang sangat tinggi, nilai SPAD juga dapat mengalami saturasi sehingga sensitivitas berkurang. Potensi bias dapat muncul jika pengambilan data tidak distandarkan, misalnya perbedaan antar-operator atau kondisi lingkungan saat pengukuran (Parry et al., 2014). Oleh karena itu, hasil SPAD sebaiknya dipahami sebagai indikator parsial yang perlu divalidasi silang dengan pendekatan spasial seperti algoritma VARI berbasis *drone*, agar memberikan gambaran lebih utuh mengenai kondisi fisiologis tanaman (Tabel 1).

Analisis Sensitivitas terhadap Kondisi Pencahayaan dan Atmosfer

Kualitas citra yang digunakan dalam perhitungan VARI sangat dipengaruhi oleh kondisi pencahayaan di lapangan. Jika pencahayaan rendah, misalnya saat cuaca mendung atau matahari rendah di horizon, reflektansi pada kanal RGB akan menurun secara keseluruhan. Dalam kondisi ini, meskipun VARI menggunakan rasio antar kanal yang relatif tahan terhadap perubahan intensitas cahaya, nilai indeks tetap dapat mengalami deviasi karena distribusi spektrum cahaya tidak seimbang. Hal ini berpotensi menurunkan kontras antar vegetasi sehat dan kurang sehat, sehingga pemantauan kehijauan daun menjadi kurang sensitif.

Tabel 1. Perbandingan metode pemantauan kehijauan tanaman (Zarco-Tejada *et al.*, 2001)

Aspek Perbandingan	Drone Multispektral (NIR/NDVI)	Drone RGB + VARI (Penelitian Ini)
Jenis Sensor	Multispektral (termasuk NIR)	RGB standar (kamera visual)
Indeks Vegetasi	NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>)
Tingkat Akurasi	Tinggi, sensitif terhadap kandungan klorofil dan biomassa	Tinggi, cukup representatif
Ketergantungan Atmosferik	Rentan terhadap awan dan pencahayaan	Lebih tahan terhadap variasi atmosferik dan cahaya
Kebutuhan Kalibrasi	Tinggi (memerlukan panel kalibrasi dan koreksi radiasi)	Rendah (tidak perlu kalibrasi spektral kompleks)
Biaya Perangkat	Tinggi (sensor NIR dan <i>drone</i> multispektral mahal)	Rendah hingga sedang (menggunakan <i>drone</i> konsumen seperti <i>Mavic Pro</i>)
Kemudahan Operasional	Perlu pelatihan khusus, <i>software</i> khusus multispektral	Lebih mudah, cukup dengan <i>software</i> pemrosesan foto biasa
<i>Output Visual</i>	Indeks numerik dan peta NDVI multispektral	Peta kehijauan berbasis VARI dalam <i>orthomosaic</i>
Waktu Pemrosesan	Relatif lebih lama, terutama dengan preprocessing multispektral	Lebih cepat dan ringan dalam pengolahan
Kesesuaian untuk Skala Kecil	Kurang ekonomis	Sangat cocok (biaya rendah, operasional sederhana)
Kesesuaian untuk Program Pemerintah	Cocok untuk riset dan pemantauan intensif	Cocok untuk <i>monitoring</i> cepat, murah, dan berbasis lokasi
Validasi Fisiologis	Biasanya dibandingkan dengan LAI atau SPAD	Divalidasi langsung dengan indeks SPAD

Tabel 2. Analisis sensitivitas untuk VARI berbasis citra RGB beserta langkah mitigasinya.

Kondisi Lapangan	Dampak pada Citra & VARI	Gejala pada Data	Mitigasi Saat Akuisisi (Pra-proses)	Mitigasi Saat Pemrosesan (Post-proses)
Cerah stabil (ideal)	Kontras baik; VARI konsisten	Histogram seimbang; sedikit bayangan	Terbang 08.00–10.00; kunci ISO 100, SS 1/1000–1/1250, WB <i>Sunny; rute grid</i>	Normalisasi ringan; pemeriksaan <i>outlier</i>
Mendung (<i>overcast</i>)	Intensitas rendah; warna “ <i>flat</i> ”; VARI bisa turun tipis	Histogram bergeser ke gelap; kontras turun	Tetap <i>manual exposure</i> ; bisa turunkan SS ($\pm 1/500$) agar ekspos cukup; hindari hujan gerimis	<i>Brightness/contrast global; radiometric normalization</i> antar-scene
Berawan parsial	Variasi pencahayaan spasial; perbedaan VARI antar area bukan fisiologis	“ <i>Patchy lighting</i> ”; seams pada <i>orthomosaic</i>	Tunda hingga awan stabil; urutan terbang cepat & konsisten; <i>overlap</i> $\geq 80/70\%$	<i>Per-tile exposure matching; histogram matching; masking</i> area terdampak awan
Bayangan tajam (<i>shadow</i>)	VARI menurun di area berbayang	Nilai VARI rendah mengikuti jejak bayangan	Hindari jam matahari rendah; tinggi terbang moderat; rencana jalur minim bayangan	<i>Shadow detection & masking; shadow compensation (gamma/illumination correction)</i>
<i>Backlight/ sun-glint</i>	<i>Blooming/flare; wash-out</i> warna; VARI bias	<i>Highlight clipping</i> ; area sangat terang	Orientasi jalur relatif terhadap matahari; pasang <i>hood</i> (jika ada)	<i>Highlight recovery (RAW); tone mapping</i> ; buang <i>frame “blown-out”</i>
Pantulan air/ lahan sangat basah	Spekular menaikkan R/B; VARI bias rendah/tinggi lokal	Bintik sangat terang; tekstur hilang	Hindari segera setelah irigasi; sudut pandang tidak tegak lurus jika memungkinkan	<i>Speckle/puddle masking</i> ; dilasi area air pada klasifikasi
Kabut/ <i>haze</i> tipis	<i>Blue scattering</i> naik; VARI bisa bias	<i>Channel B</i> dominan; kontras global turun	Tunda akuisisi; pastikan visibilitas cukup	<i>Dehaze; white balance refine; per-band normalization</i>
Angin (gerak tajuk)	Blur gerak; tekstur daun hilang; VARI <i>noisy</i>	Ketajaman turun; <i>mismatch tie-points</i>	Kecepatan rana tinggi ($\geq 1/1000$); tinggi terbang cukup; <i>overlap</i> tinggi	Buang <i>frame blur; robust alignment; smoothing</i> spasial ringan
Perbedaan otomatisasi kamera	<i>Drift eksposur/WB</i> → VARI tidak konsisten antar- <i>frame</i>	Variasi warna <i>frame-to-frame</i>	Hindari <i>auto mode</i> ; kunci <i>exposure & WB</i>	<i>Color balancing</i> antar- <i>frame; radiometric block adjustment</i>

Selain itu, jika awan menutupi sebagian area saat pemotretan, maka akan terjadi perbedaan pencahayaan spasial dalam satu sesi akuisisi citra. Area yang tertutup awan akan memiliki nilai VARI yang lebih rendah dibanding area terbuka, bukan karena perbedaan fisiologis tanaman tetapi akibat faktor eksternal. Deviasi ini dapat menimbulkan bias spasial pada orthomosaic, terutama jika koreksi radiometrik tidak dilakukan.

Untuk meminimalkan dampak tersebut, pengambilan data dilakukan pada waktu dengan pencahayaan stabil (pagi hari cerah, antara pukul 08.00–10.00 WIB), dengan pengaturan kamera dikunci pada mode manual (ISO, exposure, dan white balance tetap). Jika cuaca tidak stabil, perlu dilakukan *post-processing* berupa normalisasi histogram atau *radiometric correction* agar nilai VARI lebih seragam. Dengan cara ini, sensitivitas metode terhadap kondisi atmosfer dapat ditekan, dan akurasi pemantauan kehijauan daun tetap terjaga (Tabel 2).

Pengolahan Data Spasial

Data spasial dalam penelitian ini merujuk pada hal-hal yang terkait dengan koordinat geografis. Penggunaan data spasial memungkinkan peneliti tidak hanya mengetahui 'berapa' nilai kehijauan daun, tetapi juga 'dimana' lokasi tanaman yang mengalami defisiensi klorofil secara spesifik di dalam suatu hamparan luas melalui representasi piksel pada peta digital.

Data yang diperoleh melalui pengambilan citra udara berupa data ortomosaik kemudian diterapkan ke dalam perhitungan VARI yang diolah menggunakan aplikasi agisoft dengan menggunakan fitur *calculator raster*. Dalam konteks penginderaan jarak jauh berbasis kamera RGB, algoritma VARI dikenal dengan NDVI palsu (NDVI semu) karena fungsinya sebagai proksi pemetaan distribusi kondisi vegetasi tanpa memerlukan sensor inframerah dekat (NIR), namun tetap memberikan interpretasi visual yang konsisten dengan indeks standar vegetasi. Langkah selanjutnya pengolahan citra seperti *align foto*, *optimize cameras*. Jika dihasilkan *error* lebih dari 1 pixel maka bisa dilakukan proses *reconstruction uncertainty* dan *projection accuracy* dalam *gradual selection*. Untuk membuat peta model *Orthomosaic* yaitu melalui *dense point clouds*, model 3D dalam *build mesh*, pembuatan *DEM (Digital Elevation Model)* sehingga dapat terbentuk peta model *orthomosaic*, (Malambo *et al.*, 2019)

Data hasil pengolahan dari agisoft akan diolah dengan cara *georeferencing*, *digitasi*, *measure*, dan menu lainnya yang akan dilakukan dalam pengolahan serta analisis data lanjutan yang dibutuhkan. Sehingga menghasilkan data berupa peta luas lahan sawah dan kesehatan tanaman di lokasi yang dipetakan.

Analisis Data

Data yang didapatkan melalui observasi langsung berupa data *orthomosaic* yang kemudian diberlakukan perhitungan *False NDVI/VARI* dalam aplikasi agisoft dengan menggunakan "raster calculator" dan kemudian dilihat relasi data dengan data pengambilan rata-rata nilai klorofil dari alat *SPAD-502 Plus Chlorophyll Meter*. Untuk melihat hubungan antara hasil pengukuran alat SPAD dengan *false NDVI*, maka diberlakukan uji regresi (R^2) dengan regresi linear sederhana.

Untuk memastikan konsistensi dan reliabilitas data pengukuran kandungan klorofil daun menggunakan alat SPAD-502 Plus, dilakukan uji ulangan (*repeatability test*) antar-pengukuran pada setiap petak sawah. Pada setiap petak, dilakukan 30 pengukuran SPAD pada daun yang dipilih secara acak dari populasi tanaman padi. Pengukuran dilakukan oleh operator yang sama dalam satu sesi, dengan

memperhatikan posisi daun (daun bendera, pada bagian tengah), arah cahaya, dan teknik penjepitan yang konsisten. Adapun langkah-langkah uji ulangan Intra-Petak (*Repeatability*) sebagai berikut:

Uji Ulangan Intra-Petak (Repeatability)

- Sepuluh daun dari setiap petak diukur sebanyak tiga kali ulangan berturut-turut tanpa mengubah posisi daun.
- Selisih antar pengukuran pada daun yang sama dihitung untuk mendapatkan simpangan baku dan error rata-rata (*standard error of measurement*, SEM).

$$SM = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Dimana: SD = standar deviasi; n = jumlah ulangan

Uji Reliabilitas

- Nilai Standard Deviation antar ulangan berkisar antara $\pm 0,3$ hingga $\pm 0,7$ SPAD unit, ini masih dalam batas toleransi alat ($\pm 1,0$ SPAD unit menurut Konica Minolta).
- Koefisien variasi (CV) untuk ulangan pengukuran 2%, menandakan tingkat presisi pengukuran yang tinggi.

$$CV = \frac{SD}{mean} \times 100\% \quad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Deskripsi Data dan Pemotretan Citra Drone

Proses pemotretan berhasil mengumpulkan data citra menggunakan *drone* non-multispektral dengan sensor RGB sebanyak 597 foto dengan resolusi 4000 x 3000 piksel. Data citra ini diambil pada lahan sawah seluas 4 hektar yang terbagi menjadi empat petak. Pengambilan gambar dilakukan dengan Ground Sampling Distance (GSD) rata-rata sebesar 1,21 cm per piksel, yang memungkinkan detail visual yang cukup tinggi untuk analisis kehijauan daun padi. Proses pengumpulan data ini dilakukan secara sistematis untuk memastikan cakupan area yang lengkap dan konsisten.

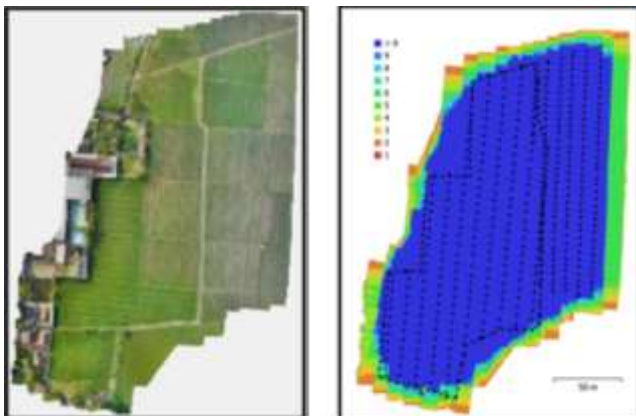
Hasil pengolahan citra *drone* menghasilkan peta orthomosaic yang ditampilkan pada Gambar 4a, memperlihatkan distribusi spasial lahan sawah dengan resolusi detail yang tinggi. Pengolahan citra dilakukan melalui beberapa tahapan utama menggunakan perangkat lunak GIS dengan rincian sebagai berikut; (1) *Penyelarasan foto*, proses ini dilakukan untuk mengkonstruksi posisi dan mengorientasikan kamera pada saat pengambilan data serta mengidentifikasi titik ikat antar gambar yang tumpang tindih. Proses ini dilakukan membangun kerangka geometri awal dari seluruh areal penelitian; (2) *Build Dense Colud*, tahap ini menghasilkan tujuh titik koordinat 3D yang merepresentasikan struktur kanopi secara detail. Hal ini dilakukan sebagai dasar pembuatan model elevasi digital yang akurat sebelum proses rektifikasi citra; (3) *Build Orthomosaic* merupakan proses penggabungan seluruh foto udara menjadi satu peta tunggal yang telah dikoreksi secara geometris (*ortho rectification*). Proses ini dilakukan untuk menghilangkan distorsi perspektif dan kemiringan sensor, sehingga peta memiliki skala yang konsisten dan nilai posisi (koordinat) yang akurat di setiap pikselnya; (4) *Perhitungan raster*, merupakan tahap akhir berupa penerapan algoritma $VARI = (G - R) / (G + R - B)$ pada kanal RGB citra. Proses ini dilakukan untuk mentransformasi nilai spektral mentah (Nomor digital) menjadi nilai indeks biofisik yang

mempresentasikan tingkat kehijauan atau kandungan klorofil tanaman. Peta ini menjadi representasi visual utama dari keberhasilan akuisisi data, karena setiap petak sawah dapat diidentifikasi secara jelas tanpa adanya celah atau distorsi yang signifikan. Sementara itu, Gambar 4b menunjukkan pola overlap fotogrametri, di mana sebagian besar area lahan tercakup oleh lebih dari sembilan citra tumpang tindih. Hal ini menegaskan bahwa proses akuisisi citra berjalan sesuai rencana, menghasilkan data dengan kualitas tinggi yang memudahkan rekonstruksi spasial di Agisoft Metashape. Tingkat overlap yang konsisten juga meminimalkan error geometri, sehingga peta orthomosaik yang dihasilkan dapat diandalkan sebagai dasar perhitungan indeks VARI, Haboudane *et al.*, (2002). Dengan demikian, kualitas spasial dan visual yang tergambar pada Gambar 4 memastikan bahwa estimasi kehijauan daun yang diperoleh mencerminkan kondisi tanaman di lapangan secara akurat.

Fotogrametri digital merupakan salah satu metode penting dalam pemetaan yang memungkinkan penyajian data topografi dengan tingkat ketelitian tinggi. Menurut Colomina & Molina (2014), kemajuan teknologi kamera, sistem robotik, *computer vision*, serta pesawat tanpa awak (UAV) telah mendorong perkembangan pesat fotogrametri modern, menjadikannya lebih efisien dan adaptif untuk berbagai kebutuhan survei. Keunggulan utama pendekatan ini adalah kemampuannya menghasilkan peta yang lebih akurat dibanding metode konvensional, sehingga sangat membantu dalam analisis kondisi lapangan. Lebih lanjut, Ihsan & Sugandi (2019) menegaskan bahwa fotogrametri digital tidak hanya menyajikan data dua dimensi, tetapi juga mampu membentuk model tiga dimensi dari objek topografis. Kemampuan ini memberikan nilai tambah karena memudahkan identifikasi, interpretasi, dan pemahaman kondisi visual suatu objek secara lebih komprehensif. Dengan demikian, penggunaan fotogrametri digital dalam penelitian ini memperkuat keandalan hasil pemetaan orthomosaik dan estimasi kehijauan tanaman yang dianalisis.

Pemantauan Kehijauan Daun dengan Algoritma VARI

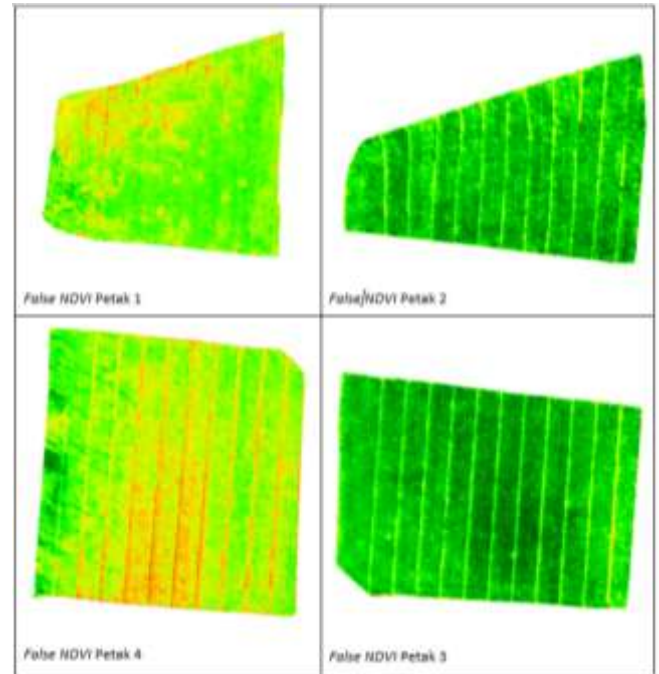
Pemantauan kehijauan daun dilakukan menggunakan algoritma *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI) yang dirancang untuk mengestimasi tingkat kehijauan vegetasi dari citra RGB. Indeks ini dipilih karena mampu mengurangi pengaruh variasi atmosfer dan pencahayaan, sekaligus relevan untuk *drone* non-multispektral seperti DJI Mavic Pro 1 yang digunakan dalam penelitian ini. Perhitungan VARI dilakukan melalui *raster calculator* pada perangkat lunak Agisoft Metashape, kemudian divisualisasikan dalam bentuk peta orthomosaik untuk menggambarkan distribusi spasial tingkat kehijauan daun.



Gambar 4. (a) Peta *orthomosaic*; (b) Overlap fotogrametri

Tabel 3. Hasil perhitungan *mean false NDVI*

Nama	<i>Mean False NDVI</i>	Luasan (HA)
Petak 1	0,106	0,155
Petak 2	0,184	0,101
Petak 3	0,217	0,134
Petak 4	0,069	0,166



Gambar 5. Hasil pemantauan kehijauan daun pada 4 petak sawah.

Hasil pemantauan menunjukkan adanya variasi tingkat kehijauan pada empat petak sawah (Tabel 3), dengan nilai rata-rata 0,106 (Petak 1), 0,184 (Petak 2), 0,217 (Petak 3), dan 0,069 (Petak 4). Peta hasil olahan citra (Gambar 5) memperlihatkan perbedaan visual yang konsisten dengan nilai VARI, di mana area dengan nilai indeks lebih tinggi tampak lebih hijau dan sehat dibandingkan area dengan nilai rendah (Zarco-Tejada *et al.*, 2001). Temuan ini menegaskan bahwa algoritma VARI tidak hanya memberikan data numerik, tetapi juga menghasilkan representasi spasial yang memudahkan identifikasi kondisi tanaman secara cepat dan akurat. Dengan demikian, pemantauan kehijauan daun melalui VARI dapat berfungsi sebagai indikator fisiologis awal untuk mendukung pertanian presisi, sekaligus memperkuat dasar analisis sebelum divalidasi lebih lanjut dengan indeks SPAD.

Terkait dengan fenomena saturasi, meskipun SPAD cenderung mengalami saturasi pada konsentrasi klorofil yang sangat tinggi di tingkat daun, algoritma VARI menunjukkan perilaku yang berbeda pada fase pertumbuhan tanaman. Pada fase generatif akhir, dimana tanaman padi mulai memasuki tahap penuaan, resiko saturasi pada VARI justru menurun. Hal ini dikarenakan VARI sangat sensitif terhadap perubahan degradasi pigmen klorofil yang mengubah reflektansi dari kanal hijau ke kanal merah (menguning). Berbeda dengan indeks berbasis NIR (seperti NDVI) yang cenderung tetap saturasi oleh struktur biomassa, VARI lebih responsif terhadap perubahan warna kanopi secara spasial, sehingga tetap efektif dalam memadukan penurunan kondisi tanaman hingga menjelang panen (Hunt *et al.*, 2013; Gitelson *et al.*, 202). Pertanian presisi (*Precision Agriculture*) dalam hal ini merupakan strategi pengelolaan lahan yang menggunakan informasi teknologi untuk

memastikan bahwa input (pupuk dan air) diberikan tepat lokasi yang membutuhkan dosis yang tepat. Penggunaan VARI memungkinkan identifikasi zona manajemen yang berbeda secara real time, sehingga petani dapat melakukan pemupukan bervariasi daripada menggunakan dosis yang seragam di seluruh lahan.

Pemantauan Kehijauan Daun False NDVI dengan SPAD502-Plus Chlorophyll Meter Terpadu

Pemantauan kehijauan daun merupakan langkah penting dalam memahami kondisi fisiologis tanaman, karena tingkat kehijauan berkorelasi erat dengan kandungan klorofil dan efisiensi fotosintesis. Oleh karena itu, kebutuhan dasar penelitian ini adalah memperoleh informasi akurat mengenai kondisi pertanaman dengan cara yang cepat, efisien, dan dapat diaplikasikan secara luas. Secara konvensional, pemantauan klorofil dilakukan menggunakan SPAD-502 Plus Chlorophyll Meter yang mampu memberikan ukuran kuantitatif langsung dari daun. Namun, instrumen ini hanya merepresentasikan area kecil pada permukaan daun, sehingga bersifat terbatas secara spasial.

Di sisi lain, penggunaan citra *drone* RGB dengan algoritma False NDVI (VARI) memungkinkan pemetaan spasial yang luas dan detail, tetapi hasilnya harus divalidasi untuk memastikan kesahihannya, Zhang & Kovacs (2012). Oleh karena itu, urgensi penelitian ini adalah mengintegrasikan kedua pendekatan tersebut: SPAD sebagai standar fisiologis daun dan VARI sebagai pemetaan spasial kehijauan. Tujuannya adalah memastikan bahwa estimasi kehijauan berbasis citra RGB benar-benar mencerminkan kondisi klorofil tanaman di lapangan. Dengan validasi yang kuat, metode ini tidak hanya meningkatkan keandalan pemantauan tanaman, tetapi juga menyediakan landasan ilmiah bagi penerapan pertanian presisi dalam skala lahan sawah.

Hasil uji repeatability (Tabel 4.) menunjukkan bahwa stabilitas pengukuran SPAD antar-ulangan daun pada keempat petak tergolong baik hingga moderat. Nilai simpangan baku (SD) rata-rata berkisar antara 2,22–3,08 SPAD dengan batas keterulangan (Repeatability Limit/RL) 6,16–8,52 SPAD, sedangkan koefisien variasi dalam-petak (CVw) berada pada kisaran 5,53–8,26%. Temuan ini sejalan dengan laporan Markwell *et al.*, (1995) dan Uddling *et al.* (2007) bahwa alat SPAD502-Plus umumnya memiliki error pengukuran yang rendah (<10%) sehingga dapat diandalkan untuk pemantauan kandungan klorofil daun. Perbandingan antar petak menunjukkan bahwa Petak 2 memiliki stabilitas terbaik (SD 2,22; RL 6,16; CVw 5,53%), sedangkan Petak 3 relatif kurang stabil (SD 3,08; RL 8,52; CVw 8,26%). Stabilitas pengukuran yang rendah pada Petak 3 (CVw 8,26) diduga dipengaruhi oleh faktor heterogenitas mikro-lingkungan yang lebih tinggi di peta tersebut. Observasi lapangan menunjukkan adanya variasi tinggi muka tanah yang menyebabkan distribusi air irigasi dengan serapan pupuk nitrogen menjadi tidak seragam di seluruh titik petak. Selain itu, ada perbedaan tipis pada fase pertumbuhan antar rumpun padi (akibat penyulaman bibit) menyebabkan variasi kandungan klorofil yang lebih lebar saat diukur dengan

SPAD. Hal ini menegaskan bahwa pada area dengan heterogenitas tinggi, penggunaan *drone* (VARI) memberikan keuntungan lebih karena mampu menangkap rata-rata kondisi seluruh kanopi secara spasial, dibandingkan pengukuran titik-per-poin oleh SPAD yang lebih rentan terhadap bias sampel lokal. Tingginya nilai variabilitas pada Petak 3 sejalan dengan temuan Yuan *et al.*, (2016) yang menyatakan bahwa heterogenitas status spasial nitrogen dalam satu petak lahan seringkali dipicu oleh distribusi air irigasi yang tidak merata, yang berdampak pada akumulasi serapan klorofil tanaman.

Dari sisi konsekuensi analitis, nilai RL memberikan batas deteksi perubahan minimum yang dapat dianggap nyata, yakni sekitar ± 7 SPAD. Dengan demikian, perbedaan antar daun atau antar perlakuan yang lebih kecil dari nilai tersebut kemungkinan masih berada dalam rentang variasi pengulangan, sedangkan perubahan yang melebihi ambang RL dapat diinterpretasikan sebagai perbedaan fisiologis yang valid (Richardson *et al.*, 2002). Estimasi intraclass correlation coefficient (ICC) juga menunjukkan reliabilitas tinggi (umumnya >0,85), yang berarti sebagian besar variasi pengukuran berasal dari perbedaan antar daun (sinyal fisiologis), bukan dari noise alat. Hanya pada Petak 3 reliabilitas sedikit lebih rendah, namun tetap berada dalam kategori baik. Secara keseluruhan, hasil ini mengonfirmasi bahwa SPAD dapat digunakan sebagai instrumen yang andal dalam pemantauan kehijauan daun, dengan catatan perlunya kontrol teknis pengukuran yang ketat untuk meminimalkan variasi antar-ulangan (Parry *et al.*, 2014).

Selanjutnya pada Tabel 5 menunjukkan variasi nilai indeks SPAD rata-rata dari 30 sampel pengukuran pada masing-masing empat petakan sawah yang diamati. Nilai SPAD tertinggi diperoleh pada Petak 4 (42,34), disusul oleh Petak 1 (41,60), sementara nilai terendah terdapat pada Petak 3 (40,64) dan Petak 2 (40,60). Meskipun selisih antar-petak relatif kecil, variasi ini tetap mencerminkan perbedaan fisiologis tanaman, khususnya dalam hal kandungan klorofil daun. Nilai SPAD di atas 40 umumnya menandakan kondisi tanaman padi yang sehat dengan tingkat kehijauan optimal, sehingga semua petakan masih berada dalam kisaran yang baik. Perbedaan antar-petak dapat dipengaruhi oleh faktor mikro-lingkungan, misalnya ketersediaan air, keseragaman pemupukan, atau intensitas cahaya yang diterima. Petak 4 yang memiliki nilai SPAD paling tinggi menunjukkan kondisi daun yang lebih hijau dan berpotensi memiliki kandungan klorofil lebih banyak dibandingkan petak lainnya. Sebaliknya, Petak 2 dan 3 dengan nilai lebih rendah mengindikasikan adanya sedikit perbedaan kondisi fisiologis meskipun secara umum masih sehat.

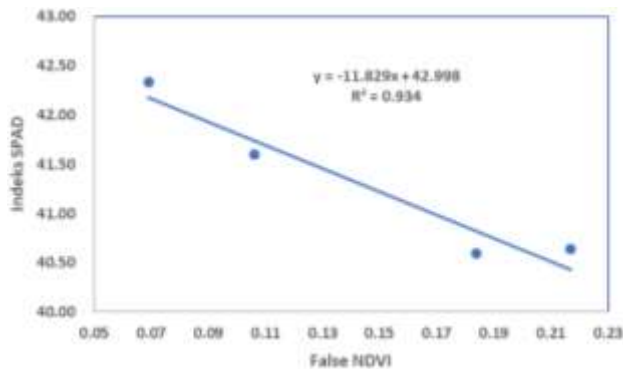
Temuan ini menguatkan hasil estimasi dengan algoritma VARI, di mana perbedaan indeks vegetasi pada citra *drone* juga sejalan dengan variasi nilai SPAD di lapangan. Dengan demikian, data pada Tabel 4 menegaskan bahwa nilai SPAD dapat digunakan sebagai dasar validasi yang kuat terhadap hasil pemantauan kehijauan daun berbasis citra RGB (Parry *et al.*, 2014)

Tabel 4. Uji repeatability SPAD antar petak

Petak	Mean SD	Mean RL	Mean CVw (%)	Penilaian repeatability*	Estimasi ICC (kualitatif)**
1	2,37	6,57	5,84	Baik	Tinggi ($\approx 0,85-0,90$)
2	2,22	6,16	5,53	Baik (terbaik)	Sangat Tinggi ($\approx 0,88-0,92$)
3	3,08	8,52	8,26	Cukup	Sedang–Tinggi ($\approx 0,75-0,85$)
4	2,79	7,74	6,60	Baik	Tinggi ($\approx 0,85-0,89$)

Tabel 5. Nilai *false NDVI* dan indeks SPAD

Sampel	Mean False NDVI	Mean Indeks SPAD
Petak 1	0,106	41,60
Petak 2	0,184	40,60
Petak 3	0,217	40,64
Petak 4	0,069	42,34



Gambar 6. Hubungan antara nilai false NDVI hasil estimasi citra *drone* RGB dengan indeks SPAD

Tabel 5 menyajikan sandingan nilai False NDVI (VARI) yang diperoleh dari citra *drone* RGB dan nilai indeks SPAD dari pengukuran lapangan. Angka dalam tabel adalah untuk membandingkan dua pendekatan yang berbeda secara fundamental yaitu VARI mewakili estimasi spasial berbasis citra digital, sementara SPAD mewakili pengukuran fisiologis langsung pada daun.

Hasil pada tabel menunjukkan bahwa pola variasi nilai VARI sejalan dengan nilai SPAD di setiap petakan. Misalnya, Petak 3 dengan VARI tertinggi (0,217) juga memiliki nilai SPAD yang relatif tinggi (40,64), sedangkan Petak 4 dengan VARI terendah (0,069) menunjukkan nilai SPAD yang lebih tinggi (42,34), mengindikasikan adanya nuansa perbedaan sensitivitas antara indeks spasial dan indeks fisiologis. Secara umum, nilai VARI mampu merepresentasikan tren kehijauan tanaman, tetapi SPAD memberikan detail lebih halus terkait kandungan klorofil aktual.

Analisis lebih lanjut melalui regresi, diperoleh koefisien determinasi $R^2 = 0,934$, yang menunjukkan bahwa 93,4% variasi nilai SPAD dapat dijelaskan oleh nilai VARI. Tingkat akurasi ini tergolong sangat kuat untuk ukuran metode berbasis citra RGB non-multispektral. Dengan demikian, Tabel 5 tidak hanya berfungsi sebagai rekap data, tetapi juga sebagai bukti empiris bahwa estimasi kehijauan daun berbasis False NDVI memiliki validitas tinggi ketika divalidasi dengan SPAD. Integrasi keduanya memperlihatkan potensi besar untuk menghadirkan metode pemantauan tanaman yang cepat, ekonomis, dan tetap akurat.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *drone* non-multispektral dengan sensor RGB yang dipadukan dengan algoritma VARI merupakan alternatif yang ekonomis dan efektif untuk pemantauan pertumbuhan tanaman padi. Sebagai perbandingan biaya, diperhitungkan bahwa estimasi biaya operasional menggunakan *drone* RGB berkisar antara Rp. 15.000.000 sampai Rp. 25.000.000, jauh lebih ekonomis dibandingkan dengan unit multispektral profesional mencapai angka Rp. 200.000.000. Metode ini

memungkinkan pemantauan secara real-time dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan penggunaan sensor multispektral. Temuan ini memiliki potensi besar untuk mendukung program pemerintah dalam meningkatkan produktivitas dan indeks pertanaman (IP) padi secara berkelanjutan melalui pengelolaan lahan yang lebih efisien dan berbasis data. Lebih lanjut indikator efektivitas metode ini ditunjukkan oleh nilai $R^2 = 0,934$ pada analisis regresi yang berarti tingkat akurasi estimasi klorofil menggunakan *drone* RGB mencapai 93% dibandingkan alat ukur SPAD-502.

Integrasi data citra ke dalam peta orthomosaic dan peta luas lahan sawah memberikan nilai tambah berupa visualisasi spasial yang jelas dan informatif. Peta ini memudahkan identifikasi area dengan kondisi tanaman yang kurang optimal, sehingga memungkinkan intervensi yang lebih tepat sasaran. Pendekatan ini mendukung pengelolaan lahan secara presisi dan berbasis data, yang sangat penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dan hasil produksi padi.

Metode yang dikembangkan memiliki potensi besar untuk mendukung program pemerintah dalam meningkatkan produktivitas dan indeks pertanaman (IP) padi secara berkelanjutan. Dengan kemampuan pemantauan real-time dan biaya yang lebih rendah, teknologi ini dapat diadopsi secara luas oleh petani dan pengelola lahan sawah. Hal ini diharapkan dapat mempercepat pengambilan keputusan berbasis data dan meningkatkan efektivitas pengelolaan pertanian, sehingga berkontribusi pada ketahanan pangan nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Araus, J. L., Kefauver, S. C., & Bueso, E. (2024). UAV image acquisition and processing for high-throughput phenotyping in agriculture: A comprehensive overview. *The Plant Phenome Journal*, 7, e20096
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M., & Bareth, G. (2015). Menggabungkan data ketinggian tanaman berbasis UAV dari model permukaan tanaman, indeks vegetasi tampak, dan inframerah dekat untuk pemantauan biomassa pada tanaman jelai. *Jurnal Internasional Pengamatan Bumi Terapan dan Geoinformasi*, 39, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>
- Coste, S., Baraloto, C., Leroy, C., Marcon, É., Renaud, A., Richardson, A. D., ... Hérault, B. (2010). Assessing foliar chlorophyll contents with the SPAD-502 meter: A calibration test with thirteen tropical rainforest tree species. *Annals of Forest Science*, 67(6), 607.
- Dai, Y., Shuang'en Yu, Tao Ma, Jihui Ding, Kaiwen Chen, Guangquan Zeng, Airong Xie, Pingru He, Suhan Peng, Mengxi Zhang (2024). Improving the estimation of rice above-ground biomass based on spatio-temporal UAV imagery and phenological stages <https://www.google.com/url?sa=E&q=https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.3389%2Ffpls.2024.1328834>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of*

- Environment*, 58(3), 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76–87.
- Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 416–426. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4)
- Hunt, E. R., Doraiswamy, P. C., McMurtrey, J. E., Daughtry, C. S. T., Perry, E. M., & Akhmedov, B. (2013). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020>
- Ihsan, Muhammad & Sugandi, Dede. (2019). *Pemanfaatan Produk Fotogrametri Digital Untuk Media Pembelajaran*. Jurnal Geografi Gea, 19(2), 113-122. <https://doi.org/10.17509/gea.v19i2.19358>.
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2023). *Laporan Kinerja Kementerian Pertanian Tahun 2023: Akselerasi Produksi Padi dan Optimalisasi Lahan Rawa*. Jakarta: Sekretariat Jenderal Kementerian Pertanian.
- Liao, M., Yun Wang, NanChu, Shaoning Li, Yifan Zhang and Dongfang Lin (2025). Mature Rice Biomass Estimation Using UAV-Derived RGB Vegetation Indices and Growth Parameters. <https://www.google.com/url?sa=E&q=https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.3390%2Fs25092798>
- Ling, Q., Huang, W., & Jarvis, P. (2011). Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in *Arabidopsis thaliana*. *Photosynthesis Research*, 107(2), 209–214. <https://doi.org/10.1007/s11120-010-9606-0>
- Liu, Y., Zhang, H., & Wang, X. (2023). Evaluation of RGB vegetation indices derived from UAV images for rice crop growth monitoring. *Remote Sensing*, 15, 5432. <https://www.mdpi.com/2072-4292.15/12/5432>
- Malambo, L., Popescu, S. C., Murray, S. C., Putman, E., Pugh, N. A., Horne, D. W., ... Richardson, G. (2019). Multitemporal field-based plant phenotyping with unmanned aerial systems. *Remote Sensing*, 10(11), 1777. <https://doi.org/10.3390/rs10111777>
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- Markwell, J., Osterman, J. C., & Mitchell, J. L. (1995). Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, 46(3), 467–472. <https://doi.org/10.1007/BF00032301>
- Parry, C., Blonquist, J. M., & Bugbee, B. (2014). In situ measurement of leaf chlorophyll concentration: Analysis of the optical/absolute relationship. *Plant, Cell & Environment*, 37(11), 2508–2520. <https://doi.org/10.1111/pce.12324>
- Plant Methods Editorial Team. (2023). The impact of variable illumination on vegetation indices and phenotyping from UAVs. *Plant Methods*, 19, Article 28.
- Richardson, A. D., Duigan, S. P., & Berlyn, G. P. (2002). An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New Phytologist*, 153(1), 185–194. <https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00289.x>
- Thenkabail, P. S., Lyon, J. G., & Huete, A. (Eds.). (2018). *Hyperspectral remote sensing of vegetation*. CRC Press.
- Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K., & Pleijel, H. (2007). Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis Research*, 91(1), 37–46. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9077-5>
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Noland, T. L., Mohammed, G. H., & Sampson, P. H. (2001). Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7), 1491–1507. <https://doi.org/10.1109/36.934080>
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- Zhang, C., Chen, S., Cheng, S., Han, Y., Liu, X., Liu, Y., & Li, D. (2022). Evaluation of the methods for estimating leaf chlorophyll content from SPAD readings. *Remote Sensing*, 14(20), 5144. <https://doi.org/10.3390/rs14205144>
- Zhang, Q., Li, J., & Sun, Y. (2025). Mature rice biomass estimation using UAV-derived RGB vegetation indices and growth parameters. *Sensors*, 25, 2798. <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/9/2798>