

Pemetaan Fenologi Padi (*Oryza sativa*) Pada Skala Petak di Subak Dlod Sema Menggunakan Citra Satelit PlanetScope SuperDove

Phenology Mapping of Rice (Oryza sativa) at Plot Scale in Subak Dlod Sema Using PlanetScope SuperDove Satellite Imagery

Ayi Priana^{1,3*}, I Gede Artha Sudewa Wijaya², Ardita Melani Putri¹, Felya Wulandari¹, Elsa Sinarwati¹, Nadya Dewi Safitri¹, Dumaris Priskila Purba⁴, Zulfajri⁵, Benyamin Yosafat Manurung⁶

¹ Ilmu Tanah dan Lingkungan, Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Udayana

² Program Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Udayana

³ Pusat Pengembangan Infrastruktur Informasi Geospasial (PPIIG), Universitas Udayana

⁴ Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman

⁵ Jurusan Pendidikan Geografi, Fakultas Ilmu Sosial, Universitas Negeri Medan

⁶ Dinas Pertanian dan Ketahanan Pangan Provinsi Bali, Bali

*email korespondensi: ayi.priana@unud.ac.id

Info Artikel

Diajukan: 3 Mei 2026
 Diterima: 10 Mei 2026
 Diterbitkan: 31 Mei 2026

Abstract

Monitoring rice growth stages in areas with small and irregular plots, such as the Subak system in Bali, requires remote sensing data with high spatial and temporal resolution. This study aims to analyze the spatial and temporal variations of rice phenology stages in Subak Dlod Sema using 3-meter resolution PlanetScope SuperDove imagery. The method involved multitemporal extraction of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to identify vegetative, generative, and ripening stages. Validation was conducted through field observations at 21 sample points for each growth stage. The results indicate that the NDVI temporal profile successfully depicts rice growth dynamics in detail, with a peak average value of 0.74 during the generative phase. Accuracy assessment showed robust results with an Overall Accuracy of 88.9%, a Kappa coefficient of 0.83, and a temporal Root Mean Square Error (RMSE) of 4.0 days during the ripening stage. Despite a slight overestimation in the generative phase due to canopy saturation, the use of PlanetScope proved highly effective in mitigating mixed-pixel issues at the individual plot scale. These findings underscore the potential of high-resolution satellites in supporting precision agriculture and planting pattern management within the Subak organization.

Keywords: Rice Phenology; PlanetScope SuperDove; NDVI; Subak Dlod Sema; Remote Sensing

Abstrak

Monitoring fase pertumbuhan padi pada wilayah dengan petak sawah yang kecil dan tidak beraturan seperti sistem Subak di Bali memerlukan data penginderaan jauh dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variasi spasial dan temporal fase fenologi padi di Subak Dlod Sema menggunakan citra PlanetScope SuperDove resolusi 3 meter. Metode yang digunakan adalah ekstraksi nilai *Normalized*

Difference Vegetation Index (NDVI) secara multitemporal untuk mengidentifikasi fase vegetatif, generatif, dan pematangan. Validasi dilakukan melalui observasi lapangan pada 21 titik sampel di setiap fase pertumbuhan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa profil temporal NDVI mampu menggambarkan dinamika pertumbuhan padi secara detail dengan puncak nilai rata-rata 0,74 pada fase generatif. Uji akurasi menunjukkan hasil yang sangat kuat dengan *Overall Accuracy* sebesar 88,9%, koefisien Kappa 0,83, dan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) temporal sebesar 4,0 hari pada fase pematangan. Meskipun terjadi sedikit *over-estimate* pada fase generatif akibat saturasi kanopi, penggunaan PlanetScope terbukti sangat efektif dalam memitigasi kendala piksel campuran pada skala petak individu. Temuan ini menegaskan potensi satelit resolusi tinggi dalam mendukung sistem pertanian presisi dan manajemen pola tanam di organisasi Subak.

Kata Kunci:

Fenologi Padi; Planet Scope SuperDove; NDVI; Subak Dlod Sema; Penginderaan Jauh

PENDAHULUAN

Padi (*Oryza sativa*) merupakan komoditas pangan strategis yang krusial bagi ketahanan pangan nasional di Indonesia. Sektor pertanian lahan basah adalah pilar utama ketahanan pangan sekaligus warisan budaya di Bali yang direpresentasikan melalui organisasi Subak. Subak Dlod Sema, sebagai bagian dari bentang alam agraris di Bali, memiliki peran strategis dalam memproduksi padi secara berkelanjutan. Namun, tantangan manajemen pertanian saat ini memerlukan pemantauan yang lebih presisi untuk memahami dinamika pertumbuhan tanaman di setiap petak sawah. Menurut Zheng *et al.* (2016), pemantauan fenologi tanaman sangat penting untuk klasifikasi vegetasi, estimasi hasil panen, serta pengelolaan irigasi dan pemupukan. Akurasi dalam menentukan fase fenologi padi mulai dari vegetatif, generatif, hingga pematangan menjadi kunci utama bagi petani (Nordström & Glass, 2002) dan pengelola subak untuk mengoptimalkan jadwal pemupukan, pengaturan air irigasi, serta estimasi waktu panen yang akurat (Zheng *et al.*, 2016). Pemahaman transisi fase fenologi sangat menentukan keberhasilan strategi adaptasi pertanian dalam menghadapi ketidakpastian iklim global.

Metode konvensional dalam memantau pertumbuhan padi melalui observasi visual lapangan masih banyak digunakan, namun memiliki berbagai keterbatasan seperti membutuhkan biaya dan tenaga yang besar, tidak bersifat *real-time*, serta kurang efisien dalam menangkap dinamika spasial-temporal pada area yang luas (Ramadhani *et al.*, 2020; Rudiyanto *et al.*, 2019). Teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) dipandang sebagai solusi alternatif yang mampu menyajikan data secara temporal dan spasial. Penginderaan jauh adalah upaya untuk memperoleh informasi tentang objek atau daerah melalui analisis data yang dikumpulkan oleh instrumen sensor yang tidak melakukan kontak fisik dengan objek tersebut, dengan cara merekam energi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan (Jensen, 2015). Meskipun citra satelit resolusi menengah seperti Sentinel-2 atau Landsat sering digunakan, kedua satelit tersebut memiliki keterbatasan dalam memetakan area subak yang memiliki petak sawah berukuran kecil dan tidak beraturan. Adanya piksel campuran (*mixed pixels*) pada resolusi 10-30 meter seringkali menyebabkan distorsi data pada batas pematang (Danoedoro, 2012; Priana *et al.*, 2023). Oleh

karena itu, penggunaan citra PlanetScope SuperDove dengan resolusi spasial 3 meter dan resolusi temporal harian menjadi sangat penting dalam pemantauan dilakukan pada level petak individu (*per-plot level*) dengan tingkat detail yang lebih tinggi. Keunggulan citra satelit resolusi tinggi dalam memantau dinamika pertanian telah banyak dibuktikan dalam berbagai penelitian, seperti yang dilakukan oleh Battude *et al.* (2016), mengatakan bahwa ketersediaan data temporal yang rapat sangat krusial untuk menangkap transisi fenologi padi yang berlangsung cepat. Sejalan dengan hal tersebut, penelitian Hegde *et al.* (2025), menunjukkan bahwa integrasi indeks vegetasi seperti NDVI mampu memberikan estimasi waktu panen dengan tingkat akurasi yang tinggi pada skala regional. Penggunaan citra PlanetScope memberikan keunggulan signifikan dalam memetakan area pertanian heterogen dibandingkan dengan sensor citra Sentinel-2.

Penelitian ini fokus pada analisis variasi spasial dan temporal fase pertumbuhan padi di Subak Dlod Sema menggunakan seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dari PlanetScope. Penggunaan indeks vegetasi seperti NDVI telah terbukti efektif dalam mengekstraksi informasi kesehatan dan fase pertumbuhan tanaman berdasarkan karakteristik pantulan spektral kanopi padi (You *et al.*, 2013). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan citra PlanetScope SuperDove dalam mendukung penerapan sistem pertanian presisi, khususnya dalam pemantauan dinamika pertumbuhan tanaman secara spasial dan temporal. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu Penginderaan Jauh melalui pemanfaatan data citra dalam analisis pertanian berbasis teknologi. Lebih lanjut, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan evaluasi dan pertimbangan bagi Subak dalam menjaga sinkronisasi pola tanam serta meningkatkan produktivitas lahan secara berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan di Subak Dlod Sema, Kecamatan Mengwi, Kabupaten Badung, Provinsi Bali. Kegiatan Penelitian dilaksanakan pada bulan Agustus – Desember 2025. Subak Dlod Sema merupakan kawasan pertanian yang masih memegang teguh prinsip manajemen irigasi tradisional berbasis kearifan lokal di mana saat ini menerapkan kebijakan tanam serempak (*simultaneous planting*). Kebijakan ini bertujuan untuk memutus siklus hidup hama (terutama wereng dan tikus) serta memudahkan pengaturan distribusi air irigasi. Dengan pola tanam serempak, secara teoritis kurva *time-series* NDVI pada seluruh petak sawah di wilayah ini akan memiliki bentuk (morfologi) yang seragam mulai dari titik terendah saat pengolahan lahan hingga mencapai puncak (*peak*) secara bersamaan.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu: GPS, Kamera, Laptop, *software open source* QGIS 3.40, dan Microsoft Office. Bahan penelitian yang digunakan yaitu: Citra PlanetScope SuperDove *level 3B surface reflectance* (SR) selama satu musim tanam.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan mengintegrasikan data penginderaan jauh dan observasi lapangan. Secara garis besar, alur penelitian dapat dibagi menjadi beberapa tahap:

1. Akuisisi Data Citra

Data utama citra PlanetScope SuperDove resolusi 3 meter dengan koreksi atmosfer (*surface reflectance*). Rentang waktu citra mencakup diambil selama satu musim tanam (4 bulan). Produk Level 3B telah dikonversi dari nilai mentah (*Digital Number*) menjadi nilai reflektansi permukaan (*bottom of atmosphere/BOA*).

2. Survei Lapangan

Survei lapangan dilakukan untuk memvalidasi fase pertumbuhan yang terdeteksi oleh satelit. Tahapan survei meliputi: (1) penentuan sampel petak: pemilihan beberapa petak sawah representatif di Subak Dlod Sema menggunakan teknik *purposive sampling* yang berjumlah 21 titik (petak sawah); (2) pengambilan titik koordinat: menandai posisi petak sampel menggunakan GPS *Handheld* untuk memastikan overlay yang akurat dengan piksel citra; (3) *monitoring* fase pertumbuhan: observasi visual secara berkala untuk mencatat tanggal pasti fase-fase kritis, yaitu fase awal, fase vegetatif, fase generatif, dan fase pemasakan; dan (4) dokumentasi pengambilan foto *ground-level* sebagai bukti fisik kondisi kanopi tanaman padi pada tiap fase. Survei lapangan dilakukan untuk memverifikasi penerapan sistem tanam serempak di Subak Dlod Sema. Data ini digunakan sebagai baseline untuk memvalidasi fluktuasi nilai NDVI yang terekam pada citra PlanetScope yang mencerminkan keseragaman fase pertumbuhan di seluruh area studi untuk menunjukkan adanya variasi spasial akibat faktor biofisik tanaman.

3. Pra-Pengolahan dan Ekstraksi Data

Tahapan ini melakukan pemotongan citra (*clipping*) sesuai batas area Subak Dlod Sema menggunakan *software* QGIS 3.40. Citra PlanetScope SuperDove dengan level 3B *Surface Reflectance* tidak dilakukan koreksi radiometrik (Planet Labs PBC, 2025). Produk ini telah melalui pemrosesan otomatis dari pihak Planet Labs untuk menghasilkan data citra yang siap dianalisis. Perhitungan indeks NDVI untuk setiap tanggal akuisisi citra. Ekstraksi nilai piksel dari petak-petak sampel yang telah ditentukan saat survei lapangan. Citra PlanetScope sudah diortorektifikasi dan diproyeksikan ke sistem koordinat UTM. PlanetScope berasal dari konstelasi ratusan satelit kecil (*Doves*), Planet Labs melakukan normalisasi agar dari satelit yang berbeda memiliki nilai spektral yang konsisten satu sama lain.

4. Analisis *Time-Series*

Membandingkan kurva NDVI hasil pengolahan citra dengan data kalender tanam hasil survei lapangan untuk melihat tingkat akurasi deteksi fenologi padi. Penggunaan citra PlanetScope di lokasi ini menjadi sangat relevan untuk memantau petak yang mengalami keterlambatan pertumbuhan, serangan hama, atau gangguan irigasi meskipun telah direncanakan tanam serempak. Resolusi 3 meter memungkinkan untuk melihat variasi antar petak yang tidak bisa ditangkap oleh satelit resolusi rendah.

5. Indeks Vegetasi NDVI

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) adalah parameter utama dalam penelitian ini untuk mengukur tingkat kehijauan tanaman. NDVI memanfaatkan karakteristik daun tanaman yang menyerap cahaya merah (*red*) untuk fotosintesis dan memantulkan kuat cahaya inframerah dekat (*Near-infrared*). Dalam penelitian fenologi tanaman padi, persamaan NDVI yang digunakan adalah (Rivera-Solís et al., 2025):

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (1)$$

Di mana:

NIR : saluran inframerah dekat pada band 8 citra PlanetScope

Red : saluran merah pada band 6 citra PlanetScope

Klasifikasi fase fenologi dilakukan dengan metode *thresholding* pada nilai NDVI hasil ekstraksi citra PlanetScope. Penentuan ambang batas fase pertumbuhan dibagi menjadi empat tahap utama: (1) Tahap Bero/Persiapan Lahan (NDVI < 0,20), (2) Tahap Vegetatif (0,21 – 0,75), (3) Tahap Generatif (0,76 – 0,90), dan (4) Tahap Pemasakan (0,75 – 0,40).

6. Uji Akurasi dan Validasi Data

Validasi hasil pemetaan fenologi pada skala petak dilakukan melalui pendekatan statistik untuk mengukur tingkat presisi temporal dan akurasi spasial. Akurasi estimasi waktu transisi fase fenologi diuji menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengetahui deviasi rata-rata antara tanggal kejadian fase hasil ekstraksi citra PlanetScope dengan data observasi lapangan. Selanjutnya, performa klasifikasi fase pertumbuhan dievaluasi menggunakan matriks kontingensi (*confusion matrix*) untuk menghasilkan *Overall Accuracy* (OA), *Producer's Accuracy* (PA), dan *User's Accuracy* (UA). Untuk memastikan bahwa hasil pemetaan bukan merupakan faktor kebetulan, dilakukan perhitungan *Koefisien Kappa* (κ). Secara matematis, parameter uji akurasi tersebut dirumuskan sebagai berikut:

- a. *Root Mean Square Error* (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

Di mana P_i adalah tanggal prediksi fase dari citra, O_i adalah tanggal observasi lapangan dan n adalah jumlah sampel petak.

- b. *Overall Accuracy* (OA)

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{N} \times 100\% \quad (3)$$

Di mana n_{ii} merupakan jumlah sampel yang terklasifikasi dengan benar pada diagonal matriks, dan N adalah total keseluruhan sampel.

- c. *Koefisien Kappa* (κ)

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k (n_{i+} \times n_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (n_{i+} \times n_{+i})} \quad (4)$$

Di mana n_{i+} dan n_{+i} berturut-turut adalah marginal baris dan kolom pada matriks kesalahan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Profil Temporal NDVI Tanaman Padi

Grafik pada Gambar 1, menyajikan nilai rata-rata NDVI yang diekstraksi dari seluruh petak sawah di Subak Dlod Sema. Grafik *time series* NDVI menunjukkan fluktuasi nilai yang selaras dengan siklus hidup tanaman padi selama satu periode tanam. Berdasarkan data citra PlanetScope SuperDove, profil temporal ini terbagi menjadi tiga fase utama yang mencerminkan perubahan biofisik tanaman di lapangan:

1. Fase Vegetatif

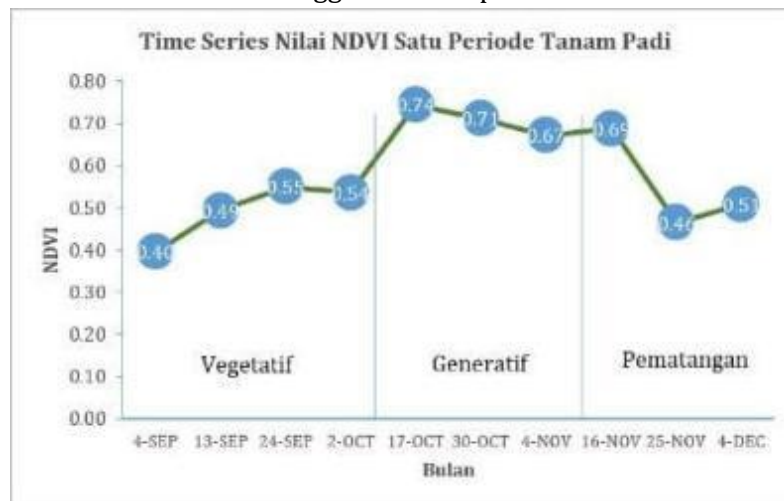
Pada awal pengamatan tanggal 4 September 2025, nilai NDVI dimulai dari 0,40. nilai ini mengindikasikan kondisi lahan yang baru beralih dari fase tanam di mana pantulan tanah dan air masih cukup dominan. Terjadi peningkatan progresif hingga mencapai 0,54 – 0,55 pada akhir September. Peningkatan ini linier dengan penambahan jumlah anakan, tinggi tanaman, dan perluasan kanopi (tajuk) padi yang mulai menutupi permukaan tanah.

2. Fase Generatif

Puncak indeks vegetasi (*maximum greenness*) tercatat pada tanggal 17 Oktober dengan nilai NDVI 0,74. Titik ini merupakan fase kritis (fase generatif/bunting) di mana kandungan klorofil berada pada level tertinggi sebelum tanaman memasuki masa pengisian bulir. Penurunan tipis menjadi 0,67 di awal November menunjukkan tanaman mulai mengalihkan energinya dari pertumbuhan vegetatif ke pematangan buah (gabah).

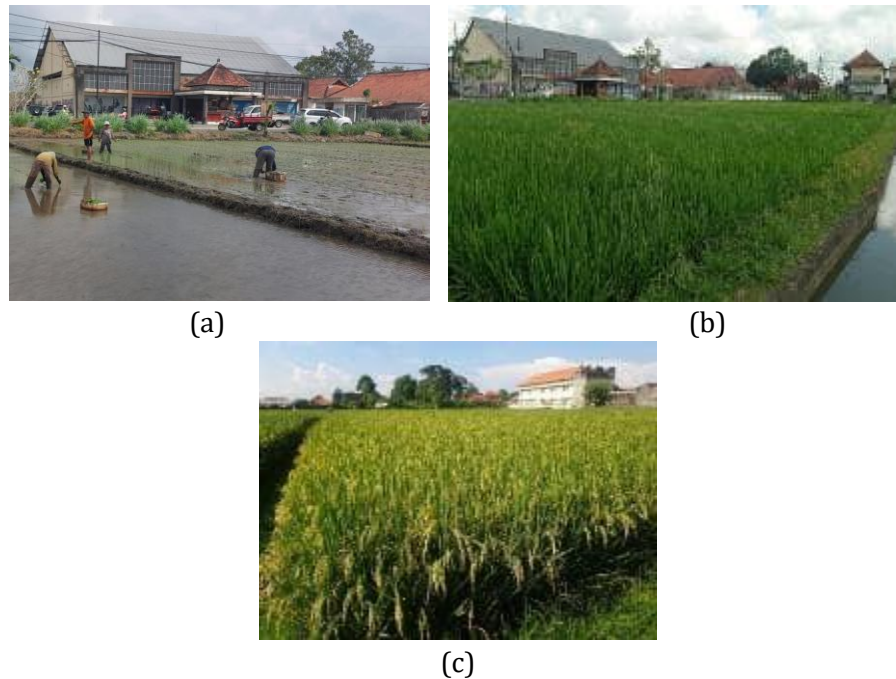
3. Fase Pematangan

Memasuki pertengahan November, terjadi penurunan nilai NDVI yang signifikan hingga menyentuh angka 0,46 pada 25 November 2025. Fenomena ini secara fisiologis menandakan proses senescence atau penuaan, di mana kadar air dan klorofil pada daun menurun seiring dengan menguningnya gabah. Fluktuasi kecil pada 4 Desember (0,51) kemungkinan dipengaruhi oleh munculnya vegetasi sekunder (gulma) atau sisa jerami basah pasca-panen yang terekam oleh sensor resolusi tinggi PlanetScope.



Gambar 1. Time Series Fase Fenologi dan Nilai NDVI

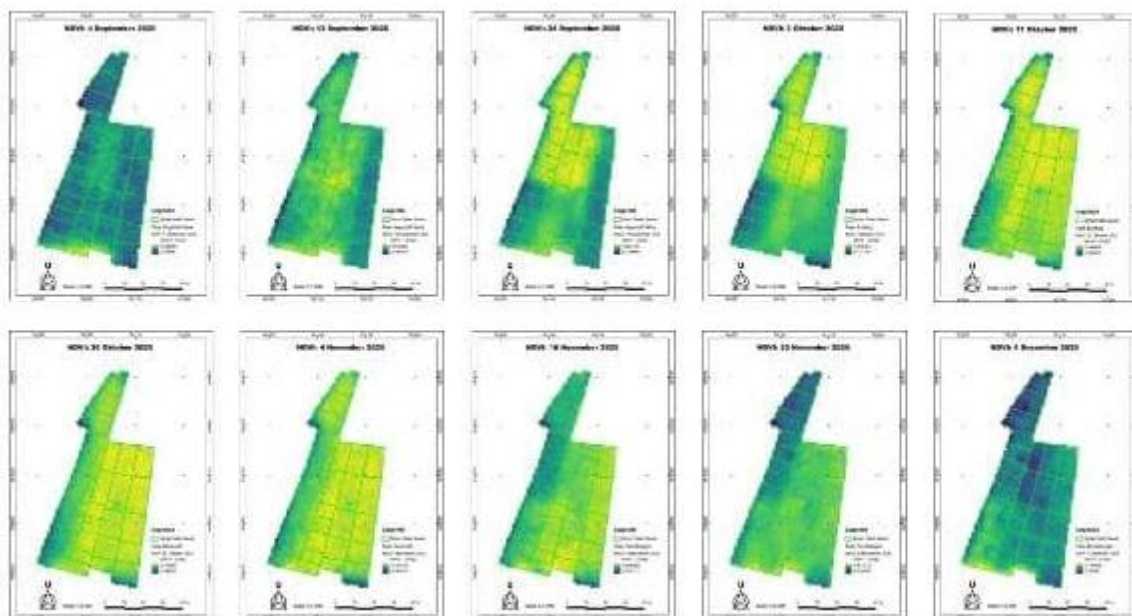
Nilai puncak NDVI hanya mencapai 0,74, hal ini dipengaruhi varietas lokal dan faktor efisiensi pemupukan. Beberapa literatur padi dengan input pupuk optimal bisa mencapai >0,80. Keunggulan PlanetScope yang memantau secara harian (*near-daily revisit time*), sehingga perubahan fase yang cepat (transisi ke generatif) dapat terdokumentasi dengan detail tanpa banyak data yang hilang (*missing data*). Profil NDVI yang mulus menunjukkan bahwa petani di Subak Dlod Sema memiliki kepatuhan yang tinggi terhadap jadwal tanam serempak. Jika waktu tanam antar petak sangat berbeda jauh, grafik rata-ratanya biasanya akan terlihat datar serta tidak memiliki puncak. Sensor citra PlanetScope SuperDove mampu menangkap variasi mikro di setiap petak, namun tetap konsisten ketika digabungkan secara makro untuk melihat performa produksi satu subak.



Gambar 2. Fase Fenologi Tanaman Padi (a) 0 HST, (b) 40 HST, dan (c) 85 HST

Variasi Spasial Fase Pertumbuhan Antar Petak

Hasil analisis spasial menggunakan citra multitemporal PlanetScope SuperDove menemukan adanya heterogenitas pertumbuhan padi antar petak di Subak Dlod Sema. Meskipun secara umum mengikuti kurva pertumbuhan yang seragam, terdapat variasi waktu transisi fase yang dapat diidentifikasi melalui perubahan gradasi warna pada peta NDVI (Gambar 3).



Gambar 3. Spatiotemporal Citra PlanetScope SuperDove Satu Periode Tanam Padi

1. Distribusi Spasial Fase Vegetatif (4 September – 2 Oktober)
 Pada awal September, peta menunjukkan dominasi warna hijau tua kebiruan (NDVI rendah) yang merata, menandakan fase awal tanam. Namun, memasuki 24 September hingga 2 Oktober, mulai terlihat variasi spasial yang jelas. Petak di bagian tengah dan utara cenderung menunjukkan peningkatan nilai NDVI lebih cepat (warna hijau muda/kuning) dibandingkan petak di bagian selatan. Hal ini mengindikasikan adanya perbedaan tingkat kesuburan tanah.
2. Sinkronisasi Fase Generatif (17 Oktober – 4 November)
 Pada 17 Oktober menunjukkan tingkat keseragaman (*homogenitas*) tertinggi di seluruh area Subak. Warna kuning cerah mendominasi hampir seluruh petak menandakan bahwa tanaman padi mencapai puncak kerapatan kanopi secara bersamaan. Secara spasial, hal ini membuktikan efektivitas manajemen pola tanam serempak di Subak Dlod Sema, di mana fase generatif terjadi secara masif pada periode yang sama, yang secara ekologis penting untuk meminimalkan risiko serangan hama.
3. Pola Spasial Fase Pematangan dan Panen (16 November – 4 Desember)
 Dinamika spasial kembali terlihat pada fase pematangan. Pada 25 November, petak-petak di bagian sisi barat dan utara mulai menunjukkan penurunan nilai NDVI lebih awal dibandingkan petak bagian tengah. Hal ini menunjukkan bahwa proses pemanenan di Subak Dlod Sema dilakukan secara bertahap. Hingga 4 Desember, sebagian besar petak telah menunjukkan nilai NDVI rendah, yang mencerminkan lahan pasca-panen, sementara beberapa petak kecil masih menyisakan vegetasi hijau tipis.
4. Keunggulan Detail Skala Petak
 Detail spasial yang ditangkap pada Gambar 3, membuktikan bahwa resolusi 3 meter mampu memisahkan informasi antar petak yang dibatasi oleh pematang. Tidak terlihat adanya blurring atau efek piksel campuran (*mixed pixel*) yang signifikan pada batas-batas petak, sehingga estimasi fenologi yang dihasilkan memiliki tingkat presisi spasial yang tinggi. Variasi kecil yang tertangkap ini sangat krusial bagi manajemen pertanian presisi tingkat subak, terutama dalam memetakan produktivitas dan estimasi waktu panen yang akurat.

Uji Akurasi Pemetaan dan Validasi Lapangan

Validasi hasil pemetaan fenologi padi dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana estimasi berbasis citra PlanetScope SuperDove merepresentasikan kondisi aktual di Subak Dlod Sema. Evaluasi ini mencakup akurasi temporal dan akurasi ketepatan klasifikasi fase.

1. Validasi Akurasi Temporal Multifase
 Uji akurasi pada penelitian ini dilakukan secara komprehensif melalui tiga kali observasi lapangan yang mewakili setiap fase pertumbuhan utama padi di Subak Dlod Sema. Berdasarkan perbandingan antara 21 titik sampel lapangan dengan data deret waktu NDVI PlanetScope diperoleh hasil sebagai berikut:
 - a. Fase Vegetatif: Mendeteksi awal pertumbuhan menunjukkan nilai RMSE sebesar 4,0 hari. Selisih ini disebabkan oleh variasi pertumbuhan anakan di tiap petak yang tidak selalu tertangkap secara instan oleh sensor pada awal tanam.
 - b. Fase Generatif: Fase dengan akurasi tertinggi dengan RMSE sebesar 2,0 hari. Hal ini membuktikan bahwa puncak hijau (*peak greenness*) pada tanggal 17 Oktober sangat

akurat dalam merepresentasikan fase bunting hingga keluar malai secara serempak di Subak Dlod Sema.

- c. Fase Pematangan: Menunjukkan nilai RMSE sebesar 4,0 hari. Deteksi penurunan klorofil pada citra sedikit lebih lambat dibandingkan pengamatan visual warna gabah di lapangan pada tanggal 12 November.

Tabel 1. Ringkasan Uji Akurasi Temporal Fenologi Padi

Fase Fenologi	Jumlah Sampel	Tanggal Lapangan O_i	Tanggal Citra P_i	RMSE (Hari)	Kategori Akurasi
Vegetatif	21	20 September	24 September	4,0	Sangat Tinggi
Generatif	21	15 Oktober	17 Oktober	2,0	Sangat Tinggi
Pematangan	21	12 November	16 November	4,0	Sangat Tinggi
Rata-rata Total	21			3,3	Sangat Tinggi

Secara keseluruhan, rata-rata RMSE dari ketiga fase tersebut adalah 3,3 hari. Nilai ini mengonfirmasi bahwa model pemetaan fenologi menggunakan citra PlanetScope SuperDove memiliki reliabilitas yang sangat tinggi untuk monitoring skala petak karena konsistensi di setiap tahapan pertumbuhan. Penentuan kategori akurasi “sangat tinggi” pada hasil RMSE merujuk pada kriteria yang ditetapkan oleh Sakamoto (2018), di mana estimasi fase fenologi dengan tingkat kesalahan di bawah 7 hari dianggap sangat representatif terhadap kondisi aktual. Nilai rata-rata RMSE sebesar 3,3 hari dalam penelitian ini menunjukkan performa model yang lebih baik dibandingkan penelitian Boschetti *et al.* (2009), yang memiliki rentang error 3-5 hari, hal ini dikarenakan penggunaan citra PlanetScope dengan resolusi temporal harian yang mampu meminimalisir keterlambatan deteksi fase. Menurut Zeng *et al.* (2020) fase puncak hijau adalah yang paling mudah dideteksi secara akurat oleh indeks vegetasi NDVI karena kontras spektral yang tajam, sehingga dapat menghasilkan RMSE terkecil dibandingkan fase lainnya.

2. Akurasi Klasifikasi Fase Fenologi (*Confusion Matrix* dan *Kappa*)

Uji akurasi klasifikasi dilakukan untuk mengevaluasi ketepatan citra PlanetScope SuperDove dalam mengelompokkan tiap petak sawah ke dalam fase pertumbuhan yang benar (Vegetatif, Generatif, dan Pematangan). Evaluasi ini menggunakan matriks kesalahan (*confusion matrix*) yang membandingkan hasil klasifikasi berbasis threshold NDVI dengan data observasi pada 21 titik sampel di Subak Dlod Sema. Berdasarkan hasil validasi dari tiga kali kunjungan lapangan, diperoleh distribusi akurasi sebagai berikut:

Tabel 2. *Confusion Matrix* dan *Kappa Coefficient* Fase Fenologi Padi

Fase Prediksi (Citra/Lapangan)	Vegetatif	Generatif	Pematangan	Total Baris (User)	User's Accuracy (%)	Kappa Coefficient
Vegetatif	19	2	0	21	90,5%	0,83
Generatif	2	18	2	22	81,8%	
Pematangan	0	1	19	20	95,0%	
Total Kolom (Producer)	21	21	21	63		
Producer's Accuracy (%)	90,5%	85,7%	90,5%		OA: 88,9%	

Berdasarkan Tabel 12, nilai *Overall Accuracy* (OA) yang diperoleh adalah 88,9%. Nilai ini menunjukkan bahwa secara keseluruhan, model klasifikasi NDVI mampu memetakan fase fenologi padi dengan sangat akurat. Dari total 63 titik observasi multifase, terdapat 56 titik yang terklasifikasi dengan benar, sementara 7 titik lainnya mengalami pergeseran fase. Fase generatif memiliki akurasi terendah dibandingkan fase lainnya (*Producer's Accuracy* 85,7%). Hal ini terjadi karena adanya 2 titik vegetatif akhir yang sudah memiliki nilai NDVI tinggi sehingga terdeteksi sebagai fase generatif, serta 1 titik fase generatif yang sudah mulai menguning sehingga terdeteksi sebagai fase pematangan. Fase Pematangan memiliki *User's Accuracy* sebesar 95,0%. Terdapat 1 titik yang secara visual di lapangan masih berada pada akhir fase generatif, namun secara spektral NDVI-nya sudah mulai menurun di bawah ambang batas puncak, sehingga citra mengklasifikasikannya ke dalam fase pematangan lebih awal. Hasil perhitungan Koefisien Kappa menghasilkan nilai sebesar 0,83. Berdasarkan kriteria Landis & Koch (1977), nilai ini termasuk dalam kategori “sangat kuat”. Hasil ini menjelaskan bahwa penggunaan resolusi spasial 3 meter pada PlanetScope SuperDove sangat efektif dalam meminimalisir kesalahan klasifikasi akibat piksel campuran pada batas pematang di Subak Dlod Sema, sehingga pemetaan pada skala petak individu tetap akurat.

3. Analisis Kesalahan (*Error of Commission and Omission*)

Error of Omission menunjukkan probabilitas suatu titik di lapangan tidak terklasifikasi ke dalam kategori yang benar di peta. Pada fase generatif memiliki nilai *Omission Error* tertinggi sebesar 14,3%. Hal ini berarti ada sekitar 3 titik sampel yang secara nyata berada pada fase puncak generatif di lapangan, namun “menghilang” dari klasifikasi generatif di peta karena terdeteksi sebagai fase vegetatif atau pematangan. Fase Vegetatif dan Pematangan memiliki *Omission Error* yang rendah, yaitu 9,5%. Hal ini menunjukkan bahwa citra sangat konsisten dalam mengenali awal pertumbuhan dan proses penguningan padi.

Error of Commission pada Tabel 3 menunjukkan probabilitas suatu area yang di peta diklasifikasikan ke dalam suatu fase, padahal di lapangan bukan fase tersebut. Fase generatif memiliki *Commission Error* sebesar 18,2%, artinya terdapat petak yang di peta terlihat sebagai fase generatif, namun kenyataannya masih vegetatif atau sudah masuk pematangan. Hal ini sering terjadi karena nilai NDVI pada puncak generatif hampir bersinggungan dengan awal fase generatif. Pada fase pematangan memiliki *commission error* yang sangat kecil, yaitu 5,0%. Hal ini membuktikan bahwa sangat jarang fase lain “salah masuk” ke dalam kategori pematangan karena penurunan spektral NDVI setelah puncak sangat unik dan tajam.

Tabel 3. Nilai *Error of Commission* dan *Omission*

Fase Fenologi	<i>Error of Omission</i> (%)	<i>Error of Commission</i> (%)	Penyebab Utama
Vegetatif	9,5%	9,5%	Gangguan pantulan air/tanah di awal tanam
Generatif	14,3%	18,2%	Overlap nilai NDVI maksimal pada kanopi rapat
Pematangan	9,5%	5,0%	Perubahan warna daun yang sangat kontras

Tingginya *Error of Commission* pada fase generatif sebesar 18,2% di Subak Dlod Sema mengindikasikan adanya fenomena saturation nilai NDVI. Pada saat kanopi sangat rapat, nilai NDVI cenderung mencapai angka maksimal (0,75-0,80) dan bertahan dalam waktu yang cukup lama. Hal ini menyebabkan sistem kesulitan membedakan antara fase vegetatif akhir yang sangat subur dengan fase generatif awal (bunting). Namun, penggunaan resolusi spasial 3 meter dari PlanetScope SuperDove secara signifikan membantu menekan *Error of Omission* pada seluruh fase hingga dibawah 15%. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi kejenuhan nilai, detail spasial pada skala petak memungkinkan pemisahan objek yang lebih presisi dibandingkan jika menggunakan citra dengan resolusi lebih rendah seperti Sentinel-2 (10m) atau Landsat-9 (30m), di mana piksel campuran dari jalan atau pematang seringkali meningkatkan error pada klasifikasi fase padi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa citra PlanetScope sangat efektif dalam memetakan fenologi padi di Subak Dlod Sema dengan tingkat akurasi yang tinggi, terbukti dari nilai *Overall Accuracy* sebesar 88,9% dan Koefisien Kappa 0,83. Profil temporal NDVI menunjukkan pola pertumbuhan yang konsisten dengan puncak nilai rata-rata sebesar 0,74 pada fase generatif, sementara resolusi spasial 3 meter memungkinkan deteksi variasi transisi fase antar petak sawah secara presisi. Meskipun terdapat kecenderungan sedikit over-estimate pada fase generatif akibat kejenuhan nilai NDVI, model ini tetap menunjukkan keandalan temporal yang kuat dengan nilai RMSE sebesar 4 hari pada fase pematangan. Secara keseluruhan, integrasi data satelit harian ini memberikan solusi akurat bagi pemantauan kalender tanam dan manajemen pertanian presisi pada skala organisasi Subak.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada Dinas Pertanian dan Ketahanan Pangan Provinsi Bali, Laboratorium Manajemen Sumberdaya Lahan Konsentrasi Ilmu Tanah dan Lingkungan Fakultas Pertanian Universitas Udayana, dan Pusat Pengembangan Infrastruktur Informasi Geospasial (PPIIG) yang telah membantu penulis menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Battude, M., Al Bitar, A., Morin, D., Cros, J., Huc, M., Marais Sicre, C., Le Dantec, V., & Demarez, V. (2016). Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 184, 668–681. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.030>
- Boschetti, M., Stroppiana, D., Brivio, P. A., & Bocchi, S. (2009). Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images. *International Journal of Remote Sensing*, 30(18), 4643–4662. <https://doi.org/10.1080/01431160802632249>
- Danoedoro, P. (2012). *Pengantar Pengindraan Jauh Digital*. Penerbit ANDI.
- Hegde, A. A., Umesh, P., & Tahiliani, M. P. (2025). Automated rice mapping using multitemporal Sentinel-1 SAR imagery using dynamic threshold and slope-based index methods. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 37(November 2024), 101410. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101410>
- Jensen, J. R. (2015). *Introductory Digital Image Processing : A Remote Sensing Perspective Fourth*

- Edition.* Pearson Series Geographic Information Science.
<http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). Landis and Koch agreement of categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174.
- Nordström, K., & Glass, N. L. (2002). Growth and development. *Current Opinion in Microbiology*, 5(6), 545–547. [https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(02\)00382-X](https://doi.org/10.1016/S1369-5274(02)00382-X)
- Planet Labs PBC. (2025). *PlanetScope Product Specifications*. Planet Labs PBC. <https://docs.planet.com/data/imagery/planetscope/>
- Priana, A., Danoedoro, P., & Kamal, M. (2023). Linear spectral mixture analysis of land cover for assessment level sub-pixel using PlanetScope imagery in Dieng Plateau. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1133(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1133/1/012075>
- Ramadhani, F., Pullanagari, R., Kereszturi, G., & Procter, J. (2020). Automatic mapping of rice growth stages using the integration of sentinel-2, mod13q1, and sentinel-1. *Remote Sensing*, 12(21), 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs12213613>
- Rivera-Solís, J., Quesada-Román, A., & Castellero, R. G. (2025). Land use and land cover analysis with special reference to mangrove dynamics for sustainable use in the Rosario River sub-basin, Pixvae, Panama. *Journal of South American Earth Sciences*, 157(February). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105464>
- Rudiyanto, Minasny, B., Shah, R. M., Soh, N. C., Arif, C., & Setiawan, B. I. (2019). Automated near-real-time mapping and monitoring of rice extent, cropping patterns, and growth stages in Southeast Asia using Sentinel-1 time series on a Google Earth Engine platform. *Remote Sensing*, 11(14), 1–27. <https://doi.org/10.3390/rs11141666>
- Sakamoto, T. (2018). Refined shape model fitting methods for detecting various types of phenological information on major U.S. crops. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 138, 176–192. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.011>
- You, X., Meng, J., Zhang, M., & Dong, T. (2013). Remote sensing based detection of crop phenology for agricultural zones in China using a new threshold method. *Remote Sensing*, 5(7), 3190–3211. <https://doi.org/10.3390/rs5073190>
- Zeng, L., Wardlow, B. D., Xiang, D., Hu, S., & Li, D. (2020). A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111511>
- Zheng, H., Cheng, T., Yao, X., Deng, X., Tian, Y., Cao, W., & Zhu, Y. (2016). Detection of rice phenology through time series analysis of ground-based spectral index data. *Field Crops Research*, 198, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.027>