

## IDENTIFIKASI SEBARAN NITROGEN PADA TANAMAN PADI BERBASIS PENGETAHUAN FENOLOGI DAN REMOTE SENSING

Sudianto<sup>1</sup>, Reni Dyah Wahyuningrum<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknik Informatika, Institut Teknologi Telkom Purwokerto

<sup>2</sup>Teknik Telekomunikasi, Institut Teknologi Telkom Purwokerto

email: sudianto@ittelkom-pwt.ac.id

### Abstrak

Nitrogen sangat penting untuk keberlanjutan tanaman padi. Kebutuhan nitrogen pada tanaman padi berguna untuk produktivitas dan peningkatan hasil panen. Masalah yang sering terjadi, kekurangan dan berlebihan nitrogen, juga tidak cocok untuk tanaman, terutama pada puncak fenologi tanaman padi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk identifikasi sebaran nitrogen pada tanaman padi pada puncak fenologi tanaman. Identifikasi nitrogen dilakukan dengan data citra satelit dan indikator indeks *spectral* seperti NDVI, NDRE, NDMI, dan data curah hujan. Selain itu, pemodelan tren musiman dibangun dengan regresi linier dan model harmonik sebagai basis pengetahuan untuk pola penanaman padi dari fenologi tanaman. Hasil yang diperoleh menunjukkan puncak tanam padi dalam satu tahun masa tanam, terdapat dua siklus puncak; (1) dari bulan Januari hingga Maret; (2) dari bulan Juli hingga September. Kemudian pada siklus puncak penanaman kedua, konservasi terhadap identifikasi sebaran nitrogen dalam kondisi normal dengan rerata sebaran nitrogen 0.516. Sementara itu, pada siklus penanaman puncak pertama, tanaman padi pada bulan Januari ketersediaan sebaran nitrogen belum merata dan belum tercukupi dengan rerata sebaran nitrogen 0.358.

**Kata kunci:** GEE, Harmonic Model, NDRE, Nitrogen, Fenologi, Satellite

### Abstract

*Nitrogen is essential for the sustainability of rice plants. The need for nitrogen in rice plants is helpful for productivity and increased yields. The problem that often occurs, nitrogen deficiency and excess, is also not suitable for plants, especially at the peak of rice plant phenology. Therefore, this study aims to identify the distribution of nitrogen in rice plants at the peak of plant phenology. Nitrogen identification was carried out using satellite imagery data and spectral index indicators such as NDVI, NDRE, NDMI, and rainfall data. In addition, seasonal trend modeling was built using linear regression and harmonic models as a knowledge base for rice planting patterns from plant phenology. The results show the peak of rice planting in one year of planting; there are two peak cycles; (1) from January to March; (2) from July to September. Then in the second peak planting cycle, the conservation of identification of nitrogen distribution under normal conditions with an average nitrogen distribution of 0.516. Meanwhile, during the first peak planting cycle, rice plants in January provided nitrogen distribution that was not evenly distributed and insufficient, with an average nitrogen distribution of 0.358.*

**Keywords :** GEE, Harmonic Model, NDRE, Nitrogen, Phenology, Satellite

---

Diterima Redaksi: 13-07-2022 | Selesai Revisi: 07-12-2022 | Diterbitkan Online: 27-12-2022

DOI: <https://doi.org/10.23887/janapati.v11i3.50051>

---

### PENDAHULUAN

Tanaman padi merupakan komoditas pangan utama masyarakat Indonesia. Indonesia memiliki luas lahan sawah sekitar 8 juta hektar, atau 8% dari total luas lahan Indonesia [1]. Dalam budidaya tanaman padi, pemantauan dan pengelolaan merupakan aspek penting untuk menjaga kualitas tanaman padi. Salah satu indikator dalam menjaga kualitas tanaman padi adalah memantau dan mengelola

kebutuhan nitrogen pada tanaman padi. Kebutuhan nitrogen umumnya dipenuhi dengan pemupukan. Proses pemupukan tanaman padi, petani belum memperhatikan kondisi tanaman dan pengaruh faktor lingkungan tetapi hanya berdasarkan pengalaman dan kebiasaan [2], terutama pemantauan dan pengelolaan nitrogen tanaman. Pada saat yang sama, pemantauan dan pengelolaan nitrogen pada tanaman memiliki peran penting pada proses fotosintesis

dan produktivitas tanaman yang mempengaruhi siklus karbon dan oksigen [3]. Salah satu faktor unsur penting dalam nitrogen yaitu berpengaruh pada pembentukan daun dan batang tanaman. Sehingga, manajemen dan pemantauan kebutuhan nitrogen dibutuhkan, terutama didasarkan pada fenologi tanaman. Karena terlalu banyak atau terlalu sedikit nitrogen akan berdampak negatif pada tanaman, kerentanan penyakit, dan hasil panen. Oleh karena itu, diperlukan teknologi tepat guna untuk identifikasi sebaran nitrogen pada tanaman menggunakan penginderaan jauh sebagai identifikasi sebaran nitrogen tanaman padi untuk mendukung pertanian presisi sebagai pemantauan dan pengelolaan kebutuhan nitrogen tanaman padi.

Penelitian sebelumnya memperkirakan kualitas tanaman padi melalui analisis regresi antara kandungan nitrogen dan refleksi dekat inframerah daun padi [4], [5]. Identifikasi sebaran nitrogen pada tanaman padi menggunakan gambar UAV [6]. Pemantauan nitrogen daun padi menggunakan indeks multi-temporal dari gambar UAV [7]. Estimasi kandungan nitrogen dan akumulasi daun padi menggunakan gambar hiperspektral UAV [8]. Namun, penelitian serupa belum banyak dilakukan di Indonesia. Selain itu, penelitian sebelumnya belum mempertimbangkan fenologi tanaman padi. Khususnya untuk komoditas padi pertanian di perkotaan dengan mempertimbangkan pengelolaan identifikasi sebaran nitrogen tanaman padi pada puncak fenologi tanaman.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk identifikasi sebaran nitrogen pada tanaman padi dengan penginderaan jauh berdasarkan puncak fenologi tanaman. Identifikasi sebaran nitrogen pada tanaman padi menggunakan penggabungan indeks *spectral* dan kondisi alam dari data curah hujan. Sehingga diharapkan proses pemupukan tanaman dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanaman.

## METODE

### A. Skema Penelitian

Dalam membangun identifikasi sebaran nitrogen pada tanaman padi, peneliti membagi sumber data citra satelit menjadi dua. (1) Citra dari satelit Landsat 8 dengan resolusi awal 30m, kemudian dilakukan penajaman hingga 15m dengan teknik *pansharpen* yang digunakan untuk membangun pengetahuan tentang tren musiman dan mengidentifikasi pola penanaman padi dari tahun 2015 hingga 2021. Selain itu, pengetahuan yang diperoleh dari data citra, juga

diverifikasi berdasarkan pengetahuan petani. (2) Citra dari satelit Sentinel 2 dengan resolusi 10m digunakan untuk identifikasi sebaran nitrogen tanaman berdasarkan pengetahuan fenologi tanaman dengan membandingkan beberapa indeks *spectral* (NDVI, NDRE, dan NDMI). Selain itu, Peneliti juga menggabungkan data curah hujan yang diperoleh dari BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika) dari Januari hingga Desember 2020. Data citra dan seluruh proses metodologis dilakukan pada platform *cloud* di GEE (Google Earth Engine); rincian alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

### B. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di kota Purwokerto, Indonesia (Lat: -7.4361° Long: 109.2505°) di sawah dengan kondisi area sawah datar. Pertimbangan memilih petak sawah ini, yaitu menjadi representatif persawahan yang berada di daerah perkotaan dengan kebutuhan pemupukan yang relative tinggi. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Selain itu, kondisi tanah relative data dengan rerata ketinggian 67,76 m.

### C. Data Gambar dan Prapemrosesan

Data yang digunakan bersumber dari dua satelit: (1) Landsat 8; satelit dari USGS (United States Geological Survey) [9], [10] dengan spesifikasi Landsat 8 Collection 2 Tier 1 TOA Reflectance atau "LANDSAT/LC08/C02/T1\_TOA". *Image collection* yang digunakan dari Januari 2015 hingga Desember 2021. Selain itu, data gambar juga difilter bebas *cloud* di bawah 20%. (2) Sentinel 2; satelit dari ESA (European Space Agency) [11]–[13] dengan spesifikasi MSI Sentinel-2: Multi Spectral Instrument, Level-2A atau "COPERNICUS/S2\_SR". *Image collection* yang digunakan pada periode tanam Januari 2020 hingga Desember 2020. Selain itu, data gambar juga difilter bebas *cloud* di bawah 20%.

### D. Indeks Nitrogen

Indeks nitrogen adalah nilai yang diperoleh dari menggabungkan beberapa pita *spectral* gambar penginderaan jauh. Nilai indeks diperoleh dari energi yang dipancarkan oleh vegetasi pada gambar penginderaan jauh untuk menunjukkan tingkat kehijauan dan distribusi tanaman dan nitrogen pada tanaman dalam bentuk gelombang Panjang (*wavelengths*). Tumbuhan memancarkan dan menyerap gelombang unik untuk menghubungkan keadaan yang terjadi dengan objek vegetasi maupun bukan vegetasi [14], [15]. Fenomena

penyerapan cahaya merah oleh klorofil dan pantulan cahaya inframerah dekat oleh jaringan mesofilik di daun akan membuat nilai kecerahan yang diterima oleh sensor satelit pada saluran jauh berbeda [16]. Di darat, non-vegetasi, termasuk air, perumahan, lahan kosong terbuka, dan wilayah dengan kondisi vegetasi yang rusak, tidak akan menunjukkan nilai rasio yang tinggi (*minimum*). Sebaliknya, area vegetasi sangat padat dan memiliki kondisi tanaman sehat dan cukup akan nitrogennya. Rasio kedua kanal (*band*) akan sangat tinggi (*maximum*).

Pemantauan identifikasi sebaran kebutuhan nitrogen dihitung menggunakan beberapa indeks spektral. (1) NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) menggunakan NIR (*Near Infrared Radiation*) dan RED, dihitung menggunakan Persamaan 1 [15], [17], [18]. (2) NDRE (*Normalized Difference Red Edge*)

dengan NIR dan Red Edge, dihitung menggunakan Persamaan 2. Selain itu, NDRE dapat memetakan variabilitas kadar nitrogen daun karena Red-edge lebih sensitif terhadap kandungan klorofil dan nitrogen pada daun [19], [20]. (3) NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*) [21], [22] menggunakan NIR dan SWIR dihitung dengan Persamaan 3.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

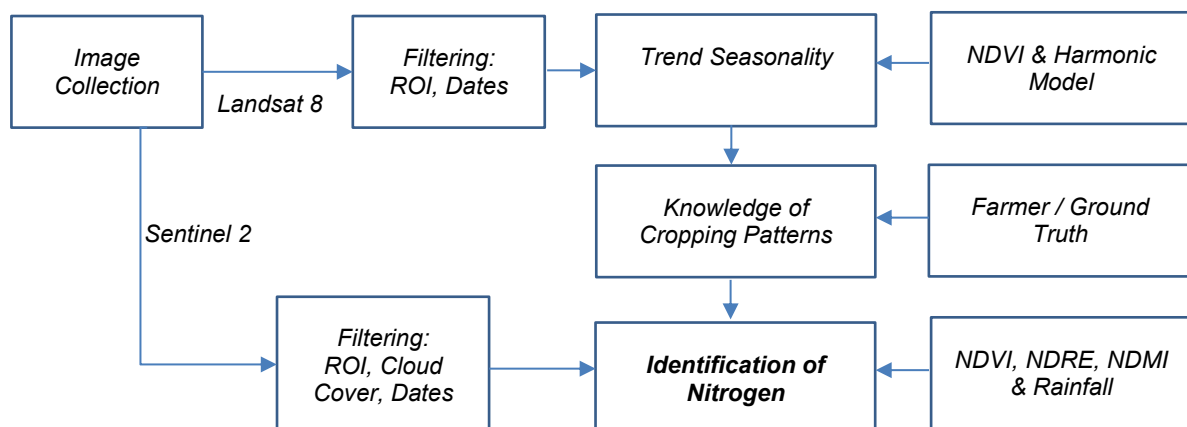
$$NDRE = (NIR - Red\ Edge) / (NIR + Red\ Edge) \quad (2)$$

$$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (3)$$

Di mana NIR ditemukan di *Band* B8, RED di *Band* B4, Red Edge di *Band* B5, dan SWIR di *Band* B11.



Gambar 1. Lokasi Penelitian di Sawah Perkotaan



Gambar 2. Alir Metodologi dari Identifikasi Sebaran Nitrogen

### E. Tren Musiman

Fenologi tanaman dapat membantu memperoleh informasi tentang tanaman [23]–[25]. Pola penanaman dapat diidentifikasi melalui tanaman hijau daun yang terbentuk melalui data temporal NDVI [15], yang diperoleh dari persamaan 1. Kemudian data temporal NDVI dimodelkan dengan regresi linier dan model harmonik (Persamaan 4 dan Persamaan 5) [26] untuk mengetahui pola penanaman sebagai basis pengetahuan tren musiman.

$$p_t = \beta_0 + \beta_{1t} + e_t \quad (4)$$

$$p_t = \beta_0 + \beta_{1t} + A \cos(2\pi\omega t - \varphi) + e_t \\ = \beta_0 + \beta_{1t} + \beta_2 \cos(2\pi\omega t) + \beta_3 \sin(2\pi\omega t) + e_t \quad (5)$$

Di mana  $A$  adalah amplitudo,  $\omega$  adalah frekuensi,  $e_t$  adalah kesalahan acak, dan  $\varphi$  adalah fasenya.  $\beta_2 = A \cos(\varphi)$ , dan  $\beta_3 = A \sin(\varphi)$ , menyiratkan  $A = (\beta_2^2 + \beta_3^2)^{1/2}$ , dan  $\varphi = \tan^{-1}(\beta_3/\beta_2)$ . Agar sesuai dengan model ini dengan deret waktu,  $\omega$  ditetapkan sebagai 1 menggunakan regresi kuadrat terkecil.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

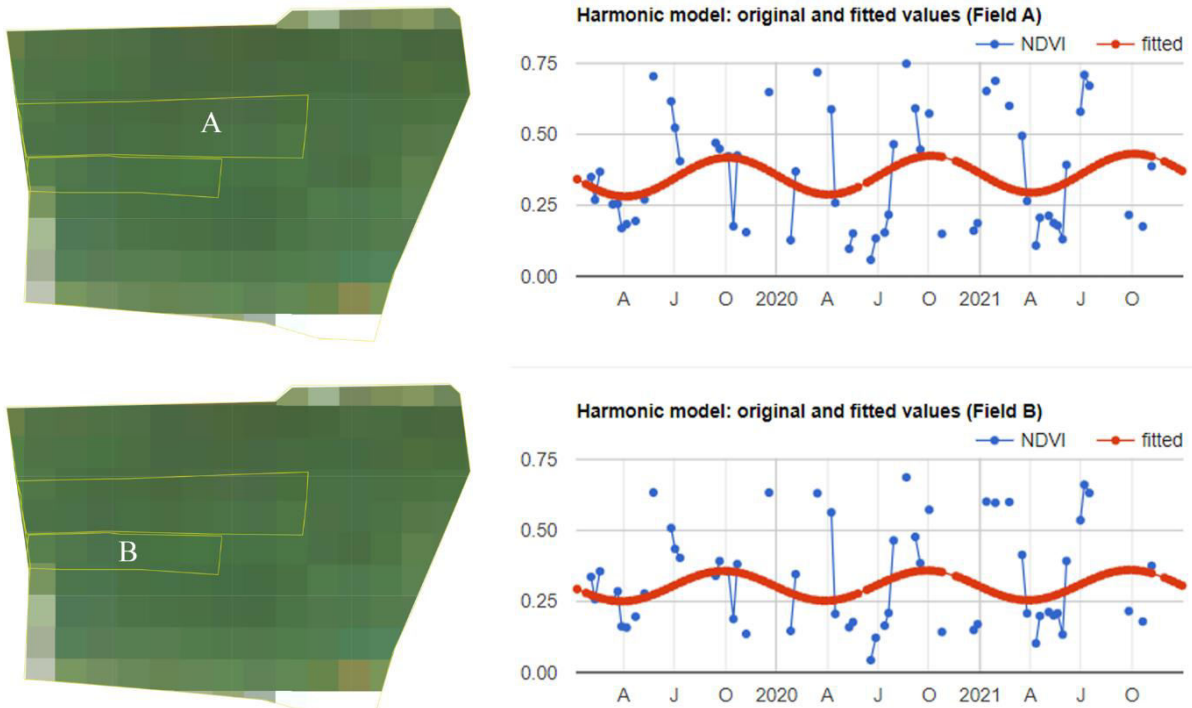
### A. Pola Tanam

Pengetahuan tentang pola tanam pada tanaman padi dibangun berdasarkan tren musiman tanaman padi. Penelitian ini membagi dua sampel untuk mengetahui tren musiman

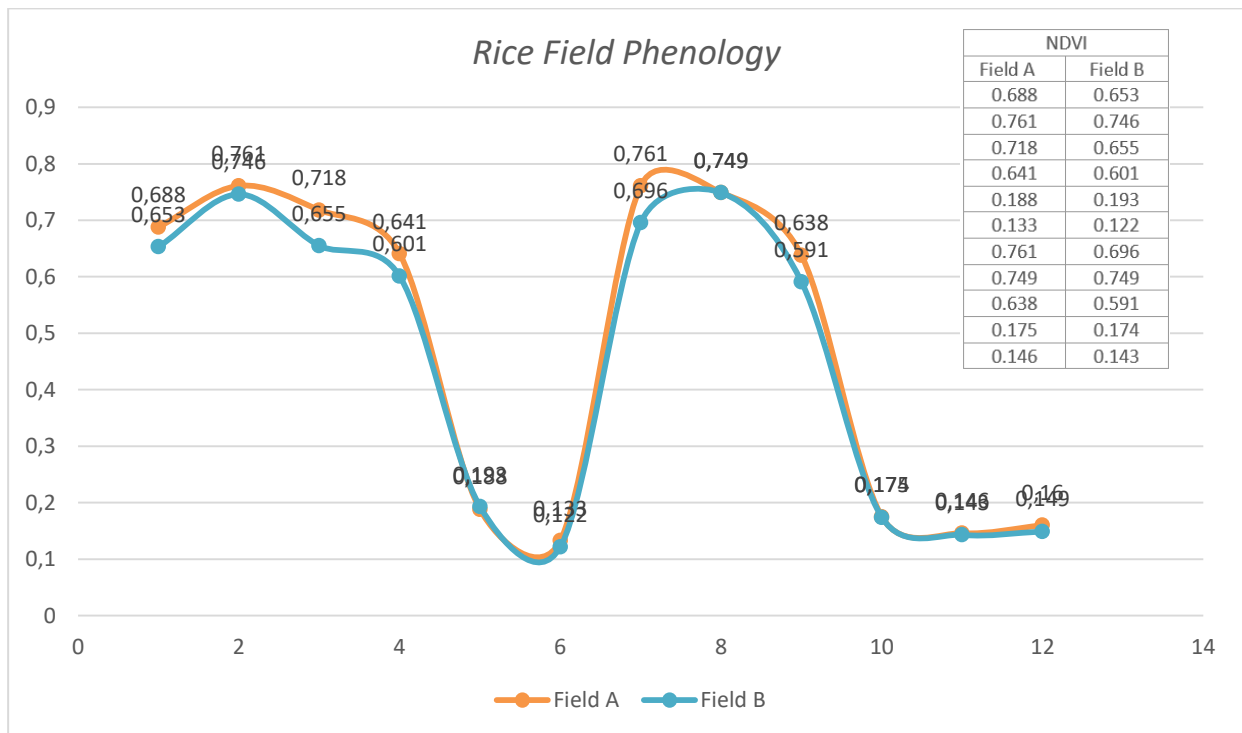
yang terdiri dari petak sawah A dan petak sawah B, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Selanjutnya, dari dua sampel petak A dan petak B, dilakukan ekstraksi nilai kehijauan tanaman padi dengan menghitung indeks *spectral* NDVI. Kemudian nilai-nilai NDVI disusun dengan model harmonik untuk menjadi pola tren musiman, grafik tren musiman dapat dilihat pada Gambar 4.

Data tren musiman dari kedua petak sawah, selanjutnya dijadikan basis pengetahuan tentang fenologi tanaman atau pola tanam tanaman padi. Sehingga pengetahuan yang diperoleh dari tren musiman menjadi acuan untuk mengetahui puncak tanam pada tanaman padi. Penerapan pengetahuan fenologi juga pernah diterapkan pada tanaman mangrove dan padi dengan *tools* yang berbeda [27][28].

Berdasarkan tren musiman, fenologi penanaman padi berlangsung selama dua periode tanam dalam satu tahun. Fenologi padi menunjukkan bahwa puncak penanaman berada pada bulan Januari hingga Maret untuk periode tanam pertama dan Juli hingga September untuk periode penanaman kedua. Selanjutnya, pengetahuan tentang pola penanaman padi dijadikan acuan dalam melakukan identifikasi sebaran nitrogen tanaman berdasarkan puncak fenologi tanaman padi. Hal itu dilakukan untuk menentukan sebaran nitrogen pada waktu terbaik bagi tanaman padi untuk mencapai pengelolaan yang maksimal.



Gambar 3. Pola Tanam Tanaman Padi pada Lokasi Penelitian pada tahun 2019-2021



Gambar 4. Pola Fenologi Tanaman Padi

### B. Identifikasi Sebaran Nitrogen

Identifikasi sebaran nitrogen di *Region of Interest* (RoI) sawah, dilakukan pada dua periode penanaman dalam satu tahun. Puncak penanaman pada periode penanaman pertama

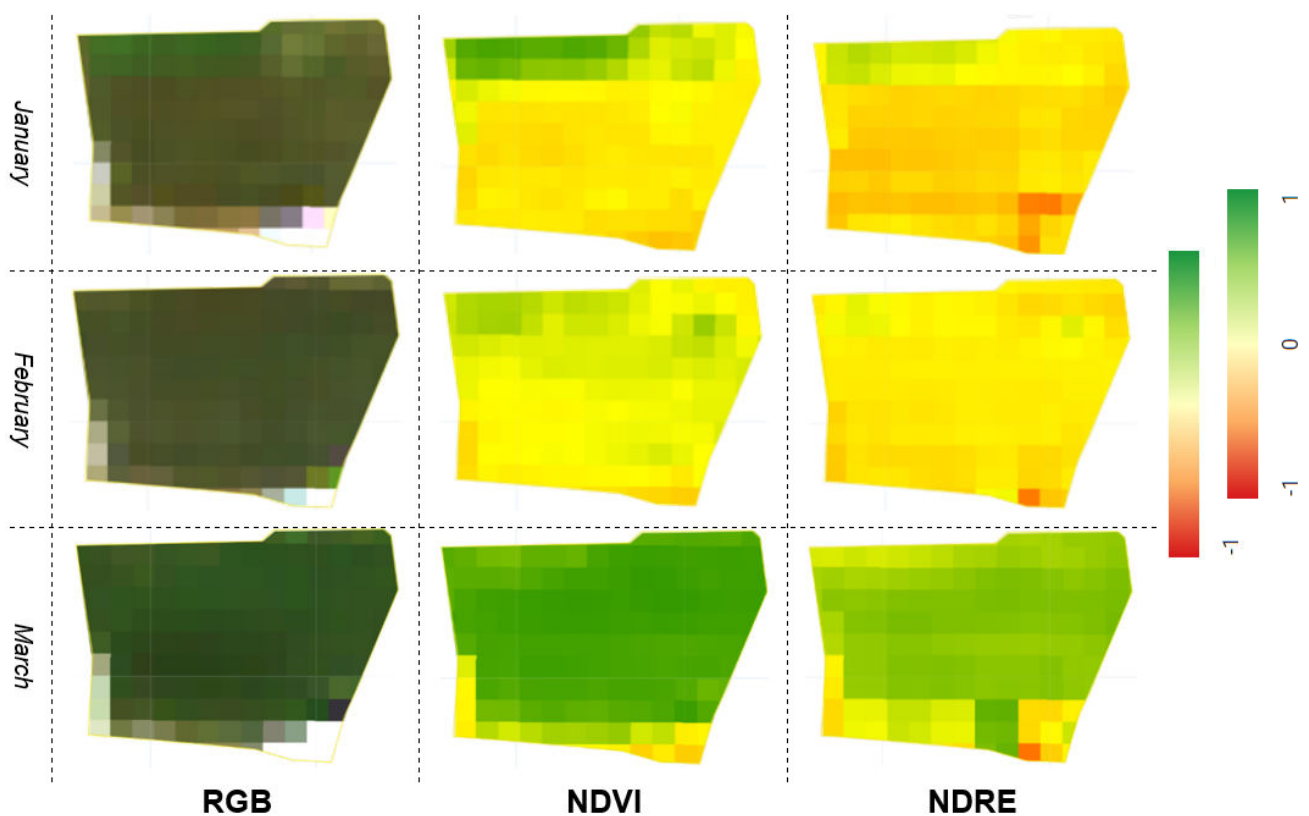
berlangsung dari bulan Januari hingga Maret dan periode penanaman kedua pada bulan Juli hingga September seperti pada Gambar 5.

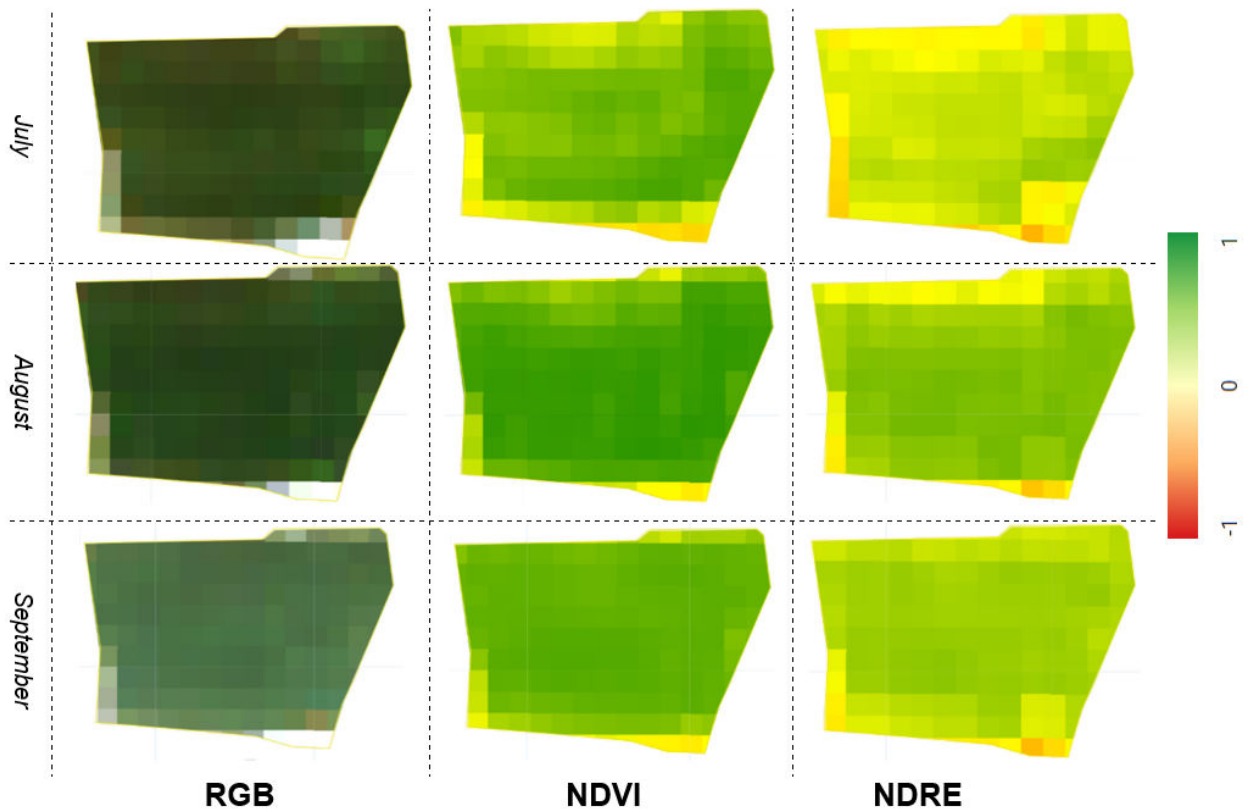
Pada periode penanaman pertama, puncak penanaman pada bulan Februari, dan



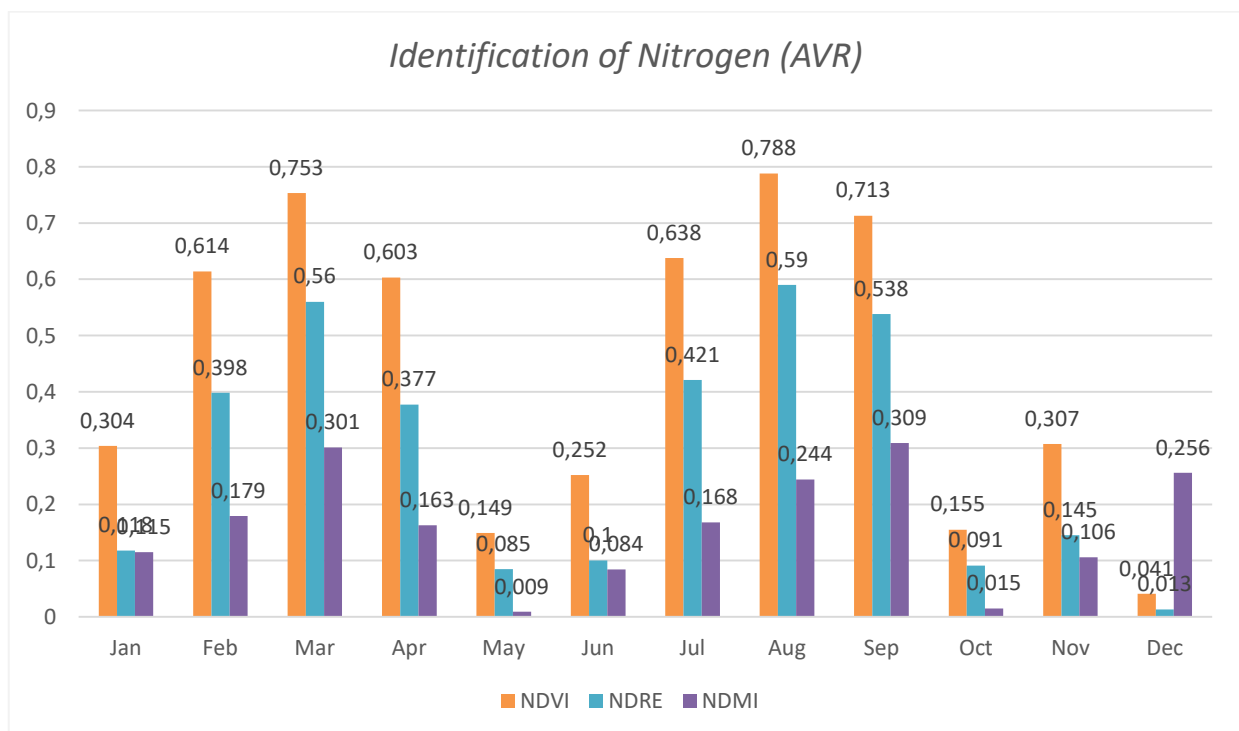
Maret, identifikasi sebaran nitrogen padi diperkirakan dalam kondisi normal. Sementara itu, pada Januari 2020, sebaran nitrogen tanaman padi belum merata dan belum terpenuhi; nilai NDRE cenderung mendekati nilai 0, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 dan Tabel 1. Kemudian, peneliti membandingkan data curah hujan dengan defisiensi nitrogen, apakah disebabkan oleh intensitas hujan pada Januari. Namun, curah hujan pada bulan Januari dalam kondisi normal, seperti pada Tabel 2. Selain itu, untuk memastikan perkiraan sebaran nitrogen pada tanaman padi, distribusi nitrogen dalam bentuk distribusi peta pada bulan Januari, menunjukkan warna yang relatif kuning hingga kemerahan. Kondisi ini memastikan bahwa sebaran nitrogen pada tanaman padi berada dalam keadaan belum terpenuhi kebutuhan nitrogen pada area sawah.

Pada periode tanam kedua, puncak penanaman padi adalah dari bulan Juli hingga September. Pada periode penanaman kedua, sebaran nitrogen diperkirakan dalam kondisi normal. Ketiga nilai indeks spektral, seperti NDVI, NDRE, dan NDMI, berada pada nilai rata-rata, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 dan Tabel 1. Kondisi ini menunjukkan bahwa daerah yang diminati berada dalam kondisi sebaran kebutuhan nitrogen yang cukup pada tanaman padi. Kemudian peneliti juga melakukan perbandingan data curah hujan, yang menunjukkan dalam kondisi normal, seperti pada Tabel 2. Selain itu, distribusi peta nitrogen dari Juli hingga September menunjukkan bahwa distribusi warna hijau dominan. Persyaratan ini memastikan bahwa sebaran nitrogen tanaman dalam kondisi rata-rata atau memenuhi kebutuhan nitrogen tanaman.





Gambar 5. Distribusi Nitrogen pada Tanaman Padi (*region of interest*)



Gambar 6. Hasil Data Identifikasi Nitrogen pada Tanaman Padi (*region of interest*)

Tabel 1. Sebaran Nilai Spektral NDVI, NDRE dan NDMI (*region of interest*)

Bulan	Indikator Spektral		
	NDVI	NDRE	NDMI
Jan	0.304	0.118	0.115
Feb	0.614	0.398	0.179
Mar	0.753	0.56	0.301
Apr	0.603	0.377	0.163
Mei	0.149	0.085	0.009
Jun	0.252	0.1	0.084
Jul	0.638	0.421	0.168
Agt	0.788	0.59	0.244
Sep	0.713	0.538	0.309
Okt	0.155	0.091	0.015
Nov	0.307	0.145	0.106
Des	0.041	0.013	0.256

Tabel 2. Data curah hujan dari Stasiun Meteorologi Tunggul Wulung (Lat: -7.7189 Long: 109.0149)

Bulan	Curah Hujan	
	AVR (mm)	STD (mm)
Jan	8.28	8.47
Feb	13.72	14.58
Mar	15.39	21.35
Apr	10.53	14.37
Mei	18.94	24.18
Jun	15.99	21.73
Jul	2.32	4.92
Agt	1.82	4.41
Sep	9.21	24.51
Okt	30.61	30.58
Nov	31.79	35.34
Des	19.11	22.81

Kedua masa tanam dalam periode tahun yang sama (Januari hingga Maret) dan (Juli hingga September), kebutuhan nitrogen pada puncak fenologi tanaman, keduanya memiliki perbedaan sebaran kebutuhan nitrogen. Di samping itu, perbedaan sebaran kebutuhan nitrogen dari kedua masa tanam juga relatif tidak dipengaruhi faktor alam. Hal ini

ditunjukkan melalui komparasi data curah hujan yang terjadi di area penelitian. Dari data curah hujan, fenomena alam atau hujan tidak memiliki dampak yang signifikan terhadap sebaran nitrogen pada tanaman padi.

Sementara secara pengelolaan dan identifikasi sebaran nitrogen pada tanaman padi berdasarkan fenologi. Praktik ini bisa membantu



agar penanganan kebutuhan nitrogen pada tanaman padi lebih sesuai dan tepat. Sehingga proses pemupukan pada tanaman lebih optimal.

### KESIMPULAN

Penerapan *remote sensing* dalam aktivitas pertanian presisi dapat membantu meningkatkan produktivitas tanaman. Pengindraan jauh dengan pengetahuan fenologi tanaman sebagai pola tanam tanaman, khususnya pada tanaman padi bisa membantu identifikasi sebaran kebutuhan nitrogen pada tanaman padi. Pengolahan identifikasi sebaran nitrogen ini juga dapat memaksimalkan praktik pengelolaan tanaman padi yang lebih efisien. Faktor *spectral* NDVI, NDRE dan NDMI memberi pengaruh pada identifikasi sebaran nitrogen, sedangkan faktor lingkungan seperti data curah hujan masih relatif terhadap pengaruh sebaran nitrogen.

Saran untuk penelitian selanjutnya, dapat menambah faktor lainnya yang dapat mempengaruhi identifikasi sebaran nitrogen melalui data lingkungan lainnya.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada DPRM (Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian Masyarakat) Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia yang telah mendukung penelitian ini, dan kepada para pengulas anonim atas saran konstruktifnya.

### REFERENSI

- [1] Kementerian Pertanian, "Statistik perkebunan Indonesia 2018-2020," *Buku Stat. Perkeb. Indones.*, pp. 1–82, 2020.
- [2] S. Juliati, "Penentuan Indeks Kebutuhan Hara Makro Pada Tanaman Mangga Dengan Metode Diagnosis and Recommendation Integrated System," *J. Hortik.*, vol. 20, no. 2, p. 83977, 2010, doi: 10.21082/jhort.v20n2.2010.p.
- [3] M. E. Martin and J. D. Aber, "High Spectral Resolution Remote Sensing of Forest Canopy Lignin, Nitrogen, and Ecosystem Processes." 1997.
- [4] K. Arai, "Rice Crop Quality Evaluation Method through Regressive Analysis between Nitrogen Content and Near Infrared Reflectance of Rice Leaves Measured from Near Field," *Int. J. Adv. Res. Artif. Intell.*, vol. 2, no. 5, pp. 1–6, 2013, doi: 10.14569/ijarai.2013.020501.
- [5] S. D. Afandi, "Estimasi kadar nitrogen tanaman padi menggunakan spectral reflectance," *Tesis*, 2016.

- [6] J. D. Colorado *et al.*, "Estimation of nitrogen in rice crops from UAV-captured images," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 20, pp. 1–31, 2020, doi: 10.3390/rs12203396.
- [7] X. Du *et al.*, "Multi-temporal monitoring of leaf area index of rice under different nitrogen treatments using UAV images," *Int. J. Precis. Agric. Aviat.*, vol. 1, no. 1, pp. 7–12, 2018, doi: 10.33440/j.ijpaa.20200301.57.
- [8] L. Wang *et al.*, "Estimation of paddy rice nitrogen content and accumulation both at leaf and plant levels from uav hyperspectral imagery," *Remote Sens.*, vol. 13, no. 15, pp. 1–21, 2021, doi: 10.3390/rs13152956.
- [9] D. L. Williams, S. Goward, and T. Arvidson, "Landsat: Yesterday, Today, and Tomorrow," vol. 72, no. 10, pp. 1171–1178, 2006.
- [10] J. R. Irons, J. L. Dwyer, and J. A. Barsi, "The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission," *Remote Sens. Environ.*, vol. 122, pp. 11–21, 2012, doi: 10.1016/j.rse.2011.08.026.
- [11] S. L. Bruinsma *et al.*, "The new ESA satellite-only gravity field model via the direct approach," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 40, no. 14, pp. 3607–3612, 2013, doi: 10.1002/grl.50716.
- [12] R. Hollmann *et al.*, "The ESA climate change initiative: Satellite data records for essential climate variables," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 94, no. 10, pp. 1541–1552, 2013, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00254.1.
- [13] H. Ma, J. Zeng, N. Chen, X. Zhang, M. H. Cosh, and W. Wang, "Satellite surface soil moisture from SMAP, SMOS, AMSR2 and ESA CCI: A comprehensive assessment using global ground-based observations," *Remote Sens. Environ.*, vol. 231, no. April, p. 111215, 2019, doi: 10.1016/j.rse.2019.111215.
- [14] N. Horning, "Land cover classification methods, Version 1.0," *J. Plant Ecol.*, vol. 3, no. 1, p. 863, 2013, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [15] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering, "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation," *Prog. Rep. RSC 1978-1*, p. 112, 1973.
- [16] J. A. Gamon *et al.*, "NDVI canopy structure photosynthesis," vol. 5, no. 1, pp. 28–41, 1995.
- [17] D. J. Bonfil, "Wheat phenomics in the

- field by RapidScan: NDVI vs. NDRE,” *Isr. J. Plant Sci.*, vol. 64, no. 3–4, pp. 41–54, 2017, doi: 10.1080/07929978.2016.1249135.
- [18] O. Strashok, M. Ziemiańska, and V. Strashok, “Evaluation and Correlation of Sentinel-2 NDVI and NDMI,” no. August, 2022, doi: 10.12911/22998993/151884.
- [19] B. Boiarskii, “Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content,” *J. Mech. Contin. Math. Sci.*, vol. spl1, no. 4, 2019, doi: 10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003.
- [20] J. Jorge, M. Vallbé, and J. A. Soler, “Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images,” *Eur. J. Remote Sens.*, vol. 52, no. 1, pp. 169–177, 2019, doi: 10.1080/22797254.2019.1572459.
- [21] D. V Malakhov and N. Y. Tsyhuyeva, “Calculation of the biophysical parameters of vegetation in an arid area of south-eastern Kazakhstan using the normalized difference moisture index (NDMI),” *Cent. Asian J. Environ. Sci. Technol. Innov.*, vol. 1, no. 4, pp. 189–198, 2020, doi: 10.22034/CAJESTI.2020.04.01.
- [22] S. K. Grace Puyang Emang, Yoshiya Touge, “Evaluating Trees Crowns Damage for The 2017 Largest Wildfire In Japan Using Sentinel-2a NDMI,” pp. 6794–6797, 2020.
- [23] M. Boschetti, D. Stroppiana, P. A. Brivio, and S. Bocchi, “Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 30, no. 18, pp. 4643–4662, 2009, doi: 10.1080/01431160802632249.
- [24] T. Sakamoto, M. Yokozawa, H. Toritani, M. Shibayama, N. Ishitsuka, and H. Ohno, “A crop phenology detection method using time-series MODIS data,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 96, no. 3–4, pp. 366–374, 2005, doi: 10.1016/j.rse.2005.03.008.
- [25] S. Ibrahim, J. Kaduk, K. Tansey, H. Balzter, and U. M. Lawal, “Detecting phenological changes in plant functional types over West African savannah dominated landscape,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 42, no. 2, pp. 567–594, 2021, doi: 10.1080/01431161.2020.1811914.
- [26] D. S. Shumway, R.H., & Stoffer, *Time Series: A Data Analysis Approach Using R: A Data Analysis Approach Using R*. 2019.
- [27] T. Liu, X. Liu, M. Liu, and L. Wu, “Evaluating heavy metal stress levels in rice based on remote sensing phenology,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 3, 2018, doi: 10.3390/s18030860.
- [28] V. Songsom, W. Koedsin, R. J. Ritchie, and A. Huete, “Mangrove Phenology and Environmental Drivers Derived from Remote Sensing in Southern Thailand,” *Remote Sens.*, vol. 11, no. 8, p. 955, 2019, doi: 10.3390/rs11080955.