

PENGUNAAN INDEKS VEGETASI BERBASIS CITRA MULTISPEKTRAL DRONE UNTUK DETEKSI KONDISI PERTUMBUHAN PADI SAWAH

Application of Multispectral Drone-Based Vegetation Indices for Assessing Growth Conditions in Irrigated Paddy Rice

Almawardi Muhammad¹⁾, Wahyu Iskandar^{2,3)*}, Khursatul Munibah²⁾, dan Baba Barus^{2,3)}

¹⁾ PT Hatfiled Indonesia, Jl. Siliwangi No.46 Unit B5 - B7, Sukasari, Bogor Timur, Bogor City, West Java 16131

²⁾ Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian IPB, Jl. Meranti Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

³⁾ Pusat Pengkajian Perencanaan dan Pengembangan Wilayah (P4W) IPB, Kampus IPB Baranang Siang, Kota Bogor 16143

ABSTRACT

Monitoring on irrigated rice field is crucial to anticipate crop damage due to drought and flooding. However, conventional observation methods present complex challenges such as observer bias, point-based data, and limited observational coverage. Observations assisted by multispectral (MS) camera technology mounted on unmanned aerial vehicles (UAVs/drones) were able to address these issues but are still underdeveloped. This study reports the potential use of multispectral cameras mounted on a drone to assess the effects of drought and inundation on rice crops using vegetation indices such as the Normalized Difference Water Index (NDWI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Normalized Difference Red-Edge Index (NDRE). Observations were conducted three times during the vegetative (10 days after transplanting), generative (45 days after transplanting), and ripening (80 days after transplanting) stages on Ciherang and IR64 rice varieties. The rice plants were subjected to different irrigation treatments: drying, flooding, and control. The results showed that the NDRE index had a poor response to vegetation during the vegetative stage but improved during the generative and maturation stages. Meanwhile, the growth of weeds among the rice plants affected the NDVI and NDWI values, especially under dry conditions, making these indices less reliable in such scenarios.

Key words: drone, NDWI, NDVI, NDRE, rice monitoring

ABSTRAK

Deteksi kondisi tanaman padi sawah beririgasi penting dilakukan untuk mengantisipasi kegagalan panen akibat kekeringan dan banjir. Namun pengamatan kondisi padi sawah secara konvensional menyisakan permasalahan kompleks seperti bias pengamat, data berbasis titik, dan cakupan pengamat yang terbatas. Pengamatan dengan bantuan teknologi kamera multispektral (MS) menggunakan wahana tanpa awak (UAV/Drone) dapat membantu mengatasi masalah-masalah di atas, meskipun penerapannya belum banyak dikembangkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas tiga indeks vegetasi NDWI, NDVI, dan NDRE berbasis citra mutispektral berbasis *drone* dalam memantau kondisi tanaman padi serta mendeteksi dampak kekeringan dan penggenangan terhadap pertumbuhannya. Pengamatan dilakukan tiga kali pada fase vegetatif (10 HST, generatif (45 HST), dan pematangan (80 HST) terhadap padi varietas Ciherang dan IR64. Tanaman padi diberi perlakuan pengairan yaitu pengeringan, penggenangan, dan kontrol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa indeks NDRE memiliki respon terhadap vegetasi yang kurang baik pada pertumbuhan fase vegetatif, tetapi meningkat lebih baik pada fase pertumbuhan generatif dan pematangan. Sementara itu, pertumbuhan gulma di antara tanaman padi menunjukkan pengaruh terhadap nilai NDVI dan NDWI terutama di perlakuan kering, sehingga nilai tersebut kurang dapat diandalkan.

Kata kunci: drone, NDWI, NDVI, NDRE, pemantauan sawah,

PENDAHULUAN

Sebagai komoditas pangan utama di Indonesia, keberlanjutan produksi padi selalu menjadi sorotan. Produktivitas padi terutama padi irigasi sangat bergantung pada efektivitas manajemen budidaya, termasuk sistem pengairan yang diterapkan. Namun perubahan iklim dinilai akan menjadi ancaman serius terhadap pola distribusi dan ketersediaan air irigasi, yang berdampak langsung pada kesehatan tanaman dan hasil panen padi (Elliott *et al.*, 2013; Saud *et al.*, 2022). Oleh karena itu, pemantauan dini terhadap kondisi padi, baik akibat kekeringan maupun penggenangan, menjadi krusial dalam sistem pertanian berbasis irigasi. Pemantauan yang cepat dan akurat terhadap kondisi fisiologis padi dapat membantu dalam pengambilan

keputusan yang tepat guna meminimalkan risiko kerusakan dan kerugian hasil produksi padi.

Pergeseran kebutuhan data dari berbasis titik dalam bentuk tabular dan teks menuju data spasial berbasis area tidak terhindarkan untuk pengelolaan padi sawah yang lebih baik. Observasi lapangan manual, meskipun masih umum digunakan, memiliki sejumlah keterbatasan, yakni, bias antar pengamat, waktu yang terbatas, serta cakupan wilayah yang sempit (Setiyono *et al.*, 2018). Selain itu, pengamatan berbasis titik sering kali tidak representatif sehingga kurang efektif dalam mengidentifikasi pola spasial pertumbuhan tanaman padi.

Kemajuan teknologi penginderaan jauh dan pemrosesan citra digital telah mendorong penggunaan wahana tanpa awak (*Unmanned Aerial Vehicle/UAV* atau

*) Penulis Korespondensi: Telp. +6281282838217; Email: wahyuiskandar@apps.ipb.ac.id DOI: <http://dx.doi.org/10.29244/jitl.27.2.115-122>

“drone”) yang dilengkapi kamera multispektral untuk pemantauan pertanian presisi. Drone dengan kamera multispektral mampu menangkap data visual secara real-time dengan resolusi tinggi, bahkan di area yang sulit dijangkau (Zhang & Kovacs, 2012). Indeks vegetasi seperti *Normalized Difference Water indeks* (NDWI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), dan *Normalized Difference Red Edge* (NDRE) dapat diekstraksi dari citra multispektral untuk mengevaluasi status klorofil, struktur kanopi, serta kandungan air tanaman (Gitelson *et al.*, 2003; Gao, 1996). Meskipun teknologi ini telah berkembang pesat, pemanfaatannya pada padi sawah beririgasi di Indonesia, khususnya untuk mendeteksi efek perlakuan air secara spesifik pada berbagai fase pertumbuhan, masih belum banyak dilakukan.

Sejauh ini, sebagian besar penelitian mengenai pemanfaatan UAV dan citra multispektral di Indonesia masih berfokus pada analisis tingkat kehijauan pada tanaman hortikultura atau kelapa sawit menggunakan NDVI (Khuzaimah *et al.*, 2022; Saud *et al.*, 2022). Penelitian mengenai respon indeks NDRE dan NDWI terhadap perlakuan pengairan, seperti pengeringan dan penggenangan pada padi sawah masih sangat terbatas, terutama yang mencakup seluruh fase pertumbuhan dari tahap vegetatif hingga pematangan. Selain itu, penelitian yang membahas pengaruh gangguan biotik, seperti keberadaan gulma, terhadap akurasi indeks vegetasi tersebut juga masih sedikit.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas tiga indeks vegetasi NDWI, NDVI, dan NDRE berbasis citra multispektral berbasis drone dalam memantau kondisi tanaman padi serta mendeteksi dampak kekeringan dan penggenangan terhadap pertumbuhannya. Studi ini dilakukan terhadap dua varietas padi, yaitu Ciherang dan IR64, yang ditanam pada tiga sistem pengairan berbeda, serta diamati pada tiga fase pertumbuhan. Hasil penelitian tidak hanya diharapkan dapat memperkaya pengetahuan terkait aplikasi drone dan citra multispektral dalam praktik pertanian presisi, tetapi juga memberikan rekomendasi indeks vegetasi yang paling sesuai untuk masing-masing fase pertumbuhan padi di bawah berbagai perlakuan irigasi.

BAHAN DAN METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

Pengumpulan data lapang dilaksanakan selama bulan Agustus hingga Desember 2023 di lahan padi sawah seluas sekitar 1,300 m² yang terletak di daerah pertemuan dua jalur irigasi di Desa Ciherang, Kecamatan Ciomas, Kabupaten Bogor (Gambar 1). Penanaman dua varietas, yaitu IR64 (I) dan Ciherang (C), dengan tiga perlakuan, yaitu pengeringan (K), penggenangan (B), dan kontrol (T), sehingga menghasilkan 6 petak sawah yakni: Ciherang Basah (CB), Ciherang Kering (CK), Ciherang Kontrol (CT), IR64 Basah (IB), IR64 Kering (IK), dan IR64 Kontrol (IT).

Sumber air berasal dari jalur irigasi yang berada di bagian selatan area penelitian dan disambungkan kepada masing-masing petak perlakuan menggunakan pipa paralon. Perlakuan pengeringan pada petak CK dan IK dilakukan dengan cara menghentikan pengairan pada 37 hari setelah tanam (HST), setelah tanaman melalui masa vegetatif. Petak dengan perlakuan basah CB dan IB digenangi air

sejak awal pertumbuhan. Perlakuan di petak CT dan IT (kontrol) seperti pengairan, pengeringan, pembersihan gulma, dan pemupukan mengikuti Prosedur Operasional Standar Budidaya Sawah Kementerian Pertanian (Abdulrachman *et al.* 2011). Pembersihan gulma di petak pengeringan CK dan IK dilakukan 1 kali selama masa tanam padi, yaitu pada 29 HST untuk meminimalisasi gangguan gulma.

Akuisisi Citra Multispektral

Akuisisi citra multispektral dilakukan dengan menerbangkan drone DJI Inspire 1 yang dipasang kamera multispektral Parrot Sequoia (Parrot SA, France). Akuisisi dilakukan pada fase vegetatif (10 HST), generatif (45 HST), dan pematangan (80 HST), antara pukul 10:00 WIB hingga 12:00 WIB. Kamera Parrot Sequoia memiliki empat sensor multispektral, masing-masing *green* (530–570 nm), *red* (640–680 nm), *red-edge* (730–740 nm), dan *near infrared* (770–810 nm), serta satu kamera RGB yang juga dilengkapi dengan sensor sinar matahari sebagai alat kalibrasi cahaya radiometrik. Sebagai tahap persiapan, rute penerbangan drone direncanakan menggunakan perangkat lunak *Mission Planner* (Ardu Pilot, RSSA) dengan penyetelan *endlap* dan *sidelap* minimal 80%, kecepatan *drone* 3 ms⁻¹ pada ketinggian 30 meter dari permukaan tanah. Eksekusi rencana terbang dilakukan melalui aplikasi *Flytichi* (VC Technology Ltd., HK) mengikuti metode dari Okamoto *et al.* (2017). Sebelum drone diterbangkan, dilakukan pemasangan *Ground Control Point* (GCP) target menggunakan GPS Garmin 62s (Garmin, USA) dan pengambilan foto panel kalibrasi reflektan. Kedua langkah *pre-flight* tersebut dilakukan untuk proses koreksi geometrik dan radiometrik.

Akuisisi citra memerlukan waktu sekitar 15 menit untuk mencakupi area pengamatan. Output citra multispektral berformat *.tif* dan berjumlah sekitar 350 foto per sensor kamera. Foto-foto yang terpisah dan tersebar pada seluruh jalur terbang drone digabungkan melalui proses *mosaicking*, yaitu proses penjahitan foto-foto yang saling tumpang tindih menggunakan aplikasi Pix4DMapper (v. 4.9.0, Pix4D, Prilly, Switzerland), yang menghasilkan ortomosaik dan model permukaan digital. Koreksi radiometrik dilakukan pada tahap tersebut, dengan menginput foto panel reflektan dan faktor koreksi reflektan sebelum proses *mosaicking*. Peta yang dihasilkan berupa peta reflektan (*surface reflectance map*) dari setiap sensor kamera. Koreksi geometrik dilakukan setelah proses *mosaicking* pada aplikasi Quantum GIS (QGIS) (v. 3.22.12, OSGeo, Beaverton, OR, USA), menggunakan fitur *georeferencing* dengan titik GCP target sebagai titik pengait.

Analisis Data

Indeks vegetasi yang digunakan pada penelitian ini merupakan indeks vegetasi yang diolah menggunakan empat band yang tersedia pada kamera multispektral Parrot Sequoia, yaitu NDWI, NDVI, dan NDRE.

NDWI digunakan untuk memantau kondisi air pada badan air (Zhou *et al.*, 2017). Nilai NDWI pada penelitian diperoleh menggunakan kombinasi reflektan band green dan NIR. NDWI dihitung dengan membagi selisih antara

band green dan NIR dengan penjumlahan antara keduanya (McFeeters, 1996). Kriteria interpretasi genangan mengikuti Boschetti *et al.* (2014) pada Tabel 1.

$$NDWI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{NIR}}{\rho_{GREEN} + \rho_{NIR}}$$

ρ_{GREEN} : nilai reflektan pada panjang gelombang *green*

ρ_{NIR} : nilai reflektan pada panjang gelombang *near infrared* (NIR)

NDVI merupakan indeks vegetasi yang digunakan sebagai indikator kesehatan dan kebugaran tanaman. Pengolahan peta NDVI melibatkan reflektan pada sensor (*band*) multispektral *red* dan *near infrared* (NIR). Menurut Yengoh *et al.* (2015), kandungan klorofil dan proses fotosintesis tanaman memiliki kecenderungan untuk menyerap cahaya pada panjang gelombang merah. Sementara itu, struktur seluler internal tanaman memiliki kecenderungan untuk merefleksikan cahaya pada panjang gelombang NIR. Tanaman yang terindikasi sehat memiliki nilai reflektan tinggi pada gelombang NIR dan rendah pada gelombang merah. Nilai NDVI pada tanaman yang terindikasi sehat akan mendekati 1, sedangkan tanaman yang sedang mengalami gangguan pertumbuhan menunjukkan nilai yang mendekati 0. NDVI merupakan rasio dari band NIR dikurangi band merah dan penjumlahan antara kedua band tersebut (Rouse *et al.*, 1973). Kriteria interpretasi kesehatan padi NDVI mengikuti Islam *et al.* (2018) pada Tabel 2.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

ρ_{RED} : nilai reflektan pada panjang gelombang *red*

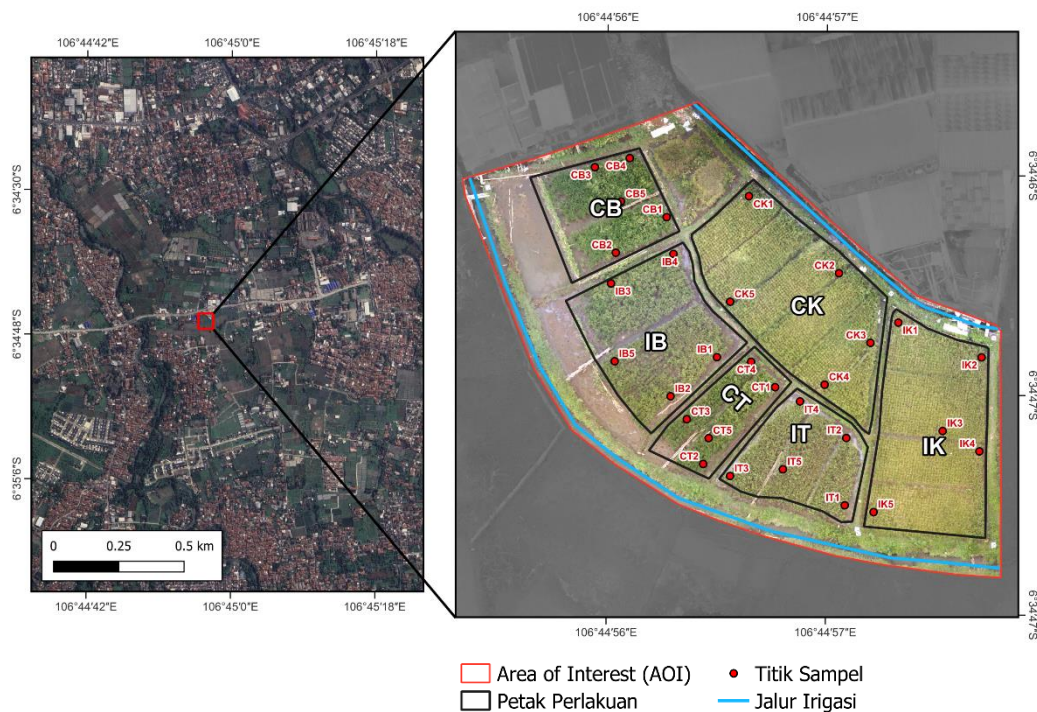
ρ_{NIR} : nilai reflektan pada panjang gelombang *near infrared* (NIR)

NDRE merupakan indeks yang memanfaatkan band *red-edge* (REG) dan NIR. Serupa dengan NDVI, NDRE dapat mengidentifikasi tanaman yang mengalami gangguan pada pertumbuhannya. Perbedaannya adalah gelombang *red-edge* yang digunakan saat pengolahan nilai NDRE merupakan gelombang yang sensitif terhadap kandungan klorofil pada daun tanaman sehingga tidak begitu efektif digunakan pada fase awal pertumbuhan tanaman yang belum banyak mengandung klorofil (Boiarskii & Hasegawa, 2019). NDRE merupakan rasio antara band NIR dikurangi red edge dengan penjumlahan antara keduanya (Tucker, 1979). Kriteria interpretasi kesehatan padi NDRE mengikuti Haboundane *et al.* (2004) pada Tabel 3:

$$NDRE = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{REG}}{\rho_{NIR} + \rho_{REG}}$$

ρ_{RED} : nilai reflektan pada panjang gelombang *red-edge* (REG)

ρ_{NIR} : nilai reflektan pada panjang gelombang *near infrared* (NIR)



Gambar 1. *Area of interest* dan rancangan petak perlakuan serta titik sampel penelitian. Perlakuan diantaranya pengeringan (K), penggenangan (B), dan kontrol (T) dilakukan sehingga menghasilkan 6 petak sawah yakni: Ciherang Basah (CB), Ciherang Kering (CK), Ciherang Kontrol (CT), IR64 Basah (IB), IR64 Kering (IK), dan IR64 Kontrol (IT). Titik-titik berwarna merah merupakan titik permanen pemantauan kondisi padi secara visual.

Tabel 1. Kriteria interpretasi genangan padi mengikuti Boschetti *et al.* (2014)

Kondisi Sawah	Rentang NDWI	Keterangan
Tergenang penuh (air bebas)	0.4 – < 0.6	Genangan air jelas, minim vegetasi
Tergenang sebagian	0.2 – < 0.4	Ada air dan vegetasi muda
Tidak tergenang / vegetatif	< 0.2 atau negatif	Tutupan vegetasi dominan, tidak ada genangan air

Tabel 2. Kriteria interpretasi kesehatan padi modifikasi dari Marsutijullah *et al.*, (2023)

Rentang NDVI	Interpretasi Kesehatan Padi
< 0.2	Tanpa vegetasi / rusak berat
0.2 – < 0.4	Padi sangat stres / tumbuh buruk
0.4 – < 0.6	Pertumbuhan sedang / mulai pulih
0.6 – < 0.8	Padi sehat / optimal vegetatif
>= 0.8	Vegetasi sangat rimbun / puncak kehijauan

Tabel 3. Kriteria interpretasi kesehatan padi NDRE mengikuti Haboundane *et al.* (2004)

Rentang NDRE	Interpretasi Kesehatan Padi
< 0.2	Tanaman rusak / stres berat
0.2 – < 0.35	Awal pertumbuhan / stres ringan
0.35 – < 0.5	Padi cukup sehat
>= 0.5	Padi sangat sehat / klorofil tinggi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penggunaan NDWI

Citra NDWI pada fase vegetatif menunjukkan perbedaan warna yang jelas antara petak perlakuan kering dengan petak perlakuan penggenangan dan kontrol. Pada Gambar 2, genangan air dapat diidentifikasi melalui variasi nilai NDWI, dimana petak perlakuan kering (CK dan IK) menunjukkan nilai NDWI rendah (<0) yang mencerminkan terbatasnya genangan air dan mulai munculnya vegetasi. Sebaliknya, genangan air terdeteksi di antara petak CB dan IB dengan NDWI >0. Kemampuan NDWI dalam mendeteksi keberadaan dan kedalaman air dapat dimanfaatkan dalam perencanaan pengairan pada suatu lahan pertanian (Guermazi *et al.*, 2016).

NDWI dapat mendeteksi perubahan kondisi air pada petak perlakuan kering seiring pertumbuhan fase. Kondisi petak terkering dapat diamati pada Gambar 2b (warna merah pekat), yaitu saat fase generatif. Petak perlakuan kering pada fase pematangan masih menunjukkan keberadaan air walaupun sedikit. Masuknya air pada fase tersebut diduga akibat hujan yang turun 2 hari sebelum pengamatan, yaitu 78 HST dan mulai berkurangnya kerapatan tanaman akibat pertumbuhan malai.

Penggunaan NDVI

Pola distribusi NDVI pada tiga fase pertumbuhan padi, yaitu vegetatif (10 HST), generative (45 HST), dan pematangan (80 HST) disajikan pada Gambar 3. Pada fase vegetatif, citra NDVI didominasi oleh warna kemerahan yang mencerminkan nilai NDVI yang rendah. Hal ini dikarenakan tanaman padi masih berukuran kecil dan belum memiliki kandungan klorofil yang tinggi. Pada fase ini, hanya tanaman padi pada petak perlakuan kering, CK dan IK yang teridentifikasi oleh indeks. Keberadaan air pada petak tersebut juga memiliki peran dalam membedakan vegetasi dengan objek lainnya.

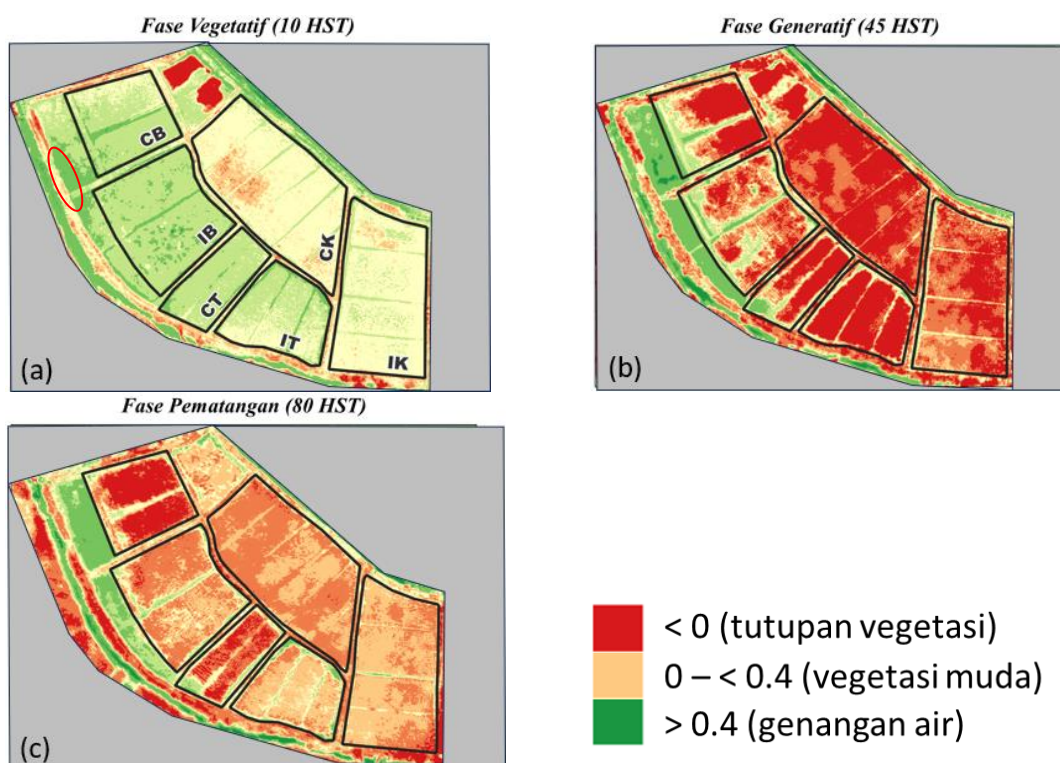
Berdasarkan pengamatan lapang, jumlah anakan meningkat memasuki fase generatif sehingga kerapatan vegetasi bertambah. Peningkatan kerapatan vegetasi ditunjukkan oleh nilai NDVI yang lebih tinggi, terutama pada peta CB, CT, dan IT seperti terlihat pada Gambar 3b. Sebaliknya, petak perlakuan kering (CK dan IK) menunjukkan gejala stres layu dan menguning (Gambar 5c) pada sebagian besar petak, khususnya pada tanaman yang berjauhan dengan jalur irigasi.

Pada fase pematangan, daun tanaman padi mulai menguning sehingga berdampak pada penurunan nilai indeks vegetasi. Berdasarkan Gambar 2c, dua petak perlakuan yang masih memiliki nilai NDVI tinggi adalah CB dan CT, yang ditanami varietas Ciherang dan menunjukkan toleransi yang baik terhadap penggenangan. Sebaliknya, petak IB dan IT yang ditanami varietas IR64 menunjukkan nilai NDVI lebih rendah. Menurut penelitian Ikhwan (2013), padi varietas IR64 sub 1 (Inpari 5) memiliki performa yang lebih buruk daripada varietas Ciherang pada kondisi penggenangan. Pengamatan lapang juga menunjukkan bahwa petak IB dan IT cenderung memiliki bulir yang kosong dan daun tanaman yang kerdil. Selain faktor varietas, gangguan biotik seperti hama dan penyakit termasuk keong sawah, burung, walang sangit, dan penyakit hawar daun bakteri pada akhir fase pertumbuhan turut berkontribusi terhadap penurunan kondisi tanaman (Gambar 5).

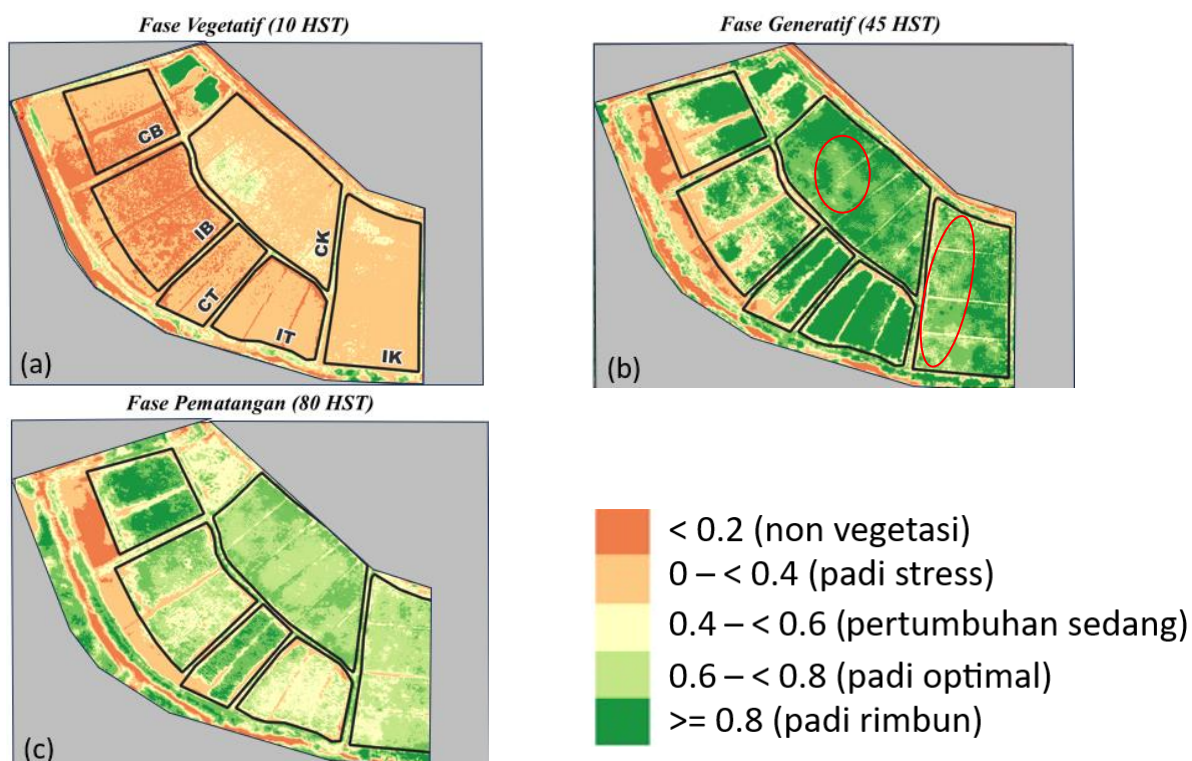
Penggunaan NDRE

Gambar 4 menyajikan visualisasi indeks NDRE dengan perbedaan nilai indeks yang rendah dibandingkan dengan NDVI dan NDWI. Rendahnya variasi nilai ini disebabkan oleh sempitnya rentang nilai NDRE, sehingga harus dilakukan analisis yang lebih. Rentang nilai yang sempit dapat menyebabkan misklasifikasi pada citra indeks, seperti terlihat pada fase generatif 45 HST dalam Gambar 4b, dimana area berair di sekitar petak CB dan IB diklasifikasikan ke dalam kelas yang sama dengan tanaman padi yang sedang mengalami stres. Tanaman padi yang sedang mengalami stres ditunjukkan oleh warna kekuningan, yang juga teridentifikasi pada petak perlakuan kering, khususnya IK.

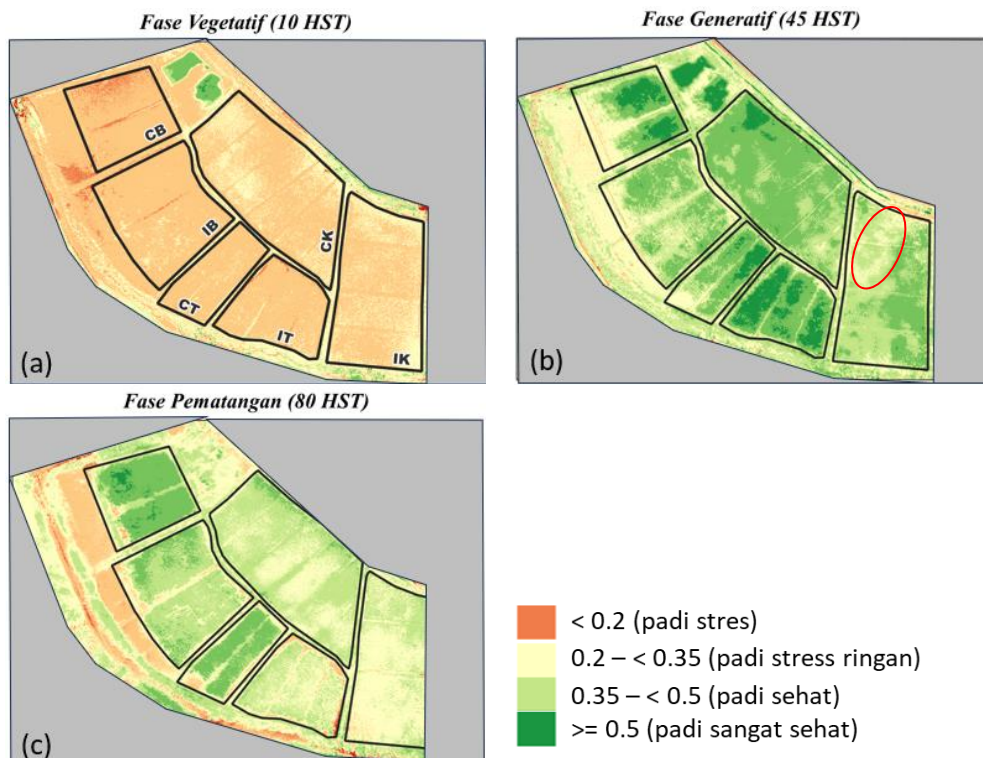
Kemampuan NDRE dalam mendeteksi gejala stres tanaman lebih baik dibandingkan NDVI berdasarkan nilai indeks yang diteliti. Selama tiga fase pertumbuhan padi, tanaman yang terindikasi stres lebih mudah dibedakan pada citra NDRE dibandingkan citra indeks lainnya. Bahkan, petak perlakuan CB, CT, dan IT pada fase generatif yang tampak memiliki pertumbuhan optimal menurut indeks NDVI namun, tampak memiliki gejala stres pada beberapa titik jika diamati melewati peta indeks NDRE (Gambar 4b). Hal ini mengindikasikan bahwa kerapatan vegetasi mempengaruhi akurasi indeks NDVI dalam mendeteksi tanaman yang terindikasi stres.



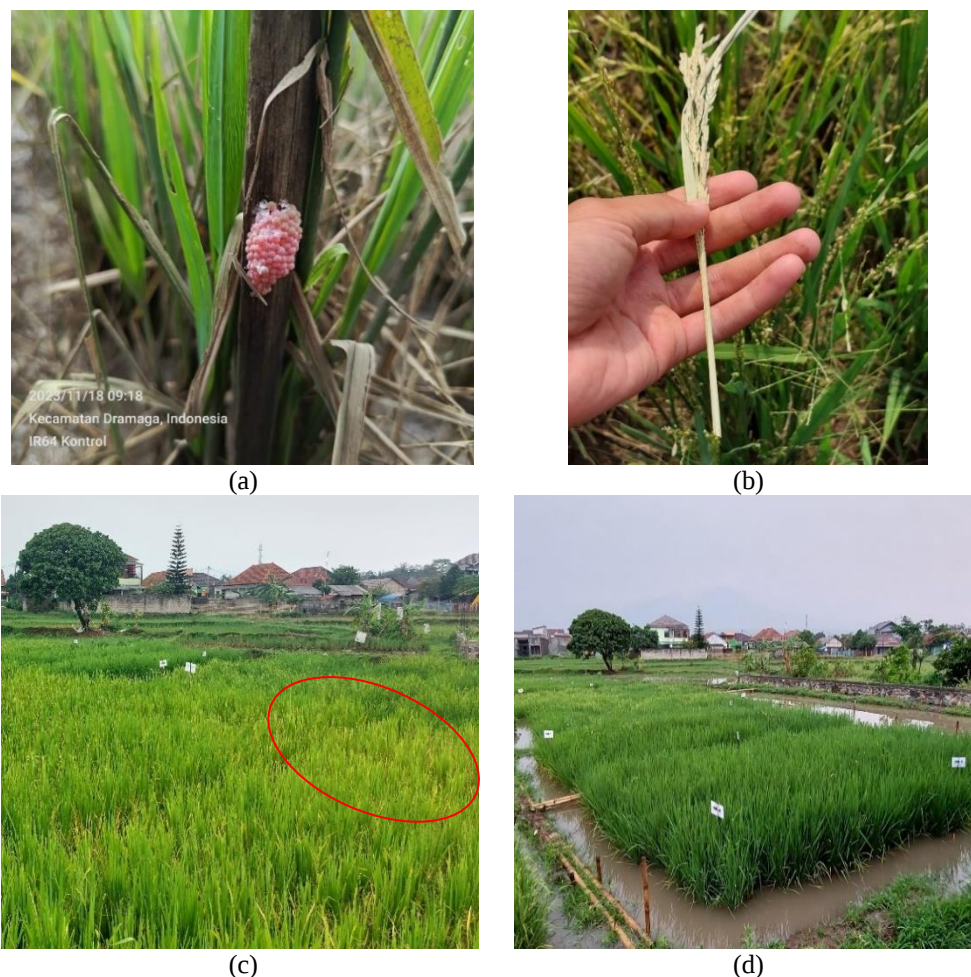
Gambar 2. Pola NDWI pada fase vegetatif (a), generatif (b), dan pematangan (c) pertumbuhan padi. Rentang kondisi sawah < 0, tutupan vegetasi/tidak terdeteksi genangan, 0.03 – 0 : vegetasi muda, > 0: tergenang



Gambar 3. Pola NDVI pada fase vegetatif (a), generatif (b), dan pematangan (c) pertumbuhan padi.



Gambar 4. Pola indeks NDRE pada fase vegetatif (a), generatif (b), dan pematangan (c) pertumbuhan padi.



Gambar 5. Dokumentasi lapang (a) pertumbuhan telur hama keong sawah pada petak IR64 kontrol pada fase pematangan (b) hasil kerusakan hama keong sawah pada petak IR64 kontrol pada fase pematangan (c) petak perlakuan Ciherang-Kering (CK) pada vegetatif memasuki fase generatif (d) petak perlakuan Ciherang-Basah (CB) pada vegetatif memasuki generatif. Lingkaran warna merah pada Gambar (c) menunjukan kerusakan akibat kekeringan.

SIMPULAN

Penggunaan indeks vegetasi seperti NDWI, NDVI, dan NDRE yang diperoleh dari akuisisi sensor multispektral dapat digunakan dalam memantau kondisi pertumbuhan padi pada berbagai fase dan kondisi pengairan. NDWI efektif untuk mendeteksi keberadaan vegetasi dan kondisi tergenang, membedakan antara petak tergenang dan kering, serta mengamati dinamika genangan sepanjang fase pertumbuhan. NDVI mampu menunjukkan perkembangan vegetasi dan mendeteksi area tanaman stres, namun sensitivitasnya terbatas pada kondisi vegetasi yang sangat rapat. Pola pertumbuhan padi relatif serupa jika diamati melalui indeks NDVI dan NDWI. Perbedaannya terletak pada pengamatan fase vegetatif karena NDWI memiliki keunggulan dalam mendeteksi air. Sementara itu, NDRE menunjukkan keunggulan dalam mengidentifikasi gejala stres tanaman, bahkan pada petak yang tampak sehat menurut NDVI, meskipun visualisasinya kurang kontras akibat rentang nilai yang sempit. NDRE bekerja efektif hanya pada fase pertumbuhan menengah hingga akhir, tetapi memiliki kemampuan untuk mendeteksi tanaman stres lebih baik dibandingkan NDVI karena tidak terpengaruh oleh faktor kerapatan vegetasi. Oleh karena itu, integrasi ketiga indeks ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap kondisi air dan kesehatan tanaman padi dalam sistem pertanian berbasis lahan sawah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih atas dukungan dari pendanaan skema riset fundamental BIMA 2023.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrachman, Sarlan, S. Karsono, M.Y. Samaullah, H. Sembiring, B.S. Efendi, A. Dirdjoseputro dan E.S. Noor. 2011. *Prosedur Operasional Standar Budi Daya Padi Sawah*. Balai Besar Penelitian Tanaman Padi Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Balai Penelitian dan pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian.
- Boiarskii, B. and H. Hasagewa. 2019. Comparison of NDVI and NDRE indices to detect differences in vegetation and chlorophyll content. *J. Mech. Cont. & Math. Sci.*, 4(1): 20–29. <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
- Elliott, J., D. Deryng, C. Müller, K. Frieler, M. Konzmann, D. Gerten, M. Glotter, M. Flörke, Y. Wada, N. Best, S. Eisner, B.M. Fekete, C. Folberth, I. Foster, S.N. Gosling, I. Haddeland, N. Khabarov, F. Ludwig, Y. Masaki, S. Olin, C. Rosenzweig, A.C. Ruane, Y. Satoh, E. Schmid, T. Stacke, Q. Tang and D. Wisser. 2013. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 111(9): 3239–3244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110>
- Gao, B.C. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gitelson, A.A., Y.J. Kaufman and M.N. Merzlyak. 2003. 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)
- Guerhazi, E., M. Bouaziz and M. Zairi. 2016. Water irrigation management using remote sensing techniques: a case study in Central Tunisia. *Environmental Earth Science*, 75(202). <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4804-x>
- Haboudane, D., J.R. Miller, E. Pottey, P.J. Zarco-Tejada and I.B. Strachan. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90(3): 337–352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>
- Ikhwan. 2013. Ketahanan varietas padi toleran rendaman dan responnya terhadap pemupukan. *Jurnal Lahan Suboptimal*, 2(1): 1–13. <https://doi.org/10.33230/JLSO.2.1.2013.30>
- Khuzaimah, Z., N.M. Nawati, S.N. Adam, B. Kalantar, O.J. Emeka and N. Ueda. 2022. Application and Potential of Drone Technology in Oil Palm Plantation: Potential and Limitations. *Journal of Sensors*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5385505>
- Madiyanto, Rahmawaty and H. Santoso. 2023. Mapping of Leaf Nutrient Content Using Multispectral Imagery in Oil Palm Based on Unmanned Aerial Vehicles. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 31(2): 124–138. <https://doi.org/10.22302/iopri.jur.jpks.v31i2.236>
- Marsujitullah, M., D.A. Kaligis, and F.X. Manggau. 2023. Health Analysis of Rice Plants Based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Value in Image of Unmanned Aircraft (Case Study of Merauke - Papua Selatan). *Engineering and Technology Journal*, 8(2): 1986–1991. <https://doi.org/10.47191/etj/v8i2.04>
- Okamoto, Y., C. McCarthy, A. Mahinda, W. Iskandar, A.K. Mishra and S. Funakawa. 2017. Applicability of the Multicopter (Unmanned Aerial Vehicle) and Aerial Photograph in the Kyoto University Experimental Forest. [Poster]. International Symposium on Global Environmental Studies Education and Research in Asia. November 13–15, 2016, Bangkok, Thailand.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell and D.W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ.*, 351:309.
- Saud, S., D. Wang, S. Fahad, H.F. Alharby, A.A. Bamagoos, A. Mjrashi, N.M. Alabdallah, S.S. AlZahrani, H. AbdElgawad, M. Adnan, R.Z. Sayyed, S. Ali and S. Hassan. 2022. Comprehensive Impacts of Climate Change on Rice Production and Adaptive Strategies in China. *Front. Microbiol.* 13: 926059. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.926059>

- Setiyono, T.D., et al. 2018. Rice Crop Manager: An integrated decision support system for site-specific nutrient management. *Field Crops Research*, 220, 12–21.
- Vergara, B.S. 1994. *A Farmer's Primer on Growing Rice*. IRRI. Manila (PH).
- Yengoh, G.T., D. Dent, L. Olsson, A.E. Tengberg, C.J. Tucker III. 2015. *Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales*. Springer. New York(AS).
- Zhang, C. and J.M. Kovacs. 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>
- Zhou, Y., J. Dong, X. Xiao, T. Xiao, Z. Yang, G. Zhao, Z. Zou and Y. Qin. 2017. Open surface water mapping algorithms: a comparison of water-related spectral indices and sensors. *Water*, 9(4): 256-272. <https://doi.org/10.3390/w9040256>
-