

Analisis Tingkat Stres Mangrove Menggunakan Pendekatan Indeks NDRE dan Sensor SPAD di Kawasan Hutan Lindung Air Telang

Analysis of Mangrove Stress Levels Using the NDRE Index and SPAD Chlorophyll Sensor in the Air Telang Mangrove Reserve

Efan Fatra Jaya¹⁾, Muhammad Rendana^{1,2)*}, Febrian Hadinata³⁾

¹⁾Program Studi Magister Pengelolaan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

²⁾Program Studi Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

³⁾Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Indralaya, Indonesia

*Penulis korespondensi: muhrendana@ft.unsri.ac.id

Received August 2025, Accepted September 2025, Published September 2025

ABSTRAK

Pemantauan kesehatan mangrove penting untuk mengidentifikasi stres akibat tekanan lingkungan dan manusia, seperti salinitas, sedimentasi, perubahan hidrologi, dan pembukaan lahan di sekitar ekosistem mangrove. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemetaan tingkat stres mangrove di Hutan Lindung Air Telang dengan mengintegrasikan data penginderaan jauh melalui analisis indeks NDRE (*Normalized Difference Red Edge*) dan SPAD (*Soil Plant Analysis Development*). Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan analisis NDRE berbasis data penginderaan jauh menggunakan ArcGIS & pengukuran SPAD. Hasil analisis indeks NDRE menunjukkan kondisi vegetasi mangrove didominasi oleh kategori sehat seluas 2.300,61 ha (75,85%), dengan luasan sangat sehat 2,29 ha (0,08%), stres sedang 639,14 ha (21,07%), dan sangat stres/non-vegetasi 91,10 ha (3,00%). Temuan ini menunjukkan bahwa sebagian besar mangrove berada dalam kondisi baik, sementara hanya sebagian kecil yang terdeteksi mengalami stres. Korelasi antara SPAD dan NDRE menunjukkan hasil uji hubungan positif yang kuat dengan koefisien $r = 0,748$ ($p < 0,001$), koefisien determinasi (R^2) SPAD dan NDRE yaitu 0,560, sehingga NDRE dapat merepresentasikan kandungan klorofil pada vegetasi mangrove pengganti pengukuran lapang menggunakan SPAD. Hasil uji menunjukkan bahwa pengukuran SPAD dan indeks vegetasi dapat menjadi alat yang efektif untuk mengukur kesehatan atau stres vegetasi mangrove.

Kata kunci: NDRE, SPAD, Indeks Vegetasi, Stres Mangrove, Penginderaan Jauh

ABSTRACT

Monitoring mangrove health is essential for identifying stress caused by environmental and anthropogenic pressures, such as salinity, sedimentation, hydrological changes, and land clearing around the mangrove ecosystem. This study aims to map mangrove stress levels in the Air Telang Mangrove Reserve by integrating remote sensing data through the analysis of the NDRE (*Normalized Difference Red Edge*) index and SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) measurements. A quantitative approach was applied using NDRE analysis from satellite imagery processed with ArcGIS and in-situ SPAD chlorophyll measurements. The NDRE analysis results indicate that mangrove vegetation is predominantly classified as healthy, covering an area of 2,300.61 ha (75.85%), with 2.29 ha (0.08%) categorized as very healthy, 639.14 ha (21.07%) under moderate stress, and 91.10 ha (3.00%) classified as highly stressed or non-vegetated. These findings suggest that the majority of mangroves are in good condition, while only a small portion has been detected as experiencing stress. The correlation between SPAD and NDRE values showed a strong positive relationship with a correlation coefficient of $r = 0.748$ ($p < 0.001$) and a coefficient of determination (R^2) of 0.560. These results indicate that the NDRE index can represent chlorophyll content in mangrove vegetation and serve as an alternative to SPAD-based field measurements. Therefore, both SPAD measurements and NDRE vegetation indices can be considered effective tools for assessing the health or stress levels of mangrove ecosystems.

Keywords: NDRE, SPAD, Vegetation Index, Mangrove Stress, Remote Sensing

PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove memainkan peran penting dalam menjaga stabilitas wilayah pesisir dari sudut

pandang ekologis, ekonomis, dan perlindungan pantai. Mangrove adalah rumah bagi biota laut, penyerap karbon, dan penyangga abrasi alami (Idrus

et al., 2018; Sholiqin et al., 2022). Namun, ekosistem ini telah rusak sebagai akibat dari tindakan manusia seperti alih fungsi lahan, penebangan liar, polusi, dan perubahan iklim, yang telah menyebabkan permukaan air laut menjadi lebih tinggi dan mengakibatkan peningkatan salinitas (Rosalina et al., 2024). Faktor-faktor tersebut menjadi pemicu salah satu penyebab tingkat stres pada mangrove semakin tinggi bahkan hilangnya vegetasi mangrove. Oleh karena itu, kondisi vegetasi mangrove harus dipantau secara menyeluruh dan berkelanjutan untuk membantu konservasi. Salah satu indikator penting untuk mengetahui kondisi fisiologis vegetasi adalah tingkat stres, yang ditunjukkan oleh penurunan kandungan klorofil dan kehijauan tajuk tanaman.

Teknologi penginderaan jauh menjadi cara yang efektif untuk menangani situasi seperti ini dalam hal mendeteksi stress pada mangrove (Maurya et al., 2021). Studi sebelumnya berkaitan dengan teknologi penginderaan jauh lebih banyak berfokus pada analisis kerapatan dan luasan, sementara penelitian yang berfokus pada kesehatan dan tingkat stres mangrove masih terbatas bahkan hanya terpaku pada analisis tertentu saja seperti pemanfaatan evaluasi kesehatan mangrove dengan analisis menggunakan indeks NDRE (*Normalized Difference Red Edge*) saja. Indeks NDRE berguna untuk mengidentifikasi kandungan klorofil dan tingkat stres fisiologis tanaman, terutama pada fase stres awal, yang dibuat berdasarkan pantulan cahaya pada spektrum merah dan red-edge (Boiarskii, 2019) (Fatmawati & Ruchlihadiana, 2024). Selain itu, Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa pengukuran klorofil dengan alat SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) dapat menunjukkan kondisi fisiologis tanaman di lapangan secara langsung (Zhen et al., 2021). Dalam konteks ini, analisis kesehatan mangrove melalui NDRE dan SPAD diposisikan sebagai proksi kuantitatif untuk mendeteksi tingkat stres, karena penurunan kondisi kesehatan vegetasi umumnya merupakan manifestasi dari tekanan lingkungan (Liu & Zhu, 2024). Namun demikian, interpretasi nilai klorofil perlu dilakukan dengan hati-hati, mengingat adanya perbedaan anatomi daun "*sun leaves*" dan "*shade leaves*" pada mangrove yang secara alami memiliki kandungan klorofil berbeda dan tidak selalu mencerminkan kondisi stres fisiologis (Nobel, 1976; Thérroux-Rancourt et al., 2017).

Pendekatan yang menggabungkan analisis indeks NDRE dengan data lapangan, seperti nilai SPAD, diperlukan guna meningkatkan akurasi dalam mengidentifikasi tingkat stres pada mangrove. Nilai SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) merupakan indikator kandungan klorofil daun yang diukur secara non-destruktif. Kandungan klorofil berhubungan erat dengan kapasitas fotosintesis, sehingga dapat digunakan untuk menilai tingkat kesehatan fisiologis vegetasi, termasuk mangrove (Hawkins et al., 2009). Pada penelitian ini, pengukuran SPAD digunakan sebagai data lapangan untuk memvalidasi indeks vegetasi berbasis citra, yaitu NDRE, yang merepresentasikan kondisi kesehatan mangrove

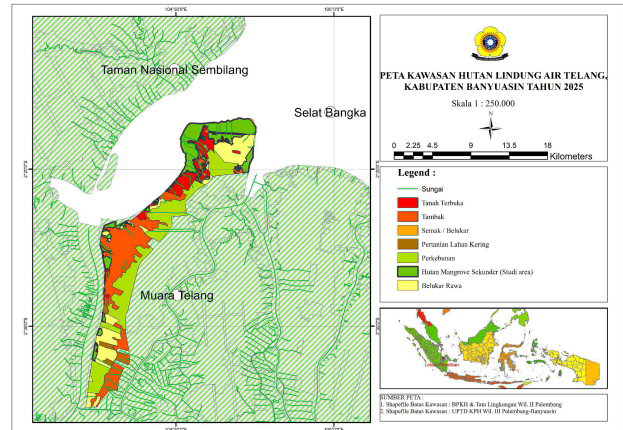
secara spasial. Penggabungan data NDRE dan SPAD dilakukan untuk memperoleh informasi yang lebih akurat tentang tingkat stres pada mangrove, karena masing-masing metode memiliki keterbatasan jika digunakan sendiri. Adapun penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan memetakan tingkat stres vegetasi mangrove di Kawasan Hutan Lindung Air Telang dengan pendekatan data indeks NDRE dan SPAD. Kawasan Hutan Lindung Air Telang dipilih sebagai lokasi penelitian karena merupakan salah satu ekosistem mangrove penting di Sumatera Selatan yang mengalami tekanan ekologis akibat aktivitas antropogenik dan perubahan lingkungan (Eddy & Mutiara, 2018). Hasilnya diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah untuk membuat kebijakan yang mempertahankan dan mengawasi vegetasi mangrove secara berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan untuk mengidentifikasi tingkat stres mangrove menggunakan metode kuantitatif yang melibatkan analisis penginderaan jauh dengan menggabungkan indeks NDRE (*Normalised Difference Red Edge*) dan pengukuran SPAD (*Soil Plant Analysis Development*), yang diolah dengan ArcGIS 10.8. Data citra diperoleh dari situs web Copernicus tahun terbaru yaitu 2025, data pendukung analisis area studi menggunakan peta administratif dan data tutupan lahan yang diperoleh dari Balai Pemantapan Kawasan Hutan Wilayah II Palembang & UPTD KPH Wilayah III Palembang-Banyuasin, Sumatera Selatan Tahun 2024.

Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan di Kawasan Hutan Lindung Air Telang, yang merupakan salah satu kawasan hutan mangrove UPTD KPH Wilayah III Palembang-Banyuasin, Sumatera Selatan Gambar 1. Berdasarkan data Neraca Sumber Daya Hutan (NSDH), kawasan Hutan Lindung Air Telang memiliki luas total 10.737,07 hektar dengan komposisi penutupan lahan berupa tanah terbuka, tambak, semak/belukar, pertanian lahan kering, perkebunan, hutan mangrove sekunder, dan belukar rawa. Dari total luasan tersebut, penelitian ini difokuskan pada ekosistem hutan mangrove sekunder dengan luas ± 3.000 hektar sebagai area kajian utama. Pemilihan kawasan mangrove dilakukan karena ekosistem ini memiliki peran ekologis penting dalam menjaga stabilitas pesisir, fungsi penyerapan karbon, serta sebagai habitat biota akuatik. Selain itu, hutan mangrove di lokasi penelitian menunjukkan adanya tekanan lingkungan dan perubahan penggunaan lahan sehingga relevan untuk dianalisis kondisi fisiologis dan ekologisnya. Koordinat lokasi penelitian adalah $2^{\circ}25'40.8''$ S, $104^{\circ}45'25.7''$ E. Kawasan Hutan Lindung Air Telang didominasi oleh jenis mangrove seperti *Rhizophora spp.*, *Avicennia spp.*, dan *Bruguiera spp.* yang umum ditemukan di ekosistem pesisir Sumatera Selatan.



Gambar 1. Peta Kawasan Hutan Lindung Air Telang

Secara biofisik, Kawasan Hutan Lindung Air Telang berada pada ketinggian rendah dengan elevasi 0–7 meter di atas permukaan laut dan kemiringan lahan relatif landai 0–8% (Eddy et al., 2017). Berdasarkan pengolahan data FKlim71-120 di Stasiun Klimatologi Sumatera Selatan, kondisi iklim setempat pada Mei 2025 menunjukkan temperatur rata-rata 28,0°C dengan kisaran maksimum 32,7°C dan minimum 24,8°C, serta kelembapan relatif rata-rata sebesar 87%. Berdasarkan Dokumen Data Umum KPH Wilayah III Palembang–Banyuasin, Provinsi Sumatera Selatan tahun 2024, geografis wilayah ini terletak di sekitar muara Sungai Telang yang bermuara ke Selat Bangka (Gambar 1), dan tanahnya berlumpur dengan banyak bahan organik. Kawasan ini meliputi hutan mangrove sekunder, belukar rawa, Semak atau belukar, tanah terbuka, tambak, perkebunan serta permukiman lahan kering.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian meliputi komputer atau laptop, software pengelola citra (Arcgis 10.8), alat GPS (*global positioning system*), SPAD meter (*soil plant analysis development*), kamera digital dan alat lapang berupa peralatan survei dan pengambilan sampel. Sedangkan, bahan yang digunakan berupa data primer terdiri dari data spasial citra Sentinel-2A Tile T48MVC Level-2A dengan resolusi 10 m yang diakuisisi pada tanggal 16 April 2025 dalam sistem proyeksi UTM zona 48S (EPSG:32748) yang diunduh pada laman web Copernicus, Peta wilayah studi berupa peta administrasi dan tutupan lahan dari lokasi penelitian (sumber peta Balai Pemantapan Kawasan Hutan Wilayah II Palembang & UPTD KPH Wilayah III Palembang-Banyuasin, Sumatera Selatan Tahun 2024). Data pengukuran SPAD diukur dari sampel mangrove yang di ambil secara acak sebanyak 30 titik.

Prosedur Penelitian

Penelitian dimulai dengan mengumpulkan data citra satelit pada laman Copernicus untuk menentukan nilai NDRE area mangrove yang dianalisis menggunakan Arcgis 10.8, dengan persentase

tutupan awan <10%. Selanjutnya, pengukuran lapangan dilakukan pada daun mangrove di lokasi yang telah ditentukan menggunakan SPAD meter. Pemilihan sampel daun mangrove diukur secara acak pada 30 titik (Tabel 1), sampel daun diukur dari cabang lateral yang terletak pada pertengahan tinggi pohon, dimana setiap cabang diambil satu helai daun yang berasal dari pasangan daun nomor dua dari pangkal tangkai daun kemudian dilakukan pencatatan (Rasyidi et al., 2024; Zakiyah et al., 2018). Tingkat stres diukur menggunakan nilai SPAD sebagai indikator kandungan klorofil, dengan pengukuran pada pangkal, tengah, dan ujung ranting daun, lalu dirata-ratakan per tegakan (Niinemets, 2010; Shibaeva et al., 2020). Nilai SPAD yang rendah menunjukkan kandungan klorofil menurun, sehingga mengindikasikan mangrove mengalami stres fisiologis akibat faktor lingkungan, sesuai prosedur yang banyak digunakan untuk menilai kesehatan vegetasi secara kuantitatif. Menurut (Connelly, 1997; Zhen et al., 2021) nilai SPAD pada daun mangrove digunakan sebagai indikator kandungan klorofil, di mana nilai SPAD < 55 menandakan klorofil rendah dan stres atau defisiensi nutrisi, 55–60 menunjukkan klorofil cukup dan kondisi normal, serta > 60 menunjukkan klorofil tinggi dan pertumbuhan optimal.

Tabel 1. Nilai NDRE dan SPAD pada titik sampel ukur di lapangan

No	Sampel Ukur	Koordinat		SPAD	NDRE
		X	Y		
1	Sampel-1	479058,78	9737895,51	46,989	0,454
2	Sampel-2	479022,97	9737923,98	46,289	0,421
3	Sampel-3	478994,84	9737973,53	45,389	0,467
4	Sampel-4	479114,59	9737922,74	47,867	0,441
5	Sampel-5	479053,71	9738020,69	46,767	0,423
6	Sampel-6	479022,97	9738069,59	49,889	0,464
7	Sampel-7	479140,39	9738050,52	47,778	0,457
8	Sampel-8	479152,45	9737997,44	47,933	0,472
9	Sampel-9	479142,88	9737932,7	46,500	0,481
10	Sampel-10	479162,03	9737885,58	46,933	0,418
11	Sampel-11	478285,95	9737737,17	46,633	0,327
12	Sampel-12	482695,37	9743603,21	44,856	0,278
13	Sampel-13	482650,85	9743433,33	44,833	0,233
14	Sampel-14	482628,14	9743577,75	44,756	0,306
15	Sampel-15	482730,8	9743628,1	45,311	0,324
16	Sampel-16	478286,52	9737727,7	46,300	0,318
17	Sampel-17	472812,41	9734195	44,100	0,324
18	Sampel-18	472831,76	9734183,19	44,030	0,299
19	Sampel-19	472880,7	9734165,29	44,893	0,326
20	Sampel-20	472791,3	9734254,26	44,956	0,306
21	Sampel-21	473068,58	9734338,73	45,233	0,333
22	Sampel-22	473069,52	9734277,2	44,989	0,305
23	Sampel-23	472804,2	9734200,66	44,233	0,318
24	Sampel-24	479023,21	9738326,97	46,211	0,413
25	Sampel-25	478989,14	9738317,99	45,700	0,368
26	Sampel-26	479465,51	9738696,08	46,322	0,423
27	Sampel-27	479492,06	9738648,33	45,733	0,398
28	Sampel-28	479456,41	9738701,87	46,456	0,434
29	Sampel-29	478928,74	9738286,65	44,956	0,368
30	Sampel-30	478988,48	9738315,88	45,778	0,368
Rata-rata				45,954	0,375
Std. Deviasi				1,291	0,067
Max				49,889	0,481
Min				44,030	0,233

Selanjutnya, dilakukan analisis spasial dan statistik terhadap nilai SPAD dan NDRE tujuannya untuk mengetahui tingkat stres mangrove dan hubungan antara kedua indikator tersebut. Tahap awal analisis dilakukan menggunakan Arcgis yaitu pra-pemrosesan data meliputi ekstraksi Area of Interest (AOI) dan koreksi atmosfer menggunakan ArcGIS. Koreksi atmosfer bertujuan untuk mengurangi gangguan seperti kabut, debu, dan partikel kecil dari citra satelit, sehingga meningkatkan akurasi analisis tutupan lahan (Rendana et al., 2020). Proses ini melibatkan konversi nilai Angka Digital (DN) menjadi reflektansi di puncak atmosfer (TOA), yang disesuaikan dengan sudut matahari, menggunakan rumus yang disediakan oleh USGS Collection 2 yang dirilis pada Tahun 2020 dengan persamaan sebagai berikut.

$$R_{I'} = M_I Q_{cal} + A_r$$

Keterangan:

$R_{I'}$ = Reflektan TOA tanpa koreksi sudut matahari; M_I = Parameter "REFLECTANCE_MULT_BAND_x" dalam file metadata; Q_{cal} = Jumlah piksel yang distandarisasi; A_r = Parameter "REFLECTANCE_MULT_BAND_x" dalam file metadata; R_I = $R_{I'}/\cos$ (sudut zenit matahari) atau $R_I = R_{I'}/\sin$ (sudut elevasi matahari); R_I = Reflektansi TOA; $R_{I'}$ = Reflektansi TOA tanpa koreksi; Sudut elevasi matahari = Parameter "SUN_ELEVATION" dalam file metadata; Sudut zenit matahari = $90 - \text{Sudut elevasi matahari}$.

Analisis Data

Analisis spasial meliputi perhitungan indeks vegetasi NDRE untuk menghasilkan band tingkat stres pada mangrove menggunakan perangkat lunak penginderaan jauh (ArcGIS). Analisis NDRE digunakan untuk mengukur kesehatan vegetasi yang lebih sensitif terhadap perubahan klorofil. NDRE dihitung menggunakan data citra sentinel-2 yaitu Band 8 (NIR) dan Band 5 (Red Edge 1) atau Band 6 (Red Edge 2) (Boiarskii, 2019), dengan persamaan sebagai berikut:

$$NDRE = \frac{(NIR - RedEdge\ 1)}{(NIR + RedEdge\ 1)}$$

Hingga saat ini belum terdapat standar baku yang secara khusus menetapkan kategori tingkat stres mangrove berdasarkan nilai NDRE. Karena belum terdapat standar baku penentuan tingkat stres mangrove berbasis NDRE, penelitian ini menggunakan pendekatan distribusi data (mean $\pm$ standar deviasi) yang divalidasi dengan pengukuran SPAD di lapangan. Klasifikasi tersebut didasarkan pada temuan sebelumnya yang menunjukkan sensitivitas NDRE terhadap variasi kandungan klorofil dan kesehatan vegetasi (Barnes et al., 2000; Uddling et al., 2007). Analisis NDRE digunakan untuk mendeteksi tingkat stres mangrove dengan mengacu

pada pendekatan penelitian sebelumnya yang memanfaatkan indeks vegetasi dalam menilai kesehatan tanaman (Ainunnisa & Haerani, 2023; EOS Data Analytics, 2021). Klasifikasi nilai NDRE yang membedakan tanaman ke dalam kategori buruk, kurang sehat, sehat, dan sangat sehat pada prinsipnya merefleksikan tingkat stres fisiologis, di mana nilai rendah menunjukkan adanya stres akibat gangguan lingkungan, sedangkan nilai tinggi mengindikasikan kondisi vegetasi yang sehat. Dengan demikian, pendekatan ini dapat digunakan sebagai dasar dalam menginterpretasikan variasi kondisi fisiologis mangrove di lokasi penelitian. Adapun rentang nilai NDRE berada antara -1 hingga +1, yang merepresentasikan kondisi vegetasi dari tidak adanya tutupan hingga vegetasi sehat dan rapat; semakin rendah nilai NDRE, semakin besar dugaan adanya stres fisiologis pada vegetasi. Vegetasi dengan kondisi sehat dan berkepadatan tinggi umumnya memiliki nilai NDRE di atas 0,6 dan diindikasikan sebagai tanaman yang sangat sehat/optimal dan rentan 0.4 hingga 0.6 dikategorikan tanaman sehat. Sedangkan, nilai NDRE pada kisaran 0,2 hingga 0,4 diduga mencerminkan vegetasi yang jarang atau mengalami tingkat stres fisiologis ringan/sedang, sedangkan nilai NDRE yang lebih rendah dari 0,2 umumnya mengindikasikan keberadaan tanah terbuka atau area tanpa vegetasi, yang dapat diinterpretasikan sebagai kondisi stres vegetasi yang sangat tinggi hingga menyebabkan hilangnya tutupan (Choi et al., 2024; Ainunnisa & Haerani, 2023; Yuhao et al., 2020).

Adapun uji korelasi pearson bertujuan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan linear dua variabel antara nilai indeks vegetasi yang diperoleh dari penginderaan jauh dan nilai pengukuran dilapangan (Merly et al., 2022). Data yang diperlukan berupa Variabel Devenden (Y) yaitu data tingkat stress vegetasi mangrove berdasarkan analisis NDRE, Variabel Independen (X) berupa pengukuran lapangan menggunakan SPAD Meter. Rumus Pearson Correlation Coefficient (r) (Cahyono., 2017):

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

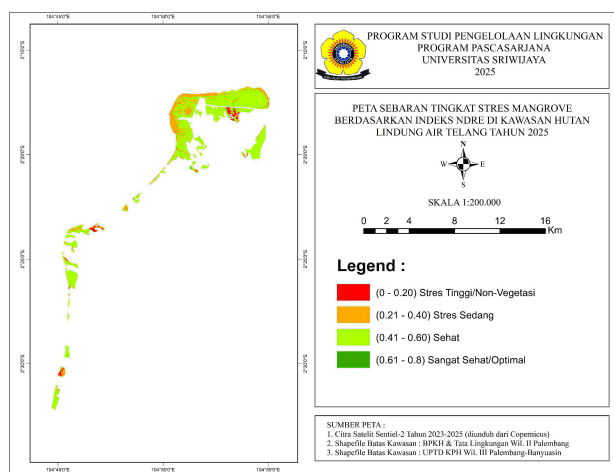
Keterangan:

X_i : Nilai individu dari variabel independen; Y_i : Nilai individu dari NDRE; $\bar{X}$: Rata-rata nilai variabel independen; $\bar{Y}$: Rata-rata nilai NDVI. Interpretasi Nilai Korelasi (r); $r \in [-1, 1]$; meliputi : $r = 1$: Hubungan linear positif sempurna, $r = -1$: Hubungan linear negatif sempurna dan $r = 0$: Tidak ada hubungan linear

HASIL DAN PEMBAHASAN

Peta sebaran stres mangrove berdasarkan indeks NDRE di Hutan Lindung Air Telang Tahun 2025 menunjukkan variasi kondisi vegetasi yang signifikan. Mangrove diklasifikasikan menjadi empat kategori: stres tinggi/non-vegetasi (0–0,20, merah), stres sedang (0,21–0,40, oranye), sehat (0,41–0,60, hijau),

dan sangat sehat/optimal (0,61–0,80, hijau tua). Sebagian besar vegetasi berada dalam kondisi sehat hingga sangat sehat, terutama di bagian utara dan tengah kawasan, sementara stres sedang tersebar di beberapa titik sepanjang garis pantai. Hanya sebagian kecil area yang tergolong stres tinggi atau non-vegetasi, terutama pada pulau kecil selatan dan pesisir yang mengalami degradasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa mayoritas mangrove sehat, meski terdapat beberapa titik dugaan stres fisiologis Gambar 2.



Gambar 2. Peta Tingkat Stres Vegetasi Mangrove Berdasarkan Indeks NDRE Tahun 2025

Hasil pemetaan tingkat stres vegetasi mangrove berdasarkan Indeks NDRE Tahun 2025, mengindikasikan tekanan lingkungan di beberapa area, yang membutuhkan perhatian dalam upaya konservasi dan pengelolaan ekosistem mangrove secara berkelanjutan. Analisis tersebut menunjukkan bahwa hasil pemrosesan spasial berdasarkan indeks NDRE sejalan dengan data kuantitatif dalam Tabel 2, memperkuat validitas analisis kondisi kesehatan vegetasi mangrove di area tersebut.

Tabel 2. Klasifikasi NDRE dan Luas Area Berdasarkan Tingkat Stres Vegetasi Tahun 2025

No	Rentan		Tahun 2025	
	Nilai NDRE	Kategori Stres	Luas (Ha)	Persentase (%)
1	0.61 – 0.8	Sangat Sehat/Optimal	2,29	0,08
2	0.41 – 0.6	Sehat	2300,61	75,85
3	0.21 – 0.40	Stres Sedang	639,14	21,07
4	0 – 0.20	Stres Tinggi / Non-Vegetasi	91,10	3,00

Hasil identifikasi analisis data NDRE dari tahun 2025, Tabel 2 menunjukkan bahwa kondisi vegetasi mangrove didominasi oleh kategori sehat, yaitu 2300,61 hektar (75,85%), sangat sehat 2,29 hektar (0,08%), stres sedang 639,14 hektar (21,07%), dan sangat stres/non-vegetasi 91,10 hektar (3,00%). Berdasarkan data lapang, kawasan Hutan Lindung Air Telang memiliki beberapa area yang menunjukkan tanda-tanda mangrove mengalami stres ringan hingga

berat, bahkan menyebabkan kematian; namun demikian, persentase area yang mengalami kondisi tersebut relatif kecil karena secara umum kawasan ini masih didominasi oleh vegetasi mangrove yang sehat. Foto lapangan berikut memperlihatkan contoh kondisi parsial, di mana hanya sebagian tegakan (± 5 pohon) yang mati di antara tegakan yang masih sehat, sesuai dengan pola spasial stres yang terdeteksi dari analisis NDRE Gambar 3. Kawasan Hutan Lindung Air Telang sebagian besar menunjukkan kondisi mangrove yang sehat, namun terdapat beberapa area terbatas yang mengalami stres ringan hingga tinggi. Zona-zona stres ini mengindikasikan adanya proses degradasi lokal, yang kemungkinan berkaitan dengan aktivitas manusia di sekitar kawasan, seperti pembukaan tambak, alih fungsi lahan, maupun perubahan pola hidrologi. Walaupun cakupannya relatif kecil, keberadaan area stres tersebut penting untuk dicatat karena menunjukkan titik-titik awal kerusakan ekosistem yang berpotensi meluas apabila tekanan antropogenik tidak dikelola dengan baik.



Mangrove Stres Ringan

Mangrove Mati Sebagian

Gambar 3. Kondisi Mangrove stress ringan atau mati

Secara ilmiah, ada hubungan antara penurunan indeks vegetasi terhadap peningkatan gangguan lingkungan (Haque et al., 2024). Penurunan indeks vegetasi dipengaruhi oleh tekanan ekologis seperti peningkatan salinitas, sedimentasi berlebih, dan perubahan rezim hidrologi, serta tekanan antropogenik seperti aktivitas pembukaan lahan dan pembangunan di sekitar wilayah mangrove (Abou Samra et al., 2025; Lewis et al., 2016). Menurut (Meiyerani et al., 2024), lokasi penelitian wilayah Sungsang yang diteliti, tercatat nilai salinitas berkisar 11–13 ppt, dalam hal ini wilayah tersebut berada di bawah kisaran optimal bagi banyak spesies mangrove (umumnya 15–25 ppt), sehingga berpotensi menurunkan kinerja fisiologis atau menyebabkan stres ringan. Mangrove mengalami kondisi stres apabila tingkat salinitas berada di luar kisaran optimal yang mendukung pertumbuhannya. Secara umum, pertumbuhan optimal tercapai pada salinitas sekitar 10–30 ppt, sedangkan paparan salinitas melebihi 35 ppt atau kurang dari 10 ppt cenderung memicu gangguan fisiologis dan penurunan vitalitas tanaman (Beckett et al., 2023; Darwati et al., 2022). Meskipun beberapa spesies yang toleran terhadap salinitas rendah seperti *Sonneratia caseolaris* dan *Nypa fruticans* kemungkinan tetap sehat pada kondisi ini, mangrove yang beradaptasi pada salinitas lebih tinggi seperti *Rhizophora mucronata* dan *Avicennia marina*

dapat mengalami penurunan efisiensi fotosintesis, yang tercermin dari rendahnya nilai indeks vegetasi. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan indeks vegetasi yang teramati kemungkinan dipengaruhi oleh kondisi salinitas yang ada, bersamaan dengan tekanan ekologis dan antropogenik lainnya. Selain itu, Vegetasi mangrove yang mengalami stres terjadi akibat penurunan indeks reflektansi vegetatif, yang menyebabkan pengurangan klorofil dan kepadatan kanopi. Menurut Eddy & Mutiara, (2018), kawasan hutan lindung Air Telang mengalami degradasi dan pengurangan luas yang dipengaruhi oleh faktor antropogenik, yaitu konversi lahan menjadi perkebunan kelapa sawit dan kelapa, tambak ikan, serta permukiman.

Analisis Korelasi SPAD (Soil Plant Analysis Development) dan Indeks Vegetasi NDRE

Deskripsi statistik dan analisis korelasi antara nilai SPAD dan NDRE pada Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai rata-rata SPAD adalah 45,95 dengan simpangan baku 1,31, sedangkan nilai rata-rata NDRE adalah 0,3755 dengan simpangan baku 0,0686, dari total 30 sampel tanpa data yang hilang. Nilai korelasi Pearson sebesar 0,748 dengan signifikansi 0,000 menunjukkan hubungan yang kuat dan signifikan secara statistik antara SPAD dan NDRE pada tingkat kepercayaan 99% ($p < 0,01$). Nilai rata-rata indeks vegetasi yang dihasilkan kurang dari 1, menunjukkan bahwa nilai indeks vegetasi di antara sampel cenderung homogen, dengan konsistensi data yang tinggi dan fluktuasi data yang relatif kecil (Sukmadana & Sagita, 2022). Menurut Zhen et al., (2021), nilai klorofil yang lebih tinggi pada tumbuhan menunjukkan pertumbuhan yang optimal, sedangkan nilai klorofil yang lebih rendah menunjukkan bahwa tumbuhan tidak sehat atau mengalami stres. Berdasarkan hasil pengukuran nilai SPAD pada 30 sample uji secara acak, nilai yang diperoleh berada pada rentang < 55 dengan interpretasi menandakan klorofil rendah dan stres atau defisiensi nutrisi pada titik sampel yang diamati, yang menunjukkan bahwa Sebagian kecil kondisi mangrove di kawasan hutan lindung Air Telang memiliki kandungan klorofil yang rendah, dan membutuhkan perhatian khusus dalam upaya pengelolaan dan rehabilitasi, agar kondisi fisiologis mangrove dapat dipertahankan dan tidak mengalami penurunan lebih lanjut.

Tabel 2. Statistik Deskriptif Nilai SPAD dan NDRE

Statistics SPAD & Indeks NDRE			
		SPAD	NDRE
N	Valid	30	30
	Missing	0	0
Mean		45.9537	0.3755
Std. Deviation		1.31262	0.06858
Minimum		44.03	0.23
Maximum		49.89	0.48
Sum		1378.61	11.26

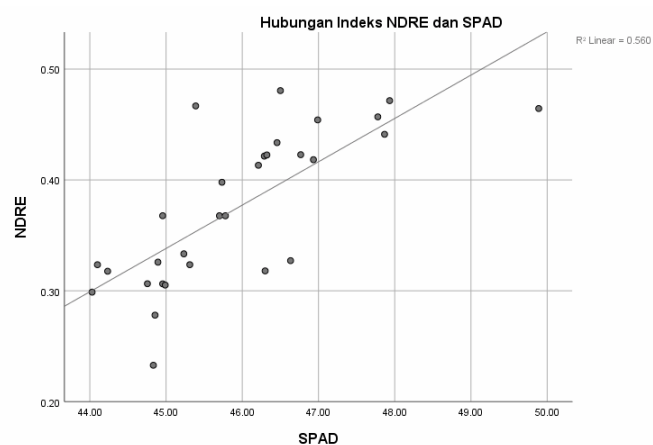
Tabel 3. Koefisien Korelasi SPAD dan Indeks NDRE

Correlations SPAD & NDRE			
		SPAD	NDRE
SPAD	Pearson Correlation	1	0.748**
	Sig. (2-tailed)		0.000
	N	30	30
NDRE	Pearson Correlation	0.748**	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	
	N	30	30

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Selain itu, Hasil uji koefisien korelasi Pearson antara nilai SPAD dan indeks vegetasi Tabel 3, menunjukkan hubungan positif dan signifikan secara statistik, di mana nilai SPAD dan indeks vegetasi yang diuji $p < 0,01$. Korelasi antara SPAD dan NDRE menunjukkan hubungan positif yang kuat dengan koefisien $r = 0,748$ ($p < 0,001$). Hal ini menunjukkan bahwa indeks NDRE cocok untuk mendeteksi dan menggambarkan kondisi fisiologis vegetasi menggunakan data pengukuran SPAD, karena indeks NDRE memiliki sensitivitas tinggi terhadap variasi kandungan klorofil pada daun mangrove. Menurut Patty et al., (2022), indeks NDRE dan SPAD memiliki rentang koefisien 0,60 – 0,799, yang menunjukkan bahwa keduanya memiliki kategori korelasi yang kuat. Dengan demikian, indeks NDRE menjadi alternatif sebagai indeks vegetasi yang paling representatif dalam mengukur kandungan klorofil daun dan direkomendasikan sebagai indeks yang paling cocok untuk mendeteksi kondisi fisiologis vegetasi, khususnya dalam konteks mendeteksi stres atau kesehatan pada vegetasi mangrove menggunakan teknologi penginderaan jauh tanpa harus melakukan pengukuran lapangan konvensional.

Untuk memvalidasi hasil analisis NDRE dengan data lapangan, dilakukan uji hubungan antara nilai SPAD dan NDRE sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Hubungan antara Indeks Vegetasi dan SPAD

Berdasarkan Gambar 4, menunjukkan ada korelasi yang cukup antara indeks vegetasi berbasis

penginderaan jauh dan kondisi fisiologis tanaman mangrove. Ini ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,560 bahwa NDRE mampu menjelaskan 56% variasi nilai SPAD. Nilai R^2 dalam kisaran 0,40 – 0,599 menunjukkan hubungan korelasi yang cukup, sehingga dapat digunakan untuk mempresentasikan pengukuran nilai SPAD dilapang (Patty et al., 2022). Dengan demikian, indeks NDRE adalah indeks yang sensitif terhadap nilai pengukuran SPAD, dengan potensi tertinggi untuk mewakili kandungan klorofil dalam vegetasi mangrove.

Temuan dari analisis penginderaan jauh dengan penilaian indeks vegetasi memberikan gambaran komprehensif tentang kondisi ekosistem, yang dapat menjadi dasar untuk merumuskan strategi konservasi yang tepat di kawasan ekosistem mangrove Hutan Lindung Air Telang, KPH Wilayah III Palembang-Banyuasin, Provinsi Sumatera Selatan. Pemetaan menggunakan penginderaan jauh (menggunakan indeks NDRE) menyediakan data yang sangat berharga untuk perencanaan langkah-langkah konservasi berbasis sains yang lebih efektif dan berkelanjutan. Berikut adalah langkah-langkah strategis yang direkomendasikan untuk konservasi mangrove di Kawasan Hutan Lindung Air Telang: restorasi biofisik di area yang mengalami tekanan tinggi, peningkatan sistem pemantauan berkala untuk area mangrove, pemeliharaan dan perlindungan untuk area yang sehat, serta edukasi dan peningkatan kapasitas bagi masyarakat lokal agar mereka juga berpartisipasi dalam merawat dan melestarikan lingkungan, khususnya area mangrove.

Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa NDRE merupakan indikator yang efektif untuk mendeteksi stres mangrove secara luas tanpa perlu pengukuran klorofil menyeluruh, meskipun pengukuran terbatas hanya pada 30 sampel acak tetap digunakan sebagai validasi. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mempelajari berbagai faktor yang memengaruhi stres mangrove, termasuk degradasi lingkungan, aktivitas manusia, dan perubahan iklim, serta memperluas pengukuran klorofil pada sampel yang lebih representatif dan mencakup seluruh tegakan, serta mempertimbangkan variasi jenis mangrove dan kategori daun (*Sun leaf* atau *Shade leaf*), sehingga hubungan antara indeks NDRE dan kesehatan vegetasi dalam kaitan deteksi stres mangrove dapat dianalisis secara lebih komprehensif dan mendukung strategi pengelolaan ekosistem mangrove yang lebih efektif.

KESIMPULAN

Penerapan indeks vegetasi NDRE memungkinkan pemantauan kondisi vegetasi jangka panjang yang akurat dan efektif. Hal ini didukung oleh perbandingan antara data penginderaan jauh dan pengukuran lapangan menggunakan SPAD, yang tidak menunjukkan perbedaan signifikan. Oleh karena itu, metode ini dapat berfungsi sebagai alternatif pengukuran lapangan untuk mendeteksi dan

memetakan sebaran stres mangrove yang memberikan data yang lebih akurat. Selain itu, pendekatan ini menawarkan cara yang lebih praktis dan aman untuk memantau kesehatan ekosistem mangrove.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada para pembimbing akademik dan semua pihak yang telah mendukung pelaksanaan dan penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abou Samra, R. M., Almazroui, M., Li, W., & El-Askary, H. (2025). Monitoring mangrove dynamics and evaluating future afforestation potential in the Egyptian Red Sea. *Environmental and Sustainability Indicators*, 26(May), 100705. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100705>
- Ainunnisa, I., & Haerani, H. (2023). The identification of pests and diseases of rice plants using sentinel-2 satellite imagery data at the end of the vegetative stage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1230(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1230/1/012148>
- Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi C., R. E., Thompson, T., Lascano, R. J., Li, H., & Moran, M. S. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. *Proc. 5th Int. Conf. Precis Agric, July 2015*.
- Beckett, H. A. A., Neeman, T., Fuenzalida, T. I., Bryant, C., Latorre, S. C., Ovington, L. I., Sack, L., Meir, P., & Ball, M. C. (2023). Ghosts of dry seasons past: Legacy of severe drought enhances mangrove salinity tolerance through coordinated cellular osmotic and elastic adjustments. *Plant Cell and Environment*, 46(7), 2031–2045. <https://doi.org/10.1111/pce.14604>
- Boiarskii, B. (2019). Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, spl1(4). <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.0003>
- Cahyono, T. (2017). Statistik Uji Korelasi. In Yayasan Sanitarian Banyumas: Vol. Pertama.
- Choi, H. B., Han, K. H., & Seo, J. (2024). Normalized Difference Red-Edge Estimation with Modified DiscoGAN Model. *IEEE Access*, 12(October), 191661–191669. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3517602>
- Connelly, X. M. (1997). The use of a chlorophyll meter (SPAD-502) for field determinations of red mangrove (*Rhizophora mangle* L.) leaf chlorophyll amount. *NASA Univ. Res. Cent. Tech. Adv. Educ. Aeronaut. Space Auton. Earth Environ.*, 1(1983), 187–190.
- Darwati, H., Poedjirahajoe, E., Sadono, R., &

- Soewarno, H. B. (2022). Karakteristik Perairan Dan Species Mangrove Dominan Di Pulau Panjang Desa Padang Tikar Ii, Kabupaten Kubu Raya Kalimantan Barat. *Jurnal Hutan Lestari*, 10(4), 1002–1009.
- Eddy, S., Iskandar, I., Ridho, M. R., & Mulyana, A. (2017). Land cover changes in the air telang protected forest, South Sumatra, Indonesia (1989-2013). *Biodiversitas*, 18(4), 1538–1545. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180432>
- Eddy, S., & Mutiara, D. (2018). Dinamika Tutupan Lahan Kawasan Hutan Lindung Air Telang Menggunakan Teknik Overlay Multitemporal. *Sainmatika: Jurnal Ilmiah Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 15(2), 96. <https://doi.org/10.31851/sainmatika.v15i2.2179>
- Fatmawati, Y., & Ruchlihadiana, A. (2024). Akuisisi Data Citra Menggunakan Uav Multispektral Guna Penentuan Indeks Kerapatan Vegetasi Dengan Metode Ndzi Dan Ndre. *Geoplanart*, 6(2), 1–10.
- Haque, M. A., Reza, M. N., Ali, M., Karim, M. R., Ahmed, S., Lee, K. Do, Khang, Y. H., & Chung, S. O. (2024). Effects of Environmental Conditions on Vegetation Indices from Multispectral Images: A Review. *Korean Journal of Remote Sensing*, 40(4), 319–341. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2024.40.4.1>
- Hawkins, T. S., Gardiner, E. S., & Comer, G. S. (2009). Modeling the relationship between extractable chlorophyll and SPAD-502 readings for endangered plant species research. *Journal for Nature Conservation*, 17(2), 123–127. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2008.12.007>
- Idrus, A. Al, Liwa, I. M., & Hadiprayitno, G. (2018). Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA Sosialisasi Peran dan Fungsi Mangrove Pada Masyarakat di Kawasan Gili Sulat Lombok Timur. *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, (1), 1, 52–59. <https://jppipa.unram.ac.id/index.php/jppipa/article/view/213>
- Lewis, R. R., Milbrandt, E. C., Brown, B., Krauss, K. W., Rovai, A. S., Beever, J. W., & Flynn, L. L. (2016). Stress in mangrove forests: Early detection and preemptive rehabilitation are essential for future successful worldwide mangrove forest management. *Marine Pollution Bulletin*, 109(2), 764–771. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.006>
- Liu, Y., & Zhu, X. (2024). Tracking mangrove light use efficiency using normalized difference red edge index. *Ecological Indicators*, 168(October), 112774. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112774>
- Maurya, K., Mahajan, S., & Chaube, N. (2021). Remote sensing techniques: mapping and monitoring of mangrove ecosystem—a review. *Complex and Intelligent Systems*, 7(6), 2797–2818. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00457-z>
- Meiyerani, J., Melki, M., Widjajanti, H., Rozirwan, R., & Aryawati, R. (2024). Pengaruh Metode Filtrasi Terhadap Peningkatan Kualitas Fisik Air Muara Sungsang, Banyuasin. *Journal of Tropical Marine Science*, 8(1), 11–18. <https://doi.org/10.33019/jour.trop.mar.sci.v8i1.5680>
- Merly, S. L., Sianturi, R., & Nini, A. L. (2022). Study of Correlation and Diversity of Gastropods at Mangrove Ecosystem in Payum Beach, Merauke. *Jurnal Moluska Indonesia*, 6(1), 12–20. <https://doi.org/10.54115/jmi.v6i1.56>
- Niinemets, Ü. (2010). A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance. *Ecological Research*, 25(4), 693–714. <https://doi.org/10.1007/s11284-010-0712-4>
- Nobel, P. S. (1976). Photosynthetic Rates of Sun versus Shade Leaves of Hyptis emoryi Torr. *Nature*, 218–223.
- Patty, S. I., Nurdiansah, D., Rizqi, M. P., & Rikardo Huwae. (2022). Analisis Sebaran dan Kerapatan Vegetasi Mangrove Menggunakan Citra Landsat 8 di Bolaang Mongondow Timur, Sulawesi Utara. *Jurnal Ilmiah PLATAX*, 10(2), 224. <https://doi.org/10.35800/jip.v10i2.40841>
- Rasyidi, A. F., Sulistiani, R., & Bin, I. (2024). Kadar Klorofil Daun Bibit Kelor (Moringa oleifera L.) pada Berbagai Dosis Kompos. *AGRIUM: Jurnal Ilmu Pertanian*, 27(1). <https://doi.org/10.30596/agrium.v27i1.17486>
- Rendana, M., Idris, W. M. R., Rahim, S. A., Rahman, Z. A., & Lihan, T. (2020). Potential of normalized difference vegetation index for mapping of soft clay area in paddy fields of Kedah, Malaysia. *Indonesian Journal of Geography*, 52(1), 22–28. <https://doi.org/10.22146/ijg.43617>
- Rosalina, D., Sabilah, A. A., Rombe, K. H., & Warni. (2024). Mapping of Mangrove Conditions Using Sentinel-2 Imagery. *JST (Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 13(1), 89–98. <https://doi.org/10.23887/jstundiksha.v13i1.65281>
- Shibaeva, T. G., Mamaev, A. V., & Sherudilo, E. G. (2020). Evaluation of a SPAD-502 Plus Chlorophyll Meter to Estimate Chlorophyll Content in Leaves with Interveinal Chlorosis. *Russian Journal of Plant Physiology*, 67(4), 690–696. <https://doi.org/10.1134/S1021443720040160>
- Sholihqin, M., Pramadaningtyas, P. S., Solikah, I., Febriyanti, S., Pambudi, M. D., Mahartika, S. B., Umam, A. F., Liza, N., & Setyawan, A. D. (2022). Analysis of the diversity and evenness of mangrove ecosystems in the Pacitan Coast, East Java, Indonesia. *International Journal of Bonorowo Wetlands*, 11(2), 84–94. <https://doi.org/10.13057/bonorowo/w110205>
- Sukmadana, R. T., & Sagita, N. (2022). Pemanfaatan Data Satelit Himawari-8 Untuk Analisis Kejadian Hujan Lebat Di Cirebon, Jawa Barat (Tanggal 17 Desember 2020). *Megasains*, 13(2).

- <https://doi.org/10.46824/megasains.v13i2.41>
- Théroux-Rancourt, G., Earles, J. M., Gilbert, M. E., Zwieniecki, M. A., Boyce, C. K., McElrone, A. J., & Brodersen, C. R. (2017). The bias of a two-dimensional view: comparing two-dimensional and three-dimensional mesophyll surface area estimates using noninvasive imaging. *New Phytologist*, 215(4), 1609–1622. <https://doi.org/10.1111/nph.14687>
- 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>
- Yuhao, A., Che'ya, N. N., Roslin, N. A., & Ismail, M. R. (2020). Rice chlorophyll content monitoring using vegetation indices from multispectral aerial imagery. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 28(3), 779–795.
- Zakiah, M., Manurung, T. F., & Wulandari, R. S. (2018). Kandungan Klorofil Daun Pada Empat Jenis Pohon Di Arboretum Sylva Indonesia Pc. Universitas Tanjungpura. *Jurnal Hutan Lestari*, 6(1), 48–55.
- Zhen, J., Jiang, X., Xu, Y., Miao, J., Zhao, D., Wang, J., Wang, J., & Wu, G. (2021). Mapping leaf chlorophyll content of mangrove forests with Sentinel-2 images of four periods. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102387>