



Pemanfaatan Aplikasi Normalized Difference Vegetation Index pada Citra Sentinel-2A untuk Klasifikasi Kerapatan Tegakan Mangrove

(Application of the Normalized Difference Vegetation Index from Sentinel-2A Imagery for Mangrove Stand Density Classification)

Ali Suhardiman^{*1,2}, Kiswanto^{1,2}, Wanda Laras Farahdita¹, Yohanes Budi Sulistioadi^{1,2}, Karyati¹, & Heru Herlambang¹

¹Fakultas Kehutanan dan Lingkungan Tropis, Universitas Mulawarman, Jl. Penajam, Kampus Gunung Kelua, Samarinda, Kalimantan Timur 75123, Indonesia

²Pusat Pengembangan Infrastruktur Informasi Geospasial Universitas Mulawarman, Gedung LP2M Universitas Mulawarman Lt. 3, Jl Krayan, Samarinda, Kalimantan Timur 75119, Indonesia

Informasi Artikel:

Submitted : 18 Mei 2026
Revised : 14 Agustus 2026
Accepted : 286 Agustus 2026
Published : 01 Oktober 2026

*Penulis Korespondensi:

Ali Suhardiman

¹Fakultas Kehutanan dan Lingkungan Tropis, Universitas Mulawarman, Jl. Penajam, Kampus Gunung Kelua, Samarinda, Kalimantan Timur 75123, Indonesia

²Pusat Pengembangan Infrastruktur Informasi Geospasial Universitas Mulawarman, Ged. LP2M Lt.3, Jl Krayan, Samarinda, Kalimantan Timur 75119, Indonesia

e-mail:

suhardiman@fahutan.unmul.ac.id

Telp: +628125863653

Makila 20 (2) 2026: 358-374

DOI:

<https://doi.org/10.30598/makila.v20i2.25816>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Copyright ©2026 Author(s): Ali Suhardiman, Kiswanto, Wanda Laras Farahdita, Yohanes Budi Sulistioadi, Karyati, & Heru Herlambang
Journal homepage:

<https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/makila>

Journal e-mail: makilajournal@gmail.com

Research Article · [Open Access](#)

ABSTRACT

Mangrove ecosystems in Bontang City require effective and repeatable monitoring to support their long-term conservation and management. This study evaluated the performance of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and red-edge Normalized Difference Vegetation Index (NDVIRE) derived from Sentinel-2A imagery for estimating mangrove stand density using field-measured basal area. Mangrove ecosystem boundaries were delineated using high-resolution imagery, resulting in an estimated area of 3,330 ha, with an overall classification accuracy of 94.44% and a kappa coefficient of 0.88. NDVI values ranged from 0 to 0.59, whereas NDVIRE values ranged from 0 to 0.73. Both vegetation indices showed strong relationships with basal area; however, NDVIRE demonstrated better model performance ($r = 0.97$; $R^2 = 0.94$; $RMSE = 6.20 \text{ m}^2/\text{ha}$) than NDVI ($r = 0.95$; $R^2 = 0.91$; $RMSE = 8.28 \text{ m}^2/\text{ha}$). The use of NDVIRE reduced prediction error by approximately 25.1% relative to NDVI. These findings indicate that incorporating the Sentinel-2A red-edge band can complement conventional NDVI-based approaches and improve the estimation of mangrove stand density in Bontang City. Further validation across different mangrove conditions is required before broader spatial application of the model.

KEYWORDS: NDVI, Sentinel-2A, Vegetation, Mangrove, Bontang

INTISARI

Ekosistem mangrove di Kota Bontang memerlukan pemantauan yang efektif dan dapat dilakukan secara berulang untuk mendukung konservasi dan pengelolaan jangka panjang. Penelitian ini mengevaluasi kinerja Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dan red-edge Normalized Difference Vegetation Index (NDVIRE) yang diturunkan dari citra Sentinel-2A dalam menduga kerapatan tegakan mangrove berdasarkan basal area hasil pengukuran lapangan. Batas ekosistem mangrove didelineasi menggunakan citra beresolusi tinggi dan

menghasilkan estimasi luas sebesar 3.330 ha, dengan akurasi keseluruhan sebesar 94,44% dan koefisien kappa sebesar 0,88. Nilai NDVI berkisar antara 0–0,59, sedangkan NDVI_{re} berkisar antara 0–0,73. Kedua indeks vegetasi menunjukkan hubungan yang kuat dengan basal area; namun, NDVI_{re} menghasilkan kinerja model yang lebih baik ($r = 0,97$; $R^2 = 0,94$; RMSE = 6,20 m²/ha) dibandingkan NDVI ($r = 0,95$; $R^2 = 0,91$; RMSE = 8,28 m²/ha). Penggunaan NDVI_{re} menurunkan galat prediksi sekitar 25,1% dibandingkan NDVI. Temuan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan band red-edge Sentinel-2A dapat melengkapi pendekatan konvensional berbasis NDVI dan meningkatkan pendugaan kerapatan tegakan mangrove di Kota Bontang. Validasi lebih lanjut pada berbagai kondisi tegakan mangrove diperlukan sebelum model diterapkan secara lebih luas pada skala spasial yang berbeda.

KATA KUNCI: NDVI, Sentinel-2A, vegetasi, mangrove, Bontang

PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove secara alami merupakan lingkungan transisi darat dan laut (*ecotone*) yang ditumbuhi oleh jenis-jenis pohon dengan tingkat toleransi terhadap salinitas yang tinggi (Worthington & Spalding, 2018). Secara ekologis, mangrove tersebar pada area yang terpengaruh oleh pasang surut, terutama di zona tropis dan subtropis (Sanderma *et al.*, 2018). Lebih jauh, mangrove memiliki peran yang penting dalam skala global (Donato *et al.*, 2012) terutama sebagai penyerap dan penyimpan karbon dalam upaya mitigasi perubahan iklim (Murdiyarso *et al.*, 2010; Winterwerp *et al.*, 2020; Melati, 2021). Potensi mangrove di Indonesia sangat besar dengan total luas mencapai 3,31 juta ha (Arifanti *et al.*, 2018). Namun, dalam tiga dekade terakhir, Indonesia telah kehilangan sekitar 50% hutan mangrovenya (Prakoso *et al.*, 2023). Sebagian besar mangrove beralih fungsi menjadi tambak, perkebunan, permukiman, infrastruktur, dan penggunaan lainnya dengan laju deforestasi sebesar ± 52.000 ha/tahun (Murdiyarso *et al.*, 2010; Friess *et al.*, 2020).

Provinsi Kalimantan Timur dikenal dengan garis pantainya yang panjang dan ditumbuhi mangrove seluas ± 266.800 ha, menempati peringkat ketiga setelah Papua dan Riau (Prakoso *et al.*, 2023). Mangrove Kota Bontang adalah bagian dari ekosistem mangrove di Kalimantan Timur. Secara luasan, Bontang hanya memiliki 2.736 ha atau $\pm 1\%$ dari total keseluruhan hutan mangrove di Kalimantan Timur (Peta Mangrove Nasional, 2021). Meskipun demikian, Pemerintah Kota Bontang telah memberikan perhatian terkait keberlangsungan ekosistem mangrove yang dituangkan dalam RTRW Kota Bontang Tahun 2019-2039 yang saat ini sedang dalam proses revisi. Ekosistem mangrove diperuntukkan menjadi salah satu kawasan lindung seluas 736,32 ha. Perlindungan ini dilakukan untuk melestarikan ekosistem mangrove dan tempat berkembangnya biota laut di samping sebagai pelindung pantai dari pengikisan air laut, dan pelindung usaha budidaya di

belakangnya. Upaya ini perlu didukung secara berkelanjutan dan berkala dengan sistem pemantauan yang efektif dan efisien.

Teknologi penginderaan jauh berbasis satelit memberikan peluang pemantauan ekosistem mangrove secara periodik dengan cakupan areal yang luas. Pengolahan data citra satelit (antara lain MODIS, Landsat dan Sentinel-2) menjadi beragam indeks vegetasi (Butt *et al.*, 2015) seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) terbukti efektif untuk membantu klasifikasi kerapatan tegakan mangrove menggunakan citra satelit. Pemanfaatan aplikasi NDVI pada citra Sentinel-2 menjadi solusi *cost effective* untuk pemantauan kerapatan mangrove dalam skala luas (Wachid *et al.*, 2017; Mardiyatmoko & Suhardiman, 2018; Alam *et al.*, 2020; Albasit *et al.*, 2022; Prakoso *et al.*, 2023; Widyasasi *et al.*, 2024).

NDVI diperoleh dari menghitung rasio pantulan *band* merah (*Red*/R) dengan *band* infra merah dekat (*Near Infra-Red*/NIR) yang digunakan sebagai indikator kerapatan dan atau kesehatan vegetasi. Nilai NDVI berkisar dari -1 sampai dengan 1 dengan klasifikasi -1 sampai 0 termasuk ke dalam kelompok bukan vegetasi dan 0 sampai dengan 1 termasuk kelompok vegetasi (Philiani *et al.*, 2018). Hal ini serupa dengan (Fasabbih *et al.*, 2025) bahwa secara teoritis nilai NDVI berkisar antara -1 hingga +1 namun nilai indeks vegetasi mangrove secara umum berada pada kisaran antara +0,1 hingga +0,7. Citra Sentinel-2 dengan resolusi hingga 10 m dan *revisit time* 5 hari menjadi alternatif untuk meningkatkan akurasi pemetaan. Citra ini memiliki 13 kanal (*band*) spektral dengan karakteristik dan fungsinya masing-masing pada Tabel 1.

Tabel 1. *Band* pada citra Sentinel-2A

No dan Nama <i>Band</i>	Resolusi (m) dan Gelombang (μm)	Kegunaan
<i>Band 1 - Coastal Aerosol</i>	60 m 0,433 – 0,453 μm	Hamburan atmosfer
<i>Band 2 - Blue</i>	10 m 0,458 – 0,523 μm	Vegetasi, kenampakan tanah
<i>Band 3 - Green</i>	10 m 0,543 – 0,578 μm	Klorofil vegetasi, tampilan hijau maksimal
<i>Band 4 - Red</i>	10 m 0,650 – 0,680 μm	Penyerapan klorofil maksimum
<i>Band 5 - Vegetation Red-edge</i>	20 m 0,698 – 0,713 μm	Koreksi atmosfer/garis dasar permukaan
<i>Band 6 - Vegetation Red-edge</i>	20 m 0,733 – 0,748 μm	Pengambilan beban partikel udara
<i>Band 7 - Vegetation Red-edge</i>	20 m 0,765 – 0,785 μm	LAI (<i>Leaf Area Index</i>), NIR (<i>Near-Infrared</i>)
<i>Band 8 - NIR</i>	10 m 0,785 – 0,900 μm	LAI
<i>Band 8A - Vegetation Red-edge</i>	20 m 0,855 – 0,875 μm	LAI, NIR, sensitif terhadap klorofil, dan penyerapan uap air
<i>Band 9 - Water Vapour</i>	60 m 0,855 – 0,875 μm	Penyerapan uap air, koreksi atmosfer
<i>Band 10 - SWIR-Cirrus</i>	60 m 1,365 – 1,385 μm	Awan Cirrus
<i>Band 11 - SWIR</i>	20 m 1,565 – 1,655 μm	Pemisah salju, es, dan awan, penilaian kondisi vegetasi Mediterania

Band 12 – SWIR	20 m 2,100 – 2,280 μ m	Perbedaan tanah lempung untuk pemantauan erosi tanah, tanah, perbedaan antara biomassa hidup dan biomassa mati
-------------------	-------------------------------	--

Sumber : European Space Agency, 2015

Band merah yang diperuntukkan untuk analisis vegetasi pada Citra Sentinel-2A terdiri dari *band* 4 (*red*) dan *band* 7 (*red-edge*). Beberapa penelitian pemetaan kerapatan vegetasi termasuk mangrove menggunakan NDVI berbasis *band* merah sudah banyak diaplikasikan pada berbagai citra satelit, termasuk Landsat (Hamuna *et al.*, 2018; Hidayah & Suharyo, 2018; Rohim *et al.*, 2021) dan Sentinel-2A (Wachid *et al.*, 2017; Mardiatmoko & Suhardiman 2018; Alam *et al.*, 2020; Singgalen *et al.*, 2021; Fasabbih *et al.*, 2025). Studi-studi tersebut terbukti mampu membedakan kelas kerapatan mangrove dengan tingkat akurasi yang memadai. Namun, evaluasi penggunaan *band red-edge* Sentinel-2A khususnya melalui indeks NDVI_{re} untuk klasifikasi kerapatan mangrove masih sangat terbatas, khususnya di ekosistem mangrove Kalimantan Timur.

Band red-edge pada Sentinel-2A dirancang lebih sensitif terhadap perubahan kandungan klorofil dan struktur kanopi vegetasi dibandingkan *band* merah konvensional (Xie *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2021) sehingga berpotensi menghasilkan klasifikasi yang lebih akurat. Oleh karena itu, kajian komparatif antara NDVI dan NDVI_{re} menjadi penting untuk mengisi kesenjangan ilmiah tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah NDVI_{re} memberikan nilai akurasi yang lebih tinggi dibandingkan NDVI dalam estimasi kerapatan tegakan mangrove dan bagaimana perbedaan distribusi kelas kerapatan mangrove yang dihasilkan oleh kedua indeks tersebut.

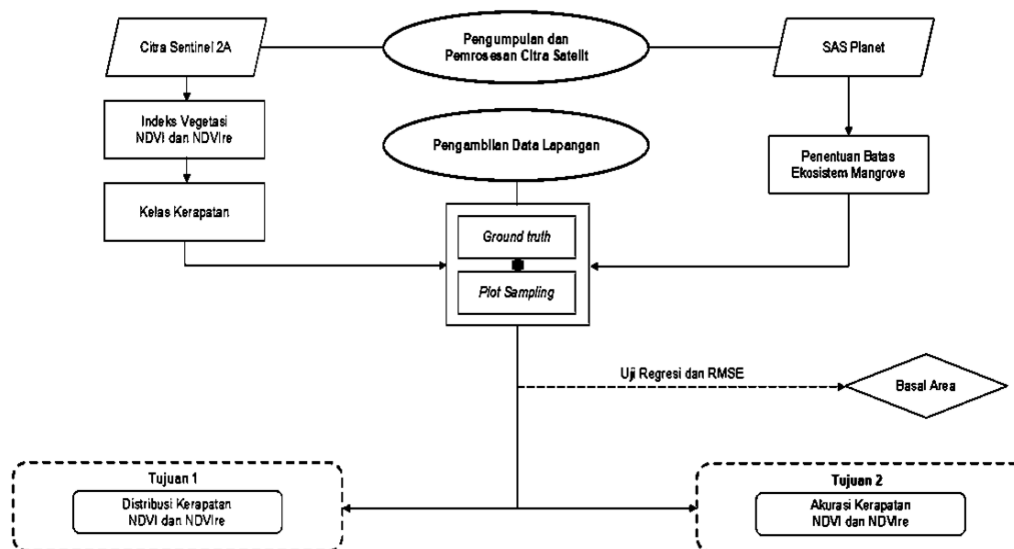
METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juni 2025 di ekosistem mangrove Kota Bontang, Kalimantan Timur, yang secara geografis terletak pada 117°27'0"-117°34'0" BT dan 0°1'30"-0°12'30" LU. Ekosistem mangrove di wilayah ini tersebar di sepanjang pesisir dari bagian utara hingga selatan, meliputi Kelurahan Bontang Kuala, Bontang Baru, Berebas Pantai, Bontang Lestari, Bontang Lestari Indah, Guntung, Gunung Lai, Lok Tuan, Satimpo, dan Tanjung Laut Indah. Wilayah pesisir dan perairan Kota Bontang tergolong rentan terhadap kerusakan ekosistem, baik akibat kegiatan pemanfaatan sumber daya maupun aktivitas lain yang menghasilkan limbah. Seiring dengan perkembangan wilayah, sebagian kawasan mangrove telah mengalami alih fungsi menjadi kawasan industri, tambak, fasilitas publik (pelabuhan dan area rekreasi), hingga permukiman (Sudirman *et al.*, 2023).

Penentuan lokasi plot sampel lapangan dilakukan secara *purposive sampling* untuk meminimalkan potensi perjumpaan dengan predator air (buaya muara) yang cukup banyak di wilayah ini. Penempatan titik tengah plot didasarkan pada hasil pengolahan citra Sentinel-2A yang sebelumnya telah melalui tahapan analisis tutupan lahan, perhitungan indeks vegetasi NDVI, dan

klasifikasi kelas kerapatan. Titik tengah plot selanjutnya ditentukan berdasarkan kelas kerapatan mangrove dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan di lapangan. Secara keseluruhan, metode penelitian dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Alur Penelitian

Proses Pengumpulan Data

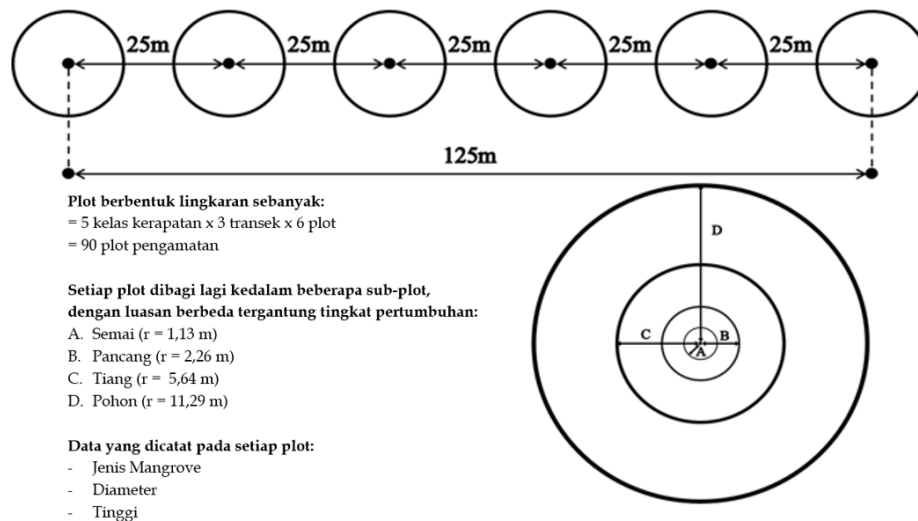
Pemrosesan Citra Satelit

Citra Sentinel-2A yang digunakan dalam penelitian ini adalah produk Level-2A (L2A) yang diunduh melalui *Copernicus Data Space Ecosystem* (<https://dataspace.copernicus.eu>). Produk L2A menyediakan data *surface reflectance* (*Bottom of Atmosphere*/BOA) yang diturunkan dari produk L1C (*Top of Atmosphere*/TOA) melalui koreksi atmosfer menggunakan Sen2Cor. Sehingga koreksi radiometrik dan atmosferik tambahan tidak dilakukan karena citra yang digunakan telah tersedia dalam bentuk *surface reflectance* (Hidayah *et al.*, 2024).

Citra diakuisisi pada 11 Mei 2025 (*path/row* 116/62) dengan sistem proyeksi yang digunakan adalah UTM 50N (WGS 84). *Pre-processing* yang dilakukan meliputi pemotongan citra (*masking*) sesuai area penelitian dan *resampling band* NIR ke *red-edge* menggunakan metode *nearest neighbor*. Proses ini dilakukan untuk menyamakan resolusi spasial antara *Band 8-NIR* (resolusi 10 m) ke resolusi *Band 5-Vegetation Red-edge* (resolusi 20 m).

Ground Truth

Sebanyak 3 (tiga) jalur transek digunakan untuk *ground truthing* mewakili masing-masing kelas kerapatan. Pembuatan transek dan plot mengikuti pedoman yang tertera pada SNI 7724:2019. Jalur transek dibuat sepanjang 125m dengan arah tegak lurus menjauhi sungai/muara. Pada setiap transek berisi 6 (enam) plot berbentuk lingkaran dengan jarak antarplot sekitar 25 m. Pada setiap plot, pengamatan vegetasi sesuai tingkatan menggunakan subplot tingkat semai ($r=1,13$ m), pancang ($r=2,26$ m), tiang ($r=5,64$ m) dan pohon ($r=11,29$ m) seperti pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Bentuk Plot Penelitian (SNI 7724:2019)

Alat yang digunakan selama penelitian lapangan meliputi *Global Positioning System* (GPS) untuk menentukan posisi geografis plot, kompas untuk menentukan arah transek, meteran pita untuk pengukuran jarak dan radius plot, tali rafia atau tali ukur sebagai penanda batas plot, patok atau ajir, *clinometer* untuk pengukuran tinggi pohon, pita ukur (*phi-band*) untuk mengukur diameter pohon, kamera digital untuk dokumentasi, serta alat tulis untuk pencatatan data lapangan.

Pengolahan Data

Penentuan Batas Ekosistem Mangrove

Penentuan batas ekosistem mangrove dilakukan dengan metode digitasi *on- screen* pada skala 1:500 menggunakan citra resolusi tinggi *Google Maps* yang ditampilkan melalui *software* SAS Planet. Citra yang digunakan adalah tampilan terbaru yang tersedia pada akuisisi Februari 2023, dengan resolusi piksel sebesar 2,6 m (setara tingkat pembesaran 20 kali). Klasifikasi kelas kerapatan vegetasi mangrove berdasarkan nilai NDVI dan NDVI_{re} menggunakan metode *natural breaks* dengan 5 kelas klasifikasi mengacu pada kategorisasi dari SNI 7645:2010 yang dimodifikasi seperti pada penelitian (Pratama *et al.*, 2018).

Perhitungan akurasi data dilakukan dengan membuat matriks kontingensi (*confusion matrix*) yang dengan cara membandingkan data hasil klasifikasi citra dengan data di Lapangan untuk memperoleh *Overall Accuracy* dan *Kappa Accuracy* sebagai indikator performa model klasifikasi. Nilai ketelitian yang diharapkan nantinya harus memenuhi syarat lebih besar dari 70 % (Hidayah *et al.*, 2024) sehingga dari nilai yang didapatkan tersebut merupakan pembuktian terhadap nilai kevalidan data citra. Perhitungan akurasi menggunakan 36 titik pengamatan yang disebar di sepanjang batas terdalam mangrove. Berikut adalah rumus perhitungan koefisien kappa:

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \cdot X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \cdot X_{+i})} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- k : Koefisien kappa
 r : Jumlah baris dalam matriks
 X_{ii} : Jumlah pengamatan pada baris i dan kolom
 iX_{i+} : Total marginal masing – masing baris i
 X_{+i} : Total marginal masing – masing kolom i
 N : Jumlah total pengamatan

Klasifikasi Kerapatan

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) digunakan sebagai indikator kerapatan mangrove, dimana pada penelitian ini akan digunakan *band* merah yang berbeda, yaitu *band red* dan *band red-edge*. Penentuan indeks vegetasi NDVI menggunakan rumus sebagai berikut:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

- NDVI : *Normalized Difference Vegetation Index*
 NIR : Nilai *band* spektral inframerah dekat
 RED : Nilai *band* spektral merah

Berdasarkan citra yang digunakan, maka formulasi *band* yang digunakan yaitu:

$$NDVI = \frac{\text{Band 8} - \text{Band 4}}{\text{Band 8} + \text{Band 4}} \dots\dots\dots(3)$$

Sedangkan, untuk indeks vegetasi dengan *band red-edge* menggunakan rumus sebagai berikut:

$$NDVI_{re} = \frac{NIR - RED_{edge}}{NIR + RED_{edge}} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

- NDVI_{re}: *Normalized Difference Vegetation Index Red-edge*
 NIR : Nilai *band* spektral inframerah dekat
 RED_{edge}: Nilai *band* spektral merah tepi

Berdasarkan citra yang digunakan, maka formulasi *band* yang digunakan yaitu:

$$NDVI_{re} = \frac{\text{Band 8} - \text{Band 5}}{\text{Band 8} + \text{Band 5}} \dots\dots\dots(5)$$

Perhitungan Basal Area

Basal area merupakan total luas penampang melintang batang pohon setinggi dada, umumnya 1,3 m dari permukaan tanah, yang digunakan untuk menggambarkan tingkat penutupan dan kepadatan tegakan mangrove oleh batang pohon. Nilai basal area per pohon dihitung menggunakan rumus:

$$BA = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{DBH}{100}\right)^2 \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan:

BA : Basal area atau luas bidang dasar (m²)

DBH : Diameter at Breast Height atau diameter pohon setinggi dada (cm)

Analisis Data

Uji Korelasi dan Regresi

Koefisien korelasi (r) merupakan variabel yang dapat menunjukkan keeratan hubungan antara dua atau lebih peubah bebas terhadap peubah tak bebasnya. Dalam hal ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara indeks vegetasi dan basal area dengan menghitung nilai koefisien korelasi (r). Uji regresi dibangun antara peubah Y (basal area) dan peubah X (Nilai NDVI dan NDVI_{re}). Sebagai bahan penafsiran terhadap koefisien korelasi yang ditemukan kuat atau lemah, digunakan ketentuan Sugiyono (2013):

Tabel 2. Kategori Interval Koefisien

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0,00 – 0,199	Sangat lemah
0,20 – 0,399	Lemah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,00	Sangat Kuat

Sumber : Sugiyono, 2013

Uji Validasi

Uji validasi dilakukan untuk mengukur besarnya penyimpangan antara nilai penduga kerapatan mangrove hasil dari model regresi yang dibangun dengan basal area yang diperoleh dari pengukuran lapangan. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan nilai aktual dari total 90 plot pengamatan dengan model regresi indeks NDVI dan NDVI_{re}. Ketelitian dievaluasi dengan *Root Mean Square Error* (RMSE), yaitu ukuran rata-rata besarnya galat prediksi. Nilai RMSE yang lebih rendah menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan prediksi yang lebih baik (Mairing, 2017).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(E-O)^2}{n}} \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan:

E : Nilai dugaan dari model regresi

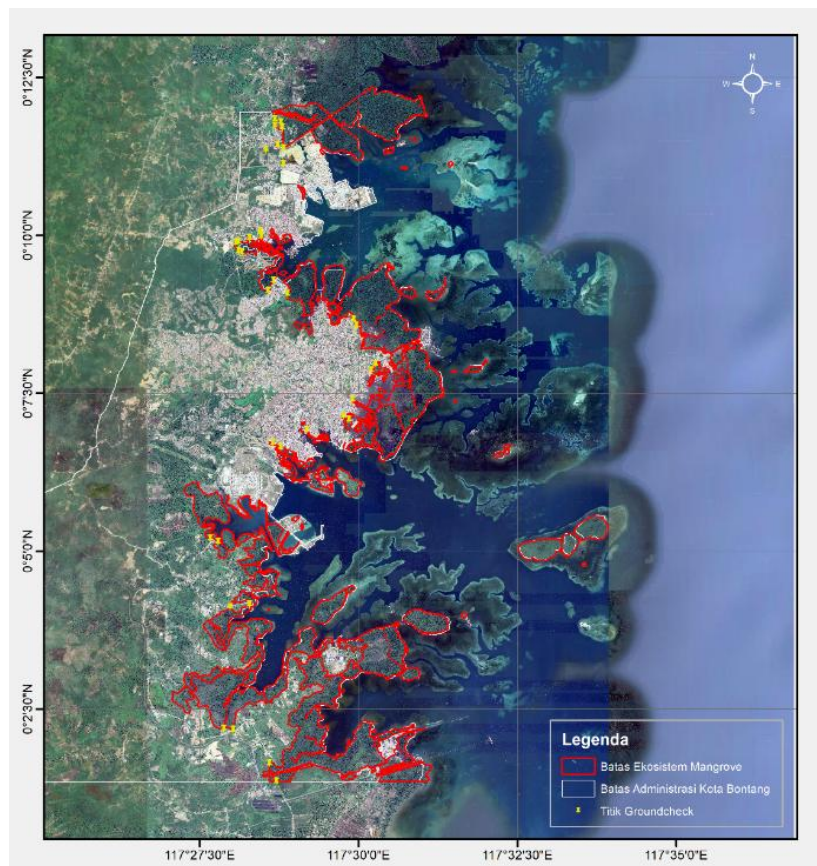
O : Nilai aktual dari plot validasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Luas Ekosistem Mangrove di Kota Bontang

Luas mangrove yang diperoleh dari hasil digitasi yaitu 3.330 ha, berbeda dengan data Peta Mangrove Nasional tahun 2021 sebesar 2.736 ha. Perbedaan ini disebabkan oleh beberapa faktor seperti, perbedaan resolusi citra yang digunakan dan tahun pada akuisisi data. Akurasi hasil delineasi dilakukan dengan membuat matriks kontingensi atau *confusion matrix*. Pengujian

dilakukan pada sampel yang mewakili obyek tertentu dalam titik yang koordinatnya berada di tempat yang sama dengan yang di lapangan. Interpretasi *user* menunjukkan adanya kesalahan dalam mengenali obyek mangrove, ketika divalidasi di lapangan ternyata sudah berubah menjadi sawit.



Gambar 3. Peta Ekosistem Mangrove Bontang

Adapun nilai akurasi keseluruhan yang didapatkan sebesar 94,44% dengan koefisien kappa sebesar 88%, hasil tersebut menunjukkan akurasi yang cukup kuat (**Tabel 3**). Metode ini telah banyak dilakukan oleh banyak peneliti dengan berbagai citra, seperti (Hamuna *et al.*, 2018) menggunakan Landsat 7 ETM+, (Hidayah & Suharyo, 2018) dengan Landsat 8, dan (Sinaga *et al.*, 2018) menggunakan Sentinel-2A dengan nilai akurasi secara berurutan yaitu 85,45%; 86%; dan 86,49%. Perbedaan tingkat akurasi antarpelitian dapat berkaitan dengan resolusi spasial citra, tetapi juga dipengaruhi oleh kualitas dan jumlah sampel lapangan, algoritma klasifikasi, heterogenitas tutupan lahan, serta kondisi atmosfer saat akuisisi citra (Alam *et al.*, 2020; Hidayah *et al.*, 2024).

Tabel 3. Hasil *Confusion Matrix*

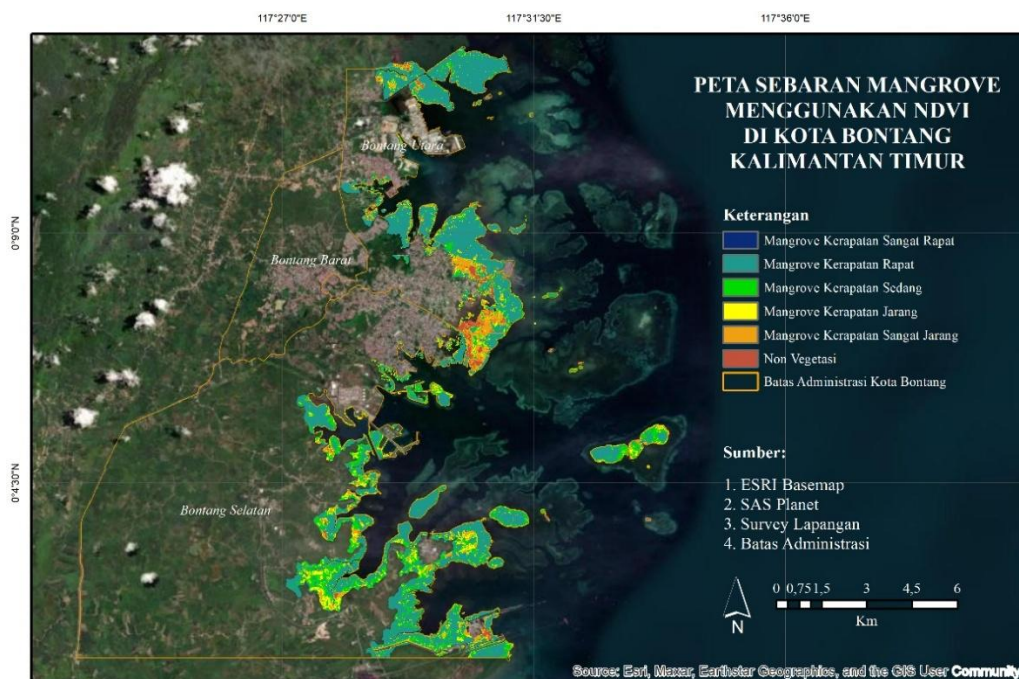
	<i>Mangrove</i>	<i>Non-Mangrove</i>
<i>Reference Data</i>		
<i>Mangrove</i>	21 (<i>true positive</i>)	2 (<i>false positive</i>)
<i>Non-Mangrove</i>	0 (<i>false negative</i>)	13 (<i>true negative</i>)
<i>User Accuracy</i>	91,30	100,00
<i>Producer Accuracy</i>	100,00	86,67

<i>Error of Omission</i>	0,00	13,33
<i>Error of Commission</i>	8,70	0,00
<i>Overall Accuracy</i>	94,44%	
<i>Kappa Coefficient</i>	88%	

Sumber : Pengolahan Data

Hasil Klasifikasi Kerapatan Mangrove

Nilai NDVI memiliki rentang -1 sampai dengan 1, dimana nilai <0 menunjukkan tutupan non vegetasi yang terdiri dari tambak, badan air, belukar rawa, ataupun permukiman dan nilai 0-1 merupakan vegetasi (Singgalen, 2023). Hasil transformasi NDVI pada citra Sentinel-2A menunjukkan nilai indeks vegetasi mangrove di Kota Bontang berada pada kisaran 0-0,59 yang diklasifikasikan menjadi lima kelas kerapatan mulai dari non vegetasi hingga sangat rapat. Distribusi piksel pada NDVI yang divisualisasikan melalui peta (**Gambar 4**), memperlihatkan bahwa kelas kerapatan rapat dan sangat rapat mendominasi sebagian besar pada wilayah terluar berdekatan dengan laut, sementara kelas jarang dan sangat jarang tersebar di zona tepi yang berbatasan dengan permukiman dan tambak. Pola ini sejalan dengan berbagai studi yang menggunakan NDVI untuk menilai sebaran kerapatan mangrove di berbagai pesisir Indonesia, yang umumnya menemukan bahwa kerapatan tinggi cenderung terkonsentrasi pada kawasan yang minim tekanan, sedangkan kerapatan rendah berasosiasi dengan kegiatan antropogenik (Rempil *et al.*, 2024; Fasabbih *et al.*, 2025).



Gambar 4. Peta Ekosistem Mangrove Bontang dengan Klasifikasi berdasarkan NDVI

Sebesar hampir 30% mangrove di Kota Bontang berada pada kelas kerapatan rapat, diikuti dengan kelas kerapatan sedang, dan kerapatan sangat rapat yang masing-masing masih menempati ruang di atas 20%. Sedangkan pada kelas sangat jarang menempati luas paling kecil. Komposisi ini mengindikasikan bahwa ekosistem mangrove di Kota Bontang didominasi tegakan dengan tutupan

kanopi relatif tinggi, yang penting untuk menjaga fungsi ekologis mangrove sebagai pelindung pantai dan keanekaragaman hayati (Murdiyarso *et al.*, 2010; Donato *et al.*, 2012). Namun, nilai NDVI tersebut masih lebih rendah jika dibandingkan Kota Balikpapan yang memiliki kisaran 0,36-0,64 (Pratama, 2018). Kerapatan dan luas mangrove di Bontang serupa kondisinya dengan mangrove di Kabupaten Tanah Bumbu Kalimantan Selatan yang didominasi oleh kelas kerapatan rapat dengan nilai NDVI 0,61-0,80 (Rohim *et al.*, 2021). Perbedaan kisaran NDVI antara Bontang dan Balikpapan dapat dipengaruhi oleh berbagai kondisi seperti tingkat pertumbuhan, tipe substrat, salinitas, serta kualitas dan waktu perekaman citra turut berpengaruh pada naik turunnya pencampuran nilai piksel antar tutupan. Sehingga parameter yang menandakan pertumbuhan mangrove penting untuk diteliti dalam kegiatan pemantauan untuk menjelaskan fenomena yang terjadi secara lebih detail (Iman *et al.*, 2024).

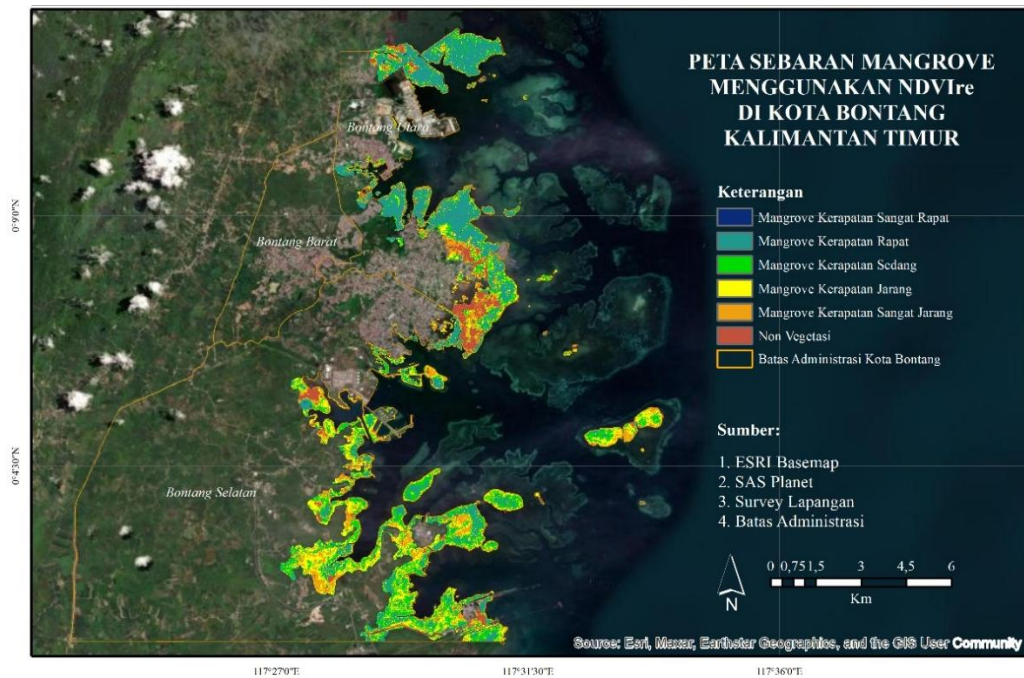
Tabel 4. Klasifikasi Indeks Vegetasi dengan NDVI

Kelas Kerapatan	Nilai NDVI	Luas (ha)	Persentase (%)
Kerapatan Sangat Rapat	0,54-0,59	814 ha	24%
Kerapatan Rapat	0,4 – 0,54	955 ha	29%
Kerapatan Sedang	0,35 – 0,4	856 ha	26%
Kerapatan Jarang	0,29-0,35	436 ha	13%
Kerapatan Sangat Jarang	0,11-0,29	214 ha	6%
Non Vegetasi	< 0,00	55 ha	2%
Total		3.330 ha	100%

Sumber : Pengolahan Data

Pola spasial dari hasil klasifikasi kerapatan dengan indeks NDVI_{re} menunjukkan distribusi yang serupa (**Gambar 5**) namun terdapat sedikit perbedaan antara proporsi luasnya (**Tabel 5**). Pada NDVI_{re}, luasan kelas kerapatan rapat dan sangat rapat cenderung sedikit lebih besar dibandingkan NDVI. Sementara pada kelas sedang dan jarang relatif berkurang, yang mengindikasikan sensitivitas yang lebih tinggi dalam membedakan variasi kerapatan kanopi mangrove. Hal ini sejalan dengan berbagai kajian yang menunjukkan bahwa indeks vegetasi berbasis saluran *red-edge* pada Sentinel 2 lebih peka terhadap variasi struktur kanopi dan kandungan klorofil dibanding indeks vegetasi dengan *band* merah pada umumnya (Guo *et al.*, 2021).

Rentang nilai indeks vegetasi lebih besar jika menggunakan transformasi NDVI_{re}, yaitu 0-0.73. Secara resolusi *piksel* antara NDVI dan NDVI_{re} berbeda. Pada NDVI, kedua *band* yang digunakan untuk formulasi indeks memiliki nilai yang sama dan lebih kecil yaitu 10 m. Sedangkan pada NDVI_{re}, terdapat perbedaan antara resolusi kedua *band* yang digunakan, sehingga harus dilakukan penyesuaian ukuran *piksel* melalui *resampling*, didapatkan resolusinya menjadi lebih besar yaitu 20 m. Semakin kecil resolusi yang dimiliki suatu citra maka hasilnya akan lebih bagus dan detail (Sanderman *et al.*, 2018).



Gambar 5. Peta Ekosistem Mangrove Bontang dengan Klasifikasi berdasarkan NDVIre

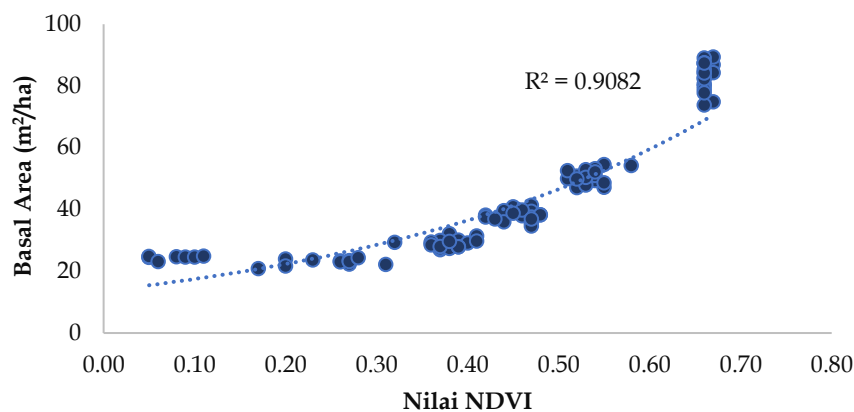
Tabel 5. Klasifikasi Indeks Vegetasi dengan NDVIre

Kelas Kerapatan	Nilai NDVIre	Luas (ha)	Persentase (%)
Kerapatan Sangat Rapat	0,66-0,73	934,09	28%
Kerapatan Rapat	0,49-0,66	792,42	24%
Kerapatan Sedang	0,42-0,49	805,94	24%
Kerapatan Jarang	0,32-0,42	530,94	16%
Kerapatan Sangat Jarang	0,04-0,32	145,82	4%
Non Vegetasi	< 0,00	120,84	4%
Total		3.330 ha	100%

Sumber : Pengolahan Data

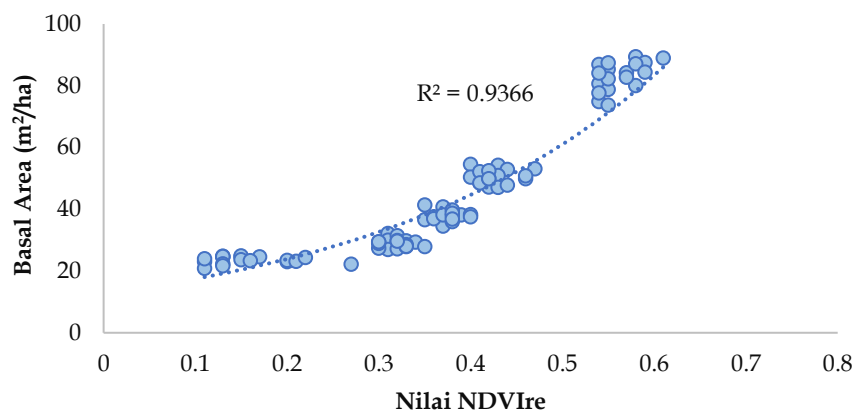
Perbandingan Regresi Indeks Vegetasi

Kinerja klasifikasi kerapatan yang dihasilkan kedua indeks tercermin dari hubungan statistiknya dengan parameter basal area di lapangan. Nilai koefisien korelasi antara NDVI dan basal area mencapai 0,91 (Gambar 6). Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara kedua variabel sangat kuat, variasi indeks vegetasi mampu menjelaskan sebagian besar variasi luas penampang tegakan mangrove di lapangan. Serupa dengan hasil penelitian (Guo *et al.*, 2021) yang melakukan penelitian indeks vegetasi dengan tipe NDVI yang sama pada area mangrove menggunakan 3 citra yang berbeda yaitu UAV, WV-2, dan Sentinel 2. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai regresi Sentinel 2 paling baik diantara citra lainnya, secara berturut-turut untuk NDVI dan NDVIre yaitu 0,68 dan 0,65.



Gambar 6. Hubungan regresi antara NDVI Sentinel-2A dan basal area tegakan mangrove.

Berbeda dengan hasil penelitian (Guo *et al.*, 2021) dimana hasil regresi NDVI lebih besar dari pada NDVI_{re} dengan selisih 0,03. Sedangkan pada penelitian ini didapatkan bahwa nilai regresi sedikit lebih besar pada indeks vegetasi NDVI_{re} yaitu 0,94 yang termasuk kategori sangat kuat berkorelasi antara variabel X dan Y. *Band red-edge* sensitif terhadap parameter biofisika vegetasi, sehingga cukup baik dalam mendeteksi nilai indeks vegetasi (Zhu, Y. *et al.*, 2017). Sehingga keberadaan *band red-edge* dapat digunakan untuk menilai kesehatan vegetasi. *Band* tersebut dirancang untuk sensitif terhadap perubahan kandungan klorofil (Goswami *et al.*, 2021). Klorofil yang tinggi akan menyerap lebih banyak energi pada spektrum 0.698 – 0.713 μm . Dalam spektrum elektromagnetik, *band red-edge* terletak diantara *band red* dan *band NIR*, dimana terjadi perubahan cepat pada reflektansi vegetasi dalam spektrum tersebut (Suardana *et al.*, 2023). Hal ini memberikan gambaran bahwa, dengan adanya 13 *band* yang tersedia pada citra Sentinel-2A dapat lebih dikembangkan penggunaannya untuk berbagai indeks vegetasi.



Gambar 7. Hubungan regresi antara NDVI_{re} Sentinel-2A dan basal area tegakan mangrove

Dalam konteks ekosistem mangrove, sebagian besar penelitian masih mengandalkan NDVI sebagai indeks utama untuk memetakan luasan dan kerapatan, sementara kajian secara eksplisit membandingkan performa NDVI dan NDVI_{re} di mangrove masih relatif terbatas. Studi lainnya menguji NDVI dengan indeks lain seperti EVI, SAVI, dan MVI (Zhu *et al.*, 2017) tanpa memanfaatkan

penyempurnaan informasi spektral *red-edge* yang tersedia di Sentinel-2A. Kedua indeks vegetasi yang digunakan dalam penelitian ini menghasilkan nilai indeks yang beragam terhadap nilai kerapatan tajuk di lapangan. Pada indeks NDVI menghasilkan koefisien relasi sebesar 0,95 dengan nilai R^2 sebesar 0,91 dan RMSE 8,28 m²/ha. Sementara itu, NDVI_{re} menghasilkan koefisien relasi sebesar 0,97 dengan nilai R^2 0,94 dan RMSE 6,20 m²/ha. Nilai R^2 yang lebih tinggi menunjukkan bahwa NDVI_{re} mampu menjelaskan variasi basal area lebih baik dibandingkan NDVI. Selain itu, prediksi basal area menggunakan NDVI_{re} menghasilkan penyimpangan rata-rata yang lebih kecil, dengan RMSE sebesar 6,20 m²/ha dibandingkan 8,28 m²/ha pada NDVI. Dengan demikian, penggunaan NDVI_{re} menurunkan RMSE sekitar 25,1% dibandingkan model NDVI (Tabel 6).

Tabel 6. Hasil Uji Model Regresi

Indeks Vegetasi	Persamaan Regresi	r	R ²	RMSE (m ² /ha)
NDVI	$Y = 13,695e^{2,4486x}$	0,95	0,91	8,28
NDVI _{re}	$Y = 12,791e^{3,1247x}$	0,97	0,94	6,20

Sumber : Pengolahan Data

Nilai RMSE NDVI pada penelitian ini relatif sebanding dengan hasil Pratama *et al.* (2019), yang melaporkan model NDVI dengan R^2 sebesar 0,67 dan RMSE sebesar 8,15 m²/ha. Perbedaan RMSE kedua penelitian hanya sekitar 0,13 m²/ha, meskipun nilai R^2 pada penelitian ini lebih tinggi. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik struktur tegakan, rentang basal area, jumlah dan sebaran plot, resolusi spasial citra, waktu akuisisi citra, serta bentuk model regresi yang diterapkan. Oleh karena itu, perbandingan antarlokasi perlu dipahami sebagai indikasi performa relatif, bukan sebagai ukuran ketelitian yang sepenuhnya setara.

Sedangkan untuk RMSE NDVI_{re} menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan indeks EVI dalam penelitian Pratama *et al.*, (2019). Indeks EVI dikembangkan untuk mengurangi pengaruh latar belakang kanopi dan aerosol atmosfer serta mengurangi kejenuhan yang lazim terjadi pada NDVI. Namun, EVI tetap menggunakan saluran biru, merah, dan NIR sehingga tidak secara langsung memanfaatkan informasi transisi *red-edge* yang sangat responsif terhadap perubahan klorofil. Sebaliknya, NDVI_{re} mengombinasikan saluran NIR dan *red-edge*, sehingga lebih mampu menangkap variasi biofisik kanopi pada tegakan mangrove dengan basal area menengah hingga tinggi. Penggunaan saluran *red-edge* Sentinel-2A juga telah dilaporkan efektif untuk menduga parameter fisiologis mangrove, termasuk kandungan unsur daun dan struktur kanopi (Miao *et al.*, 2022).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa citra Sentinel-2A dapat digunakan untuk memetakan kerapatan vegetasi mangrove di Kota Bontang melalui indeks NDVI dan NDVI_{re}. Delineasi batas ekosistem mangrove menghasilkan luas 3.330 ha dengan *overall accuracy* sebesar 94,44% dan

koefisien kappa sebesar 0,88, yang menunjukkan tingkat kesesuaian tinggi antara hasil klasifikasi dan data referensi lapangan. Nilai NDVI berada pada kisaran 0–0,59, sedangkan NDVI_{re} berada pada kisaran 0–0,73. Hubungan kedua indeks dengan basal area tergolong sangat kuat, dengan koefisien korelasi NDVI sebesar 0,95 ($R^2= 0,91$) dan NDVI_{re} sebesar 0,97 ($R^2= 0,94$). Evaluasi model menggunakan RMSE menunjukkan bahwa model NDVI_{re} menghasilkan galat prediksi basal area lebih rendah, yaitu 6,20 m²/ha, dibandingkan model NDVI sebesar 8,28 m²/ha. Dengan demikian, penggunaan NDVI_{re} menurunkan galat prediksi sebesar 2,08 m²/ha atau sekitar 25,1% dibandingkan NDVI. Hasil tersebut menunjukkan bahwa NDVI_{re} memiliki hubungan yang lebih kuat dengan basal area serta kemampuan pendugaan yang lebih baik dibandingkan NDVI pada lokasi penelitian. Temuan ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan saluran red-edge pada Sentinel-2A dapat melengkapi penggunaan NDVI konvensional dalam pemantauan kerapatan mangrove. Namun, penerapan model pada lokasi lain perlu mempertimbangkan perbedaan kondisi tegakan, pasang surut, substrat, waktu perekaman citra, serta ketersediaan data lapangan untuk kalibrasi dan validasi model.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM), Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi, atas dukungan pendanaan melalui Hibah Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Tahun 2025. Dukungan tersebut berkontribusi terhadap pelaksanaan penelitian hingga penyelesaian artikel ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, M. I. F., I Wayan, N., & Ni Luh, P. R. P. (2020). Uji Akurasi Beberapa Indeks Vegetasi dalam Mengestimasi Kerapatan Hutan Mangrove dengan Citra Sentinel-2A di Taman Nasional Bali Barat. *Journal Of Marine Research And Technology*, 3(2), 59-67. <https://doi.org/10.24843/JMRT.2020.v03.i02.p01>
- Albasit, L. Z., Priyadi, R., & Pramesti, R. (2022). Estimasi Stok Karbon Mangrove Pasca Rehabilitasi di Desa Kaliwlingi, Brebes Menggunakan Citra Sentinel-2. *Journal of Marine Research*, 11(4), 620-640. <https://doi.org/10.14710/jmr.v11i4.31734>
- Arifanti, V. B., Kauffman, J. B., Deddy, H., Daniel, M., & Rita, D. (2018). Carbon dynamics and land use carbon footprints in mangrove-converted aquaculture: the case of the Mahakam Delta, Indonesia. 1-30.
- Butt, A., Shabbir, R., Ahmad, S. S., & Aziz, N. (2015). Land use change mapping and analysis using Remote Sensing and GIS: A case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.07.003>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2012). Mangrove adalah salah satu hutan terkaya karbon di kawasan tropis. *CIFOR Brief*, 13(12), 12.
- Fasabbih, T. D., Pramono, D. A., Fadlin, F., & Sofyan A. P., A. B. (2025). Pemetaan Perubahan Kerapatan Vegetasi Mangrove di Kabupaten Berau Tahun 2019 - 2023 dengan Metode Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). *Journal of Geomatics Engineering, Technology, and Science*, 3(2), 55-60. <https://doi.org/10.51967/gets.v3i2.50>
- Friess, D.A., Yando, E.S., Abuchahla, G.M.O., *et al.* (2020). Are all ecosystems services equal? A detailed assessment of the mangrove ecosystem services literature. *Global Ecology and*

- Biogeography, 29, 1829-1840. Hamuna, B., Sari, A. N., & Megawati, R. (2018). Kondisi hutan mangrove di kawasan Taman Wisata Alam Teluk Youtefa, Kota Jayapura. *Majalah Ilmiah Biologi Biosfera: A Scientific Journal*, 35(2), 75-83. <https://doi.org/10.20884/1.mib.2018.35.2.611>
- Hidayah, Z., & Suharyo, O. S. (2018). Analisis perubahan penggunaan lahan wilayah pesisir Selat Madura. *Rekayasa*, 11(1), 19. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v11i1.4120>
- Hidayah, Z., Rachman, H.A., & As-Syakur, A.R. (2024). Perbandingan Citra Sentinel-2 Level TOA dan BOA untuk Pemetaan Mangrove di Teluk Balikpapan, Kalimantan Timur. *BIO Web of Conferences*, 135, 07003. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413507003>
- Goswami, J., Das, R., Sarma, K. K., & Raju, P. L. N. (2021). Red-edge Position (REP), an Indicator for Crop Stress Detection: Implication on Rice (*Oryza sativa* L). *International Journal of Environment and Climate Change*, 88-96. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2021/v11i430396>
- Guo, X., Wang, M., Jia, M., & Wang, W. (2021). Estimating mangrove leaf area index based on red-edge vegetation indices: A comparison among UAV, WorldView-2 and Sentinel-2 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 103, 102493. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102493>
- Hamuna, B., Sari, A. N., & Megawati, R. (2018). Kondisi Hutan Mangrove di Kawasan Taman Wisata Alam Teluk Youtefa, Kota Jayapura. *Majalah Ilmiah Biologi Biosfera : A Scientific Journal*, 35(2), 75-83. <https://doi.org/10.20884/1.mib.2018.35.2.611>
- Hidayah, Z., & Suharyo, O. S. (2018). Analisis Perubahan Penggunaan Lahan Wilayah Pesisir Selat Madura. *Rekayasa*, 11(1), 19. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v11i1.4120>
- Iman, Z. F. B., Rachmad, B., & Rahardjo, P. (2024). Analisis Tingkat Kerapatan dan Perubahan Lahan Vegetasi Mangrove Melalui Pemetaan Citra Sentinel 2 Multitemporal di Kabupaten Cilacap Analysis of Density Level and Changes in Mangrove Vegetation Land Through Multitemporal Sentinel 2 Imagery Mapping in Cil. *Prosiding Seminar Nasional Perikanan Indonesia*, 25, 535-553. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15578/psnp.15329>
- Mairing, J. P. (2017). *Statistika Pendidikan, Konsep dan Penerapannya Menggunakan Minitab dan Microsoft Excel+ cd*. Yogyakarta, Indonesia: Penerbit Andi.
- Mardiyatmoko, Y., & Suhardiman, A. (2018). Cadangan Karbon Di Wilayah Perkotaan Tenggarong Berdasarkan Metode Klasifikasi Ndzi Pada Citra Sentinel 2-a. *ULIN: Jurnal Hutan Tropis*, 1(2), 174-181. <https://doi.org/10.32522/ujht.v1i2.899>
- Melati, D. N. (2021). Mangrove Ecosystem and Climate Change Mitigation: a Literature Review. *Jurnal Sains dan Teknologi Mitigasi Bencana*, 16(1), 1-8. <https://doi.org/10.29122/jstmb.v16i1.4979>
- Miao, Jing, Jianing Zhen, Junjie Wang, Demei Zhao, Xiapeng Jiang, Zhen Shen, Changjun Gao, and Guofeng Wu. "Mapping seasonal leaf nutrients of mangrove with Sentinel-2 images and XGBoost method." *Remote sensing* 14, no. 15 (2022): 3679. <https://doi.org/10.3390/rs14153679>
- Murdiyarso, D., Donato, D., Kauffman, J. B., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2010). Carbon storage in mangrove and peatland ecosystems. *CIFOR Working Paper*, 1-40.
- Philiani, I., Harvianto, L., Saputra, L., & Muzaki, A. A. (2018). Pemetaan Vegetasi Hutan Mangrove Menggunakan Metode Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Di Desa Arakan, Minahasa Selatan, Sulawesi Utara. *Surya Octagon Interdisciplinary Journal of Technology*, 1(2), 211-222. <https://doi.org/10.31219/osf.io/c8k6j>
- Prakoso, D. A. R., Hakim, L., Pratama, D. R., Prananda, A. R. A., Bayyan, M. M., Hidayat, T., & Fajariyanto, Y. (2023). The dynamic of mangroves and ponds changes in East Kalimantan, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1220(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1220/1/012020>
- Pratama, M. R. (2018). Analisis Sebaran dan Kerapatan Mangrove di Teluk Balikpapan Kecamatan Balikpapan Barat. *The Indonesian Green Technology Journal*, 7(2), 40-46. <https://doi.org/10.21776/ub.igtj.2018.007.02.02>
- Pratama, I. G. M. Y., Karang, I. W. G. A., & Suteja, Y. (2019). Distribusi spasial kerapatan mangrove menggunakan citra sentinel-2A di TAHURA Ngurah Rai Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 5(2), 192-202. <https://doi.org/10.24843/jmas.2019.v05.i02.p05>

- Rempil, N. T. B., Syahdan, M., & Nursalam, N. (2024). Analisis Kerapatan Vegetasi Mangrove Berdasarkan Karakteristik Normalized Difference Vegetation Index (Ndvi) Pada Citra Sentinel-2 Di Kawasan Mangrove Desa Pagatan Besar. *Marine Coastal and Small Islands Journal - Jurnal Ilmu Kelautan*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.20527/m.v5i1.11794>
- Rohim, M., Ridwan, I., & Fahrudin, F. (2021). Analisis Sebaran dan Kerapatan Hutan Mangrove Menggunakan Landsat 8 di Kabupaten Tanah Bumbu Kalimantan Selatan. *Jurnal Natural Scientiae*, 1(1), 23-28. <https://doi.org/10.20527/jns.v1i1.4425>
- Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, G., Solvik, K., Adame, M. F., Benson, L., Bukoski, J. J., Carnell, P., Cifuentes-Jara, M., Donato, D., Duncan, C., Eid, E. M., Ermgassen, P. Z., Lewis, C. J. E., Macreadie, P. I., Glass, L., Gress, S., Jardine, S. L., Jones, T. G., ... Landis, E. (2018). A global map of mangrove forest soil carbon at 30 m spatial resolution. *Environmental Research Letters*, 13(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabe1c>
- Sinaga, S. H., Suprayogi, A., & Haniah. (2018). Analisis Ketersediaan Ruang Terbuka Hijau Dengan Metode Normalized Difference Vegetation Index dan Soil Adjusted Vegetation Index Menggunakan Citra Satelit Sentinel-2A (Studi Kasus : Kabupaten Demak). *Jurnal Geodesi Undip* Januari, 7(1), 202-211.
- Singgalen, Y. A. (2023). Implementation of Spatio-Temporal Analysis for Land Use Management and Urban Planning in North Halmahera Regency. *Klik : Kajian Ilmiah Informatika dan Komputer*, 4(2), 913-925. <https://doi.org/10.30865/klik.v4i2.1256>
- Singgalen, Y. A., Candra, G., Sri, Y. J. P., & Charitas, F. (2021). Mangrove Monitoring Using Normalized Difference Vegetation. *Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 13(August), 219-239. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v13i2.34771>
- Sudirman, N., Salim, H. L., Rustam, A., Ati, R. N. A., Hernina, R., Marini, Y., & Suryono, D. D. (2023). Assessment of Mangrove Ecosystem Potential in Bontang Regency-East Kalimantan to Reduce Abrasion. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1148, 11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1148/1/012041>
- Suardana, A. A. M. A. P., Anggraini, N., Nandika, M. R., Aziz, K., As-Syakur, A. R., Ulfa, A., Wijaya, A. D., Prasetyo, W., Winarso, G., & Dimiyati, R. D. (2023). Estimation and Mapping Above-Ground Mangrove Carbon Stock Using Sentinel-2 Data Derived Vegetation Indices in Benoa Bay of Bali Province, Indonesia. *Forest and Society*, 7(1), 116-134. <https://doi.org/10.24259/fs.v7i1.22062>
- Wachid, M. N., Hapsara, R. P., Cahyo, R. D., Wahyu, G. N., Syarif, A. M., Umarhadi, D. A., Fitriani, A. N., Ramadhaningrum, D. P., & Widyatmanti, W. (2017). Mangrove canopy density analysis using Sentinel-2A imagery satellite data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 70(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/70/1/012020>
- Widyasasi, D., Karyati, Kiswanto, Ibrahim, & Pramono, D. A. (2024). Analysis of Mangrove Forest Cover in Bontang City of East Kalimantan Province Using Normalized Difference Vegetation Index. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1430(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1430/1/012020>
- Winterwerp, J. C., Albers, T., Anthony, E. J., Friess, D. A., Mancheño, A. G., Moseley, K., Muhari, A., Naipal, S., Noordermeer, J., Oost, A., Saengsupavanich, C., Tas, S. A. J., Tonneijck, F. H., Wilms, T., Van Bijsterveldt, C., Van Eijk, P., Van Lavieren, E., & Van Wesenbeeck, B. K. (2020). Managing erosion of mangrove-mud coasts with permeable dams - lessons learned. *Ecological Engineering*, 158(November), 106078. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106078>
- Worthington, T., & Spalding, M. (2018). Mangrove Restoration Potential: A Global Map Highlighting a Critical Opportunity. www.globalmangrovetwatch.org
- Xie, Q., Dash, J., Huang, W., Peng, D., Qin, Q., Mortimer, H., Casa, R., Pignatti, S., Laneve, G., Pascucci, S., Dong, Y., & Ye, H. (2018). Vegetation Indices Combining the Red and Red-Edge Spectral Information for Leaf Area Index Retrieval. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(5), 1482-1493. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2813281>
- Zhu, Y., Liu, K., Liu, L., Myint, S. W., Wang, S., Liu, H., & He, Z. (2017). Exploring the potential of world view-2 red-edge band-based vegetation indices for estimation of mangrove leaf area index with machine learning algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 9. <https://doi.org/10.3390/rs9101060>