



DINAMIKA PERUBAHAN KESEHATAN MANGROVE DI PANTAI TIMUR PROVINSI JAMBI BERBASIS *MACHINE LEARNING DECISION TREE*

MUHAMMAD IQBAL AFIFI



**DEPARTEMEN MANAJEMEN HUTAN
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI, SUMBER INFORMASI, PENGGUNAAN AI, DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Dinamika Perubahan Kesehatan Mangrove Di Pantai Timur Provinsi Jambi Berbasis *Machine Learning Decision Tree*” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dalam penyusunan karya ini, penulis menggunakan bantuan kecerdasan buatan *Google Gemini AI*, untuk meningkatkan kejelasan tulisan, memperbaiki gaya bahasa akademik, serta mendukung penyuntingan bahasa selama penyusunan skripsi. Setelah menggunakan alat/layanan tersebut, penulis meninjau dan menyunting konten sesuai kebutuhan serta bertanggung jawab penuh atas isi karya tugas akhir ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2026

Muhammad Iqbal Afifi
E1401221023



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

ABSTRAK

MUHAMMAD IQBAL AFIFI. Dinamika Perubahan Kesehatan Mangrove Di Pantai Timur Provinsi Jambi Berbasis *Machine Learning Decision Tree*. Dibimbing oleh I NENGAH SURATI JAYA dan QORI PEBRIAL ILHAM.

Penelitian ini mendeskripsikan pengembangan algoritma pembelajaran mesin berbasis pohon keputusan untuk mendeteksi tingkat kesehatan mangrove dan menganalisis dinamika perubahannya dari tahun 2019 hingga 2025, sebagai respons terhadap tekanan antropogenik seperti pemanfaatan kayu dan konversi lahan di Pantai Timur Provinsi Jambi yang telah memicu degradasi vegetasi secara signifikan. Analisis data spasial dilakukan menggunakan citra satelit Sentinel-2A multi-temporal yang diintegrasikan dengan variabel sosio-geo-biofisik dengan akar pohon keputusan *Normalized Difference Water Index* (NDWI). Klasifikasi tingkat kesehatan mengacu pada nilai *Mangrove Health Index* (MHI). Hasil uji akurasi model menunjukkan performa yang optimal, dengan tingkat Akurasi Keseluruhan (*Overall Accuracy*) mencapai 96,6% dan Akurasi Kappa (*Kappa Accuracy*) sebesar 96% dengan *Cross Validation 5 fold*. Sepanjang periode analisis 2019–2025, dinamika perubahan spasial menunjukkan adanya degradasi dan pertumbuhan mangrove.

Kata kunci: dinamika, kesehatan mangrove, pohon keputusan

ABSTRACT

MUHAMMAD IQBAL AFIFI. Dynamic of Changes in Mangrove Health on the East Coast of Jambi Province Based on Machine Learning Decision Tree. I NENGAH SURATI JAYA and QORI PEBRIAL ILHAM.

This research describes the development of a decision tree-based machine learning algorithm to detect mangrove health levels and analyze its change dynamics from 2019 to 2025, in response to anthropogenic pressures such as wood utilization and land conversion on the East Coast of Jambi Province, which have triggered significant vegetation degradation. Spatial data analysis was conducted using multi-temporal Sentinel-2A satellite imagery integrated with socio-geo-biophysical variables, with the Normalized Difference Water Index (NDWI) serving as the root node of the decision tree. The health level classification refers to the Mangrove Health Index (MHI) values. The model accuracy test results demonstrated optimal performance, achieving an Overall Accuracy of 96.6% and a Kappa Accuracy of 96% using 5-fold Cross-Validation. Throughout the 2019–2025 analysis period, the spatial change dynamics indicated both the degradation and regrowth of the mangrove ecosystem monitoring.

Keywords: decision tree, dynamic, mangrove health index.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

DINAMIKA PERUBAHAN KESEHATAN MANGROVE DI PANTAI TIMUR PROVINSI JAMBI BERBASIS *MACHINE LEARNING DECISION TREE*

MUHAMMAD IQBAL AFIFI

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana pada
Program Studi Manajemen Hutan

**DEPARTEMEN MANAJEMEN HUTAN
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Skripsi:

1. Prof. Dr. Ir. I Nyoman Jaya Wistara, MS
2. Dr. Ujang Suwarna, S.Hut. M.Sc.F.Trop



Judul Skripsi : Dinamika Perubahan Kesehatan Mangrove Di Pantai Timur
Provinsi Jambi Berbasis *Machine Learning Decision Tree*

Nama : Muhammad Iqbal Afifi
NIM : E1401221023

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. I Nengah Surati Jaya, M.Agr

Pembimbing 2:
Qori Pebrial Ilham, S.Hut., M.Si

Diketahui oleh

Ketua Departemen Manajemen Hutan:
Dr. Soni Trison, S.Hut., M.Si
NIP 197711232007011002





@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanaahu Wa Ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Januari 2026 sampai bulan Juni 2026 ini ialah “Dinamika Perubahan Kesehatan Mangrove di Pantai Timur Provinsi Jambi berbasis *Machine Learning Decision Tree*”. Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2026

Muhammad Iqbal Afifi

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan kepada pihak yang telah kebersamai, mendukung dan memberikan berbagai bentuk bantuan kepada penulis selama perjalanan akademik sarjana dan penyelesaian skripsi. Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. I Nengah Surati Jaya, M.Agr dan Bapak Qori Pebrial Ilham, S.Hut., M.Si yang telah memberikan bimbingan, nasihat dan motivasi secara akademik maupun non akademik selama penulis menyusun skripsi.
2. Keluarga penulis Bapak Sudiono Adiguno, Ibu Kusdiana Ika Marita Susanti dan Muhammad Farhan Afifi yang selalu memberikan doa serta dukungan semangat yang membuat penulis tetap semangat.
3. Kementerian Lingkungan Hidup dan tim Kesatuan Lanskap Mangrove yang telah membantu, menemani dan menjadi teman diskusi penulis selama penelitian.
4. Keluarga Lab Remote Sensing khususnya Bapak Uus, Bang Dony, Mbak Anggie, Bang Amati, Mbak Amel, Mas Ganta, Bang Alif, Mbak Allisya, Mbak Cinta dan Bang Dandy yang telah membantu dan memberikan motivasi kepada penulis dalam proses penyusunan skripsi.
5. Teman-teman seperjuangan Imam, Firman, Marcel, Maya, Valen dan Rachel yang telah menjadi teman berdiskusi, saling memberikan motivasi selama menjalani proses penyusunan skripsi.
6. Meisya Rizki Maulida atas segala dukungan, perhatian dan kehadiran yang senantiasa menemani penulis dan menjadi tempat penulis untuk bercerita.
7. Manajemen Hutan angkatan 59 dan FAHUTAN angkatan 59 yang telah berjuang bersama dari awal hingga akhir perkuliahan.

Bogor, Juli 2026

Muhammad Iqbal Afifi



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xiv
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
II METODE	3
2.1 Waktu dan Tempat	3
2.2 Perangkat Lunak, Perangkat Keras dan Data Penelitian	3
2.3 Prosedur Kerja	5
2.4 <i>Decision Tree</i>	31
2.5 Seleksi Peubah	31
2.6 Optimasi Seleksi	32
2.7 Optimasi Parameter	33
2.8 Uji Akurasi	33
2.9 Transfer Lintas Waktu	34
2.10 Dinamika Perubahan Kesehatan Mangrove tahun 2019 hingga 2025	34
III HASIL DAN PEMBAHASAN	35
3.1 Struktur Komunitas Mangrove	35
3.2 Karakteristik Tegakan Berdasarkan Kelas <i>Mangrove Health Index</i>	37
3.3 Seleksi Peubah	38
3.4 Optimasi Model	40
3.5 Uji Akurasi	45
3.6 Hasil Klasifikasi	48
3.7 Dinamika Perubahan Kesehatan Mangrove Tahun 2019 hingga 2025	56
IV SIMPULAN DAN SARAN	61
4.1 Simpulan	61
4.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN	65
RIWAYAT HIDUP	68

DAFTAR TABEL

1	Data Penelitian	4
2	Karakteristik citra Sentinel-2A	4
3	Skema kelas tutupan lahan	9
4	Skema kelas perubahan	10
5	Skema kelas perubahan (<i>lanjutan</i>)	11
6	Kombinasi indeks vegetasi	11
7	Parameter regresi linear dalam harmonisasi citra	19
8	Indeks Nilai Penting (INP) tingkat pertumbuhan semai	35
9	Indeks Nilai Penting (INP) tingkat pertumbuhan pancang	36
10	Indeks Nilai Penting (INP) tingkat pertumbuhan pohon	37
11	Karakteristik struktur vegetasi berdasarkan kelas kesehatan	37
12	Seleksi peubah spektral	39
13	Seleksi peubah sosio-geo-biofisik	39
14	Seleksi peubah kombinasi spektral dan sosio-geo-biofisik	40
15	Optimasi parameter setiap peubah	41
16	Matrik konfusi peubah spektral	46
17	Matriks konfusi peubah sosio-geo-biofisik	47
18	Matriks konfusi kombinasi peubah spektral dan sosio-geo-biofisik	47
19	Performa model <i>decision tree</i>	48
20	Uji akurasi <i>backcasting</i> hasil klasifikasi 2019 sudah diregresi	50
21	Uji akurasi <i>backcasting</i> hasil klasifikasi 2019 non-regresi	50
22	Luasan (ha) kelas perubahan di Pantai Timur Provinsi Jambi	59
23	Perubahan luasan (ha) dari tahun 2019 hingga 2025	59

DAFTAR GAMBAR

1	Peta lokasi penelitian dan titik pengambilan data lapangan	3
2	Diagram alir penelitian	5
3	Indeks vegetasi 2025: a) ARVI_25, b) CMRI_25, c) MVI_25, d) NDBI_25, e) NDVI_25, f) NDWI_25, g) SAVI_25	12
4	Indeks vegetasi 2025: a) ARVI_19, b) CMRI_19, c) MVI_19, d) NDBI_19, e) NDVI_19, f) NDWI_19, g) SAVI_19	15
5	Harmonisasi citra : a) ARVI_2019, b) ARVI_2019_Regresi	20
6	Harmonisasi citra : a) CMRI_2019, b) CMRI_2019_Regresi	21
7	Harmonisasi citra a) MVI_2019, b) MVI_2019_Regresi	22
8	Harmonisasi citra : a) NDBI_2019, b) NDBI_2019_Regresi	23
9	Harmonisasi citra : a) NDVI_2019, b) NDVI_2019_Regresi	24
10	Harmonisasi citra : a) NDWI_2019, b) NDWI_2019_Regresi	25
11	Harmonisasi citra : a) SAVI_2019, b) SAVI_2019_Regresi	26
12	Peubah sosio-geo-biofisik : a) Elevasi, b) <i>Proximity</i> garis pantai, c) <i>Proximity</i> Jalan, d) Kelerengan, e) <i>Proximity</i> pemukiman, f) <i>Proximity</i> sungai, g) Jenis substrat	27
13	Ilustrasi pohon keputusan: a) NDWI>-0,569, b) NDWI<=-0,569, Jenis Substrat = Lumpur, CMRI>1,499, c) NDWI<= -0,569, Jenis Substrat =	

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

	Lumpur berpasir dan Non Substrat, d) NDWI $\leq$ -0,569, Jenis Substrat = Lumpur, CMRI $\leq$ 1,499	42
14	Hasil klasifikasi menggunakan citra tanpa regresi dan citra dengan regresi pada citra tahun 2019	49
15	Hasil klasifikasi dengan tiga skema peubah	52
16	Hasil klasifikasi deteksi kesehatan mangrove 2025 dengan peubah kombinasi peubah spektral dan peubah sosio-geo-biofisik	54
17	Hasil klasifikasi deteksi kesehatan mangrove 2019 dengan peubah kombinasi peubah spektral dan peubah sosio-geo-biofisik	55
18	Dinamika perubahan di Pantai Timur Provinsi Jambi pada lokasi 1	57
19	Dinamika perubahan di Pantai Timur Provinsi Jambi pada lokasi 2	58



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Provinsi Jambi memiliki garis pantai sepanjang 221 km di Kabupaten Tanjung Jabung Barat dan Tanjung Jabung Timur yang didominasi oleh ekosistem mangrove. Namun, tekanan antropogenik seperti pemanfaatan kayu mangrove dan konversi lahan memicu kerusakan vegetasi yang sangat signifikan di kawasan pesisir Pantai Timur Jambi. Pada periode 2012–2014, tutupan kanopi di Cagar Alam Hutan Bakau Pantai Timur menurun dari 98% menjadi 83%, sementara di Cagar Alam Sungai Betara menyusut progresif menjadi 78% akibat masifnya konversi lahan menjadi area perkebunan seluas 1.584,57 ha (Achmad *et al.* 2020). Kerusakan vegetasi ini berdampak buruk secara ekologis akibat hilangnya benteng pelindung alami yang berfungsi mereduksi energi gelombang dan memperlambat arus. Berdasarkan penelitian Achmad *et al.* (2020) menunjukkan kondisi terbaru pada tahun 2018 memperlihatkan penurunan drastis pada mangrove kerapatan tinggi yang tersisa 3.275,07 ha. Namun, di sisi lain, tutupan mangrove sehat dan jarang justru mendominasi dengan kenaikan luasan masing-masing mencapai 5.766,92 ha dan 1.155,83 ha.

Perlindungan ekosistem mangrove semakin mendapatkan ketegasan dari pemerintah dengan diterbitkan Peraturan Pemerintah (PP) No. 27 Tahun 2025 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Mangrove. Peraturan Pemerintah No. 27 Tahun 2025 menjelaskan mengenai kewajiban pemantauan, perlindungan dan pemulihan ekosistem penting termasuk mangrove dengan berdasarkan data ilmiah. Kondisi saat ini semakin menjelaskan bahwa kelestarian dan kesehatan mangrove menjadi perhatian khusus bagi pemangku kebijakan dan masyarakat sebagai bukti usaha dalam menjaga kelestarian mangrove. Konversi ekosistem mangrove di kawasan Asia Tenggara, termasuk Indonesia, telah mencapai tingkat yang mengkhawatirkan dengan estimasi sekitar 80% areanya telah beralih fungsi menjadi tambak, lahan pertanian, serta perkebunan industri (Jaya *et al.* 2026). Dalam kaitan tersebut, deteksi terhadap tingkat kesehatan mangrove menjadi parameter krusial karena kondisi kesehatan vegetasi (seperti kerapatan dan kandungan klorofil daun) mencerminkan kemampuan ekosistem dalam menjalankan fungsi ekologisnya, sekaligus menjadi indikator awal untuk mendeteksi degradasi sebelum kerusakan permanen terjadi (Indrazora *et al.* 2024).

Ancaman konversi lahan yang sudah mulai banyak terjadi menunjukkan bahwa saat ini diperlukannya alternatif yang dapat membantu monitoring dan evaluasi mangrove secara akurat dan real menunjukkan kondisi mangrove dengan cepat. Upaya mengendalikan konversi ekosistem pesisir serta menjaga keseimbangan fungsi ekologi mangrove memerlukan pengembangan teknik deteksi kondisi vegetasi mangrove yang cepat dan akurat (Jaya *et al.* 2026). Metode terestris berbasis survei lapangan langsung sulit diterapkan di Pantai Timur Jambi karena kendala aksesibilitas medan yang berlumpur dalam, serta luasnya area geografis yang cukup luas. Oleh karena itu, integrasi teknik penginderaan jauh dan *machine learning decision tree* hadir sebagai solusi alternatif yang rasional untuk mengatasi keterbatasan fisik dan efisiensi biaya tersebut. *Decision tree* dipilih karena bersifat tidak *black box*, transparan, logis, dan mudah diinterpretasikan dibandingkan dengan *machine learning* yang lain seperti *random forest*. Dalam

konteks ini, analisis dinamika perubahan kesehatan mangrove secara spasial di Jambi dapat berperan sebagai instrumen pengawasan berkala dan menjadi alternatif.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan berdasarkan latar belakang untuk menjawab rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana tingkat akurasi algoritma *decision tree* berbasis *machine learning* dapat mendeteksi kesehatan mangrove di Pantai Timur Provinsi Jambi?
2. Bagaimana dinamika perubahan kesehatan mangrove yang terjadi di Pantai Timur Provinsi Jambi pada tahun 2019 hingga 2025?

1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan mengembangkan algoritma *machine learning decision tree* untuk deteksi kesehatan mangrove di Pantai Timur Provinsi Jambi. Algoritma pohon keputusan pembelajaran mesin (*machine learning decision tree*) mengidentifikasi dinamika perubahan kesehatan mangrove di Pantai Timur Provinsi Jambi.

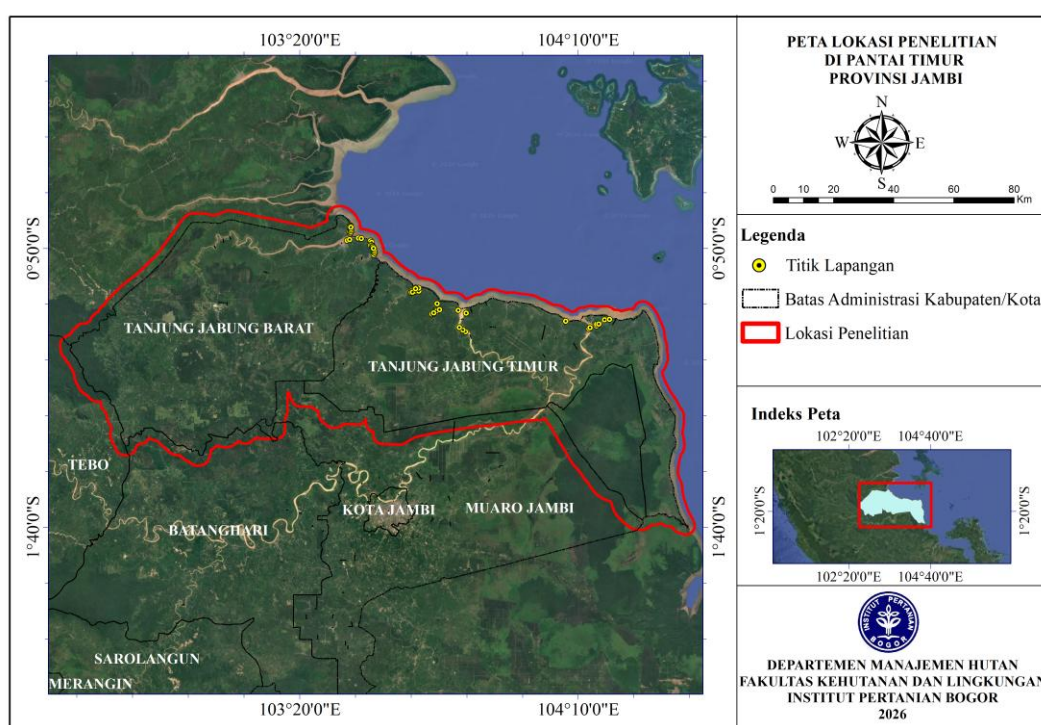
1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan dalam mendeteksi kesehatan mangrove di Pantai Timur Provinsi Jambi berbasis *machine learning decision tree*. Hasil analisis dinamika perubahan kesehatan mangrove yang diperoleh dari penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan dalam rehabilitasi dan pemeliharaan mangrove.

II METODE

2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada bulan Januari - Juli 2026. Pengambilan data lapangan dan *ground check* dilakukan pada bulan Januari 2026 di Kabupaten Tanjung Jabung Timur dan Kabupaten Tanjung Jabung Barat Provinsi Jambi. Secara geografis terletak pada $0^{\circ}30'00''$ - $2^{\circ}00'00''$ LS dan $103^{\circ}00'00''$ - $104^{\circ}30'00''$ BT. Pengolahan dan analisis data serta penulisan karya tulis ilmiah dilakukan pada bulan Januari - Juli 2026 di Laboratorium *Remote Sensing* dan *Geographic Information System* Departemen Manajemen Hutan Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB University. Lokasi penelitian dan titik pengecekan lapangan disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Peta lokasi penelitian dan titik pengambilan data lapangan

2.2 Perangkat Lunak, Perangkat Keras dan Data Penelitian

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini berupa laptop ASUS Vivobook Pro 15 OLED dengan spesifikasi *processor* Intel Core i5-11300H dengan 3.10GHz, RAM 16 GB dan penyimpanan 477 GB. Pengambilan data lapangan menggunakan perangkat keras berupa kamera untuk dokumentasi visual kanopi, *Global Positioning System* (GPS), *tally sheet*, dan alat tulis sebagai penentuan dan pencatatan koordinat *ground check*, serta dukungan perangkat lunak yang terdiri dari *ArcMap* 10.8 untuk membantu pembuatan area latih, *ArcMap* 10.3 untuk membantu pengolahan jarak layer sosio-geo-biofisik, QGIS untuk membantu dalam membangun indeks vegetasi. Data *Training Area* yang ada dilakukan proses lebih lanjut dengan *AI Studio* 2026 1.1 agar mendapatkan algoritma *decision tree* dan model yang diperoleh diubah menjadi bahasa pemrograman dengan bantuan

CodeBlocks 25.03. Penelitian ini menggunakan *Microsoft Excel* 2021 yang digunakan untuk membuat kumpulan data yang diperoleh serta *Microsoft Word* 2021 digunakan untuk membantu dalam membuat tulisan.

Penelitian ini juga menggunakan data utama dan data pendukung. Data utama yang digunakan pada penelitian ini berupa Citra Sentinel-2A perekaman tahun 2019 dan 2025. Pada penelitian ini menggunakan data lapangan yang diperoleh langsung di Kabupaten Tanjung Jabung Barat dan Kabupaten Tanjung Jabung Barat. Data pendukung digunakan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dengan rincian data pendukung meliputi, elevasi, jaringan jalan, jaringan sungai, garis pantai, pemukiman, jenis substrat, Peta Mangrove Nasional (PMN), batas administrasi Provinsi Jambi yang di sajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Data Penelitian

Data penelitian	Sumber
Citra Sentinel-2A (Perekaman 2025,2019)	Copernicus
Layer elevasi	DEMNAS
Layer jaringan jalan	Rupa Bumi Indonesia (BIG)
Layer jaringan sungai	Rupa Bumi Indonesia (BIG)
Layer garis pantai	Rupa Bumi Indonesia (BIG)
Layer pemukiman	Rupa Bumi Indonesia (BIG)
Layer batas administrasi desa	Rupa Bumi Indonesia (BIG)
Layer substrat	Pusat Penelitian Lingkungan Hidup (PPLH) IPB dan Hasil Survei Lapangan
Layer PMN	Kementerian Lingkungan Hidup (KLH)
Koordinat lapangan	Survei lapang

Citra Sentinel-2A dipilih dalam penelitian ini karena memiliki resolusi temporal 10 hari (satelit tunggal) dan 5 hari (konstelasi gabungan). Hal ini memudahkan untuk melihat perubahan yang cukup dinamis. Karakteristik citra secara rinci disajikan pada Tabel 2. Pemilihan *band* dilakukan dengan pertimbangan sensitivitas spektral dalam analisis vegetasi dengan dilakukannya pembangunan indeks vegetasi yang akan digunakan.

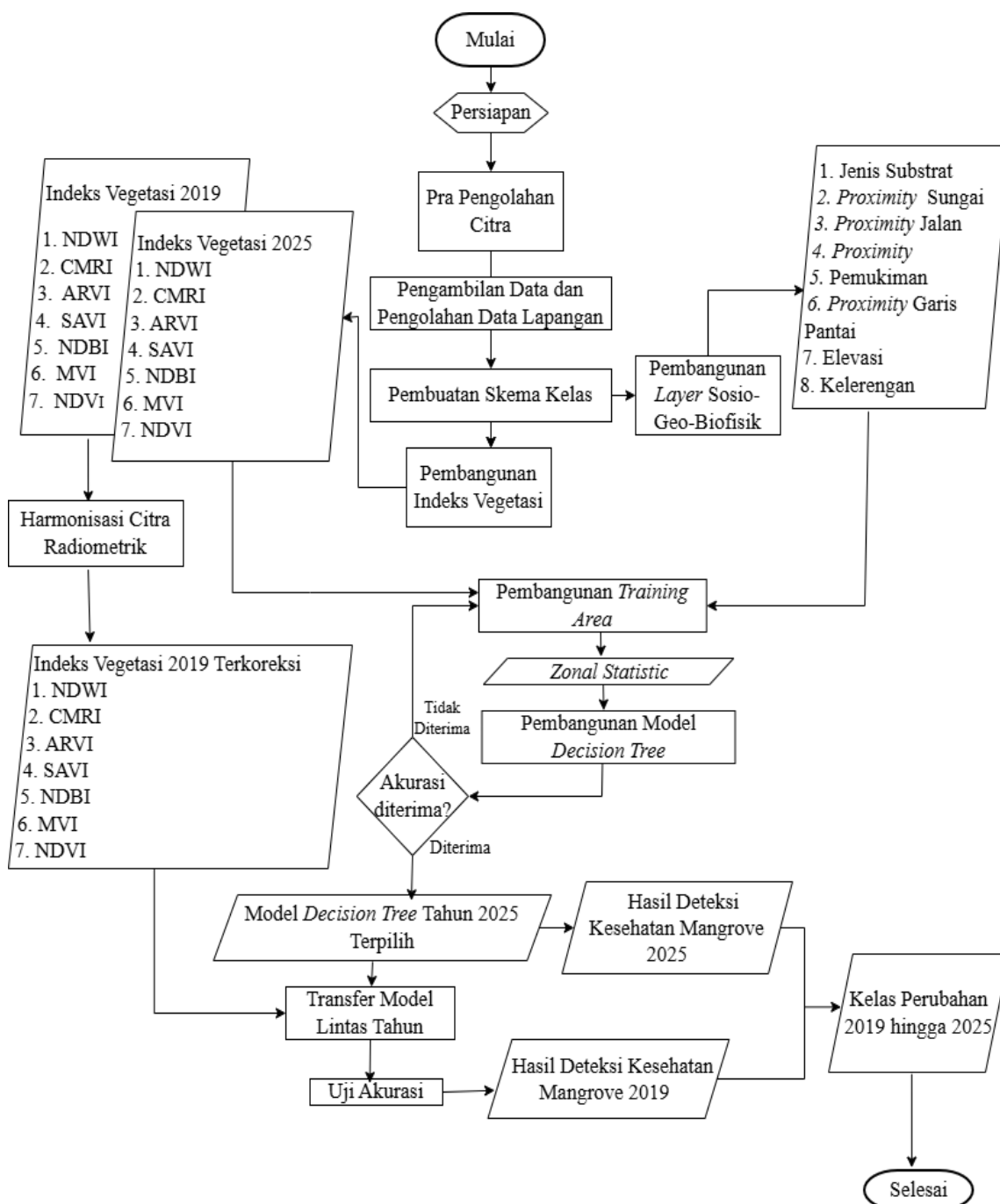
Tabel 2 Karakteristik citra Sentinel-2A

Band	Panjang gelombang (µm)	Resolusi spasial (m)
1 Coastal aerosol	0,443	60
2 Blue*	0,490	10
3 Green*	0,560	10
4 Red*	0,665	10
5 Red edge 1	0,705	20
6 Red edge 2	0,740	20
7 Red edge 3	0,784	20
8 NIR*	0,842	10
8A Narrow NIR	0,865	20
9 Water vapour	0,945	60
10 SWIR-cirrus	1,380	20
11 SWIR1 *	1,610	20
12 SWIR2	2,190	20

Keterangan: (*) = Band yang digunakan dalam penelitian

2.3 Prosedur Kerja

Penelitian ini dilakukan dengan melalui beberapa tahapan yang terdiri dari pra-pengolahan citra, pembuatan citra sintetis, penentuan *training area*, pembangunan model pohon keputusan, harmonisasi citra, uji akurasi serta transfer model lintas tahun. Alur penelitian disajikan pada (Gambar 2)



Gambar 2 Diagram alir penelitian

2.3.1 Pra Pengolahan Citra

Citra Sentinel-2A merupakan citra yang sudah terkoreksi secara radiometrik namun belum terkoreksi secara geometrik. Koreksi geometrik citra dilakukan dengan menyesuaikan sistem proyeksi yang digunakan pada Area of Interest (AOI) yang akan dilakukan pengolahan. Sistem proyeksi yang digunakan untuk Indonesia adalah sistem proyeksi UTM (Universal Transverse Mercator) (Jaya 2010). Sistem proyeksi UTM yang digunakan untuk pantai timur Provinsi Jambi menggunakan UTM 48S. Setelah melakukan penyesuaian proyeksi dan lokasi yang akan diteliti, selanjutnya melakukan resampling menjadi resolusi 10 m pada band citra yang belum memiliki resolusi 10 m yakni pada band 5, band 6, band 7, band 8a, band 9, band 11, band 12. Pra-pengolahan citra dilanjutkan dengan melakukan pemotongan dengan menyesuaikan garis pantai dan batas administrasi Pantai Timur Provinsi Jambi.

2.3.2 Pengolahan Data Lapangan

Data yang diperoleh dari lapangan dilakukan pengolahan agar mendapatkan parameter kesehatan mangrove yang menggambarkan kondisi lapangan pada titik pengamatan. Titik pengamatan dipilih berdasarkan tutupan kanopi tampak citra dan akses untuk menuju lokasi titik pengambilan data lapangan. Metode ini dilakukan agar keterwakilan tutupan kanopi yang menjadi salah satu parameter kesehatan ekosistem mangrove dapat terwakili dalam pengambilan data lapangan.

Parameter kesehatan mangrove dianalisis dengan menggunakan data presentase tutupan tajuk (Canopy Cover/CC), kerapatan tegakan (N/ha), volume tegakan (Vol/ha), indeks keanekaragaman jenis Shannon-Winner (H'), indeks kemerataan jenis (Evenness), serta Indeks Nilai Penting (INP). Hasil pengolahan data lapangan dilakukan sebagai pembandingan kesehatan mangrove di lapangan dan tampak citra Sentinel-2A. Hasil pengolahan data lapangan tersebut dievaluasi berdasarkan titik koordinat dan tampak piksel dari Citra Sentinel-2A dalam membantu penambahan Training Area dengan karakter visual citra yang serupa.

Persentase tutupan tajuk diperoleh dari foto tutupan kanopi di lapangan yang kemudian diolah menggunakan perangkat lunak ImageJ, dengan rumus (1) :

$$CC = \frac{P_t}{P} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan :

CC = Persentase tutupan tajuk (%)

P_t = Jumlah piksel tajuk

P = Jumlah seluruh piksel

Volume tegakan dihitung menggunakan data diameter dan tinggi pohon dengan rumus (2) :

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times H \times f \quad (2)$$

Keterangan :

V = Volume pohon (m³)

D = Diameter setinggi dada (m)

H = Tinggi total pohon (m)

f = Faktor bentuk pohon (0,7)

$\pi = 3,1416$

Keragaman jenis mangrove dihitung untuk mengetahui tingkat keanekaragaman spesies di titik pengambilan data yang dihitung menggunakan indeks Shannon-Wiener menggunakan rumus (3) :

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (3)$$

Keterangan :

H' = Indeks keragaman Shannon-Wiener

P_i = Proporsi Individu spesies

iS = Jumlah Spesies

Kerapatan tegakan dihitung pada setiap plot berdasarkan jumlah individu di setiap plot kemudian dikonversi ke satuan hektar dengan menggunakan rumus (4):

$$N = \frac{n}{A} \quad (4)$$

Keterangan :

N = Kerapatan tegakan (individu/ha)

n = Jumlah individu dalam plot

A = Luas plot (ha)

Tingkat dominansi setiap spesies mangrove dalam komunitas dapat diketahui dengan menggunakan Indeks Nilai Penting (INP). Nilai Indeks Penting dihasilkan dari penjumlahan kerapatan relatif (KR) dihitung menggunakan persamaan (5), frekuensi relatif (FR) dihitung menggunakan rumus (6), dan dominansi relatif (DR) dihitung menggunakan rumus (7). Nilai Indeks Penting (INP) diperoleh dengan penjumlahan kerapatan relatif, frekuensi relatif, dan dominansi relatif yang dijumlahkan dengan menggunakan rumus (8) :

$$KR = \frac{K_i}{\sum K_i} \times 100 \quad (5)$$

$$FR = \frac{F_i}{\sum F_i} \times 100 \quad (6)$$

$$DR = \frac{D_i}{\sum D_i} \times 100 \quad (7)$$

$$INP = KR + FR + DR \quad (8)$$



Keterangan :

KR = Kerapatan Relatif (%)

FR = Frekuensi Relatif (%)

DR = Dominansi Relatif (%)

Ki = Kerapatan spesies ke-i

Fi = Frekuensi spesies ke-i

Di = Dominansi spesies ke-i

3.3.3 Pembangunan Skema Kelas

Pembangunan skema kelas tutupan lahan memiliki empat syarat utama. Empat syarat utama dalam pembangunan kelas yaitu, seluruh tutupan lahan harus terbagi habis, semua kelas dapat digabung menjadi satu kelas, skema kelas harus memiliki aturan pemberian label, dan kelas-kelas harus disusun secara hierarkis (Jaya 2015). Penelitian ini melakukan pembagian kelas seperti yang tercantum pada Tabel 3.

Pembagian kelas kesehatan mangrove yang digunakan pada penelitian ini Penentuan kelas kesehatan mangrove menggunakan nilai *Mangrove Health Index* (MHI) mengacu pada rumus (9) yang dikeluarkan oleh Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia tahun 2020. Nilai kesehatan mangrove dikategorikan menjadi tiga kategori yaitu >66,67% sebagai mangrove baik, 33,33%-66,67% sebagai mangrove sedang dan <33,33% sebagai mangrove buruk.

$$MHI (\%) = \left(\frac{SC + SD + SNSP}{3} \right) \times 10 \quad (9)$$

Keterangan:

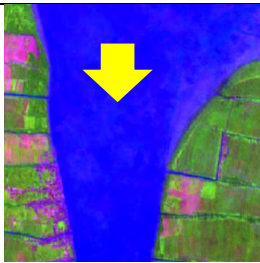
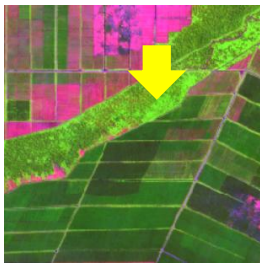
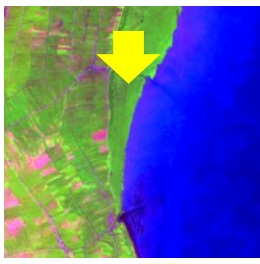
MHI = *Mangrove Health Indeks (%)*

SC = Skor Canopy
($SC = 0,25 \times \text{Persentase canopy tiap plot} - 13,06$)

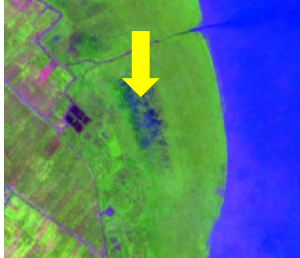
SD = Skor rata-rata diameter
($SD = 0,45 \times \text{Rata - rata diameter tiap plot} + 1,42$)

SNSP = Skor jumlah pancang
($SNSP = 0,13 \times \text{Jumlah pancang tiap plot} + 4,1$)

Tabel 3 Skema kelasutupan lahan

Skema kelas	Deskripsi	Dokumentasi lapangan	Tampak citra sentinel -2A perekaman tahun 2025
Badan Air (BAR)	Seluruh area perairan di kawasan pesisir, seperti laut, sungai, muara. Dokumentasi diambil pada titik 1°02'40,92"LS dan 104°15'29,52"BT.		
Lahan Terbuka/Lahan Terbangun (LTB/LBN)	Area tanpa vegetasi, mencakup tanah kosong, area terbuka, pemukiman, jalan, dan bangunan fisik. Dokumentasi diambil pada titik 1°00'29,88"LS dan 104°11'03,12"BT.		
Vegetasi Bukan Mangrove (VBM)	Semua jenis vegetasi di daratan sekitar pesisir selain hutan mangrove, seperti semak belukar, vegetasi lahan kering, dan perkebunan. Dokumentasi diambil pada titik 1°13'30,72"LS dan 103°39'19,80"BT.		
Mangrove Sangat Sehat (MSS)	Kawasan hutan mangrove dengan penutupan tajuk >75% kerapatan tinggi dan nilai MHI >66,67%. Dokumentasi diambil pada titik 0°46'57,07"LS dan 103°29'09,059"BT.		
Mangrove Sehat (MSD)	Kawasan hutan mangrove dengan penutupan tajuk 50-75% dan nilai MHI 33-66,67%. Dokumentasi diambil pada titik 0°49'24,96"LS dan 103°32'57,12"BT		

Tabel 3 Skema kelas tutupan lahan (*lanjutan*)

Skema kelas	Deskripsi	Dokumentasi lapangan	Tampak citra sentinel - 2A perekaman tahun 2025
Mangrove Kurang Sehat (MKS)	Kawasan hutan mangrove dengan penutupan tajuk <50% dan nilai MHI<33%. Dokumentasi diambil pada titik 0°45'57,24"LS dan 103°28'59,88"BT		

@Mak cipta milik IPB University

Dinamika perubahan kesehatan mangrove di Pantai Timur Provinsi Jambi dilihat dari perubahan tingkat kesehatan dan tutupan lahan dari 2019 dan 2025. Kelas perubahan dibagi berdasarkan bentuk perubahan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Skema kelas perubahan

No	Arah perubahan	Deskripsi	Bentuk perubahan
1	Degradasi mangrove	Penurunan kualitas, kerapatan, atau struktur ekosistem hutan mangrove	1. MSS-MSD 2. MSS-MKS 3. MSD-MKS
2	Deforestasi Mangrove	Perubahan tutupan lahan mangrove menjadi tutupan lahan non mangrove	1. MSS-LTB/LBN 2. MSD-LTB/LBN 3. MKS-LTB/LBN
2	<i>Regrowth</i> mangrove	Peningkatan kualitas, kerapatan, atau struktur ekosistem hutan mangrove	1. MKS-MSD 2. MKS-MSS 3. MSD-MSS
3	<i>No change</i> mangrove	Tidak ada perubahan kualitas, kerapatan, atau struktur ekosistem hutan mangrove	1. MSS-MSS 2. MSD-MSD 3. MKS-MKS
4	Dinamika non mangrove	Perubahan yang terjadi di luar ekosistem hutan mangrove	1. LTB/LBN-VBM 2. VBM-LTB/LBN
5	<i>No change</i> non mangrove	Tidak ada perubahan yang terjadi di luar ekosistem mangrove	1. LTB/LBN-LTB/LBN 2. VBM-VBM 3. BAR-BAR
6	Abrasi	Perubahan yang terjadi dari daratan atau ekosistem mangrove menjadi badan air	1. MSS-BAR 2. MKS-BAR 3. MSD-BAR 4. VBM-BAR

Tabel 5 Skema kelas perubahan (*lanjutan*)

No	Arah perubahan	Deskripsi	Bentuk perubahan
7	Akresi	Perubahan yang terjadi dari badan air menjadi daratan	1. BAR-MKS 2. BAR-MSD 3. BAR-MSS 4. BAR-LTB/LBN 5. BAR-VBM

Keterangan: Sama seperti Tabel 3

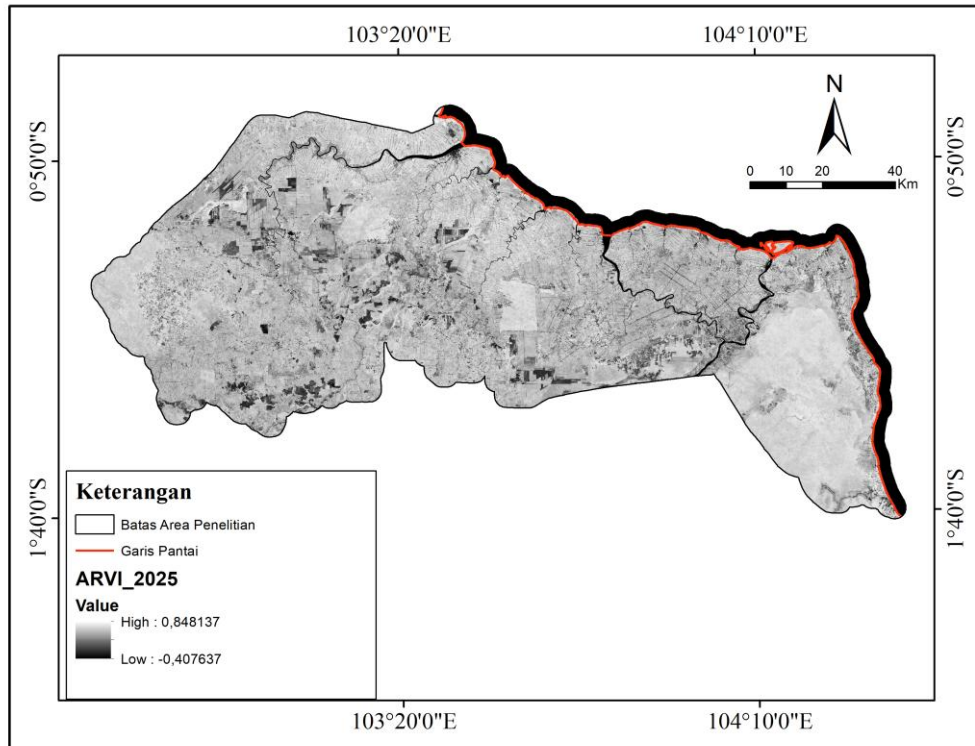
2.3.4 Penyusunan Indeks Vegetasi

Pembangunan indeks vegetasi dilakukan dengan operasi matematis sederhana seperti penjumlahan, pengurangan dan rasio beberapa salurna citra satelit yang menghasilkan suatu nilai indeks vegetasi (Jaya 2015). Persamaan yang digunakan dalam pembangunan indeks disajikan pada Tabel 5 dengan tampilan indeks vegetasi disajikan pada Gambar 3 dan (Gambar 4).

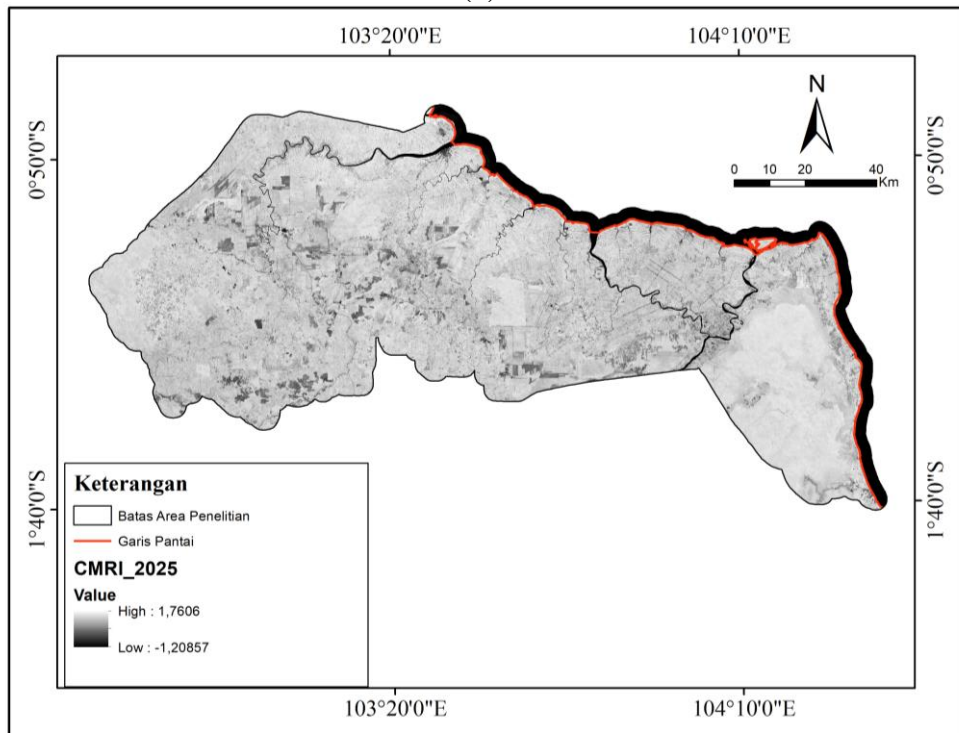
Tabel 6 Kombinasi indeks vegetasi

Indeks Vegetasi	Persamaan	Sumber
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI)	$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$	Rouse <i>et al.</i> 1974
<i>Combined Mangrove Recognition Index</i> (CMRI)	$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} - \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)}$	Gupta <i>et al.</i> 2018
<i>Atmospherically Resistant Vegetation Index</i> (ARVI)	$\frac{NIR - 2R + Blue}{NIR + 2R - Blue}$	Kaufman dan Tanre 1992
<i>Mangrove Vegetation Index</i> (MVI)	$\frac{(NIR - G)}{(Swir 1 - G)}$	Baloloy <i>et al.</i> 2020
<i>Normalized Difference Built-up Index</i> (NDBI)	$\frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)}$	Zha <i>et al.</i> 2001
<i>Normalized Difference Water Index</i> (NDWI)	$\frac{G - NIR}{G + NIR}$	McFeeters 1996
<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i> (SAVI)	$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red + 0,5)} \times (1 + 0,5)$	Huete 1988

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak meruikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

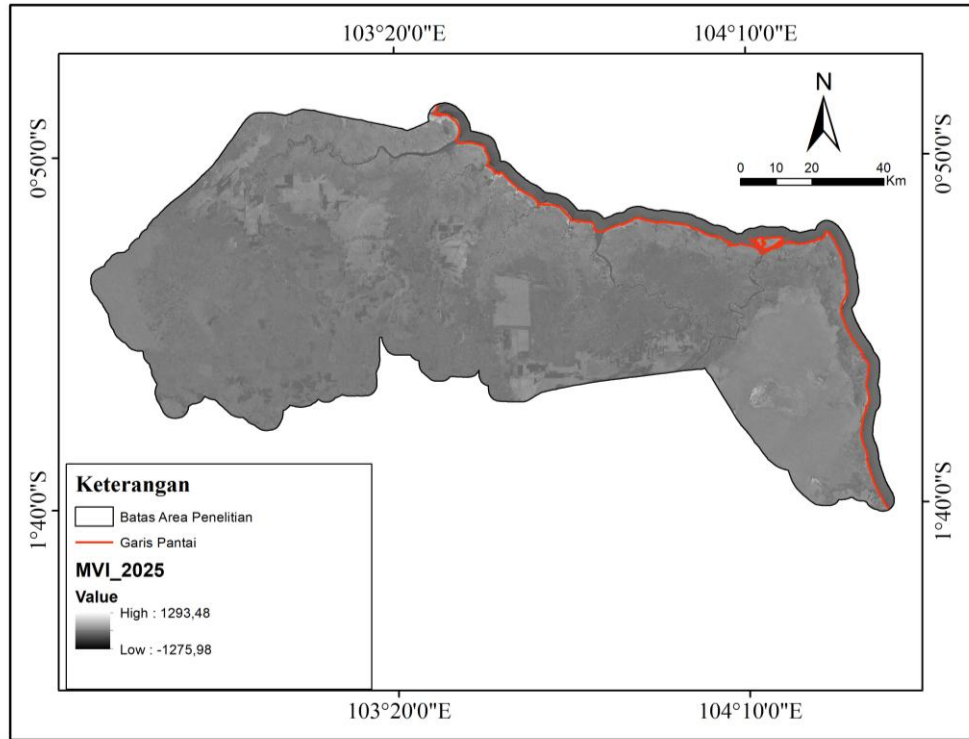


(a)

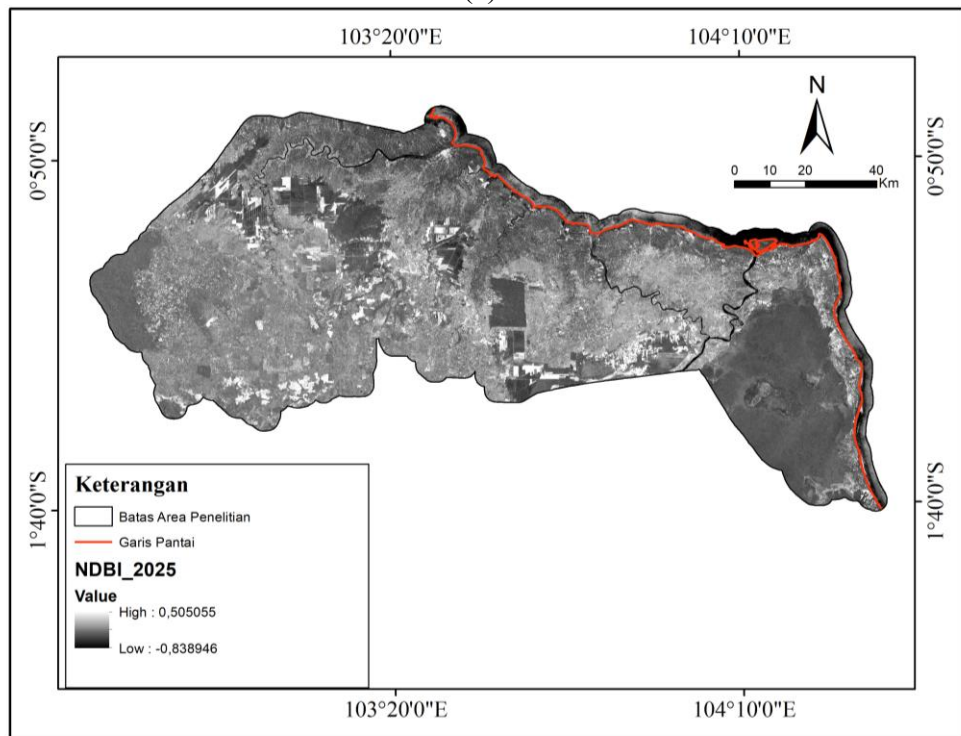


(b)

Gambar 3 Indeks vegetasi 2025: a) ARVI_25, b) CMRI_25, c) MVI_25, d) NDBI_25, e)NDVI_25, f) NDWI_25, g) SAVI_25



(c)



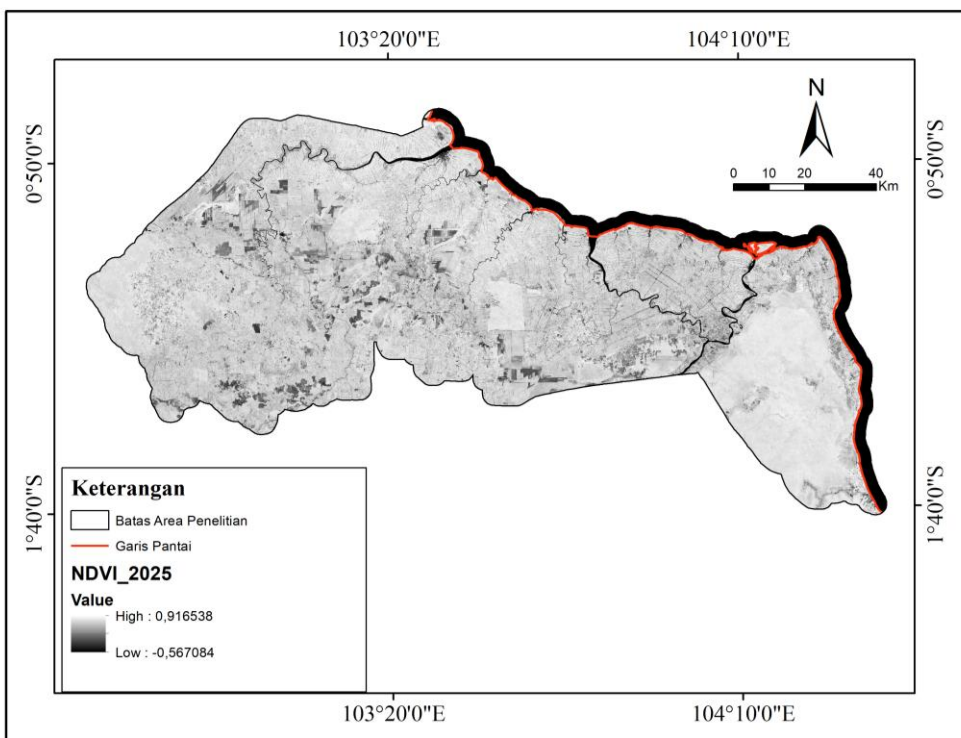
(d)

Gambar 3 (lanjutan)

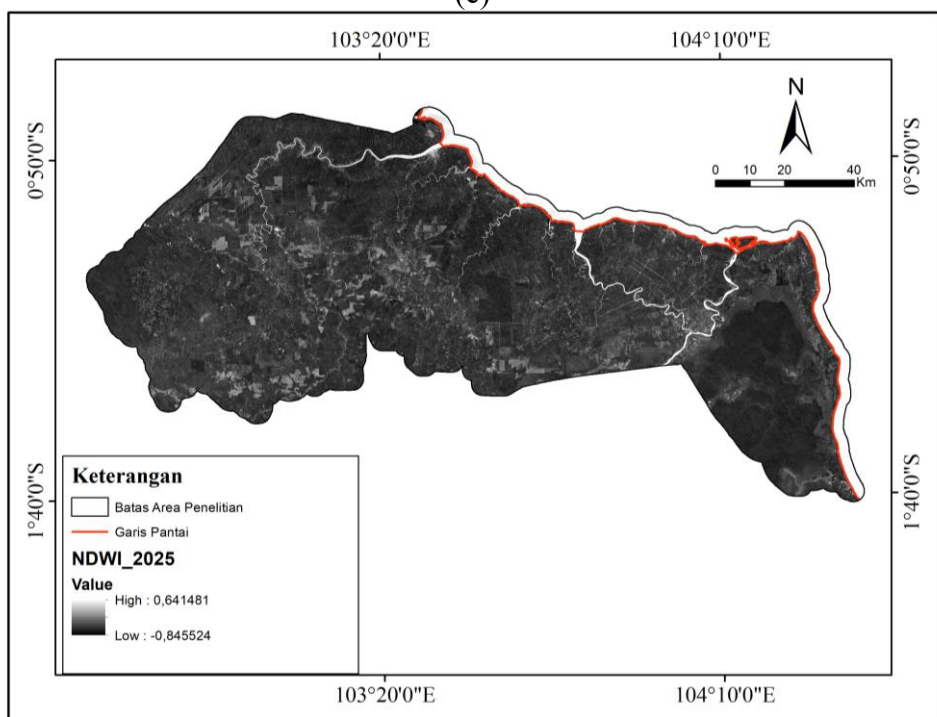


- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

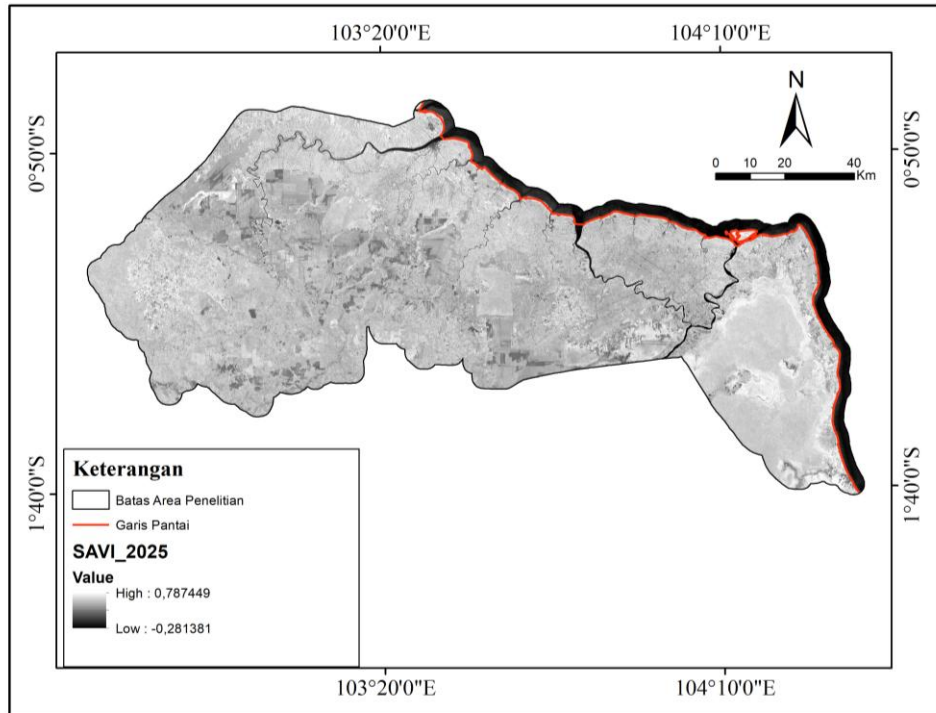


(e)



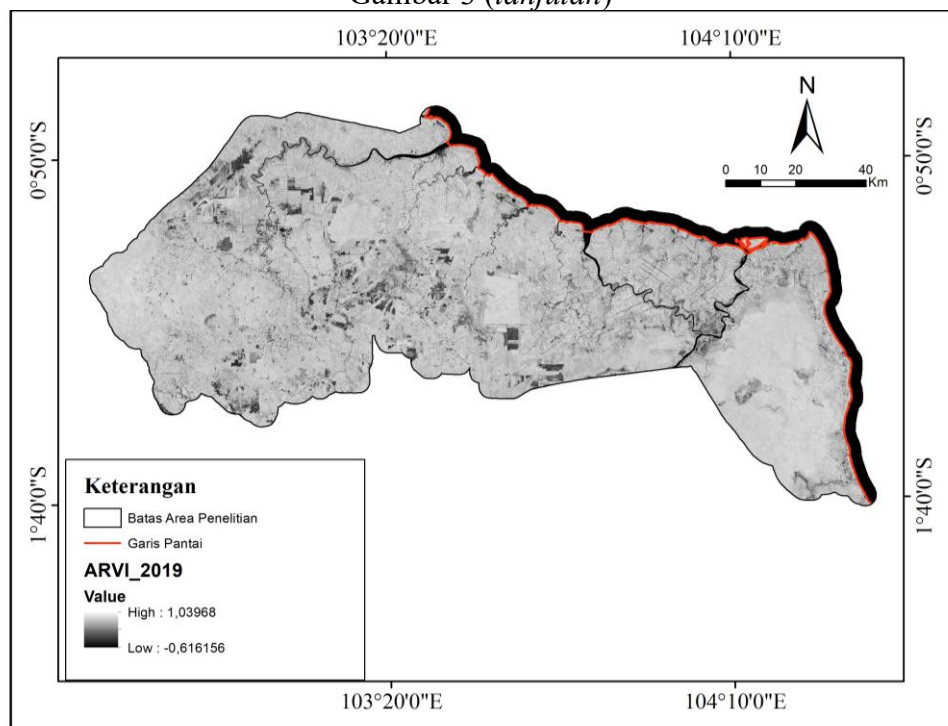
(f)

Gambar 3 (lanjutan)



(g)

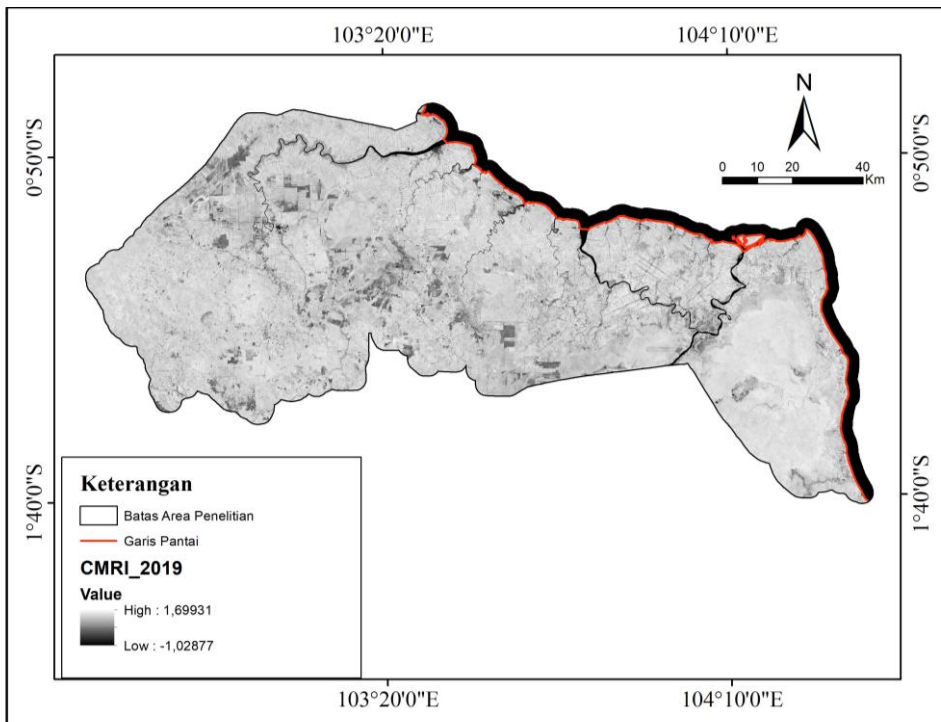
Gambar 3 (lanjutan)



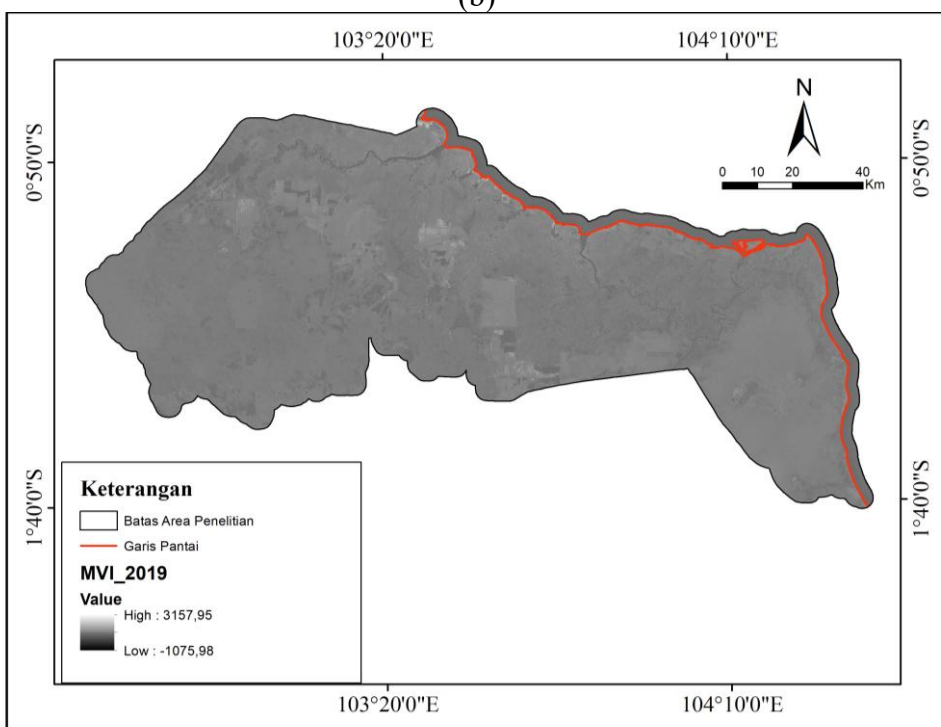
(a)

Gambar 4 Indeks vegetasi 2025: a) ARVI_19, b) CMRI_19, c) MVI_19, d) NDBI_19, e) NDVI_19, f) NDWI_19, g) SAVI_19

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

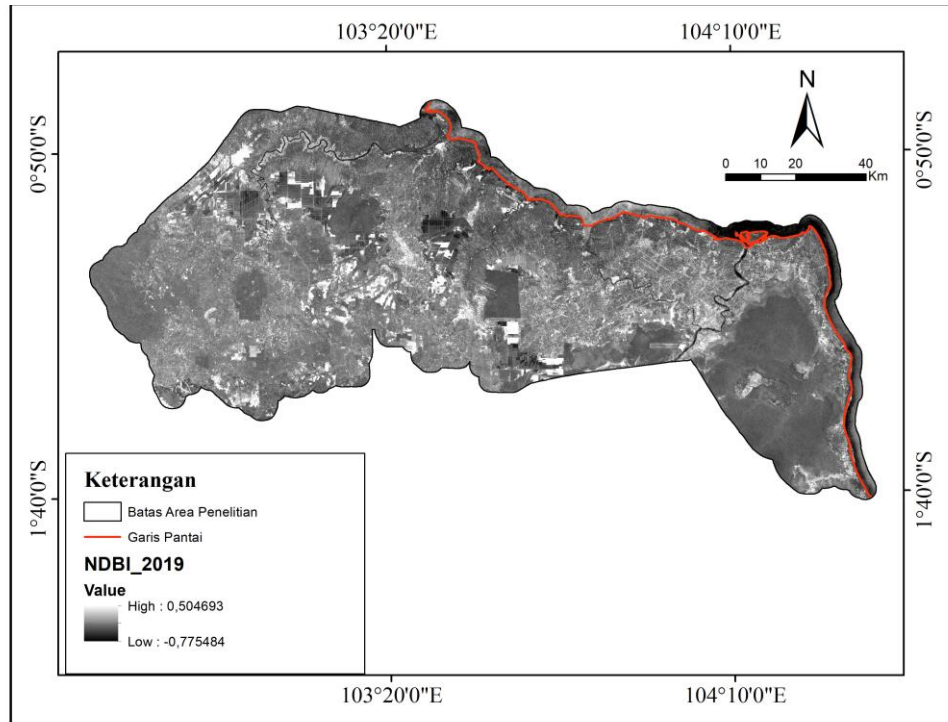


(b)

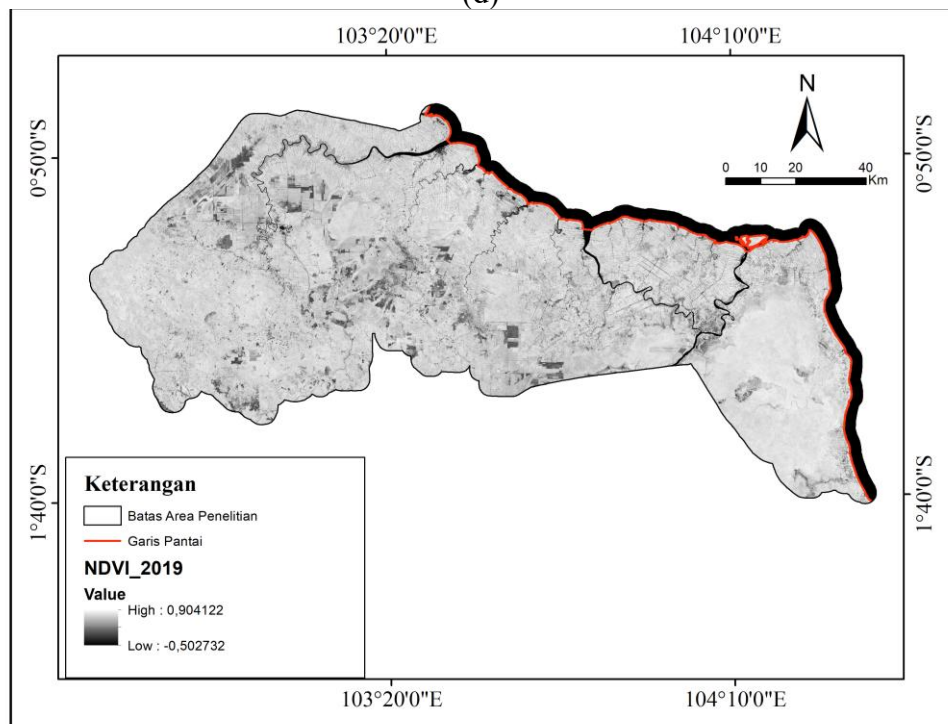


(c)

Gambar 4 (lanjutan)



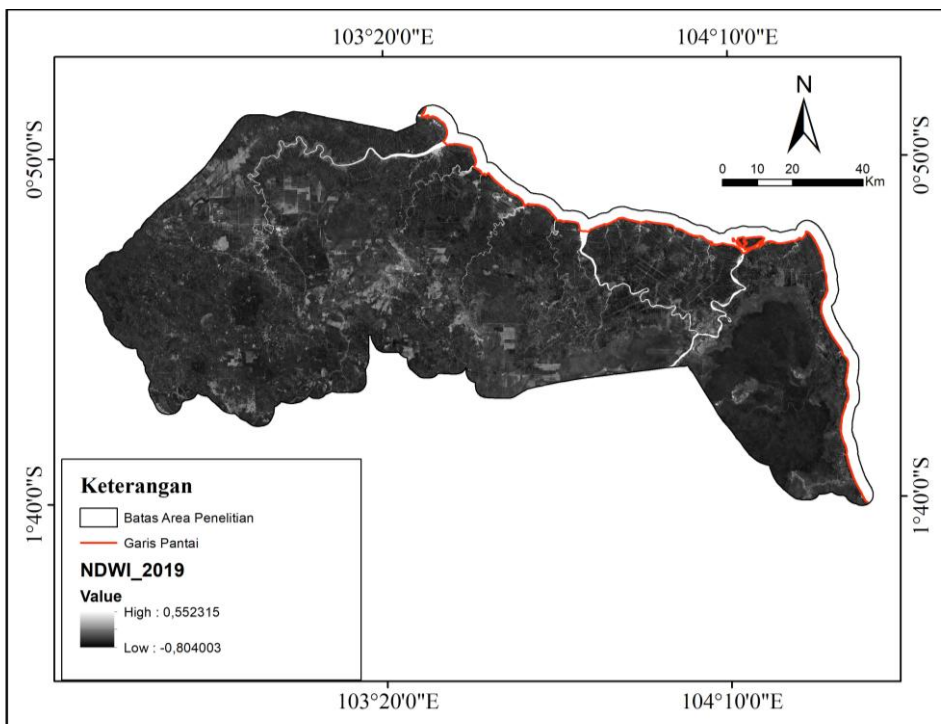
(d)



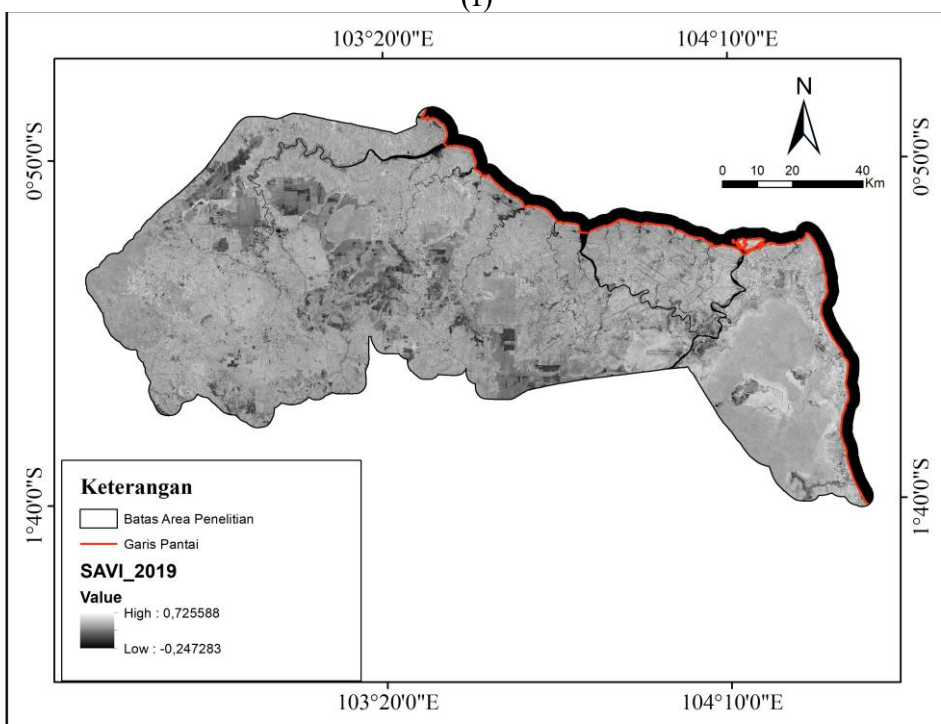
(e)

Gambar 4 (lanjutan)

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



(f)



(g)

Gambar 4 (lanjutan)

2.3.5 Harmonisasi Indeks Vegetasi Multi Waktu

Penelitian ini menerapkan skema transfer model lintas waktu menggunakan model yang dilatih menggunakan data perekaman 2025 sebagai tahun referensi. Penelitian ini menggunakan Pseudo Invariant Feature (PIF) dengan melihat piksel pada tahun 2019 dan 2025 yang tidak memiliki perubahan cukup signifikan. Koreksi radiometrik ini dilakukan untuk mengurangi perbedaan nilai piksel pada tahun 2019 dengan referensi 2025 (Kim dan Han 2021). Tahun 2025 dipilih karena merepresentasikan kondisi terkini dan didukung dengan data lapangan yang diambil pada rentang waktu yang tidak begitu jauh dari 2025 dan sudah tervalidasi mengenai kondisi sesungguhnya di lapangan. Penelitian ini melibatkan data citra tahun 2019 untuk prediksi mundur (*backcasting*) kondisi mangrove pada tahun 2019 dan tidak dilibatkan dalam melatih model yang dibangun menggunakan data 2025. Penerapan model lintas waktu memiliki tantangan yaitu berbedanya karakter dan nilai piksel dari tahun yang berbeda. Untuk mengatasi masalah tersebut, penelitian ini melakukan harmonisasi citra berbasis regresi sebelum dilakukan transfer model pada data tahun 2019 dengan parameter pada Tabel 6.

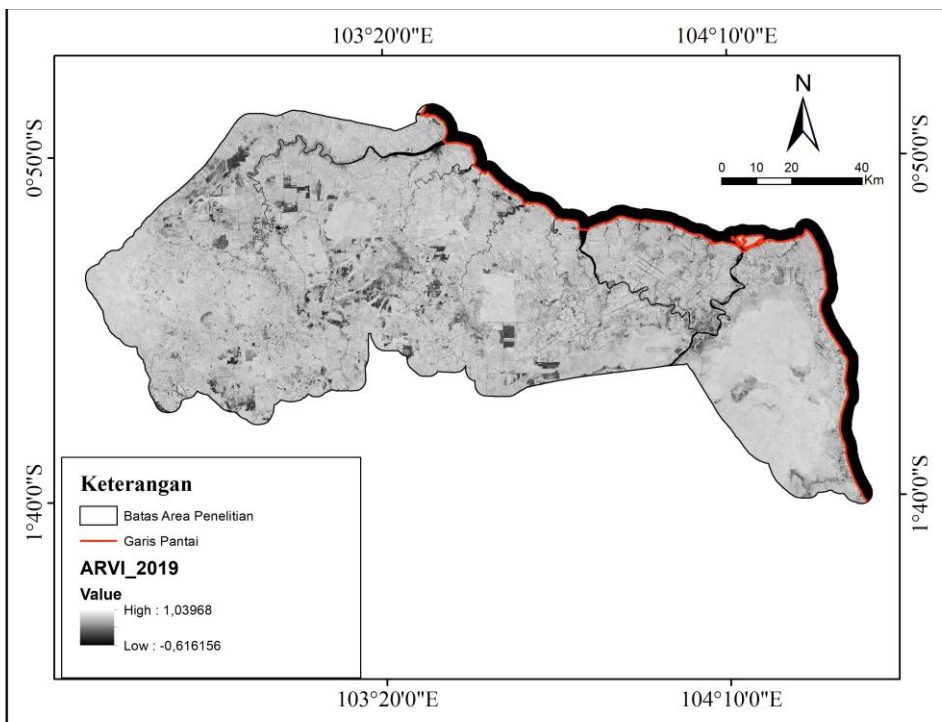
Tabel 7 Parameter regresi linear dalam harmonisasi citra

Model	Persamaan	R ² (%)	RMS Error
M1	ARVI_2019_Reg = -0.01956998+(0.56813515 X ARVI_2019)	82.9	0.04
M2	NDVI_2019_Reg = 1.08040022 X NDVI_2019	88.1	0.07
M3	NDWI_2019_Reg = 1.07615598 X NDWI_2019	89.6	0.08
M4	MVI_2019_Reg = -0.24784539+(1.34521160 X MVI_2019)	87.1	0.08
M5	SAVI_2019_Reg = -0.01067987+(0.93613405 X SAVI_2019)	89.7	0.02
M6	NDBI_2019_Reg = 0.03531902+(1.13486495 X NDBI_2019)	90.9	0.08
M7	CMRI_2019_Reg = 1.08256780 X CMRI_2019	89.7	0.14

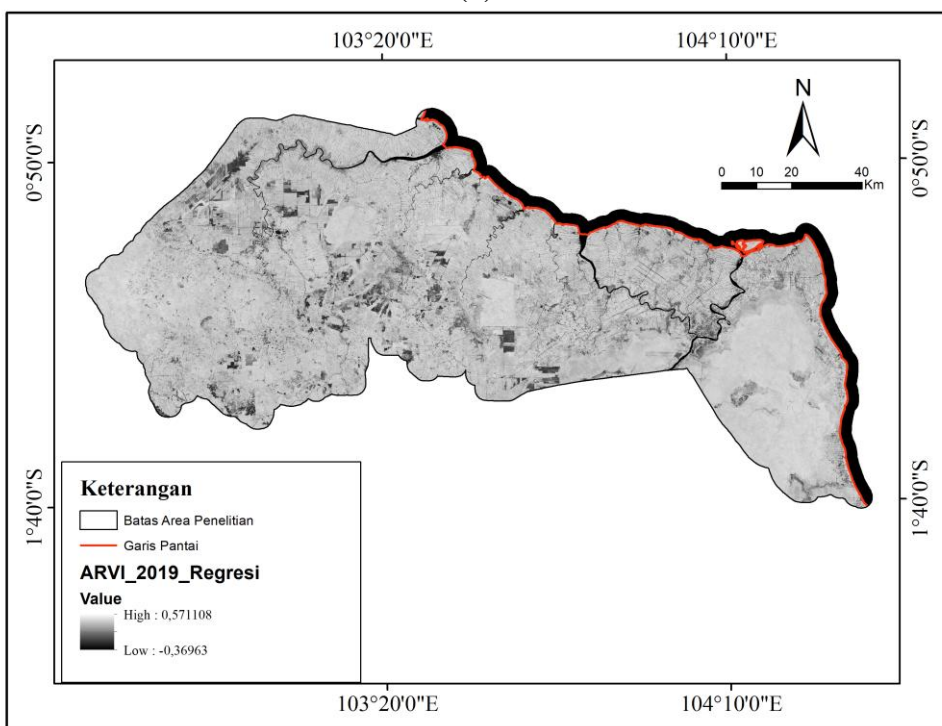
Keterangan : Indeks 2019 Koreksi (2019_Reg) dikoreksi untuk aplikasi model 2025 pada citra tahun 2019 yang dibangun dengan pendekatan *Pseudo Invariant Feature* (PIF) dari perekaman 2019 dan 2025.

Harmonisasi citra dilakukan dengan membangun indeks vegetasi 2019 menggunakan persamaan yang didapatkan dengan melibatkan indeks vegetasi 2019 asli. Persamaan tersebut digunakan untuk mendapatkan indeks vegetasi 2019 yang sudah disetarakan nilai pikselnya dengan indeks vegetasi 2025. Perbandingan indeks vegetasi yang dilakukan harmonisasi citra disajikan pada Gambar 5 untuk indeks ARVI, Gambar 6 untuk indeks CMRI, Gambar 7 untuk indeks MVI, Gambar 8 untuk indeks NDBI, Gambar 9 untuk indeks NDVI, Gambar 10 untuk indeks NDWI, Gambar 11 untuk indeks SAVI.

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

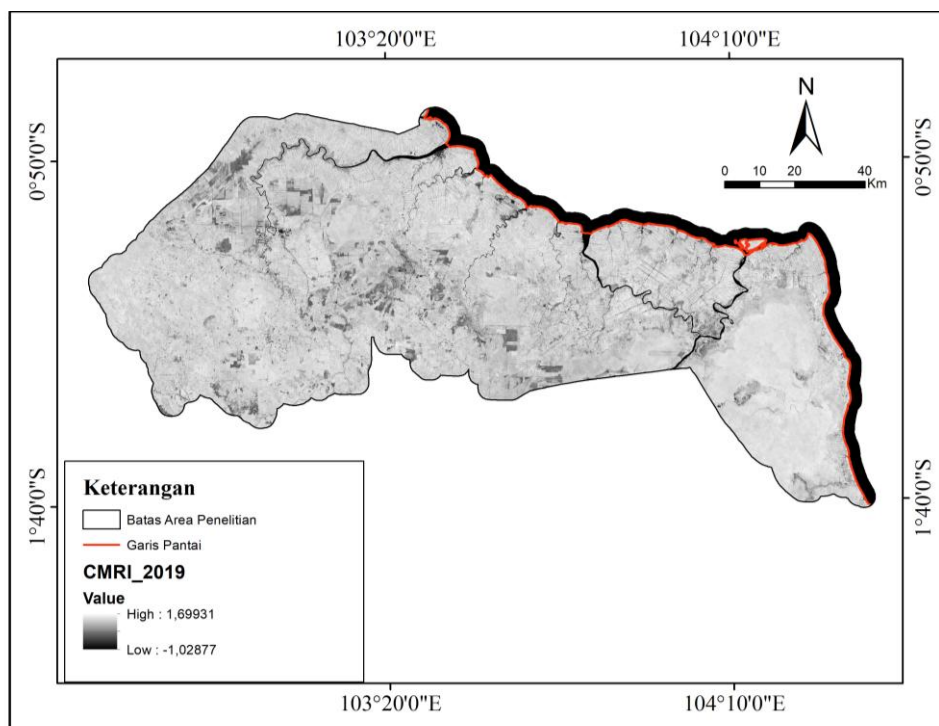


(a)

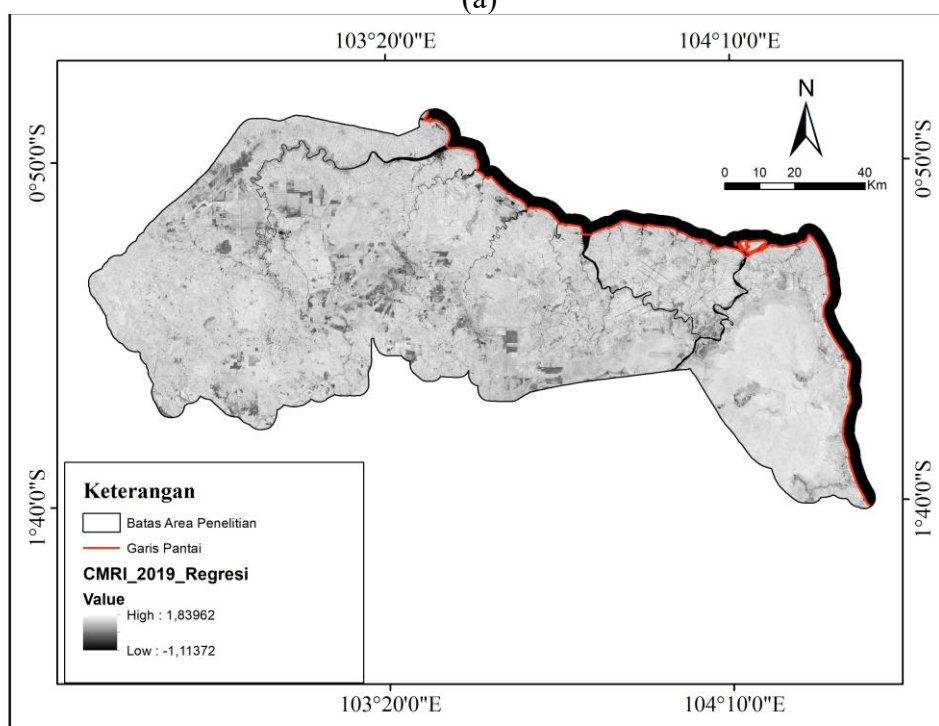


(b)

Gambar 5 Harmonisasi citra : a) ARVI_2019, b) ARVI_2019_Regresi



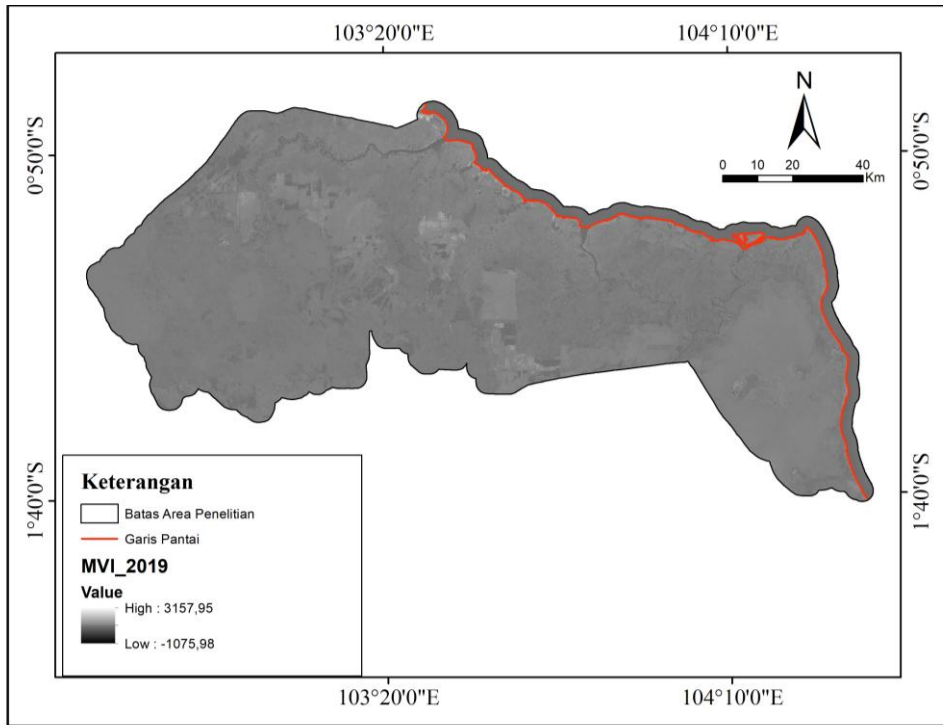
(a)



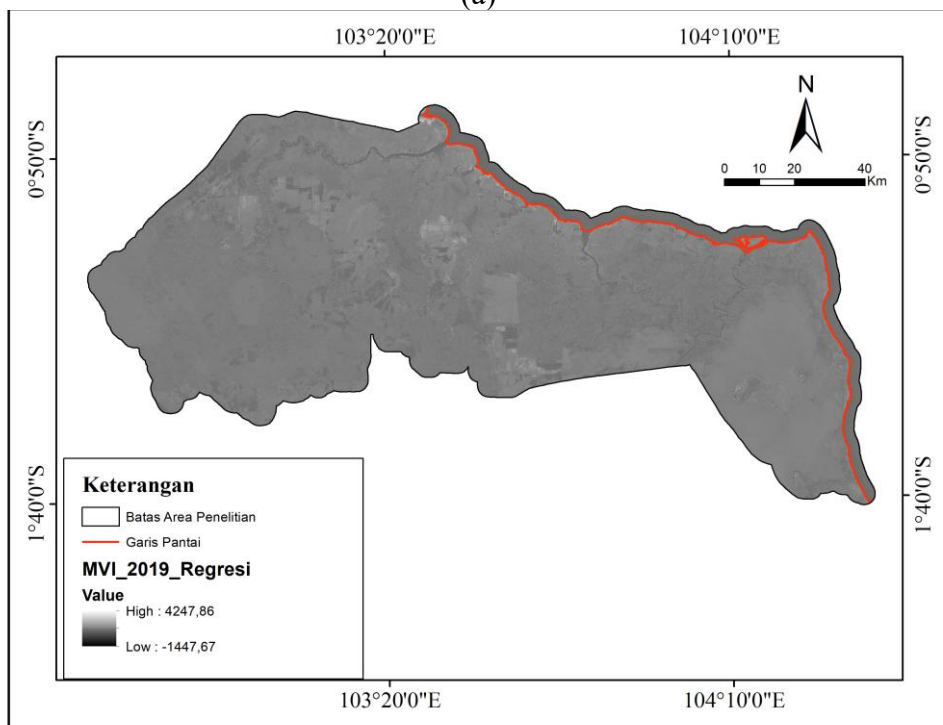
(b)

Gambar 6 Harmonisasi citra : a) CMRI_2019, b) CMRI_2019_Regresi

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

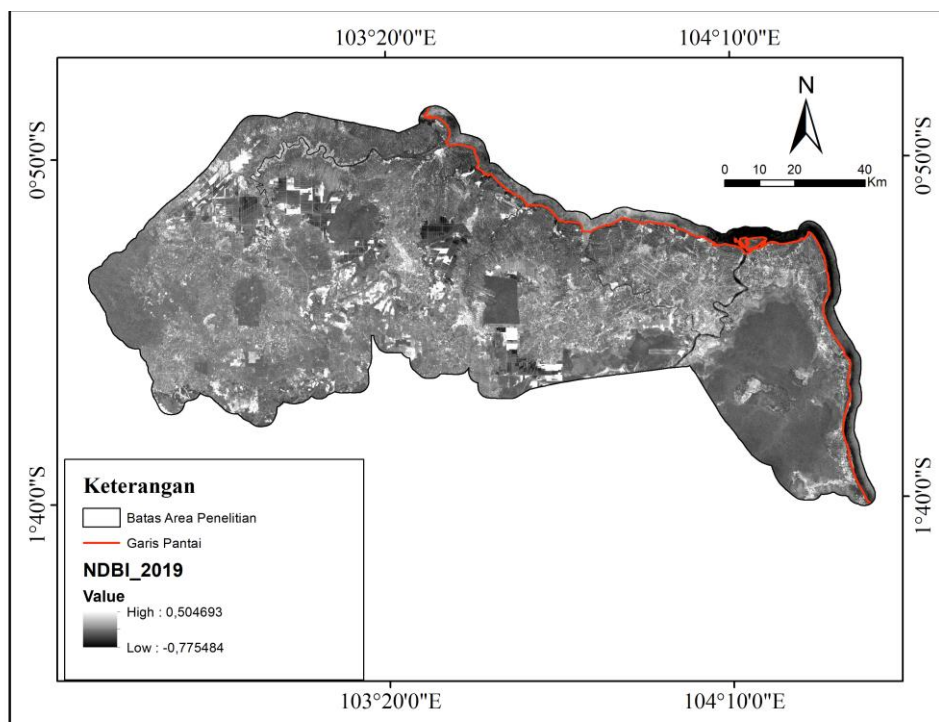


(a)

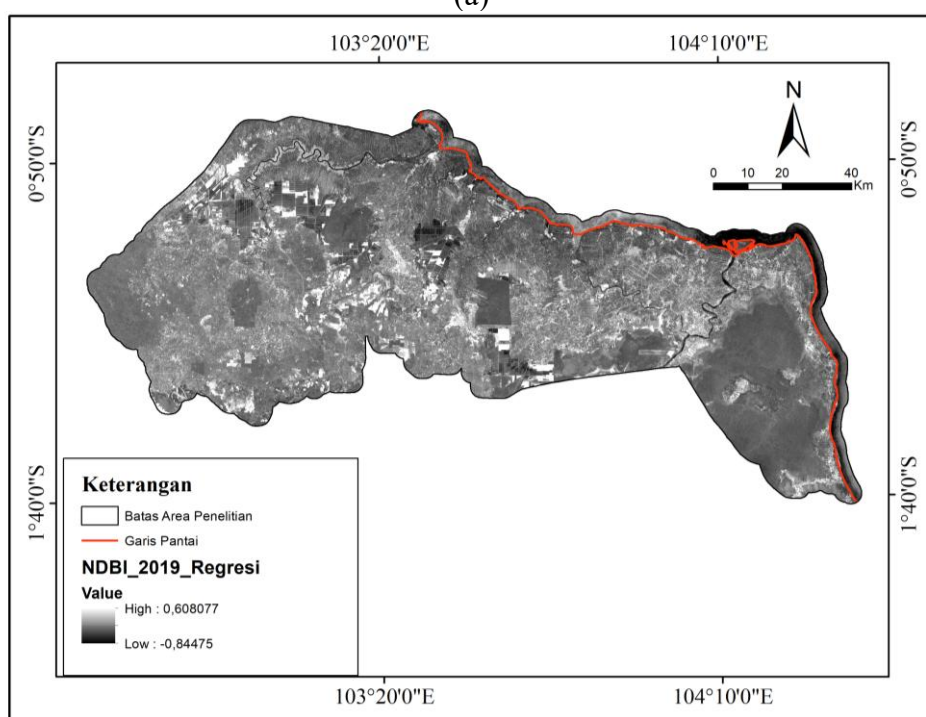


(b)

Gambar 7 Harmonisasi citra a) MVI_2019, b) MVI_2019_Regresi



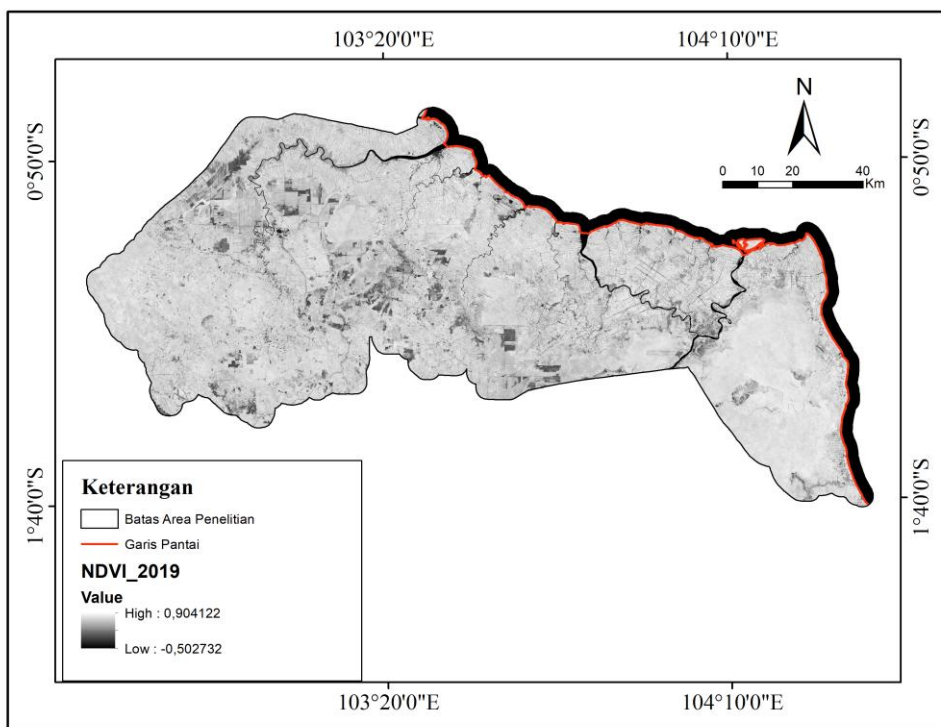
(a)



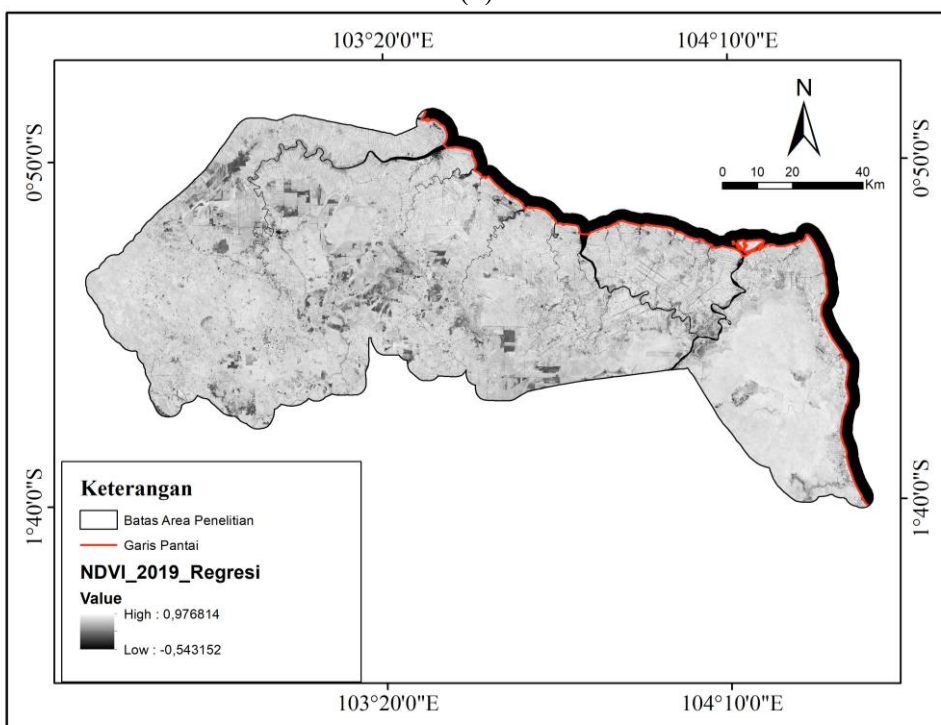
(b)

Gambar 8 Harmonisasi citra : a) NDBI_2019, b) NDBI_2019_Regresi

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

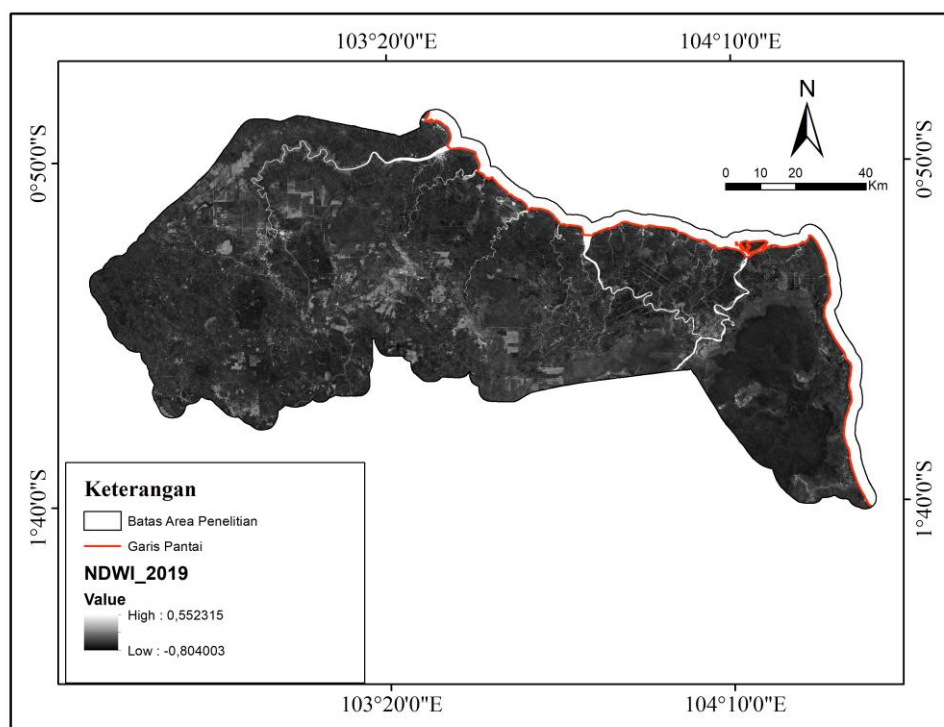


(a)

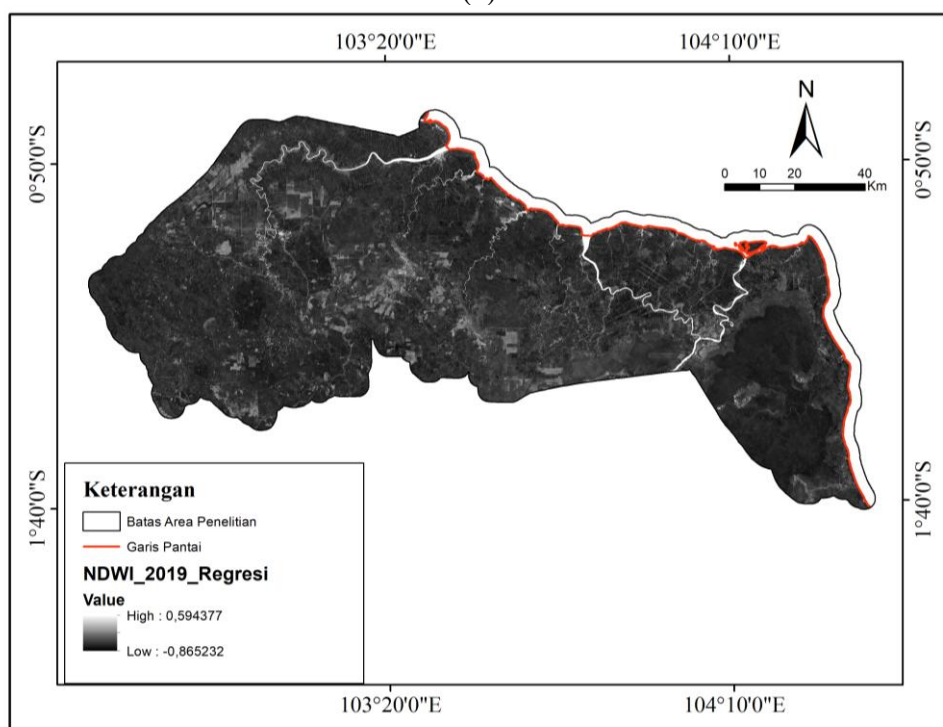


(b)

Gambar 9 Harmonisasi citra : a) NDVI_2019, b) NDVI_2019_Regresi



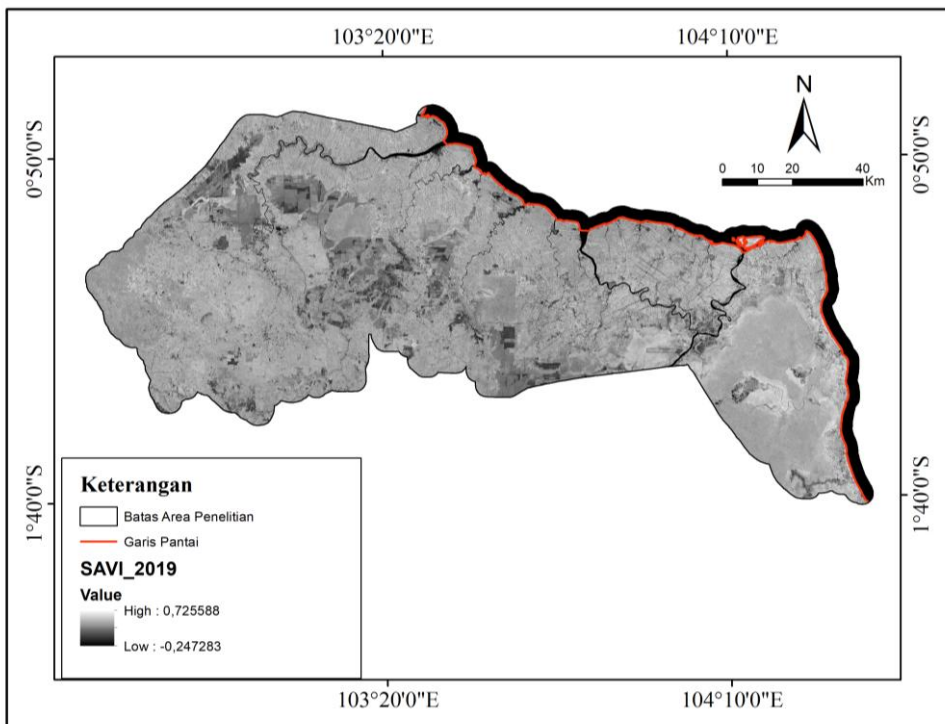
(a)



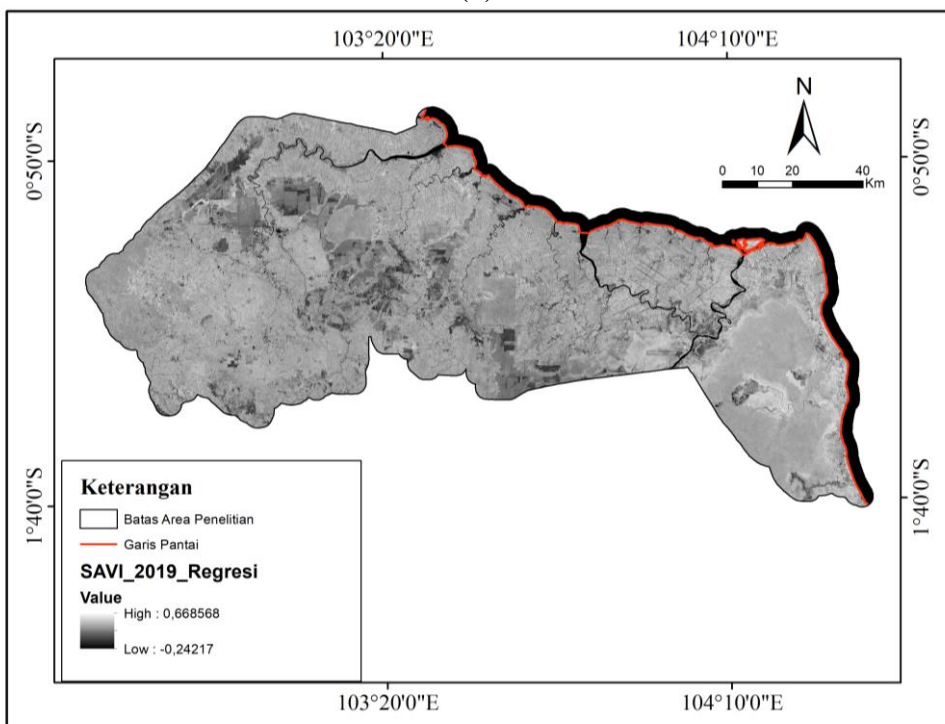
(b)

Gambar 10 Harmonisasi citra : a) NDWI_2019, b) NDWI_2019_Regresi

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



(a)

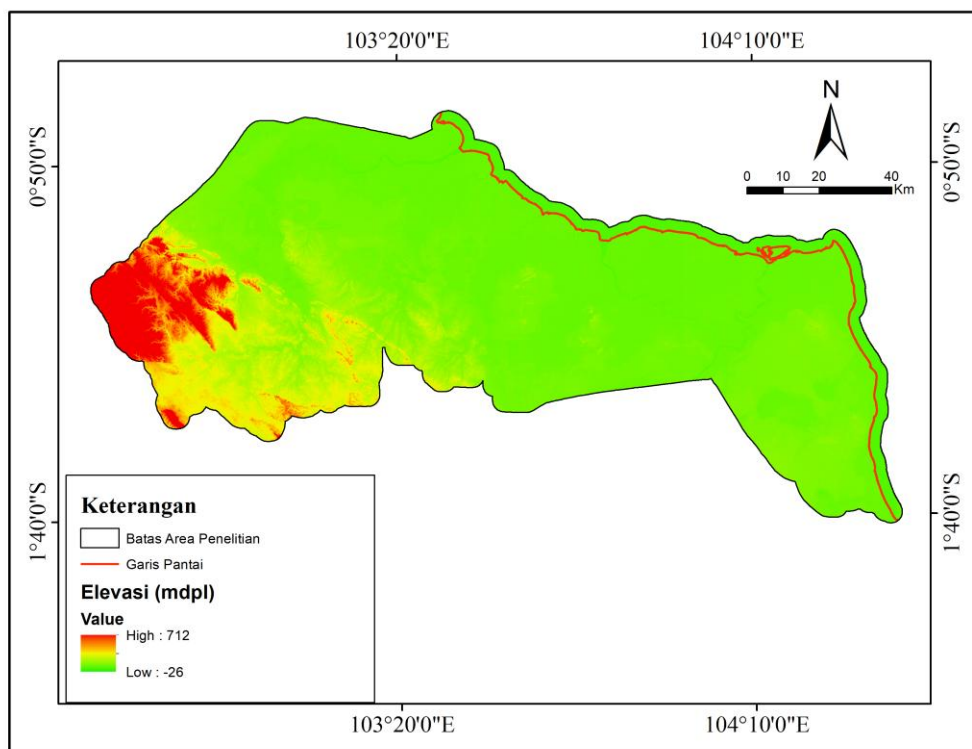


(b)

Gambar 11 Harmonisasi citra : a) SAVI_2019, b) SAVI_2019_Regresi

2.3.6 Pembangunan Peubah Sosio-geo-biofisik

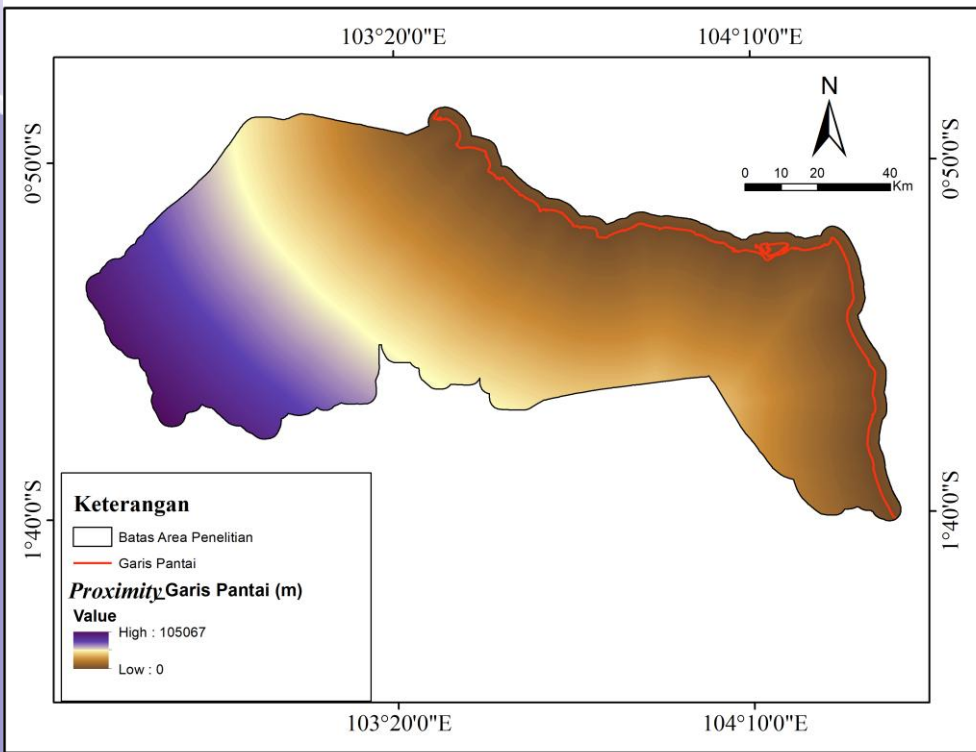
Peubah Sosio-geo-biofisik digunakan sebagai data pendukung penelitian dinamika perubahan kesehatan mangrove di Pantai Timur Jambi dengan machine learning decision tree. Pada tahap ini dilakukan koreksi pada layer substrat yang dimiliki kemudian menyesuaikan dengan data yang diperoleh di lapangan. Peubah sosio-geo- biofisik lainnya yang digunakan antara lain jarak pemukiman, jarak sungai, jarak garis pantai, jarak jalan, yang dibangun dengan menggunakan tools Euclidean Distance yang disajikan pada (Gambar 12).



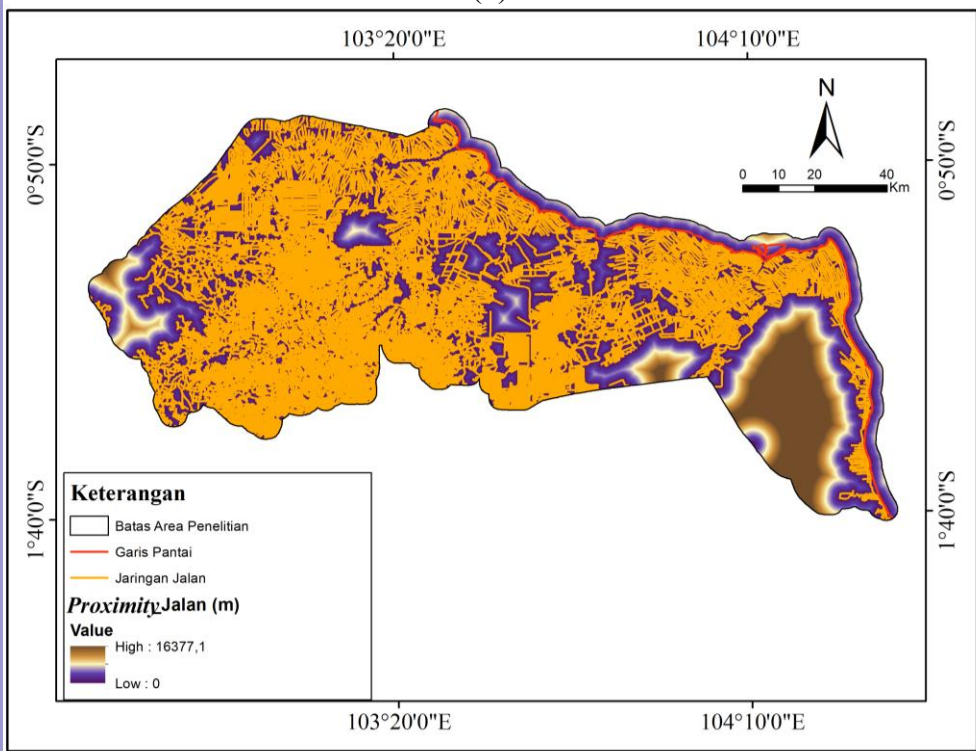
(a)

Gambar 12 Peubah sosio-geo-biofisik : a) Elevasi, b) *Proximity* garis pantai, c) *Proximity* Jalan, d) Kelerengan, e) *Proximity* pemukiman, f) *Proximity* sungai, g) Jenis substrat

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

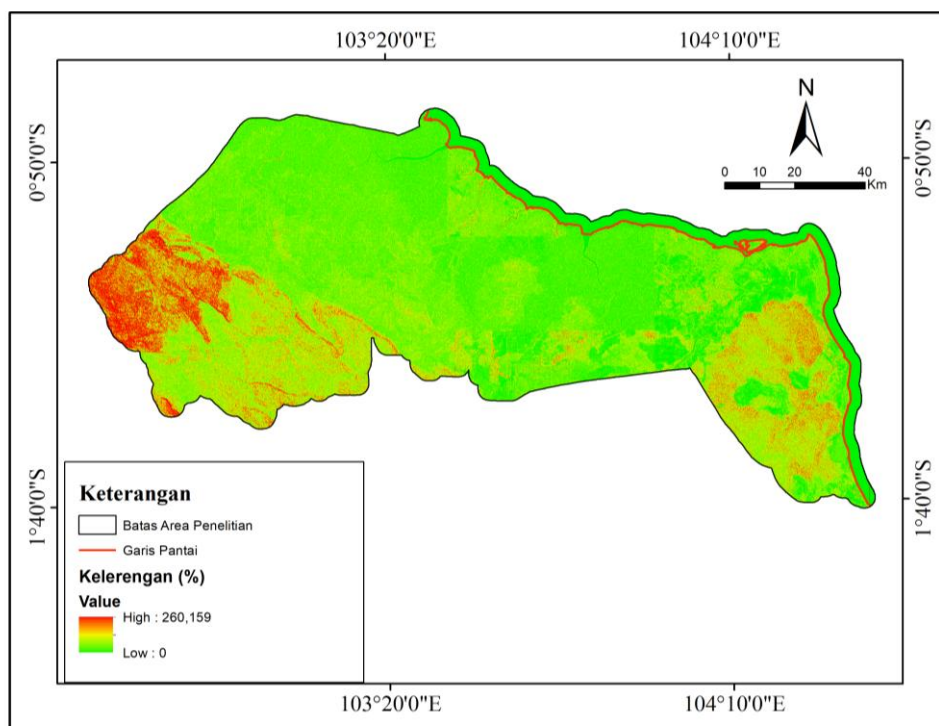


(b)

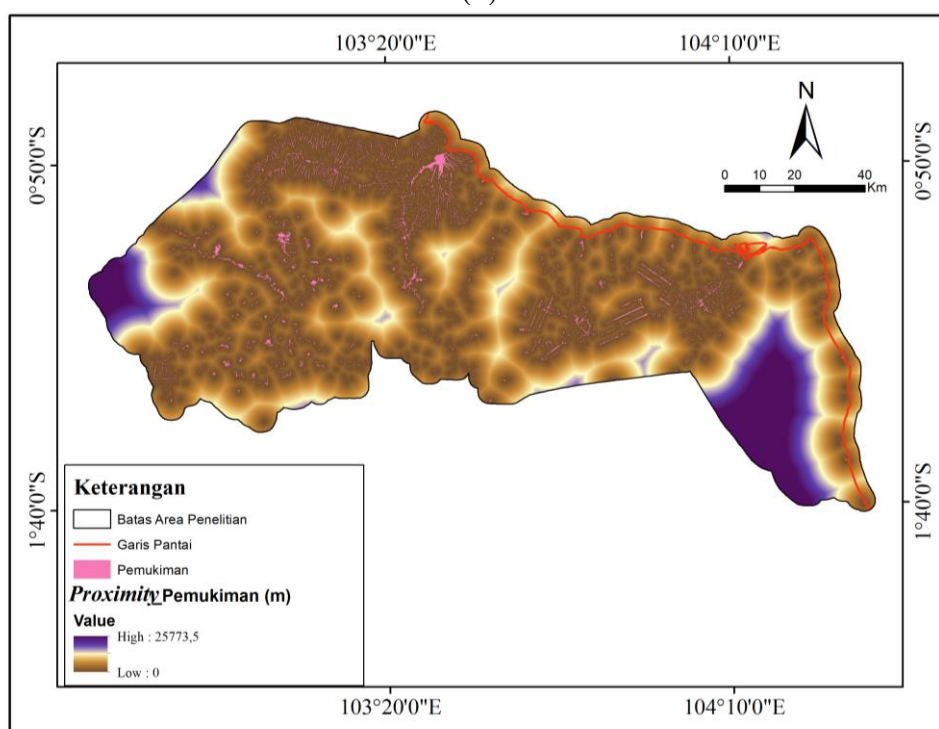


(c)

Gambar 12 (lanjutan)

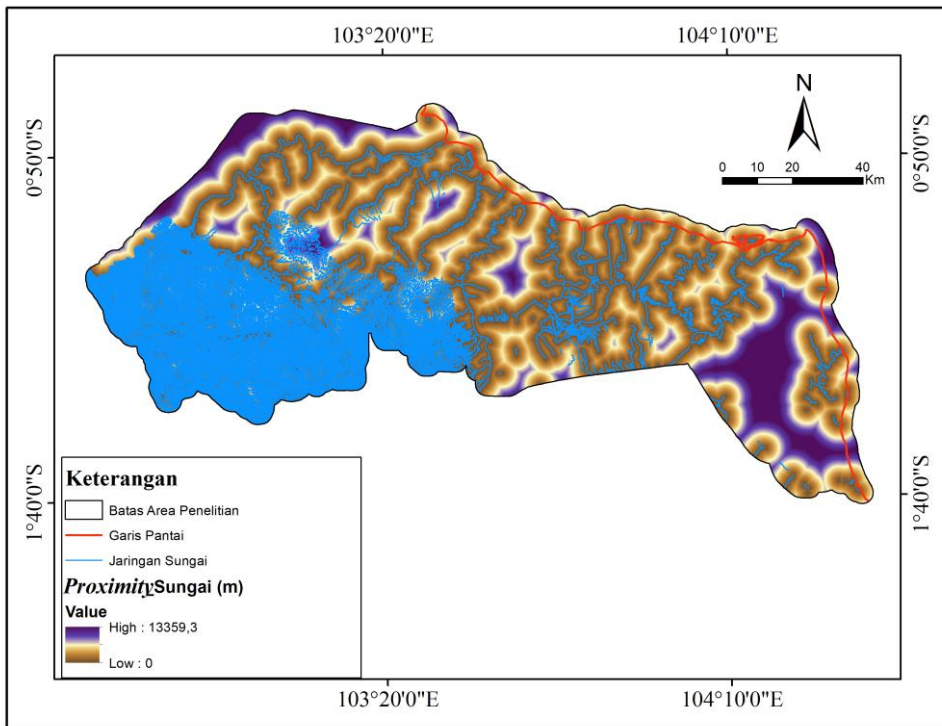


(d)

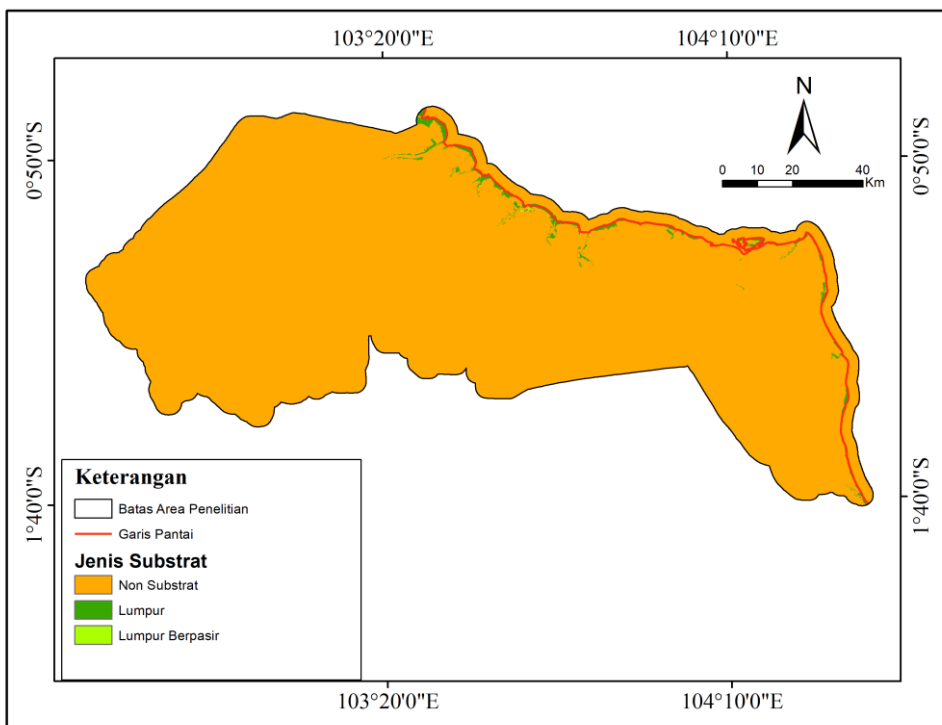


(e)

Gambar 12 (lanjutan)



(f)



(g)

Gambar 12 (lanjutan)

2.3.7 Pembuatan Training Area

Training Area (TA) merupakan area latihan yang dipilih untuk interpretasi visual citra satelit berdasarkan data survei lapangan. Training area yang digunakan merupakan sekumpulan pixel yang memiliki karakteristik sama dan dapat mewakili suatu kondisi kelas sesuai dengan kondisi sebenarnya. Area latihan yang sudah dipilih kemudian digunakan untuk mengambil informasi nilai pixel pada suatu tutupan lahan dari citra yang akan digunakan dalam pembangunan model. Area latihan yang sudah ditentukan akan digunakan sebagai bantuan untuk mengambil nilai piksel suatu citra. Zonal statistic dilakukan dengan menggunakan enveloped 30x30 m yang terbentuk dari buffer dengan radius 15 m dari titik area latihan yang sudah ditentukan sebelumnya.

2.3.8 Zonal Statistic Training Area

Zonal statistic dilakukan dengan menggunakan enveloped 30x30 m yang terbentuk dari buffer dengan radius 15 m dari titik area latihan yang sudah ditentukan sebelumnya. Zonal statistic mengambil mean dari setiap indeks vegetasi dan sosio-geo-biofisik, kecuali layer substrat. Layer substrat yang digunakan akan dilakukan zonal statistic dengan mengambil nilai majority.

2.4 Decision Tree

Dalam penelitian ini, mesin pembelajaran *Decision Tree* (Pohon Keputusan) dipilih sebagai landasan utama dalam penyusunan algoritma pembelajaran mesin untuk melakukan klasifikasi terhadap tutupan lahan dan kesehatan mangrove. Pemilihan *machine learning* ini didasari oleh karakteristik utamanya yang memiliki tingkat interpretabilitas tinggi, sehingga model keputusan yang dihasilkan dapat dipahami secara logis dan transparan bukan *black box*. Selain itu, efisiensi komputasinya yang optimal serta rekam jejak penerapannya yang luas di berbagai bidang multidisiplin menjadikannya metode yang sangat adaptif untuk menyelesaikan permasalahan dalam penelitian ini.

2.5 Seleksi Peubah

a) Information Gain

Information Gain merupakan kriteria pemisahan yang berfungsi untuk mempartisi data dari setiap kelas secara efektif berdasarkan konsep teori informasi. Kriteria ini mengukur penurunan tingkat ketidakpastian (*entropy*) setelah suatu dataset dipecah berdasarkan atribut tertentu (Tangirala 2020).

$$IG(S, A) = Entropy(S) - \sum_{i=1}^r \frac{|S_i|}{|S|} Entropy(S_i) \quad (10)$$

$$Entropy(S) = - \sum_{i=1}^r p_i \log_2 p_i \quad (11)$$

Keterangan:

- S = Keseluruhan dataset yang sedang diuji
- A = Peubah yang diuji
- S_i = Jumlah data pada nilai i dari setiap peubah A
- p_i = Proporsi data dari kelas ke-i
- = Urutan data
- = Jumlah kelas

b) Gain Ratio

Information Gain memiliki kelemahan bawaan, yaitu kecenderungan bias dalam memilih atribut. *Gain Ratio* menjadi alternatif fitur yang menyempurnakan *Information Gain* dengan menerapkan faktor normalisasi yang disebut *Split Information*. *Split Information* mengukur potensi informasi yang dihasilkan dari pembagian dataset menjadi beberapa bagian (Mienye dan Jere 2017).

$$GR(S, A) = \frac{IG(S, A)}{Split\ Information(S, A)} \quad (12)$$

$$Split\ Information(S, A) = - \sum_{i=1}^r \frac{|S_i|}{|S|} \log_2 \left(\frac{|S_i|}{|S|} \right) \quad (13)$$

c) Gini Index

Gini index merupakan metrik yang mengukur probabilitas sampel acak dalam dataset akan salah diklasifikasikan jika diberi label secara acak sesuai dengan distribusi kelas pada subset tersebut (Mienye dan Jere 2017).

$$Gini(S) = 1 - \sum_{i=1}^r p_i^2 \quad (14)$$

d) Relief

Relief digunakan untuk melakukan evaluasi tingkat kepentingan atribut berdasarkan kemampuan dalam membedakan kelas.

$$W[A] = W[A] - \frac{diff(A, x, nearestHit)}{m} + \frac{diff(A, x, nearestMiss)}{m} \quad (15)$$

Keterangan:

- $W[A]$ = Skor bobot peubah
- m = Jumlah sampel yang diambil
- x = *Instance* acak
- nearestHit = Tetangga terdekat dari kelas yang sama
- nearestMiss = Tetangga terdekat dari kelas yang berbeda
- $diff(A, x_p, x_2)$ = Fungsi perbedaan menggunakan peubah A, tergantung jenis atribut (numerik/teks)

2.6 Optimasi Seleksi

Strategi optimasi yang digunakan adalah *Brute Force* yang berfungsi mencari nilai titik *split* terbaik. *Brute Force* bekerja dengan mencoba semua kemungkinan satu persatu hingga ditemukan yang tepat.

$$Brute\ Force = C_s^p \quad (16)$$

Keterangan:

- C = Kombinasi yang dilakukan
 s = Jumlah total peubah
 p = Jumlah peubah yang digunakan

2.7 Optimasi Parameter

Optimasi parameter dilakukan untuk meningkatkan akurasi serta kemampuan generalisasi model dengan cara menghindari kondisi jenuh atau *overfitting*. Proses ini melibatkan penyesuaian *hyperparameter* kunci pada algoritma *decision tree*, seperti batas kedalaman maksimum pohon (*max depth*), jumlah sampel minimum pada setiap daun (*min samples leaf*), serta kriteria pemisahan (*splitting criteria*) seperti *Information Gain*, *Gain Ratio*, atau *Gini Index*. Pembatasan *max depth* berfungsi untuk mengontrol kompleksitas pohon agar tidak menangkap gangguan (*noise*) pada data latih, sedangkan penentuan *min samples leaf* memastikan bahwa setiap keputusan akhir didukung oleh jumlah sampel yang representatif guna meminimalkan variansi model. Konfigurasi *hyperparameter* terbaik dapat diidentifikasi secara objektif guna menghasilkan struktur pohon keputusan yang paling optimal dan sesuai dengan karakteristik data yang digunakan.

2.8 Uji Akurasi

Uji akurasi dilakukan untuk mengevaluasi hasil klasifikasi yang telah dibangun menggunakan matriks kesalahan (*confusion matrix*), dengan matrik utama berupa *Overall Accuracy* (OA) dan *Kappa Accuracy* (KA). Uji akurasi Algoritma *machine learning* adalah salah satu metode evaluasi yang digunakan untuk mengukur kinerja model klasifikasi (Papilaya *et al.* 2026). *Overall Accuracy* merupakan matrik yang mengukur proporsi dari seluruh sampel yang diklasifikasikan dengan benar oleh model dibandingkan dengan total sampel acuan yang ada. Sementara itu, *Kappa Accuracy* digunakan untuk mengukur seberapa baik kinerja klasifikasi dibandingkan dengan klasifikasi yang dilakukan secara acak. Berbeda dengan OA dan KA yang merepresentasikan akurasi global, tingkat keandalan dari masing-masing kelas diukur secara spesifik menggunakan *Producer's Accuracy* (PA) dan *User's Accuracy* (UA) yang diturunkan dari *confusion matrix*. *Producer's Accuracy* digunakan untuk mengukur seberapa baik data acuan di lapangan dari kelas tertentu dapat diklasifikasikan dengan benar oleh model. Di sisi lain, *User's Accuracy* menunjukkan probabilitas bahwa suatu piksel yang diklasifikasikan ke dalam kelas tertentu pada peta memang benar-benar sesuai dengan kondisi nyata di lapangan.

$$OA = \frac{\sum_{i=r}^r x_{ii}}{N} 100\% . \quad (17)$$

$$KA = \frac{N \sum_{i=r}^r x_{ii} - \sum_{i=r}^r (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=r}^r (x_{i+} x_{+i})} \quad (18)$$

$$UA = \frac{x_{ii}}{x_{i+}} 100\% . \quad (19)$$

$$PA = \frac{x_{ii}}{x_{+i}} 100\% \quad (20)$$

Keterangan:

- x_{ii} = Nilai diagonal dari *confusion matrix*
- x_{i+} = Jumlah nilai dari baris ke-i
- x_{+i} = Jumlah nilai dari kolom ke-i
- N = Banyak data tiap kelas

2.9 Transfer Lintas Waktu

Penerapan model secara lintas waktu (*cross-temporal*) ini menghasilkan skema klasifikasi dengan jumlah kelas kesehatan yang konsisten dan identik dengan hasil klasifikasi pada tahun 2025. Pendekatan transfer lintas waktu ini dilakukan untuk memfasilitasi analisis deteksi perubahan (*change detection*), sehingga dinamika serta tren degradasi atau pemulihan kondisi kesehatan hutan mangrove di kawasan Pantai Timur Jambi selama periode tersebut dapat diidentifikasi.

2.9.1 Uji Akurasi model lintas waktu

Uji akurasi dilakukan dengan *ground truthing* dengan menentukan titik yang merepresntasikan kelas yang digunakan untuk melihat akurasi dari deteksi dengan kondisi pada citra 2019. Titik uji akurasi yang sudah ditentukan di *extraxt* menggunakan hasil klasifikasi pada 2019 yang menghasilkan *confusion matrix* dan mendapatkan *Overall Accuracy* (OA), *Kappa Accuracy* (KA), *User's Accuracy* (UA), *Producer's Accuracy* (PA).

2.10 Dinamika Perubahan Kesehatan Mangrove tahun 2019 hingga 2025

Dinamika perubahan di Pantai Timur Jambi ditemukan dengan melakukan *overlay* hasil klasifikasi tahun 2019 menggunakan model dan indeks vegetasi yang sudah dikoreksi dengan hasil klasifikasi tahun 2025. Klasifikasi dilakukan untuk menemukan kelas perubahan yang terjadi di Pantai Timur Jambi. Klasifikasi hasil *overlay* dilakukan menghasilkan kelas perubahan kesehatan mangrove dan tutupan lahan di Pantai Timur Provinsi Jambi.

III HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Struktur Komunitas Mangrove

Hasil perhitungan INP menunjukkan bahwa *Avicennia alba* merupakan jenis yang paling mendominasi ekosistem pada fase regenerasi dengan nilai INP sebesar 54,93% yang disajikan pada Tabel 7. Tingginya nilai INP dari genus *Avicennia* mengindikasikan kemampuan adaptasi yang kuat. Secara ekologis, tingginya kerapatan dan frekuensi dari *Avicennia alba* sangat umum ditemukan pada zona mangrove yang berhadapan langsung dengan laut atau pada substrat lumpur seperti pada lokasi Pantai Timur Jambi. Hal tersebut dikarenakan setiap jenis mangrove memiliki adaptasi fisiologis dan morfologi yang berbeda terhadap jenis substrat (Velati *et al.* 2024)

Tabel 8 Indeks Nilai Penting (INP) tingkat pertumbuhan semai

Nama Jenis	FR (%)	KR (%)	INP (%)
<i>Avicennia alba</i>	26,67	28,26	54,93
<i>Avicennia marina</i>	20,00	19,57	39,57
<i>Avicennia officinalis</i>	2,22	2,17	4,40
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	13,33	13,04	26,38
<i>Bruguiera parviflora</i>	2,22	2,17	4,40
<i>Pandanus tectorius</i>	2,22	2,17	4,40
<i>Rhizophora apiculata</i>	15,56	15,22	30,77
<i>Rhizophora mucronata</i>	2,22	2,17	4,40
<i>Sonneratia alba</i>	4,44	4,35	8,79
<i>Sonneratia caseolaris</i>	6,67	6,52	13,19
Total			200

Keterangan : KR (Kerapatan Relatif), FR (Frekuensi Relatif), INP (Indeks Nilai Penting)

Analisis vegetasi pada fase pertumbuhan pancang (Tabel 8) mengidentifikasi adanya peningkatan keanekaragaman dengan tercatatnya 16 spesies mangrove, dibandingkan dengan 10 spesies yang ditemukan pada fase semai. Berdasarkan perhitungan INP pada tingkat pancang, kelompok genus pionir masih memegang peranan yang sangat dominan dalam menguasai ruang ekosistem. *Avicennia marina* tercatat sebagai spesies paling dominan dengan nilai INP tertinggi mencapai 66,20% FR bernilai 20,51%, KR bernilai 45,69%, dan *Avicennia alba* dengan INP sebesar 49,98%. Di bawah dominansi genus pionir tersebut, tercatat beberapa spesies lain yang mulai menunjukkan perkembangan signifikan, seperti *Sonneratia caseolaris* dengan INP sebesar 16,09% dan *Rhizophora apiculata* sebesar 15,33%. Dominasi genus *Avicennia* pada fase pancang sejalan dengan penelitian Tufan *et al.* (2026) di kawasan pesisir Pantai Kelapa Tinggi, yang mencatat *Avicennia marina* sebagai jenis dengan nilai INP tertinggi mencapai 80,90%. Pola dominansi yang berpusat pada kelompok pionir tersebut secara ekologis mengindikasikan kemampuan adaptasi dan toleransi yang tinggi untuk jenis ini terhadap frekuensi genangan pada zona mangrove. Selain itu peningkatan keanekaragaman dari 10 spesies pada fase semai menjadi 16 spesies pada fase pancang menunjukkan adanya dinamika kelonggaran ruang dan kompetisi cahaya. Hal tersebut sejalan dengan temuan Puna *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa struktur kanopi tingkat pohon yang lebih terbuka atau rendahnya kerapatan pohon dewasa akan mengurangi persaingan ruang dan mengoptimalkan penetrasi cahaya matahari. Hal ini

menstimulasi pertumbuhan serta keberhasilan anakan mangrove secara masif pada tingkat pancang.

Tabel 9 Indeks Nilai Penting (INP) tingkat pertumbuhan pancang

Nama Jenis	FR (%)	KR(%)	INP(%)
<i>Avicennia alba</i>	23,08	26,90	49,98
<i>Avicennia marina</i>	20,51	45,69	66,20
<i>Avicennia officinalis</i>	1,28	3,30	4,58
<i>Barringtonia asiatica</i>	2,56	0,76	3,33
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	8,97	2,79	11,77
<i>Bruguiera parviflora</i>	2,56	0,76	3,33
<i>Cerbera manghas</i>	1,28	0,25	1,54
<i>Excoecaria agallocha</i>	2,56	0,76	3,33
<i>Ficus benjamina</i>	2,56	1,78	4,34
<i>Hibiscus tiliaceus L.</i>	1,28	0,25	1,54
<i>Kandelia candel</i>	6,41	2,28	8,70
<i>Rhizophora apiculata</i>	10,26	5,08	15,33
<i>Rhizophora mucronata</i>	3,85	1,27	5,12
<i>Sonneratia alba</i>	1,28	0,76	2,04
<i>Sonneratia caseolaris</i>	10,26	5,84	16,09
<i>Xylocarpus granatum</i>	1,28	1,52	2,81
Total			200

Keterangan : Sama dengan Tabel 7

Vegetasi tingkat pertumbuhan pohon yang tersaji pada Tabel 9, ditemukan sebanyak 16 jenis pohon penyusun komunitas dengan akumulasi Indeks Nilai Penting (INP) sebesar 300. Nilai INP ini diperoleh dari hasil penjumlahan tiga parameter utama ekologis, yaitu Kerapatan Relatif (KR), Frekuensi Relatif (FR), dan Dominansi Relatif (DR). Secara umum, arsitektur vegetasi pada tingkat pohon di lokasi pengamatan didominasi oleh jenis *Avicennia alba* yang mencatatkan nilai INP tertinggi, yakni mencapai 93,50. Keunggulan jenis ini didukung kuat oleh nilai Kerapatan Relatif (KR = 35,98%) dan Dominansi Relatif (DR = 33,13%) yang tinggi.

Tabel 10 Indeks Nilai Penting (INP) tingkat pertumbuhan pohon

Nama Jenis	KR (%)	FR (%)	DR (%)	INP (%)
<i>Avicennia alba</i>	35,98	24,39	33,13	93,50
<i>Avicennia marina</i>	19,75	14,63	12,20	46,58
<i>Avicennia officinalis</i>	0,18	0,81	0,04	1,03
<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	3,88	4,88	5,40	14,15
<i>Excoecaria agallocha</i>	0,53	1,63	0,29	2,45
<i>Ficus benjamina</i>	0,35	1,63	0,27	2,24
<i>Hibiscus tiliaceus L.</i>	0,88	1,63	0,49	3,00
<i>Kandelia candel</i>	2,12	4,88	1,10	8,09
<i>Nypa fruticans</i>	4,94	19,51	0,00	24,45
<i>Rhizophora apiculata</i>	10,23	8,13	7,56	25,92
<i>Rhizophora mucronata</i>	0,71	0,81	0,96	2,48
<i>Sonneratia alba</i>	1,41	1,63	1,57	4,61
<i>Sonneratia caseolaris</i>	13,23	12,20	33,26	58,68
<i>Terminalia catappa</i>	0,18	0,81	0,08	1,07
<i>Xylocarpus granatum</i>	3,53	1,63	2,75	7,90
<i>Xylocarpus moluccensis</i>	2,12	0,81	0,91	3,84
Total				300

Keterangan : Sama dengan Tabel 7, DR: Dominasi Relatif

3.2 Karakteristik Tegakan Berdasarkan Kelas *Mangrove Health Index*

Evaluasi terhadap kondisi kesehatan ekosistem mangrove di lokasi penelitian dilakukan dengan mengintegrasikan tiga parameter biofisik utama, yaitu kerapatan tajuk (%), jumlah pancang, dan rata-rata diameter batang (cm) ke dalam formula MHI. Hal tersebut sejalan dengan Azzahra *et al.* (2022) menyatakan bahwa MHI melibatkan dua parameter penting yaitu tutupan tajuk dan diameter pohon. Karakteristik struktur vegetasi mangrove menunjukkan variasi yang linear dan signifikan di setiap parameter berdasarkan tingkat kesehatan mangrove, yang di bagi menjadi tiga kelas yaitu Mangrove Sangat Sehat (MSS), Mangrove Sehat (MSD) dan Mangrove Kurang Sehat (MKS) yang disajikan pada Tabel 10.

Tabel 11 Karakteristik struktur vegetasi berdasarkan kelas kesehatan

Kelas Kesehatan	Rata- Rata				
	Kerapatan Tajuk (%)	Kerapatan N/ha	Vol/ha (m ³ /ha)	Shannon (H')	Evenness (E)
MSS	82,0	164,27	4,50	0,84	0,69
MSD	67,8	167,56	2,71	0,59	0,53
MKS	33,2	48,00	1,91	0,00	0,00

Keterangan : MSS = Mangrove Sangat Sehat, MSD = Mangrove Sehat, MKS = Mangrove Kurang Sehat

Kelas kesehatan mangrove sangat sehat memiliki rata- rata kerapatan tajuk tertinggi sebesar 82,0%, diikuti oleh mangrove sehat sebesar 67,8% dan mangrove kurang sehat sebesar 33,2%. Menariknya jumlah individu per hektar tertinggi ditemukan pada kelas mangrove sehat dengan jumlah 167,56 individu/ha, sedikit lebih tinggi dari mangrove sangat sehat sebesar 164,27 individu/ha dan jumlah terendah terdapat pada kelas mangrove kurang sehat dengan jumlah 48,00 individu/ha. Tingginya kerapatan tajuk pada kelas mangrove sangat sehat berbanding lurus dengan volume sebesar 4,50m³/ha mengindikasikan bahwa area

mangrove sangat sehat didominasi oleh tegakan berdiameter besar dengan percabangan tajuk yang sudah mapan. Sebaliknya, kelas mangrove sehat dengan jumlah individu tertinggi namun dengan kerapatan tajuk dan volume yang rendah dengan volume $2,71\text{m}^3/\text{ha}$. Hal tersebut mengindikasikan bahwa wilayah tersebut sedang berada fase pertumbuhan sejalan dengan Alongi (2009) menjelaskan bahwa perkembangan hutan mangrove melibatkan kompetisi ruang cahaya yang ketat, kemudian mengubah struktur ukuran dan menurunkan kerapatan vegetasi melalui hukum penjarangan alami atau *self-thinning rule*.

Keanekaragaman yang disajikan pada Tabel 10 menunjukkan bahwa kelas mangrove kurang sehat memiliki nilai 0,00 untuk (H') dan *evenness*. Kondisi lapangan menunjukkan bahwa mangrove kurang sehat terdapat pada lokasi yang diganggu oleh manusia ataupun secara alami. Gangguan pada daerah pesisir akan berujung pada berubahnya struktur hutan, di mana proses regenerasi alami sering tidak memadai dan beralih menjadi tempat nagi dominasi spesies pionir tertentu saja. Hal tersebut sejalan dengan Alongi (2002) menjelaskan bahwa dampak manusia terhadap struktur mangrove harus dipertimbangkan dengan latar belakang perubahan alami.

3.3 Seleksi Peubah

Penelitian ini menerapkan tiga skema pemodelan spasial untuk memetakan tingkat kesehatan mangrove di lokasi penelitian. Skema pertama hanya menggunakan peubah spektral citra satelit untuk menangkap respons optik dan kerapatan kanopi secara langsung. Skema kedua menggunakan peubah sosio-geo-biofisik yang mengintegrasikan parameter lingkungan fisik pesisir. Sementara itu, skema ketiga menguji kombinasi kedua peubah tersebut untuk menyintesis data penginderaan jauh dan faktor lingkungan untuk memperoleh gambaran kondisi lapangan yang lebih utuh dan menyeluruh.

3.3.1 Peubah Spektral

Berdasarkan hasil seleksi peubah spektral pada Tabel 11, proses pemilihan variabel prediktor terbaik dilakukan dengan menguji tujuh indeks berbasis citra satelit melalui empat metode seleksi fitur, yaitu *Brute Force*, *Gain Ratio*, *Information Gain*, dan *Gini Index*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa NDWI (*Normalized Difference Water Index*) menjadi peubah spektral paling konsisten dan optimal karena mencatatkan nilai tertinggi yang sempurna (bernilai 1) pada seluruh metode seleksi. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Simarmata *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa NDWI menjadi salah satu variabel yang dapat membantu dalam identifikasi kerapatan mangrove. Performa tinggi ini diikuti oleh indeks CMRI (*Combined Mangrove Recognition Index*) sesuai dengan penelitian Salma dan Pramita (2026) bahwa CMRI dapat memisahkan mangrove dan air laut. CMRI dan NDVI yang menunjukkan respons sangat kuat, terutama pada metode *Information Gain* masing-masing 0,94 dan 0,91 serta *Gini Index* 0,92 dan 0,89. Indeks SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) dan ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*) juga menunjukkan performa yang stabil pada mayoritas metode. Sebaliknya, peubah MVI (*Mangrove Vegetation Index*) cenderung memiliki performa rendah di bawah 0,50, sementara NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) gugur karena bernilai nol pada tiga metode seleksi utama.

Tabel 12 Seleksi peubah spektral

Peubah	<i>Brute Force</i>	<i>Gain Ratio</i>	<i>Information Gain</i>	<i>Gini Index</i>
NDWI	1	1	1	1
SAVI	1	0,93	0,82	0,78
CMRI	1	0,86	0,94	0,92
MVI	1	0,28	0,50	0,42
NDBI	1	0	0	0
ARVI	0	0,78	0,90	0,87
NDVI	0	0,77	0,91	0,89

3.3.2 Peubah Sosio-geo-biofisik

Berdasarkan hasil seleksi peubah sosio-geo-biofisik pada Tabel 12, jenis substrat menjadi variabel prediktor yang paling dominan dan konsisten dengan mencatatkan nilai 1 pada seluruh metode pengujian. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Cahyani *et al.* (2022) bahwa jenis substrat pada suatu pantai mempengaruhi pertumbuhan mangrove. Kinerja optimal berikutnya ditunjukkan oleh peubah elevasi dengan nilai *Gain Ratio* sebesar 0,80, serta *Proximity* Pantai yang memiliki kontribusi stabil pada metode *Gini Index* (0,74) dan *Information Gain* (0,62). Sebaliknya, peubah *Proximity* pemukiman hanya menunjukkan pengaruh rendah di bawah 0,30. Berdasarkan capaian tersebut, peubah jenis substrat, elevasi, *proximity sungai* dan *proximity* pantai dipilih sebagai variabel utama karena dinilai paling responsif dalam merepresentasikan kondisi fisik lingkungan pesisir di lokasi penelitian.

Tabel 13 Seleksi peubah sosio-geo-biofisik

Peubah	<i>Brute Force</i>	<i>Gain Ratio</i>	<i>Information Gain</i>	<i>Gini Index</i>
Jenis Substrat	1	1	1	1
Elevasi	1	0,80	0,52	0,64
<i>Proximity</i> Pantai	1	0,62	0,62	0,74
<i>Proximity</i> Pemukiman	1	0,26	0,07	0,16
<i>Proximity</i> Sungai	1	0,18	0	0
Kelerengan	0	0,46	0,33	0,49

3.3.3 Peubah Spektral dan Sosio-geo-biofisik

Hasil seleksi peubah kombinasi yang disajikan pada Tabel 13 menunjukkan bahwa NDWI menjadi variabel yang paling konsisten dengan nilai 1 di seluruh metode pengujian. Peubah spektral diisi oleh peubah CMRI, NDVI, dan SAVI dengan nilai performa sangat tinggi di atas 0,90. Sementara itu, Jenis Substrat menjadi satu-satunya peubah fisik lingkungan yang bersaing kuat dengan nilai mencapai 0,95 pada *Information Gain* dan 0,94 pada *Gini Index*. Peubah NDWI dengan tingkat tertinggi sesuai dengan penelitian Simarmata *et al.* (2021) bahwa NDWI dapat membantu dalam identifikasi kerapatan mangrove. Kerapatan mangrove menjadi salah satu indikator kesehatan mangrove sesuai dengan (Dharmawan *et al.* 2020). Kombinasi peubah ini menjadi skema yang semakin kuat dalam mendeteksi kesehatan mangrove dengan NDWI dapat membantu identifikasi kerapatan dan jenis substrat

sebagai pengaruh tempat pertumbuhan mangrove sebagaimana penelitian Cahyani *et al.* (2022) menjelaskan bahwa jenis substrat pada suatu pantai mempengaruhi pertumbuhan mangrove. Adapun peubah ARVI, Proximiti Pantai, dan Elevasi, *Proximity* Sungai dan *Proximity* Jalan dieliminasi dalam seleksi peubah kombinasi.

Tabel 14 Seleksi peubah kombinasi spektral dan sosio-geo-biofisik

Peubah	Brute Force	Gain Ratio	Information Gain	Gini Index
NDWI	1	1	1	1
CMRI	1	0,96	0,97	0,98
NDVI	1	0,94	0,96	0,97
Jenis Substrat	1	0,73	0,95	0,94
SAVI	1	0,98	0,92	0,93
MVI	1	0,82	0,77	0,83
NDBI	1	0,75	0,53	0,70
Kelerengan	1	0,33	0,32	0,46
<i>Proximity</i> Pemukiman	1	0,19	0,06	0,15
ARVI	0	0,94	0,95	0,96
<i>Proximity</i> Pantai	0	0,46	0,59	0,70
Elevasi	0	0,58	0,49	0,60
<i>Proximity</i> Jalan	0	0	0,11	0,08
<i>Proximity</i> Sungai	0	0,13	0	0

3.4 Optimasi Model

Hasil optimasi parameter algoritma *Decision Tree* pada Tabel 14 menunjukkan ketiga skema pemodelan menggunakan kriteria pembagian (*split*) yang sama, yaitu *gini index*, serta metode *cross validation sampling* berupa *shuffled sampling*. Meskipun demikian, setiap skema menghasilkan kombinasi parameter terbaik yang berbeda untuk mencapai performa akurasi yang optimal. Skema spektral menghasilkan akurasi sebesar 92,7% dengan nilai kedalaman pohon (*Max depth*) mencapai 22, nilai *Min leaf size* sebesar 34, *Min size for split* sebesar 41, serta menerapkan pemangkasan pohon (*Pruning*). Pada skema sosio-geo-biofisik, akurasi yang diperoleh merupakan yang paling rendah di antara ketiganya, yaitu sebesar 80,0%, dengan parameter *Max depth* sebesar 16, *Min leaf size* sebesar 58, dan *Min size for split* yang sangat kecil sebesar 11, disertai penerapan fitur *Pruning*. Sementara itu, skema kombinasi spektral dan sosio-geo-biofisik berhasil menghasilkan akurasi tertinggi mencapai 97,5%. Model kombinasi ini bekerja optimal pada kedalaman *Max depth* 16, *Min leaf size* 34, dan *Min size for split* sebesar 60, tanpa memerlukan proses *Pruning* (*FALSE*).

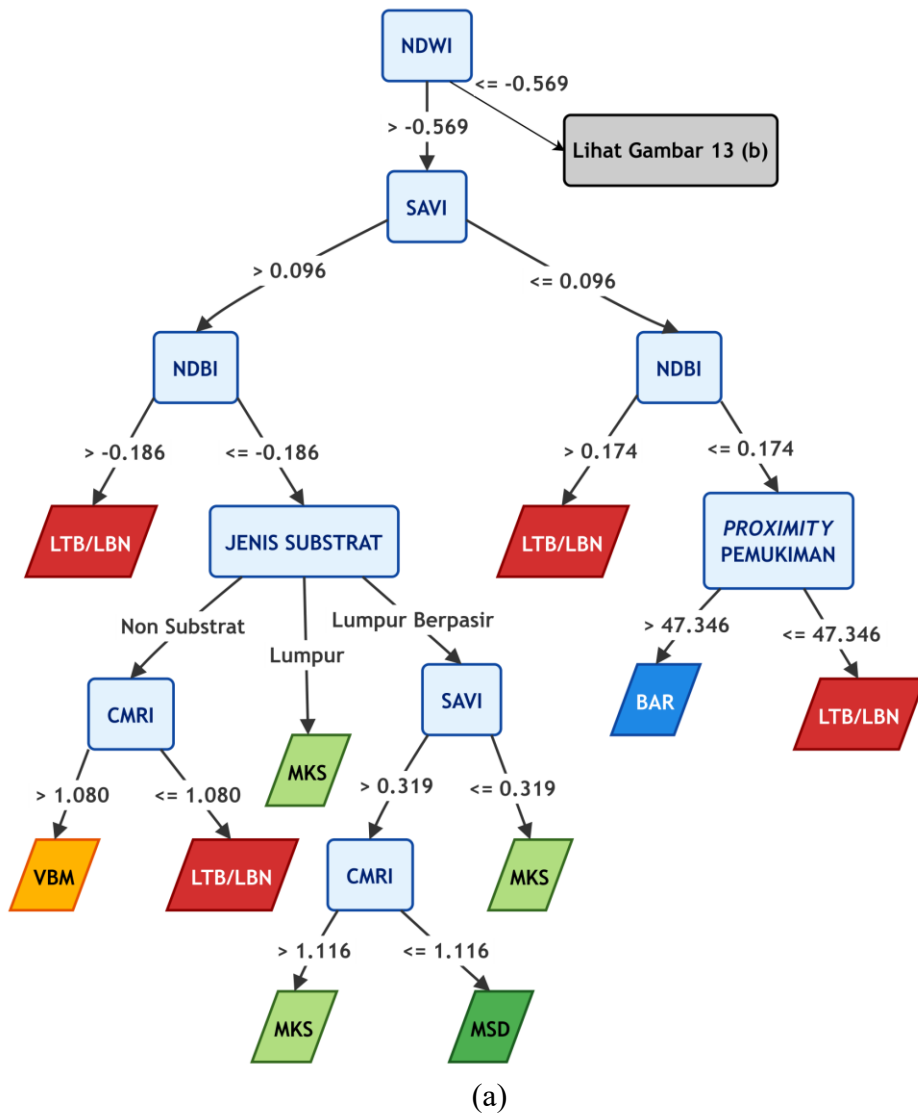
Tidak dilakukannya *pruning* pada skema kombinasi mengindikasikan bahwa fitur-fitur sosio-geo-biofisik yang dimasukkan secara efektif menyederhanakan ruang pencarian algoritma *decision tree*. Ketika peubah spektral mandiri dipadukan dengan peubah lingkungan seperti jenis substrat, kelerengan, dan jarak dari garis pantai pola klasifikasi menjadi jauh lebih terstruktur dan stabil tanpa memicu terbentuknya percabangan pohon yang terlalu dalam (*overfitting*). Keunggulan ini diperkuat oleh terpilihnya *Normalized Difference Water Index* (NDWI) sebagai *root node* atau akar pemisah utama pada Gambar 13 yang membuktikan bahwa respons interaksi air tanah merupakan pembeda paling krusial dalam menentukan tingkat kesehatan mangrove dalam penelitian ini. Melalui pemisahan awal berbasis

NDWI tersebut, algoritma dapat dengan cepat memisahkan objek non-mangrove dan kawasan yang mengalami stres fisiologis tingkat tinggi sebelum mengklasifikasikan sub-kelas yang lebih detail, sehingga tidak hanya meningkatkan akurasi statistik hingga 97,5%, tetapi juga menghasilkan alur keputusan spasial yang sangat logis secara ekologis.

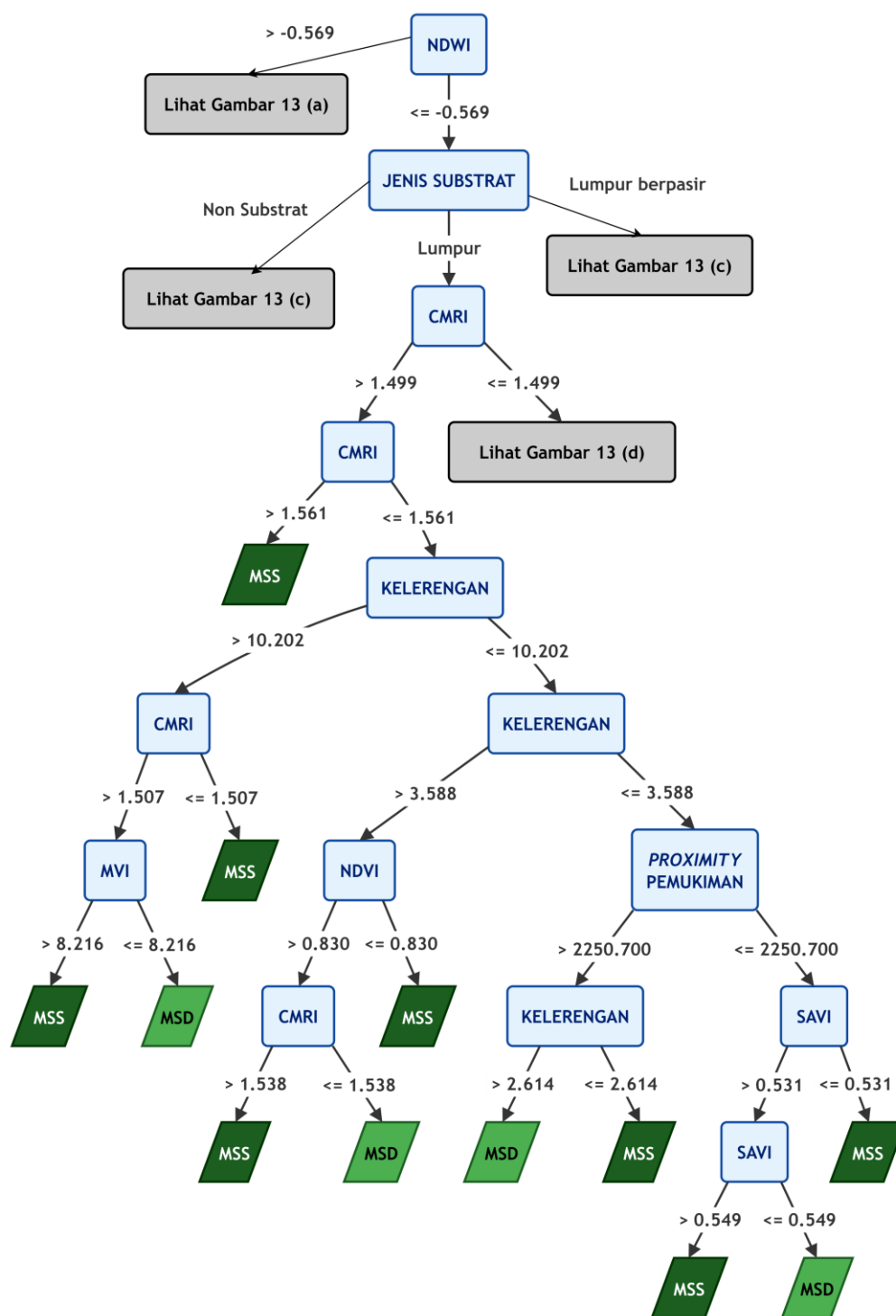
Tabel 15 Optimasi parameter setiap peubah

Parameter <i>Decision Tree</i>	Spektral	Sosio-geo-biofisik	Spektral dan Sosio-geo-biofisik
Kriteria	<i>gini_index</i>	<i>gini_index</i>	<i>gini_index</i>
<i>Max depth</i>	22	16	16
<i>Pruning</i>	<i>True</i>	<i>True</i>	<i>False</i>
<i>Pre-Pruning</i>	<i>False</i>	<i>False</i>	<i>False</i>
<i>Min leaf size</i>	34	58	34
<i>Min size for split</i>	41	11	60
<i>Cross validation sampling</i>	<i>Shuffled sampling</i>	<i>Shuffled sampling</i>	<i>Shuffled sampling</i>
<i>Accuracy (%)</i>	92,7	80	97,5

Menurut teori induksi pohon keputusan oleh Mingers (1989), kebutuhan akan pemangkasan umumnya muncul untuk mengatasi *noise* atau ketidakpastian data pada pohon yang terlalu kompleks. Ketiadaan proses *pruning* pada skema kombinasi mengindikasikan bahwa integrasi data spektral citra satelit dengan karakteristik fisik lingkungan telah berhasil meminimalisasi *noise* informasi dan memperjelas pola prediktor, sehingga pohon keputusan dapat mencapai akurasi yang optimal secara alami tanpa risiko *overfitting*. Tingginya akurasi pada skema ketiga ini membuktikan bahwa penggabungan data spektral citra satelit dan karakteristik fisik lingkungan mampu saling melengkapi informasi prediktor, sehingga menghasilkan pohon keputusan yang jauh lebih akurat dalam memetakan kesehatan mangrove di Pantai Timur Provinsi Jambi. Cuplikan pohon keputusan yang dipilih dalam klasifikasi dapat dilihat pada Gambar 13 dengan *root node* NDWI.

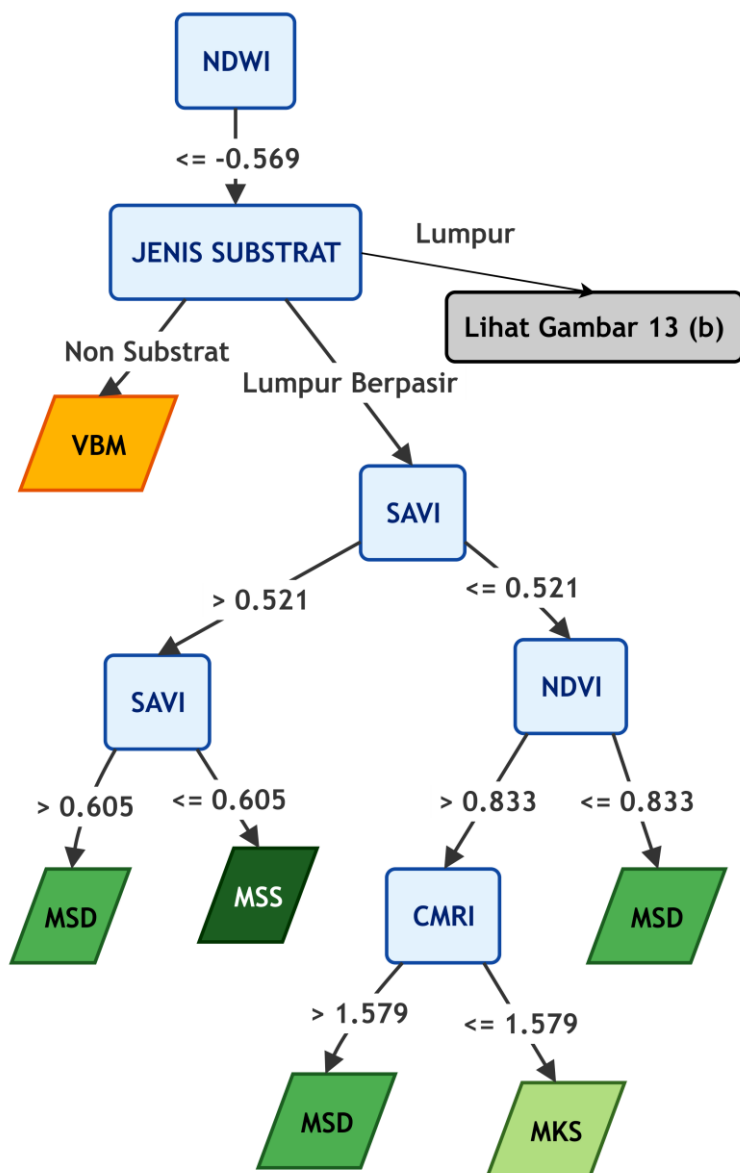


Gambar 13 Ilustrasi pohon keputusan: a) $NDWI > -0,569$, b) $NDWI \leq -0,569$, Jenis Substrat = Lumpur, $CMRI > 1,499$, c) $NDWI \leq -0,569$, Jenis Substrat = Lumpur berpasir dan Non Substrat, d) $NDWI \leq -0,569$, Jenis Substrat = Lumpur, $CMRI \leq 1,499$



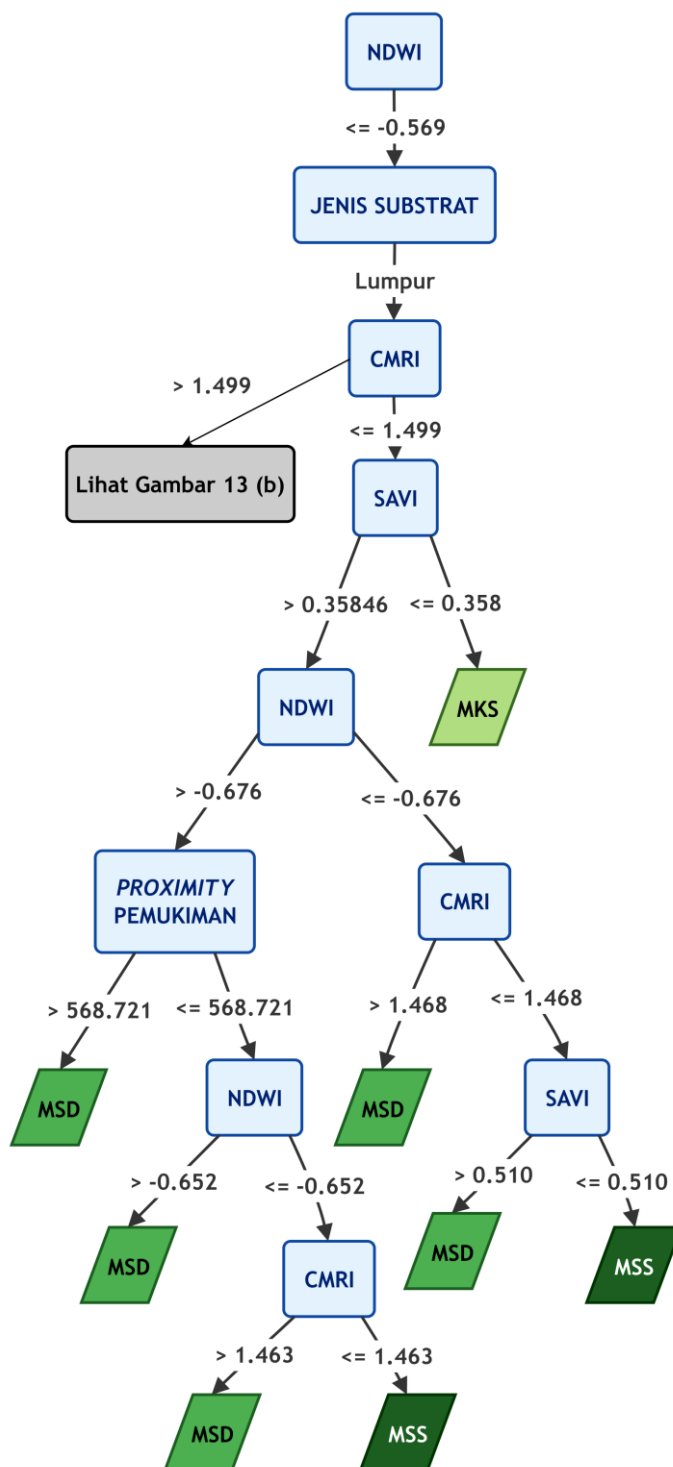
(b)

Gambar 13 (lanjutan)



(c)

Gambar 13 (lanjutan)



(d)

Gambar 13 (lanjutan)

3.5 Uji Akurasi

Evaluasi performa klasifikasi pada penelitian ini dilakukan dengan membedah matriks konfusi dari ketiga skema pemodelan melalui parameter *User's*

Accuracy (UA) dan *Producer's Accuracy* (PA). Secara umum, pola kesalahan klasifikasi yang terjadi pada setiap skema menunjukkan karakteristik yang unik dan sangat erat kaitannya dengan kualitas fitur input. Hal ini sejalan dengan pandangan Mingers (1989) yang menyatakan bahwa keandalan sebuah pohon keputusan tidak semata-mata ditentukan oleh metrik pemisahan (*split measures*) seperti *Gini Index*, melainkan sangat bergantung pada bagaimana atribut prediktor mampu memisahkan kelas-kelas data yang memiliki tingkat variabilitas atau gangguan (*noise*) berbeda.

Skema pertama yang hanya menggunakan peubah spektral dengan matriks konfusi disajikan pada Tabel 15, hasil klasifikasi menunjukkan tingkat akurasi yang cukup baik namun masih menyisakan masalah pencampuran piksel (*spectral mixture*). Kelas vegetasi MSD (Mangrove Sehat) mencatat keandalan pengguna (*User's Accuracy*) terendah pada skema ini, yaitu sebesar 75,6%. Rendahnya akurasi ini disebabkan oleh adanya 10 sampel VBM (Vegetasi Non-Mangrove) dan 7 sampel MSS (Mangrove Sangat Sehat) yang salah teridentifikasi sebagai MSD. Meskipun demikian, objek non-vegetasi seperti BAR (Badan Air) dan LTB/LBN (Lahan Terbuka/Lahan Non-Vegetasi) berhasil dipisahkan dengan sangat baik dengan nilai UA masing-masing mencapai 97,4% dan 98,6%. Keterbatasan peubah spektral dalam membedakan kerapatan kanopi mangrove yang rapat (MSD dan MSS) menunjukkan adanya *noise* informasi yang tinggi pada pantulan spektral objek yang mirip.

Tabel 16 Matrik konfusi peubah spektral

<i>Prediction class</i>	<i>True class</i>						<i>User's accuracy (%)</i>
	MSD	MSS	MKS	BAR	VBM	LTB/LBN	
MSD	59	7	2	0	10	0	75,6
MSS	3	49	0	0	2	0	90,7
MKS	0	0	62	1	0	1	96,9
BAR	0	0	0	74	0	2	97,4
VBM	4	10	1	0	138	1	89,6
LTB/LBN	0	0	1	0	0	71	98,6
<i>Producer's accuracy (%)</i>	89,4	74,2	93,9	98,7	92,0	94,7	

Keterangan : BAR = Badan Air, VBM = Vegetasi Bukan Mangrove, LTB/LBN = Lahan Terbuka/Lahan Terbangun, MSS = Mangrove Sangat Sehat, MSD = Mangrove Sehat, MKS = Mangrove Kurang Sehat

Penurunan performa yang jauh lebih turun terlihat pada skema kedua yang hanya mengandalkan peubah sosio-geo-biofisik dengan matriks konfusi disajikan pada Tabel 16. Pada skema ini, klasifikasi objek vegetasi mengalami kekacauan yang cukup parah, di mana nilai *Producer's Accuracy* (PA) untuk kelas MSD turun hingga mencapai 51,5%. Rendahnya nilai PA ini disebabkan oleh banyaknya sampel MSD yang salah terprediksi ke dalam kelas MSS (16 sampel) dan MKS (15 sampel), yang mengindikasikan adanya tumpang tindih (*overlap*) informasi spasial lingkungan yang sangat tinggi antarkelas kerapatan mangrove tersebut. Hal ini sejalan dengan Foody (2024) yang menjelaskan sebuah piksel dapat mewakili area di lapangan dengan penggunaan data yang tepat dan saling melengkapi dapat membantu dalam klasifikasi kelas dengan kondisi lapangan berisi campuran kelas

atau kondisi transisi. *Misclassification* ini yang menyebabkan UA dan PA pada kelas kesehatan mangrove rendah khususnya pada kelas MSD dan MSS.

Tabel 17 Matriks konfusi peubah sosio-geo-biofisik

<i>Prediction class</i>	<i>True class</i>						<i>User's accuracy (%)</i>
	MSD	MSS	MKS	BAR	VBM	LTB/LBN	
MSD	34	11	6	0	0	0	66,7
MSS	16	45	6	0	0	0	67,2
MKS	15	10	54	0	0	0	68,4
BAR	0	0	0	75	0	0	100
VBM	0	0	0	0	131	19	87,3
LTB/LBN	1	0	0	0	19	56	73,7
<i>Producer's accuracy (%)</i>	51,5	68,2	81,8	100	87,3	74,7	

Keterangan : Sama seperti Tabel 15

Pada skema ketiga menghasilkan akurasi optimal yang disajikan pada Tabel 17. Penggabungan peubah membantu dalam mengatasi kesalahan klasifikasi, sebagian besar kesalahan klasifikasi yang sebelumnya muncul pada skema peubah spektral saja ataupun skema peubah sosio-geo-biofisik saja. Hal ini sejalan dengan Lu *et al.* (2014) menjelaskan bahwa pentingnya mengintegrasikan data untuk penginderaan jarak jauh. Kelas MKS dan BAR mampu dipetakan secara sempurna dengan nilai *User's Accuracy* mencapai 100%. Selain itu, kelas MSD yang sebelumnya memiliki akurasi rendah kini melonjak drastis dengan nilai UA 86,1% dan PA 93,9%. Kelas VBM juga mencatat performa luar biasa dengan nilai PA 100%, yang berarti seluruh 150 sampel lapangan berhasil diklasifikasikan dengan benar.

Tabel 18 Matriks konfusi kombinasi peubah spektral dan sosio-geo-biofisik

<i>Prediction class</i>	<i>True class</i>						<i>User's accuracy (%)</i>
	MSD	MSS	MKS	BAR	VBM	LTB/LBN	
MSD	62	9	1	0	0	0	86,1
MSS	4	57	0	0	0	0	93,4
MKS	0	0	65	0	0	0	100
BAR	0	0	0	74	0	0	100
VBM	0	0	0	0	150	2	98,7
LTB/LBN	0	0	0	1	0	73	98,7
<i>Producer's accuracy (%)</i>	93,9	86,4	98,5	98,7	100	97,3	

Keterangan : Sama seperti Tabel 15

Tiga skema peubah yang digunakan dalam membangun model yang terdiri dari, peubah spektral, sosio-geo-biofisik, serta kombinasi dari keduanya. Evaluasi ini diukur berdasarkan nilai *Overall Accuracy* (OA), *Kappa Accuracy* (KA), serta nilai minimum dan maksimum dari *Producer's Accuracy* (PA) dan *User's Accuracy* (UA) seperti yang disajikan pada Tabel 18.

Tabel 19 Performa model *decision tree*

Peubah	Root node	Accuracy (%)					
		OA	KA	Min PA	Max PA	Min UA	Max UA
Spektral dan sosio-geo-biofisik	NDWI	96,6	96	86,64	100	86,1	100
Spektral	NDWI	91	89	74,2	98,7	75,6	98,6
Sosio-geo-biofisik	Jenis Substrat	79,3	75	51,5	100	66,7	100

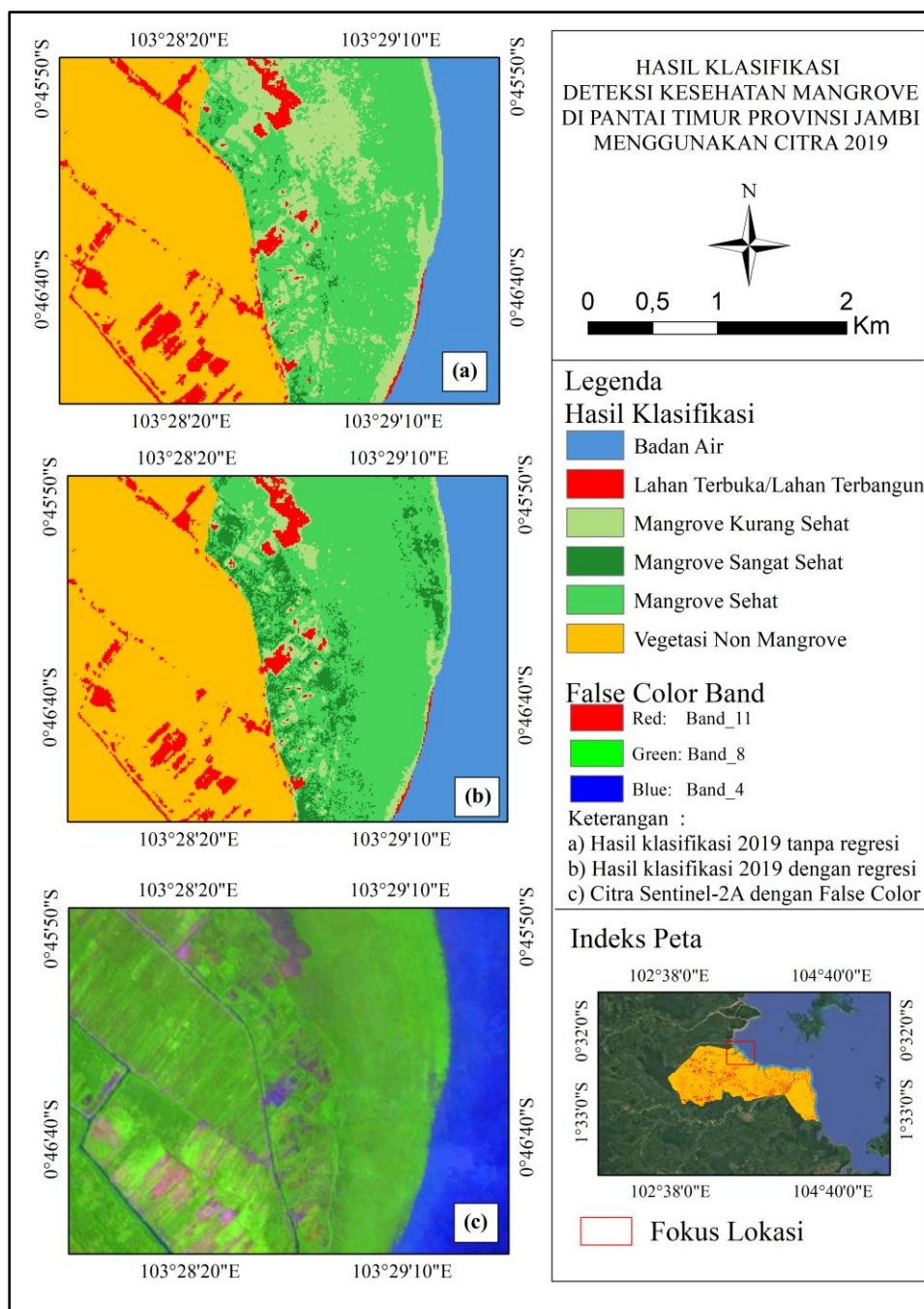
Keterangan : OA= Overall Accuracy, KA = Kappa Accuracy, PA = Producer's Accuracy, UA = User's Accuracy

Secara keseluruhan, model yang mengintegrasikan seluruh peubah (Kombinasi spektral dan sosio-geo-biofisik) memberikan performa terbaik dibandingkan model tunggal lainnya. Model ini menghasilkan tingkat akurasi tertinggi dengan nilai OA mencapai 96,6% dan KA sebesar 0,96, dengan root node yang diwakili oleh indeks NDWI. Selain itu, stabilitas model ini juga terlihat dari nilai akurasi per kelas yang cukup tinggi, di mana Min PA dan Min UA masing-masing berada pada angka 86,64% dan 86,1%, serta Max PA dan Max UA yang mampu menyentuh angka 100%. Hasil klasifikasi dapat dikatakan baik jika OA lebih dari 85% (Jaya 2015). Peubah tunggal spektral dan peubah kombinasi memiliki OA dan KA yang termasuk kedalam kategori baik. Akan tetapi peubah kombinasi menjadi yang lebih unggul dikarenakan tingkat konsisten dari nilai PA dan UA yang dimiliki. Dapat dilihat pada Tabel 18 bahwa peubah tunggal spektral memiliki minimal nilai PA 74,2%.

3.6 Hasil Klasifikasi

3.6.1 Transfer Model Lintas Waktu

Penerapan model klasifikasi pada skala lintas tahun memiliki tantangan tersendiri akibat adanya variasi kondisi atmosfer, sudut matahari, dan perbedaan sensor citra dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, penggunaan citra yang telah melalui proses regresi (normalisasi/kalibrasi radiometrik lintas waktu) terbukti memberikan hasil klasifikasi yang jauh lebih baik dan konsisten dibandingkan dengan citra yang tidak diregresi. Tanpa proses regresi, model cenderung mengalami penurunan akurasi saat diterapkan pada tahun yang berbeda karena mendeteksi perubahan nilai piksel akibat gangguan atmosfer sebagai perubahan tutupan lahan aktual. Sebaliknya, citra yang sudah diregresi mampu menyelaraskan nilai reflektansi antar-tahun, sehingga model *decision tree* dapat mengenali karakteristik objek secara stabil dan meminimalkan kesalahan klasifikasi dalam analisis temporal. Perbandingan hasil klasifikasi secara visual disajikan pada Gambar 14.



Gambar 14 Hasil klasifikasi menggunakan citra tanpa regresi dan citra dengan regresi pada citra tahun 2019

Hasil uji akurasi yang disajikan pada Tabel 19 dan Tabel 20 penerapan regresi pada citra terbukti secara signifikan meningkatkan akurasi model untuk klasifikasi lintas tahun (*backcasting* 2019). Hasil uji menunjukkan bahwa hasil klasifikasi menggunakan citra yang sudah diregresi (Tabel 19) memberikan performa jauh lebih tinggi dan stabil, dengan nilai *Overall Accuracy* (OA) mencapai 95% dan *Kappa Accuracy* (KA) sebesar 94%. Sebaliknya, hasil klasifikasi menggunakan citra non-regresi yang disajikan pada Tabel 20 menurun cukup signifikan dengan OA hanya 78,9% dan KA 75%.

Tabel 20 Uji akurasi *backcasting* hasil klasifikasi 2019 sudah diregresi

Pred Class	True Class						Grand total	User's accuracy (%)
	BAR	LTB/LBN	MKS	MSD	MSS	VBM		
BAR	30		1				31	96,8
LTB/LBN		30	1				31	96,8
VBM						30	30	100
MSS				1	26		27	96,3
MSD				27	4		31	87,1
MKS			28	2			30	93,3
Grand Total	30	30	30	30	30	30	180	
Producer's Accuracy (%)	100	100	93	90	87	100		
Overall accuracy (%)					95			
Kappa accuracy (%)					94			

Keterangan : Sama seperti Tabel 15

Tabel 21 Uji akurasi *backcasting* hasil klasifikasi 2019 non-regresi

Pred Class	True class						Grand total	User's accuracy (%)
	BAR	LTB/LBN	MKS	MSD	MSS	VBM		
BAR	30						30	100
LTB/LBN		30	1				31	96.8
VBM						30	30	100
MSS					5		5	100
MSD				18	25		43	41.9
MKS			29	12			41	70.7
Grand Total	30	30	30	30	30	30	180	
Producer's accuracy (%)	100	100	97	60.0	17	100		
Overall accuracy (%)					78.9			
Kappa Accuracy (%)					75			

Keterangan : Sama seperti Tabel 15

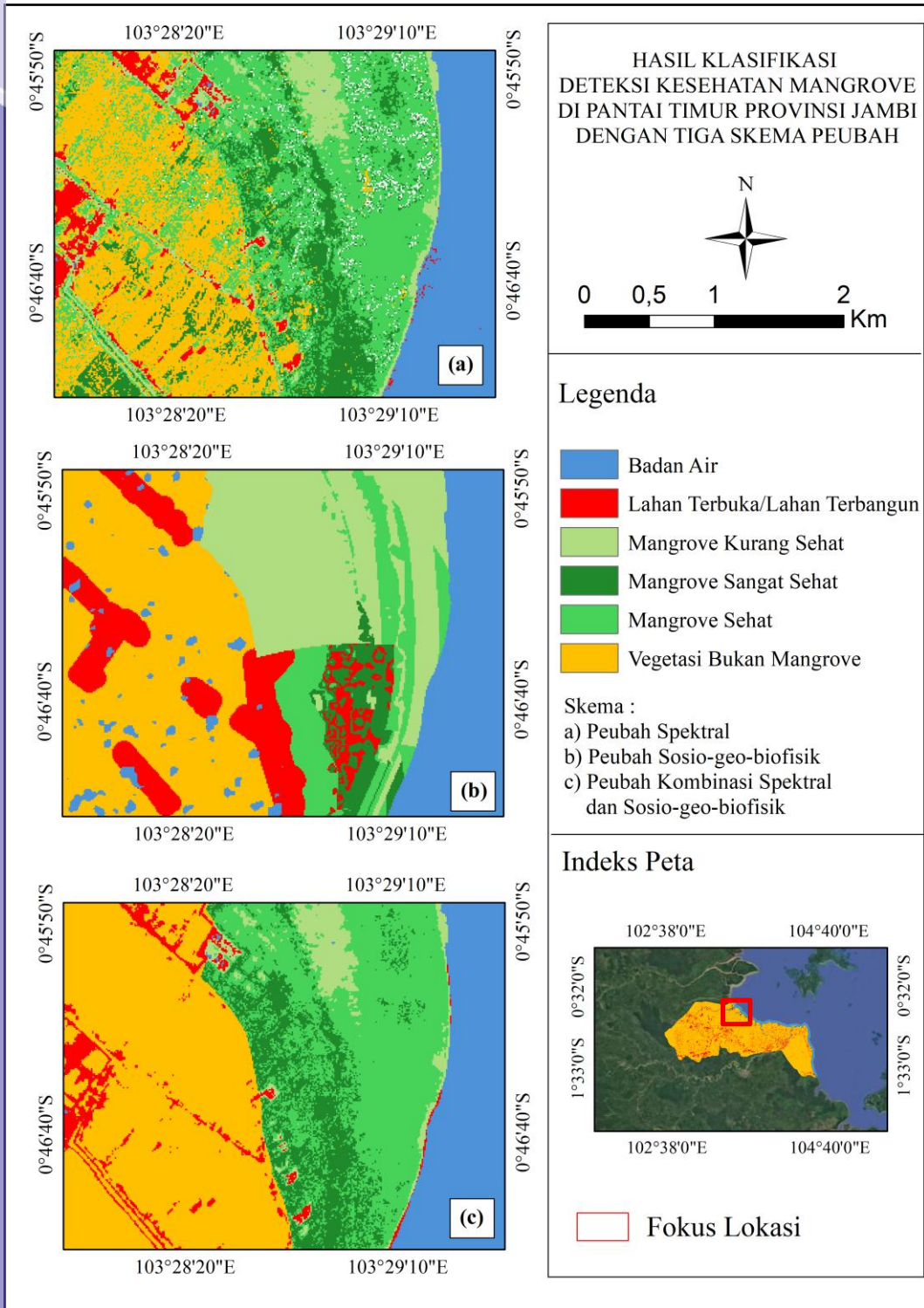
Penurunan akurasi pada citra non-regresi ini dipicu oleh ketidakstabilan model dalam membedakan beberapa kelas vegetasi mangrove secara spesifik. Hal ini terlihat jelas pada kelas mangrove sehat (MSD) dan mangrove sangat sehat (MSS), di mana pada citra non-regresi nilai *Producer's Accuracy* (PA) kelas MSD jatuh ke angka 60,0% dan kelas MSS anjlok hingga 17% saja akibat banyaknya piksel yang salah diklasifikasikan. Sementara itu, pada citra yang sudah diregresi, akurasi kedua kelas tersebut tetap terjaga tinggi dengan PA masing-masing sebesar 90% (MSD) dan 87% (MSS). Perbandingan ini menegaskan bahwa proses regresi sangat krusial dalam menyelaraskan nilai reflektansi citra lintas tahun, sehingga model dapat mengklasifikasikan tingkat kesehatan mangrove secara konsisten, akurat, dan terhindar dari bias gangguan atmosferik.

3.6.2 Perbandingan Hasil Klasifikasi Tiga Skema Peubah

Berdasarkan data yang disajikan Tabel 18, perbandingan ketiga skema peubah menunjukkan bahwa skema kombinasi merupakan model terbaik yang menghasilkan klasifikasi paling optimal tanpa mengalami *overfitting*. Sebaliknya, skema sosio-geo-biofisik mandiri memberikan performa terendah dengan *Overall Accuracy* (OA) 79,3% dan *Kappa Accuracy* (KA) 75%, serta nilai minimum *Producer's Accuracy* (PA) yang merosot hingga 51,5% akibat bias yang tinggi dalam mengenali kondisi lapangan. Skema spektral mandiri menunjukkan hasil yang lebih baik dengan OA 91% dan KA 89%, namun tetap rentan mengalami *overfitting* karena nilai minimum PA-nya masih rendah (74,2%).

Peningkatan signifikan terjadi pada skema kombinasi, yang mencatat OA tertinggi 96,6% dan KA 96% dengan indeks NDWI sebagai root node. Skema kombinasi ini terbukti tidak mengalami *overfitting* karena nilai akurasi minimum tiap kelasnya tetap tinggi dan stabil (Min PA 86,64% dan Min UA 86,1%) mendekati nilai maksimumnya yang mencapai 100%. Penggabungan kedua kelompok peubah ini terbukti mampu melengkapi satu sama lain, sehingga model dapat membedakan kelas mangrove sangat sehat, sehat, dan kurang sehat secara konsisten dan akurat.

Perbandingan hasil klasifikasi dari ketiga skema tersebut dapat dilihat pada Gambar 15 yang menunjukkan bahwa peubah kombinasi dapat membedakan dengan baik setiap kelasnya, dan peubah tunggal masih terjadi *overfitting* dan *miss classification*. *Overfitting* terjadi karena kebocoran data dimana informasi data pengujian bocor ke data pelatihan secara langsung maupun tidak langsung sehingga model terlalu optimis selama pembangunan model dalam menentukan suatu kelas dan gagal merepresentasikan sesuai dengan kondisi sesungguhnya (Ichwani et al. 2026).



Gambar 15 Hasil klasifikasi dengan tiga skema peubah

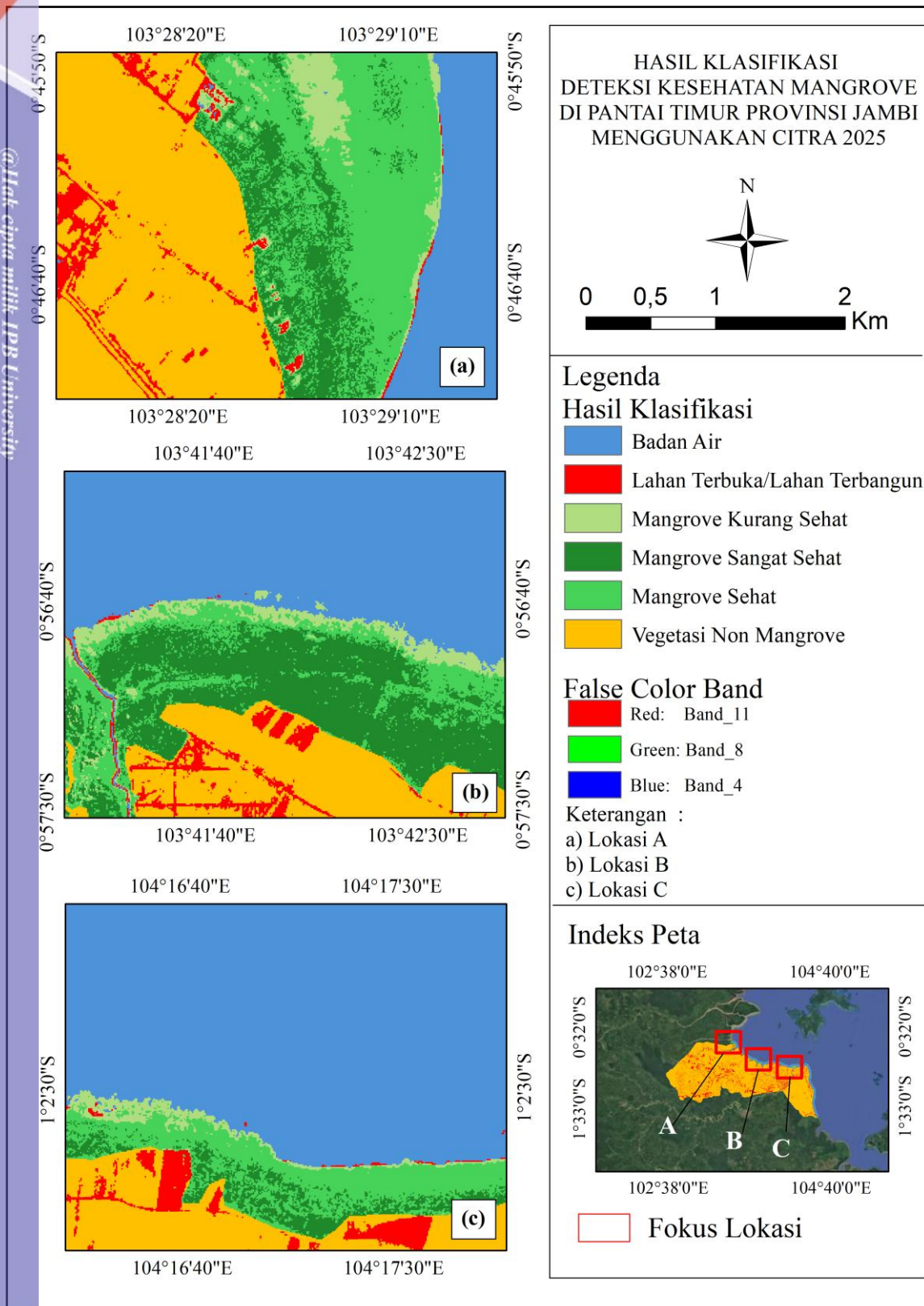
3.6.3 Hasil Klasifikasi Dengan Skema Peubah Optimal

Hasil pemodelan menggunakan *decision tree*, secara keseluruhan model mampu melakukan klasifikasi tingkat kesehatan mangrove secara spasial dengan sangat baik. Keberhasilan klasifikasi ini didukung oleh penentuan training area yang representatif serta integrasi data lapangan yang valid sebagai kontrol korelasi dalam membedakan kelas yaitu: badan air, lahan terbuka/lahan terbangun, vegetasi non mangrove mangrove sangat sehat, mangrove sehat, dan mangrove kurang sehat. Model dengan performa terbaik diperoleh melalui Kombinasi peubah spektral dan sosio-geo-biofisik, yang menghasilkan nilai *Overall Accuracy* (OA) tertinggi mencapai 96,6% dan *Kappa Accuracy* (KA) sebesar 96%. Tingginya nilai akurasi ini menunjukkan tingkat keselarasan (*agreement*) yang sangat kuat antara hasil klasifikasi model dengan kondisi aktual di lapangan. Pada model ini, indeks NDWI bertindak sebagai *root node* atau pemisah utama. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi kandungan air atau kelembapan kanopi yang ditangkap secara spektral berkorelasi kuat dengan data lapangan untuk mencerminkan kesehatan mangrove di setiap zona. Hasil klasifikasi yang disajikan pada Gambar 16 menunjukkan bahwa model dapat membedakan dengan baik vegetasi bukan mangrove, lahan terbuka/lahan terbangun, badan air, mangrove sangat sehat, mangrove sehat, dan mangrove kurang sehat.

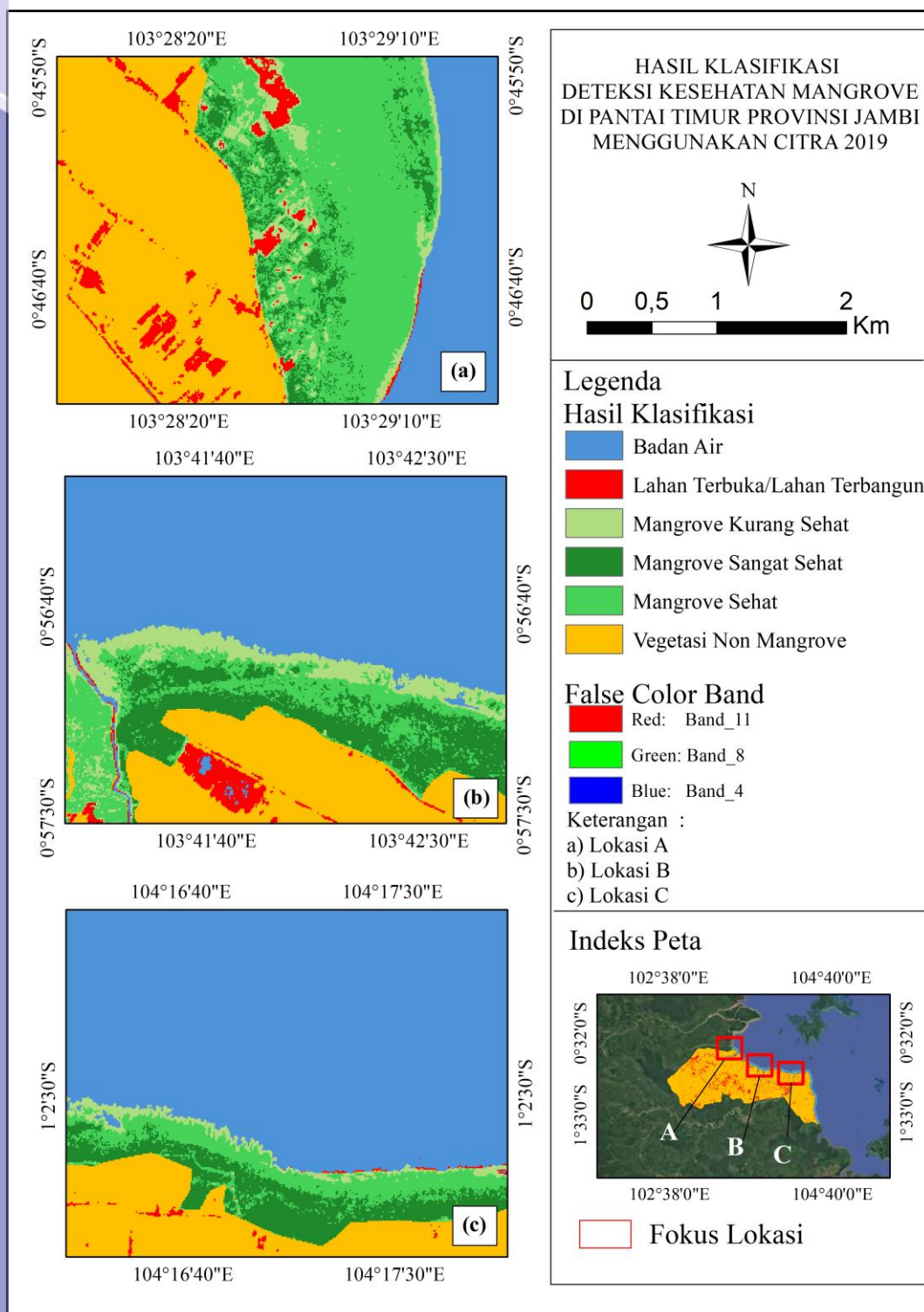
Hasil klasifikasi yang disajikan pada Gambar 16 menunjukkan di *Site A*, *Site B*, dan *Site C*, terlihat bahwa sebaran kelas mangrove kurang sehat dan lahan terbuka cenderung berada di area tepi pesisir. Hal ini menunjukkan adanya tekanan antropogenik maupun faktor dinamika pasang surut yang memicu keterbukaan tajuk. Sebaliknya, area yang berada lebih jauh dari zona aktivitas manusia didominasi oleh kelas mangrove sangat sehat dan mangrove sehat. Pola distribusi spasial pada ketiga lokasi amatan ini memperkuat bukti bahwa integrasi peubah spektral dan sosio-geo-biofisik tidak hanya unggul dari segi akurasi statistik, tetapi juga secara kondisi di lapangan. Keberhasilan pemodelan berbasis *decision tree* dengan NDWI sebagai *root node* memberikan efisiensi tinggi dalam analisis penginderaan jauh wilayah pesisir. Penggunaan kombinasi peubah ini terbukti tidak hanya meminimalisir tingkat *overfitting* pada pengolahan data citra, tetapi juga menghasilkan peta klasifikasi yang mampu menggambarkan kondisi kesehatan mangrove secara nyata. Pendekatan ini dapat digunakan untuk pemantauan berkala kesehatan mangrove di wilayah pesisir lainnya dengan karakteristik lingkungan serupa.

Hasil klasifikasi deteksi kesehatan mangrove pada tahun 2019 diperoleh dengan melakukan integrasi antara model terbaik yang diperoleh dari ketiga skema yang dilakukan dengan citra 2019 yang sudah melwati proses harmonisasi citra. Hasil deteksi kesehatan mangrove tahun 2019 menggunakan model yang melibatkan kombinasi peubah yaitu peubah spektral dan peubah sosio-geo-biofisik yang merupakan model terbaik dari tiga skema yang dilakukan. Penerapan pada citra 2019. Integrasi antara model terbaik dan citra terbaik pada tahun 2019 menghasilkan klasifikasi deteksi kesehatan mangrove yang optimal pada tahun 2019 dengan akurasi yang disajikan pada Tabel 19. Hasil klasifikasi pada tahun 2019 disajikan pada Gambar 17

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 16 Hasil klasifikasi deteksi kesehatan mangrove 2025 dengan peubah kombinasi peubah spektral dan peubah sosio-geo-biofisik



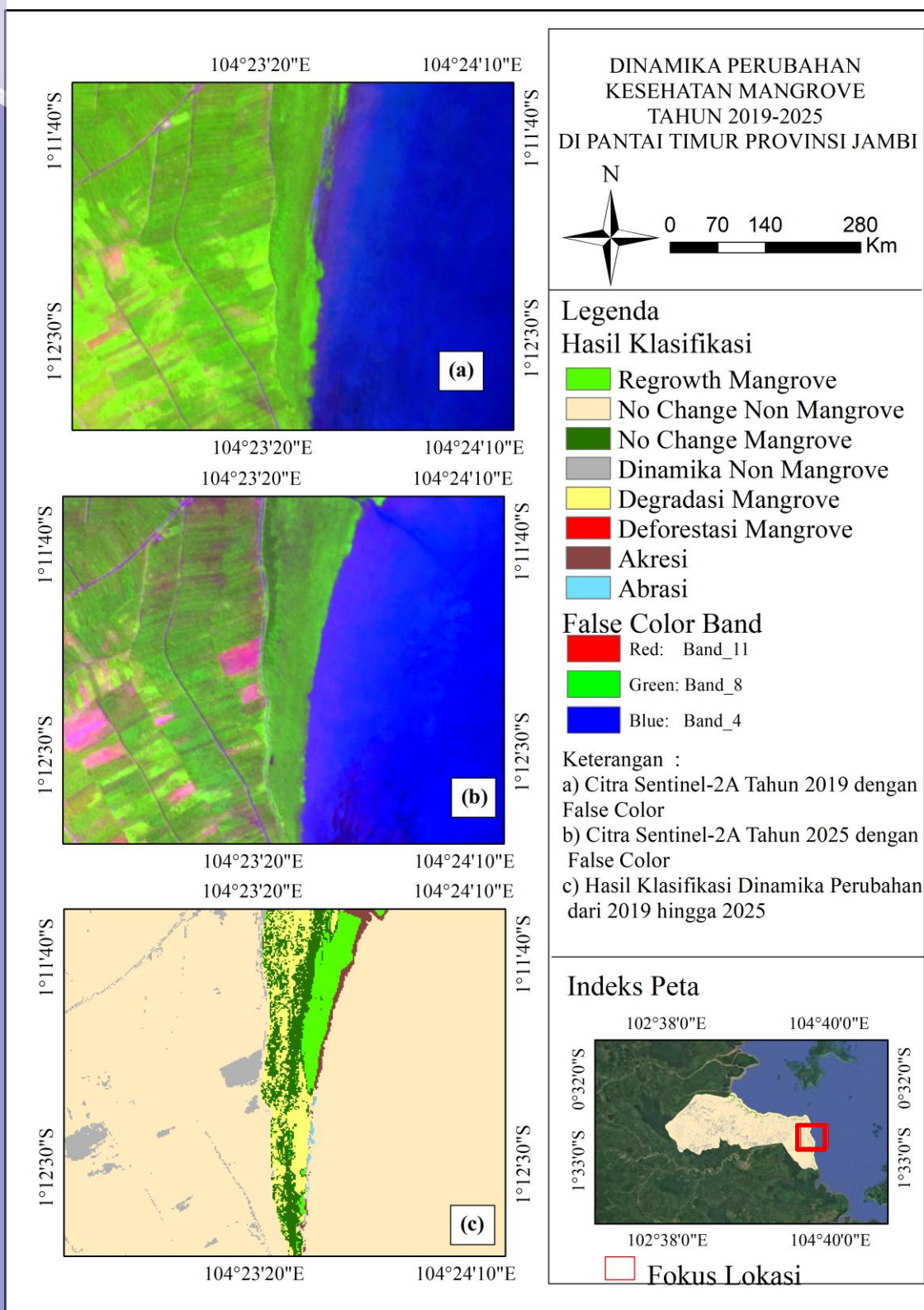
Gambar 17 Hasil klasifikasi deteksi kesehatan mangrove 2019 dengan peubah kombinasi peubah spektral dan peubah sosio-geo-biofisik

3.7 Dinamika Perubahan Kesehatan Mangrove Tahun 2019 hingga 2025

Hasil klasifikasi deteksi kesehatan mangrove pada tahun 2025 di Pantai Timur Provinsi dilakukan *overlay* dengan hasil klasifikasi 2019 yang sudah diregresi sehingga dihasilkan klasifikasi perubahan yang terjadi dari 2019 hingga 2025 seperti yang disajikan pada Gambar 18 dan Gambar 19 luasan setiap kelas perubahan disajikan pada Tabel 22 dan perubahan setiap kelas tutupan lahan dari tahun 2019 hingga 2025 disajikan pada Tabel 21.

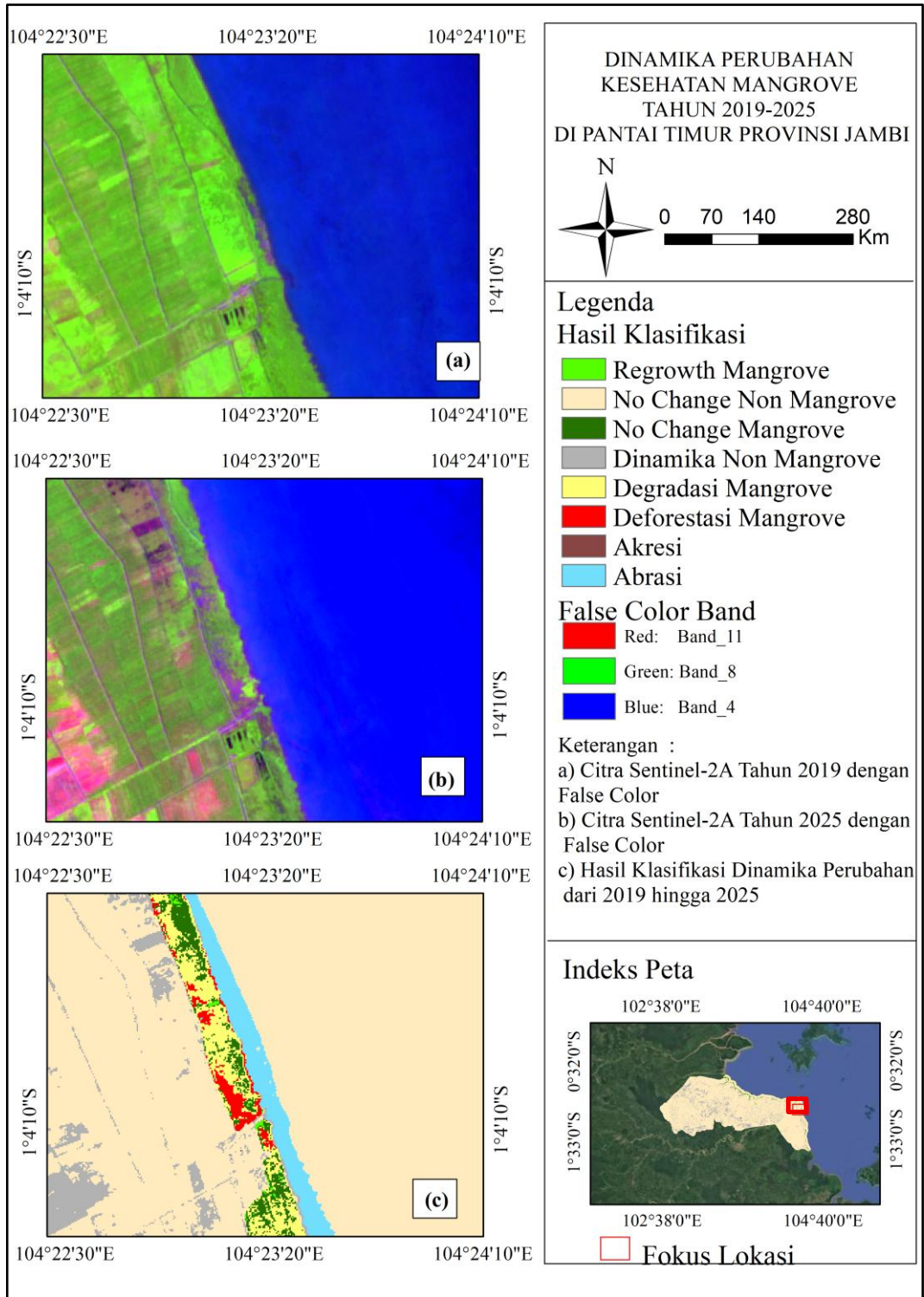
Dinamika perubahan yang terjadi di Pantai Timur Provinsi Jambi menunjukkan adanya pergeseran luasan pada beberapa kelas kondisi kesehatan mangrove. Sebagian besar area mangrove yang tergolong stabil (*no Change*) mampu mempertahankan tingkat kerentanannya, sementara beberapa titik lain mengalami perubahan akibat dinamika lingkungan pesisir. Dinamika perubahan kondisi kesehatan mangrove tersebut dipengaruhi oleh faktor antropogenik dan dinamika alamiah pesisir. Proses penurunan kualitas tutupan (*degradasi mangrove*) dan hilangnya tutupan lahan mangrove (*deforestasi mangrove*) umumnya dipengaruhi dengan aktivitas alih fungsi lahan dan kegiatan manusia di sekitar wilayah pesisir. Sebaliknya, kemunculan area perbaikan (*regrowth mangrove*) serta proses akresi dan abrasi di sepanjang garis pantai menjadi perubahan yang terjadi di Pantai Timur Provinsi Jambi. Secara keseluruhan, pemetaan dinamika spasial ini memberikan gambaran krusial mengenai wilayah-wilayah pesisir yang tergolong rentan dan mengalami pemulihan alami. Penurunan kesehatan dan tutupan mangrove di beberapa titik menegaskan pentingnya menjaga kelestarian yang lebih terfokus, khususnya pada zona yang teridentifikasi mengalami degradasi dan deforestasi. Sebaliknya, kawasan yang menunjukkan pemulihan (*regrowth mangrove*) perlu dipertahankan kelestariannya.

Keberhasilan penerapan model deteksi kesehatan mangrove optimal dan model regresi dalam penelitian ini terbukti mampu membantu dalam menunjukkan perubahan kesehatan mangrove di Pantai Timur Provinsi Jambi. Pendekatan ini direkomendasikan untuk diadopsi dalam sistem pemantauan berkala (*monitoring*) kesehatan mangrove di masa mendatang, sehingga data perubahan tutupan lahan di Pantai Timur Provinsi Jambi dapat terus diperbarui sebagai acuan evaluasi kebijakan pengelolaan lingkungan..



Gambar 18 Dinamika perubahan di Pantai Timur Provinsi Jambi pada lokasi 1

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 19 Dinamika perubahan di Pantai Timur Provinsi Jambi pada lokasi 2

Tabel 22 Luasan (ha) kelas perubahan di Pantai Timur Provinsi Jambi

Kelas	Luas (ha)
Deforestasi Mangrove	115
Akresi	1323
Abrasi	1360
Degradasi Mangrove	2846
Regrowth Mangrove	3488
No Change Mangrove	7344
Dinamika Non Mangrove	139629
No Change Non Mangrove	1036308

Berdasarkan Tabel 21, dinamika luasan pada kelas perubahan di Pantai Timur Provinsi Jambi menunjukkan variasi yang beragam antara kondisi stabil, degradasi mangrove, maupun pemulihan lingkungan pesisir hingga deforestasi mangrove. Kelas *no change* mangrove menunjukkan luasan tertinggi pada ekosistem mangrove yang menandakan sebagian besar kawasan mangrove masih berada dalam kondisi stabil dan terjaga. Tekanan terhadap ekosistem ini tetap terlihat dari luasan kelas *degradasi* mangrove dan deforestasi mangrove terjadi. Kesehatan mangrove sering kali terancam oleh berbagai faktor termasuk aktivitas manusia dan perubahan lingkungan (Prasetio *et al.* 2023). Sementara itu, proses alami pantai juga aktif terjadi, di mana luasan area yang mengalami *Abrasi* tercatat relatif sama dengan *akresi*. Abrasi terjadi dipengaruhi oleh faktor alam seperti terjadinya pasang surut pada daerah pantai, perubahan iklim serta gelombang air laut (Nabilla *et al.* 2021).

Dinamika perubahan luasan yang cukup dinamis pada berbagai kelas tutupan lahan dan tingkat kesehatan mangrove di Pantai Timur Provinsi Jambi dari tahun 2019 hingga 2025. Secara umum, sebagian besar kawasan mangrove berada pada kondisi yang stabil, namun proses degradasi dan pemulihan vegetasi (*regrowth*) tetap teramati di beberapa zona wilayah pesisir. Perubahan luasan setiap kelas disajikan pada Tabel 22.

Tabel 23 Perubahan luasan (ha) dari tahun 2019 hingga 2025

2019	2025						Grand total
	BAR	LTB/LBN	VBM	MSS	MSD	MKS	
BAR	71087	933	390	83	188	277	72959
LTB/LBN	699	29691	61331	85	108	20	91932
VBM	623	78298	935530				1014452
MSS	11	83		4321	2538	92	7045
MSD	5	21		1512	2556	216	4309
MKS	22	11		411	806	467	1717
Grand Total	72448	109036	997251	6411	6195	1072	1192413

Keterangan : Sama seperti Tabel 15

Pada kelas Mangrove Sangat Sehat (MSS), meskipun sebagian besar areanya berhasil dipertahankan, terdapat sebagian luasan yang mengalami degradasi

menjadi kelas Mangrove sehat (MSD) dan Mangrove Kurang Sehat (MKS). Sebaliknya, tren pemulihan vegetasi terlihat pada kelas Mangrove Kurang Sehat (MKS) tahun 2019, di mana sebagian besar areanya berhasil membaik dan mengalami peningkatan kelas menjadi Mangrove sehat (MSD) serta Mangrove Sangat Sehat (MSS) pada tahun 2025.

Secara keseluruhan, fenomena perubahan kelas kesehatan ini memperlihatkan ekosistem mangrove terhadap gangguan lingkungan. Peningkatan tingkat kesehatan dari Mangrove Kurang Sehat (MKS) menjadi Mangrove Sehat (MSD) dan Mangrove Sangat Sehat (MSS) membuktikan bahwa penutupan tajuk dapat pulih secara bertahap. Namun, penurunan kualitas pada sebagian area MSS menjadi MSD dan MKS menjadi sinyal peringatan awal bagi pengelola kawasan untuk memperketat pengawasan di zona-zona pesisir yang rentan terhadap alih fungsi lahan maupun abrasi dan akresi di pesisir pantai.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

IV SIMPULAN DAN SARAN

4.1 Simpulan

Penelitian ini menghasilkan algoritma pohon keputusan dalam deteksi kesehatan mangrove di Pantai Timur Jambi dengan indeks vegetasi dengan kombinasi peubah spektral dan sosio-geo-biofisik dengan *Overall Accuracy* sebesar 96,6% dan *Kappa Accuracy* sebesar 0,96 dengan *Cross Validation 5 fold*. Peubah yang terpilih yaitu NDWI, CMRI, NDVI, jenis substrat, SAVI, MVI, NDBI, kelerengan, dan *proximity* pemukiman. Dinamika perubahan ditemukan di Pantai Timur Jambi, terdapat penurunan kesehatan mangrove, perubahan tutupan lahan dan pertumbuhan mangrove yang ditemukan di Pantai Timur Jambi sebesar 2846 ha untuk degradasi mangrove, 115 ha untuk deforestasi mangrove dan 3488 ha untuk pertumbuhan yang terjadi di Pantai Timur Provinsi Jambi.

4.2 Saran

Penelitian berikutnya disarankan untuk menggunakan citra resolusi tinggi agar deteksi kesehatan mangrove dapat dilakukan lebih baik dan memudahkan pada saat ground truthing ketika melakukan penelitian untuk prediksi tahun sebelumnya. Monitoring perubahan tutupan lahan dilakukan secara berkala dan menggunakan data terbaru sehingga kebijakan yang ditentukan sesuai dengan kondisi terbaru.



DAFTAR PUSTAKA

- Achmad E, Fazriyas, Jayanti DP, Marwoto N. 2020. Studi kerapatan mangrove dan perubahan garis pantai tahun 1989-2018 di pesisir Provinsi Jambi. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*. 10(2): 138-152.
- Alongi DM. 2002. *Present State and Future of the World's Mangrove Forests*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Alongi DM. 2009. *The Energetics of Mangrove Forests*. Australia : Springer
- Azzahra RP, Sumarga E, Sholihah A. 2022. Analisis kesehatan mangrove di Taman Wisata Alam Angke Kapuk, Jaakarta Utara. *Journal Ilmu Teknologi Kayu*. 2(1).
- Baloloy AB, Blanco AC, Ana RHCS, Nadaok K. 2020. Development and application of a new mangrove vegetation index (MVI) for rapid and accurate mangrove mapping. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 95-117.
- Cahyani WS, Bone AH, Hamar B, Hasan R. 2022. Struktur kawasan angrove di Kolagana Kota Baubau Sulawesi Tenggara. *Journal of Aceh Aquatic Science*. 6(1). ISSN : 2580-246X, E-ISSN:2745-7230.
- Dharmawan IWE, Suyarso, Ulumuddin YI, Prayudha B, Pramudji. 2020. *Manual for Mangrove Community Structure Monitoring and Research in Indonesia*. Makassar: Nas Media Pustaka.
- Foody GM. 2024. Ground truth in classification accuracy assesment : myth and reality. *Geomatics*. 4(1) :81-90. <https://doi.org/10.3390/geomatics4010005>
- Gupta K, Mukhopadhyay A, Giri S, Chanda A, Datta Majumdar S, Samanta S, Mitra D, Samal RN, Pattnaik AK, Hazra S. 2018. An index for discrimination of mangroves from non-mangroves using LANDSAT 8 OLI imagery. *MethodsX*. 5:1129–1139. DOI: 10.1016/j.mex.2018.09.011
- Huete AR.1988. A soil- adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing and Environment*. 25: 295-309.
- Indrazora TH, Santoso A, Nirwani S. 2024. Mangrove health index di Kawasan Mangrove Desa Bedono, Kecamatan Sayung, Kabupaten Demak. *Journal of Marine Research*. 13(4) : 731-738. <https://doi.org/10.14710/jmr.v13i4.43270>.
- Ichwani A, Kesuma RI, Setiawan A, Wicaksono IE, Hanifah R. Preventing data leakage in classification via integrated machine learning pipelines; preprocessing, feature transformation, and hyperparameter tuning. *Jurnal Teknik Informatika*. 7(1) : 391-410. <https://doi.org/10.52436/1.jutif.2026.7.2.5490>
- Jaya INS, Fajrin EN, Gaffrila G, Umairah AB, Ilham QP, Fehrmann L, Klein C. 2026. Multi-sensor decision tree machine learning algorithm for identifying mangrove ecosystem. *BIO Web of Conferences*. 234. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202623401016>.

- Jaya INS. 2010. *Analisis Citra Digital Perspektif Penginderaan Jarak Jauh untuk Pengelolaan Sumber Daya Alam Edisi Kedua*. Bogor: Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB.
- Jaya INS. 2015. *Analisis Citra Digital Perspektif Penginderaan Jarak Jauh untuk Pengelolaan Sumber Daya Alam*. Bogor (ID): IPB Press.
- Kaufman YJ, Tanre D. 1992. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*. 30 (2). DOI: 10.1109/36.134076
- Kim T, Han Y. 2021. Integrated preprocessing of multitemporal very-high-resolution satellite image via conjugate points-based pseudo-invariant feature extraction. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs13193990>.
- Lu D, Chen Q, Wang G, Liu L, Li G, Moran E. 2014. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*. 9(1):63-105. <http://dx.doi.org/10.1080/17538947.2014.990526>.
- McFeeters SK. 1996. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 17(7): 1425-1432.
- Mienye ID, Jere N. 2017. A survey of decision trees: concepts, algorithms, and applications. *IEE Access*.
- Mingers J. 1989. *An Empirical Comparison of Selection Measures for Decision-Tree Induction*. Kluwer Academic Publisher.
- Nabilla LM, Mubarak, Elizal. 2021. Analysis of coastline change on the potential of mangrove forests on Bengkalis Island, Riau Province. *Asian Journal of Aquatic Science* 4(2) :163-170. e-issn: 2716-4608. NEM.
- Papilaya MC, Mardiatmoko G, Loppies R. 2026. Efektivitas aplikasi algoritma machine learning dalam klasifikasi tutupan lahan di Pulau NusaLaut. *Jurnal Sains dan Teknologi*. 2(12) : 851-864. <https://doi.org/10.69840/marsegu/2.12.2026.851-864>.
- Prasetio T, Putri VA, Lugyn ZD, Ani K. 2023. Pemetaan Kesehatan Mangrove. Pekalongan (ID) : Nasya Expanding Management.
- Puna SH, Sahrani P, Tirayya NH, Buhari N, Damayanti AA, Lestariningsih WA, Rahman I. 2024. Struktur komunitas dan persentase tutupan kanopi mangrove di Pantai Keranji, Desa Paremas, Lombok Timur. *Jurnal Ilmu Kelautan Lesser Sunda*. 4(2) : 19-32.
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium, NASA SP-351. 1:309-317.
- Salma U, Pramita AW. 2026. Perbandingan kinerja indeks CMRI dan MVI untuk pemetaan mangrove menggunakan citra Sentinel-2 pada berbagai kondisi pesisir di Jawa, Indonesia. *Journal of Marine Research*. 15(1) :219-232. <https://doi.org/10.14710/jmr.v15i1.54829>.

Simarmata N, Wikantika K, Tarigan TA, Aldyansyah M, Tohir RK, Fauziah A, Purnama Y. 2021. *Jurnal Geografi*. 19(2). <https://doi.org/10.26740/jggp.v19n2.p69-79>

Tangirala S. 2020. Evaluating the impact of gini index and information gain on classfication using decision tree classifier algorithm. *International Journal of Advanced Computer Science and Application*. 11(2). <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110277>

Rufan RM, Santrum MJ, Nikmah. 2026. Struktur dan keanekaragaman jenis vegetasi mangrove di Pesisir Pantai Kelapa Tinggi Desa Mata Air. *Jurnal Riset Ilmiah*. 3 (5) : 1483-1493. <https://doi.org/10.62335>.

Velati ZA, Suryono, Pratikto I. 2024. Jenis substrat dan tingkat kerapatan mangrove di kawasan konservasi mangrove baros yogyakarta. *Journal of Marine Research*. 13(4). DOI : 10.147010/jmr.v13i4.43088.

Zha Y, Gao J, NI S. 2001. Use of normalized difference built-up index in automatically mappingurban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 24(3): 583-594.