

**ANALISIS DAN PREDIKSI PERUBAHAN HUTAN MANGROVE
BERBASIS CA-MARKOV DI DESA SIMANDULANG,
SUMATERA UTARA**

*Analysis and Prediction of Mangrove Forest Changes Using the CA-Markov
Model in Simandulang Village, North Sumatra*

DANIS SUHARI SINGAWILASTRA¹⁾, MUHAMMAD RAFLY FAHREZI¹⁾

¹⁾Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Perencanaan dan Arsitektur,
Universitas Winaya Mukti

*Email: denisgeodesi@gmail.com

Diterima Januari 2026/Disetujui Maret 2026

ABSTRACT

Mangrove forests are crucial coastal ecosystems that play an important role in maintaining environmental stability, protecting shorelines from erosion, and storing substantial carbon stocks. Nevertheless, mangrove ecosystems are currently facing considerable pressure due to land conversion, coastal infrastructure expansion, and various anthropogenic activities. This research aims to project changes in the extent of mangrove forests in Simandulang Village by the year 2034. The study employs the Cellular Automata-Markov Chain (CA-Markov) approach to simulate future land cover changes based on several driving factors. The driving variables incorporated in the model include maps of coastlines, river networks, settlement areas, and aquaculture ponds within the Simandulang Village area. Land cover information was derived from the classification of Sentinel-2 satellite imagery for the years 2020, 2022, and 2024. The analysis indicates a decrease in mangrove forest coverage during the 2020–2024 period, which coincides with the expansion of oil palm plantation areas. Based on the prediction model, the projected mangrove forest area in 2034 is estimated to reach 210.06 hectares. The projection results indicate that if the current trend of land cover change persists, mangrove forest areas are likely to experience substantial reduction over time. These findings can serve as an important reference for policymakers and spatial planners in designing strategies for the sustainable conservation and management of mangrove ecosystems.

Keywords: *Cellular automata, Mangrove Forest, Markov chain.*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki ekosistem mangrove terluas di dunia. Luas kawasan mangrove di Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 21–29% dari total mangrove global serta menjadi habitat bagi sekitar 45 dari 75 spesies mangrove yang ada di dunia (Spalding *et al.*, 2010; Giri *et al.*, 2011; Hamilton & Casey, 2016). Namun demikian, besarnya potensi sumber daya tersebut belum mampu mencegah terjadinya penurunan luas ekosistem mangrove secara berkelanjutan. Berdasarkan data FAO (2007), selama periode 1980–1990 luas mangrove di Indonesia mengalami penyusutan dari sekitar 4,2 juta hektare menjadi 3,5 juta hektare, dengan rata-rata kehilangan mencapai kurang lebih 70 ribu hektare setiap tahunnya.

Penurunan luas mangrove tersebut masih terus berlangsung hingga awal tahun 2000-an, di mana luas kawasan mangrove tercatat sekitar 3,15 juta hektare dengan laju kehilangan mencapai sekitar 35 ribu hektare setiap tahunnya. Degradasi ekosistem mangrove tersebut sebagian besar disebabkan oleh aktivitas manusia, seperti alih fungsi lahan menjadi kawasan permukiman, industri, maupun pembangunan berbagai fasilitas ekonomi dan pariwisata. Fenomena yang sama juga terjadi di Kabupaten Labuhanbatu Utara, di mana kawasan mangrove mengalami konversi lahan yang cukup signifikan, terutama menjadi perkebunan karet dan kelapa sawit yang terus berkembang (Kaswanto *et al.*, 2021). Salah satu wilayah pesisir yang masih memiliki ekosistem mangrove di kabupaten tersebut adalah Desa Simandulang.

Teknologi penginderaan jauh menjadi salah satu metode yang dapat digunakan untuk memantau kondisi ekosistem mangrove. Pemanfaatan teknologi ini mendukung proses identifikasi dan monitoring secara lebih efektif karena mangrove berkembang pada area peralihan darat–laut yang memperlihatkan karakteristik spektral khas dan berbeda dari vegetasi terestrial lainnya.

Pemanfaatan citra satelit yang diolah menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG) juga memungkinkan dilakukan analisis spasial terhadap perubahan tutupan lahan. Kajian perubahan penggunaan lahan umumnya melibatkan analisis terhadap luas wilayah, tingkat perubahan, serta pola distribusi spasialnya, sehingga dapat memberikan gambaran mengenai dinamika perubahan penggunaan lahan dari waktu ke waktu.

Dalam penelitian ini, pendekatan *Cellular Automata–Markov Chain* (CA-Markov) digunakan untuk memodelkan sekaligus memprediksi perubahan kawasan mangrove. Metode CA-Markov memiliki keunggulan dalam menganalisis dinamika perubahan tutupan lahan karena mampu menggambarkan proses perubahan yang bersifat dinamis, baik dalam pola sederhana maupun kompleks,

serta relatif mudah untuk diterapkan. Model ini telah banyak digunakan dalam berbagai kajian kebumihutan, termasuk penelitian yang berkaitan dengan perubahan kawasan mangrove. Melalui pendekatan tersebut, perubahan tutupan lahan dianalisis berdasarkan probabilitas transisi antar kelas penggunaan lahan sehingga memungkinkan identifikasi potensi perubahan dari satu jenis penggunaan lahan ke jenis lainnya.

Prediksi perubahan tutupan lahan tidak hanya dilakukan dengan pendekatan penginderaan jauh dan SIG, tetapi juga dapat menggunakan beragam metode pemodelan lain, di antaranya model statistik, metode berbasis machine learning, dan model dinamis spasial. Model statistik, seperti regresi logistik atau regresi multinomial, sering digunakan untuk menghubungkan variabel lingkungan—misalnya ketinggian wilayah, jarak dari garis pantai, tingkat salinitas, serta jarak terhadap permukiman—dengan probabilitas perubahan tutupan lahan. Pendekatan ini mampu menghasilkan peta probabilitas perubahan, namun memiliki keterbatasan karena cenderung mengasumsikan hubungan linear dan kurang mampu menangkap interaksi kompleks antar variabel.

Sebaliknya, pendekatan Cellular Automata–Markov Chain merupakan kombinasi antara model probabilistik (Markov Chain) dan model spasial (Cellular Automata) yang mampu mensimulasikan dinamika perubahan tutupan lahan baik secara temporal maupun spasial. Pendekatan ini memanfaatkan informasi perubahan tutupan lahan pada periode sebelumnya untuk memprediksi kondisi tutupan lahan di masa yang akan datang.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menganalisis dinamika perubahan penggunaan lahan mangrove di Desa Simandulang melalui pemanfaatan data citra satelit tahun 2020, 2022, dan 2024, serta melakukan pemodelan proyeksi spasial terhadap perubahan tutupan lahan dalam kurun waktu sepuluh tahun mendatang. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menyajikan gambaran awal mengenai potensi perubahan luasan kawasan mangrove, sekaligus menjadi dasar analitis dalam mengidentifikasi berbagai dampak yang berpotensi timbul akibat penurunan luas ekosistem mangrove.

METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian berada di Desa Simandulang, Kecamatan Kualuh Leidong, Kabupaten Labuhanbatu Utara, Provinsi Sumatera Utara. Berdasarkan posisi geografisnya, wilayah penelitian terletak pada koordinat 2,4521° LU dan 99,5627° BT. Kegiatan penelitian dilaksanakan dalam rentang waktu November 2024 sampai Maret 2025.

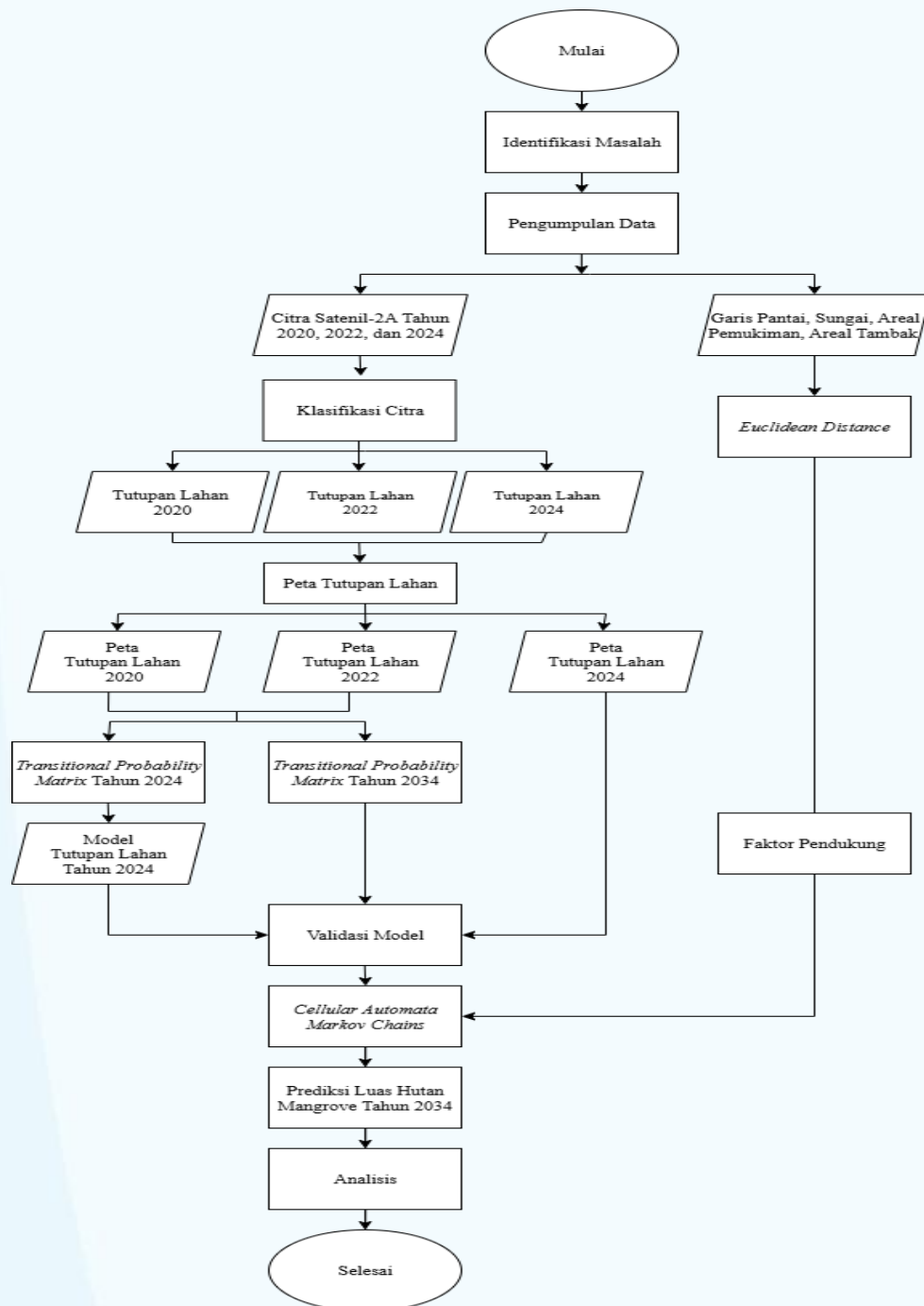
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif. Metode kuantitatif merupakan pendekatan penelitian yang berlandaskan pada paradigma positivisme yang digunakan untuk meneliti populasi atau sampel tertentu. Pemilihan sampel dilakukan secara acak, sedangkan pengumpulan data dilakukan menggunakan instrumen penelitian yang kemudian dianalisis dengan teknik statistik untuk memperoleh kesimpulan yang objektif.



Gambar 1 Lokasi penelitian Desa Simandulang, Kecamatan Kualuh Leidong, Kabupaten Labuhanbatu Utara, Provinsi Sumatera Utara.

Pesatnya perkembangan teknologi Sistem Informasi Geospasial (SIG) mendorong penggunaan berbagai metode untuk menganalisis dan mengklasifikasikan tutupan lahan. Salah satu pendekatan yang banyak dimanfaatkan ialah model Cellular Automata–Markov Chain (CA-Markov), yang dapat menggambarkan dinamika perubahan tutupan lahan melalui identifikasi pola perubahan secara bertahap dari kondisi sederhana hingga kondisi yang lebih kompleks. Selain itu, prosedur pemodelannya relatif mudah dipahami serta dapat diimplementasikan secara efektif. Dalam penelitian ini, metode CA-Markov dimanfaatkan untuk memproyeksikan perubahan tutupan lahan dengan

mempertimbangkan probabilitas transisi antar kelas penggunaan lahan berdasarkan data perubahan pada periode sebelumnya.



Gambar 2 Diagram alir penelitian.

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari berbagai instansi dan sumber resmi yang relevan, antara lain:

1. Peta Rupa Bumi Digital skala 1:25.000 tahun 2019 dari InaGeoportal BIG

2. Data citra satelit Sentinel-2 tahun 2020, 2022, dan 2024 dari Google Earth Engine Cloud (GEEC)
3. Data vektor batas administrasi desa

Pemilihan citra Sentinel-2 pada tahun 2020, 2022, dan 2024 dilakukan untuk merepresentasikan dinamika perubahan kawasan mangrove pada periode terbaru. Interval waktu dua tahun dipilih karena perubahan ekosistem mangrove di wilayah pesisir umumnya berlangsung cukup cepat akibat tekanan aktivitas manusia maupun faktor lingkungan. Dengan interval waktu yang relatif pendek, variasi perubahan yang signifikan dapat teridentifikasi dengan lebih baik. Selain itu, model CA-Markov membutuhkan data multi-temporal dengan interval waktu yang konsisten untuk menghasilkan matriks probabilitas transisi yang lebih stabil dan realistis. Pemilihan tahun genap 2020–2024 juga mempertimbangkan ketersediaan citra Sentinel-2 dengan kualitas tinggi dan tingkat tutupan awan yang rendah pada platform Google Earth Engine.

Klasifikasi tutupan lahan dilakukan melalui pengolahan data citra menggunakan platform Google Earth Engine (GEE), yaitu sistem pengolahan geospasial berbasis komputasi awan yang tersedia secara open source. Pengolahan data dilakukan melalui serangkaian tahapan analisis yang disusun secara sistematis. Tahapan tersebut mencakup penyusunan variabel driving factor yang berperan dalam perubahan tutupan lahan serta pengolahan citra Sentinel-2 untuk menghasilkan peta tutupan lahan pada tiap periode pengamatan.

a. Pengolahan Data Driving Factor

Dalam penelitian ini, driving factor dipahami sebagai variabel yang mendorong terjadinya perubahan tutupan lahan. Variabel yang dianalisis terdiri atas jarak terhadap garis pantai, sungai, kawasan permukiman, dan tambak. Analisis seluruh variabel dilakukan dengan metode Euclidean Distance untuk membentuk peta jarak yang merepresentasikan pengaruh masing-masing faktor terhadap perubahan tutupan lahan. Tahap berikutnya dilakukan evaluasi terhadap hasil analisis guna mengetahui tingkat kontribusi setiap variabel dalam memengaruhi dinamika tutupan lahan pada wilayah penelitian.

b. Klasifikasi Terbimbing

Metode klasifikasi terbimbing (supervised classification) digunakan untuk mengidentifikasi objek serta mengelompokkannya ke dalam kelas tertentu berdasarkan respons spektral yang terekam pada piksel citra satelit. Pada penelitian ini, citra Sentinel-2 tahun 2020, 2022, dan 2024 terlebih dahulu diproses melalui komposit kanal RGB 8-11-4 sehingga menghasilkan tampilan false color yang menyerupai kondisi lapangan. Tahap berikutnya dilakukan pemilihan area atau titik sampel yang mewakili tiap kelas tutupan lahan dengan mempertimbangkan kemiripan karakteristik spektral dan kondisi objek sebenarnya di lapangan.

c. Pemodelan Prediksi Tutupan Lahan

Proyeksi kondisi tutupan lahan pada masa mendatang dilakukan menggunakan model Cellular Automata–Markov (CA-Markov). Model ini menggabungkan pendekatan Cellular Automata sebagai simulasi spasial untuk menggambarkan perubahan tutupan lahan berdasarkan hubungan spasial antar piksel dan struktur sel. Untuk menjalankan simulasi, diperlukan matriks transisi yang menggambarkan peluang perubahan antar kelas tutupan lahan dari satu waktu ke waktu berikutnya. Matriks tersebut dihasilkan melalui analisis Markov Chain dengan membandingkan kondisi tutupan lahan pada tahun 2020 dan 2022. Matriks transisi yang telah dihasilkan kemudian digunakan dalam proses simulasi untuk memprediksi kondisi tutupan lahan pada tahun 2024. Hasil prediksi tersebut selanjutnya dibandingkan dengan hasil klasifikasi aktual dari citra Sentinel-2 tahun 2024 guna menilai tingkat akurasi model. Nilai akurasi yang diperoleh menjadi indikator kelayakan matriks transisi tersebut dalam memproyeksikan perubahan tutupan lahan pada periode yang lebih panjang, yaitu hingga tahun 2034 di wilayah Desa Simandulang.

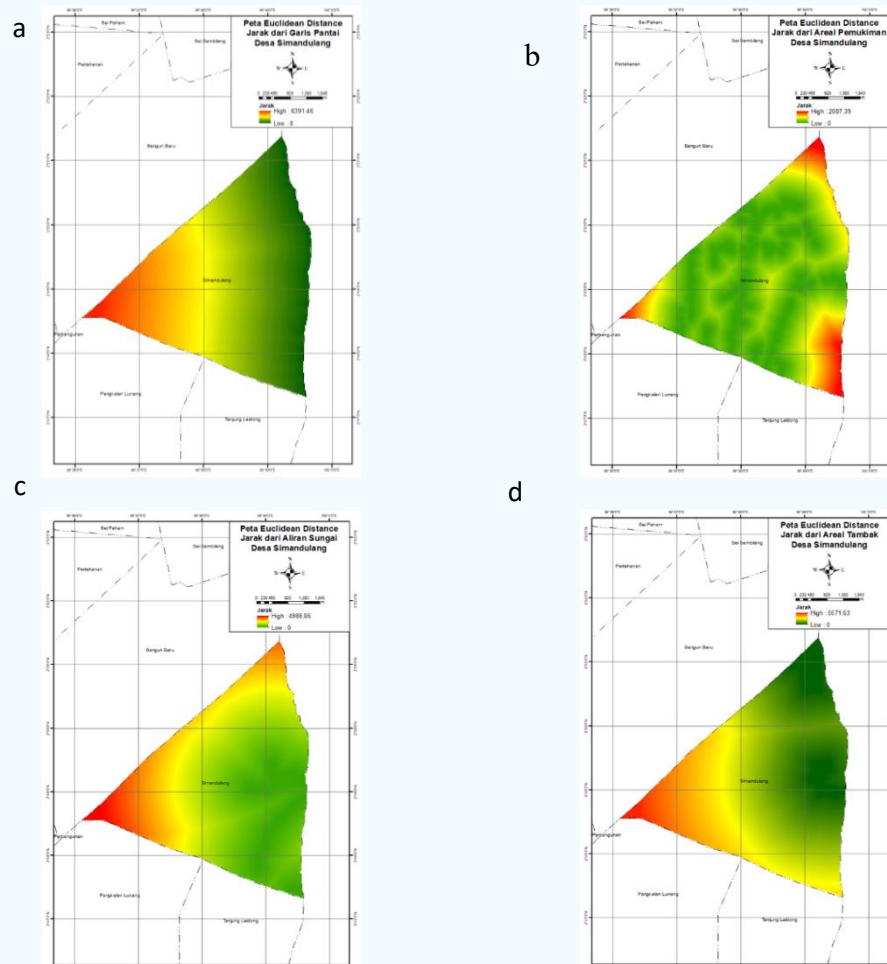
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengolahan *Driving Factor*

Faktor pendorong (*driving factors*) dalam penelitian ini berupa sejumlah variabel spasial yang diasumsikan berperan dalam memengaruhi dinamika perubahan tutupan lahan di wilayah penelitian. Setiap variabel memiliki tingkat kontribusi yang tidak sama terhadap perubahan suatu kelas tutupan lahan menjadi kelas lainnya. Pengolahan data dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG). Melalui metode Euclidean Distance, dilakukan perhitungan jarak terhadap beberapa elemen spasial, meliputi garis pantai, sungai, kawasan permukiman, dan area tambak. Hasil analisis tersebut berupa peta jarak yang kemudian dimanfaatkan sebagai variabel pendukung dalam pemodelan perubahan tutupan lahan. (Gambar 3).

Validasi terhadap faktor pendorong perubahan tutupan lahan perlu dilakukan dengan membandingkannya terhadap perubahan tutupan lahan yang aktual di lapangan. Untuk tujuan tersebut, hasil analisis Euclidean Distance pada setiap faktor diuji guna mengidentifikasi tingkat keterkaitannya dengan perubahan tutupan lahan yang terjadi. Metode yang digunakan dalam pengujian ini adalah uji Cramer's V, yaitu pendekatan kuantitatif yang digunakan untuk mengukur kekuatan asosiasi antarvariabel. Nilai Cramer's V berkisar antara 0,0 hingga 1,0; nilai yang

mendekati 0 menunjukkan hubungan yang sangat lemah atau tidak signifikan, sedangkan nilai yang mendekati 1 menandakan adanya hubungan yang sangat kuat atau korelasi sempurna.



Gambar 3 a) *Euclidean Distance* Garis Pantai; b) *Euclidean Distance* Areal Pemukiman; c) *Euclidean Distance* Aliran Sungai; d) *Euclidean Distance* Areal Tambak.

Eastman (2016) menyatakan bahwa faktor pendorong perubahan tutupan lahan yang memiliki nilai Cramer's V minimal 0,15 dapat dianggap memiliki keterkaitan terhadap perubahan tutupan lahan dan layak digunakan dalam pemodelan prediksi. Berdasarkan hasil pengujian, faktor garis pantai memperoleh nilai overall V sebesar 0,3467, yang berarti telah melampaui nilai ambang 0,15. Hasil tersebut menunjukkan bahwa jarak terhadap garis pantai memiliki pengaruh terhadap dinamika perubahan tutupan lahan sehingga dapat digunakan sebagai variabel dalam model prediksi. Pengaruh tertinggi faktor ini terjadi pada perubahan kelas perairan dengan nilai Cramer's V sebesar 0,6422. Sebaliknya, pengaruh terendah ditemukan pada perubahan kelas hutan mangrove dengan nilai 0,0000.

Rincian hasil pengujian Cramer's V untuk faktor garis pantai dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil uji Cramer's.

Tabel 1.1 Hasil Uji Cramer's V Jarak ke Garis Pantai

Tutupan Lahan	Nilai Cramer's V
<i>Overall V</i>	0,3467
Perairan	0,6422
Perkebunan Kelapa Sawit	0,6126
Lahan Terbangun	0,2945
Hutan Mangrove	0,0000

Tabel 1.2 Hasil Uji Cramer's V Jarak ke Areal Pemukiman

Tutupan Lahan	Nilai Cramer's V
<i>Overall V</i>	0,2183
Perairan	0,3914
Perkebunan Kelapa Sawit	0,3895
Lahan Terbangun	0,1662
Hutan Mangrove	0,0000

Tabel 1.3 Hasil Uji Cramer's V Jarak ke Aliran Sungai

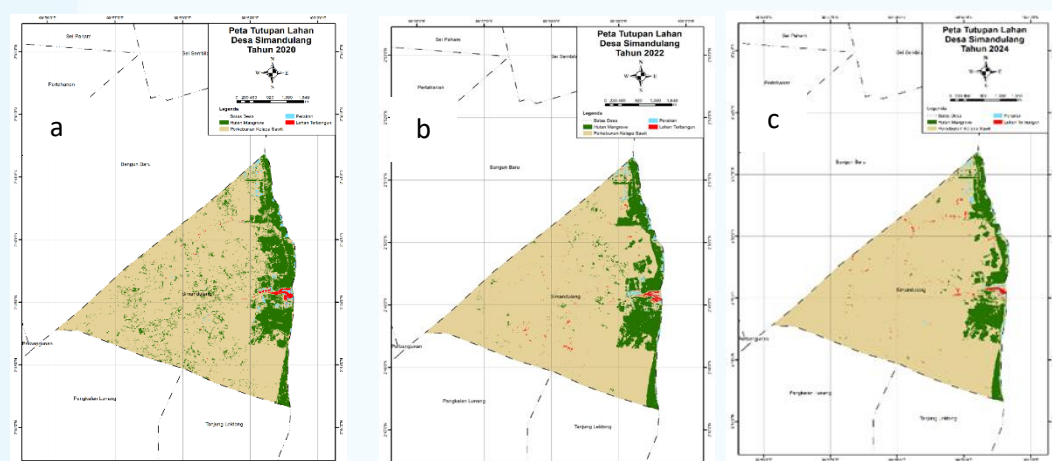
Tutupan Lahan	Nilai Cramer's V
<i>Overall V</i>	0,1949
Perairan	0,3646
Perkebunan Kelapa Sawit	0,3449
Lahan Terbangun	0,0930
Hutan Mangrove	0,0000

Tabel 1.4 Hasil Uji Cramer's V Jarak ke Areal Tambak

Tutupan Lahan	Nilai Cramer's V
<i>Overall V</i>	0,2620
Perairan	0,4900
Perkebunan Kelapa Sawit	0,4575
Lahan Terbangun	0,2089
Hutan Mangrove	0,0000

Hasil Klasifikasi Citra Satelit

Metode Random Forest digunakan dalam proses klasifikasi tutupan lahan dengan menetapkan area pelatihan berdasarkan hasil interpretasi visual citra Sentinel-2 tahun 2020, 2022, dan 2024 (Gambar 4). Penentuan jumlah area pelatihan pada setiap kelas tutupan lahan dilakukan secara menyesuaikan dengan periode pengambilan citra.



Gambar 4 a) Klasifikasi Tutupan Lahan Tahun 2020; b) Klasifikasi Tutupan Lahan Tahun 2022; c) Klasifikasi Tutupan Lahan Tahun 2024.

Hasil analisis menunjukkan bahwa tutupan hutan mangrove mengalami penurunan secara bertahap dari tahun ke tahun. Pada rentang 2020–2022, luas hutan mangrove menyusut sebesar 90,68 Ha atau 21,85%. Penurunan tersebut berlanjut hingga tahun 2024 dengan pengurangan sebesar 53,5 Ha atau 16,5%, sehingga luas mangrove yang tersisa pada tahun 2024 mencapai 270,83 Ha. Data perbandingan luas tutupan lahan pada setiap periode pengamatan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Luas Tutupan Lahan Tahun 2020-2024

Tutupan Lahan	Luas (Ha)		
	2020	2022	2024
Hutan Mangrove	415,01	324,33	270,83
Perkebunan Kelapa Sawit	2018,86	2108,50	2162,35
Perairan	20,79	21,39	19,45
Lahan Terbangun	12,46	12,91	14,49
Total	2467.12	2467.12	2467.12

Data pada Tabel 2 menunjukkan adanya peningkatan luas pada tutupan lahan perkebunan kelapa sawit selama periode pengamatan. Pada tahun 2020–2022, luas perkebunan kelapa sawit meningkat sebesar 89,63 Ha atau 4,44%, kemudian kembali bertambah sebesar 53,85 Ha atau 2,55% pada periode 2022–2024.

Berbeda dengan perkebunan kelapa sawit, tutupan lahan perairan mengalami perubahan yang bersifat fluktuatif. Pada periode 2020–2022 terjadi peningkatan luas sebesar 0,60 Ha atau 2,88%, namun pada periode berikutnya, yaitu 2022–2024, luas perairan justru menurun sebesar 1,93 Ha atau 9,04%. Perubahan tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh dinamika pasang surut air laut yang dapat memengaruhi hasil interpretasi dan klasifikasi tutupan lahan.

Selain itu, lahan terbangun memperlihatkan tren peningkatan selama masa penelitian. Luas lahan terbangun bertambah sebesar 0,45 Ha atau 3,6% pada periode 2020–2022 dan meningkat lebih besar pada periode 2022–2024, yakni sebesar 1,58 Ha atau 12,28%.

3.3 Ground Check

Untuk menilai sejauh mana keakuratan data hasil pengolahan dapat diterima, dilakukan pengujian akurasi terhadap hasil klasifikasi tutupan lahan mangrove. Pengujian ini mencakup verifikasi antara hasil interpretasi citra satelit yang telah diklasifikasikan ke dalam kelas tutupan lahan dengan data kondisi aktual di lapangan. Tahapan validasi dilakukan melalui survei lapangan pada kawasan mangrove untuk memastikan bahwa titik-titik sampel hasil klasifikasi merepresentasikan kondisi tutupan lahan yang sebenarnya. Dalam proses ini, sebanyak 20 titik sampel dikumpulkan yang mewakili seluruh kelas tutupan lahan.

Jumlah titik sampel pada setiap kelas tidak sama, melainkan disesuaikan dengan sebaran dan luas masing-masing kelas tutupan lahan, terutama pada kelas mangrove yang menjadi fokus penelitian.

Tabel 3. Hasil *Ground Check* Klasifikasi Tutupan Lahan Terhadap Data Lapangan Sebenarnya

No.	Koordinat		Hasil Klasifikasi			Data Lapangan
	X (m)	Y (m)	Tahun 2020	Tahun 2022	Tahun 2024	Tahun 2024
1	610386.5197	312824.3328	Hutan	Hutan	Hutan	Hutan
			Mangrove	Mangrove	Mangrove	Mangrove
2	610375.4848	312693.509	Hutan	Hutan	Hutan	Hutan
			Mangrove	Mangrove	Mangrove	Mangrove
3	610435.4729	312563.6592	Hutan	Perkebunan	Hutan	Hutan
			Mangrove	Kelapa Sawit	Mangrove	Mangrove
4	610385.2337	312325.108	Hutan	Hutan	Hutan	Hutan
			Mangrove	Mangrove	Mangrove	Mangrove
5	610370.2916	312126.2997	Hutan	Hutan	Hutan	Hutan
			Mangrove	Mangrove	Mangrove	Mangrove

Tutupan lahan yang ditampilkan dengan warna hijau menunjukkan kesesuaian dengan kondisi aktual di lapangan, sedangkan tutupan lahan berwarna merah menunjukkan ketidaksesuaian. Ketidaksesuaian antara data hasil klasifikasi dengan data lapangan dapat terjadi karena citra satelit Sentinel-2 yang secara resolusi spasial termasuk ke dalam golongan menengah sehingga berpeluang untuk mendapatkan hasil yang tidak sesuai.

3.4 Pemodelan Tutupan Lahan 2024

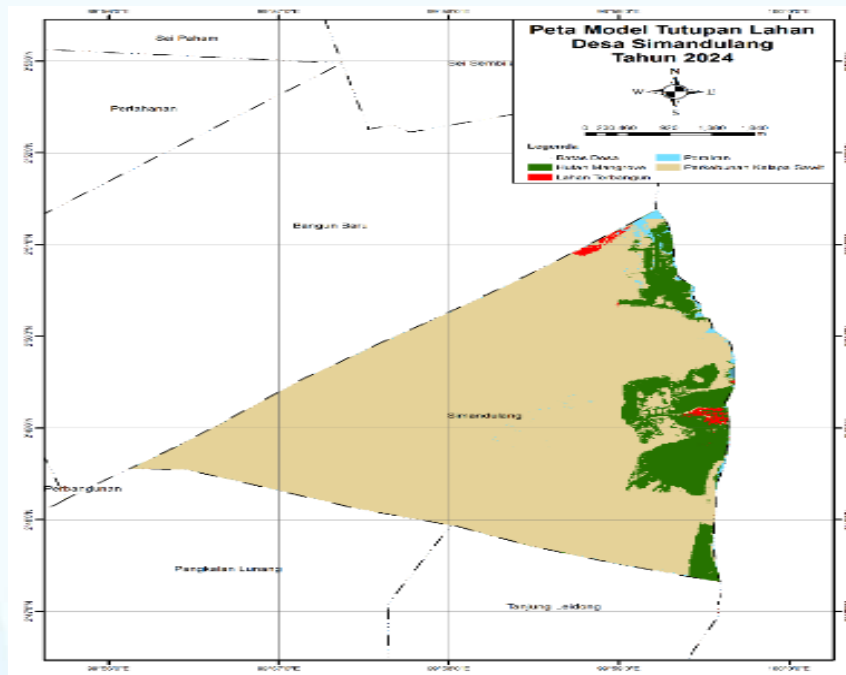
Berdasarkan hasil analisis Markov Chain periode 2020–2022, kelas hutan mangrove diproyeksikan memiliki potensi perubahan menuju beberapa jenis tutupan lahan lain, yakni perkebunan kelapa sawit, perairan, dan lahan terbangun. Matriks probabilitas transisi menunjukkan bahwa peluang perubahan terbesar terjadi pada konversi hutan mangrove menjadi perkebunan kelapa sawit dengan probabilitas 0,3946. Di sisi lain, peluang perubahan menuju kelas perairan dan lahan terbangun cenderung rendah, masing-masing hanya sebesar 0,0045 dan 0,0006.

Tabel 4. Matriks Probabilitas Prediksi Tahun 2024

Tutupan Lahan	Hutan Mangrove	Perkebunan Kelapa Sawit	Perairan	Lahan Terbangun
Perkebunan Kelapa Sawit	0.0372	0.9569	0.0037	0.0031

Tutupan Lahan	Hutan Mangrove	Perkebunan Kelapa Sawit	Perairan	Lahan Terbangun
Hutan Mangrove	0.6004	0.3948	0.0047	0.0008
Lahan Terbangun	0.0000	0.4194	0.1234	0.4578
Perairan	0.0304	0.3909	0.5266	0.0529

Dalam matriks probabilitas transisi, baris merepresentasikan kelas tutupan lahan pada kondisi awal, sementara kolom menunjukkan kelas tutupan lahan hasil perubahan. Tabel 2 menyajikan Transition Probability Matrix (TPM) yang dihasilkan dari simulasi pemodelan tahun 2024. Nilai probabilitas yang semakin mendekati angka 1 mengindikasikan peluang perubahan tutupan lahan yang semakin besar, sedangkan nilai yang mendekati 0 menunjukkan bahwa kemungkinan terjadinya perubahan relatif rendah.



Gambar 5 Pemodelan tutupan lahan 2024 Desa Simandulang, Kecamatan Kualuh Leidong, Kabupaten Labuhanbatu Utara, Provinsi Sumatera Utara.

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa luas prediksi pada kelas hutan mangrove dan perairan cenderung lebih besar dibandingkan data aktual. Pada kelas hutan mangrove, perbedaan antara hasil simulasi dan kondisi aktual mencapai 2,53 Ha atau 0,93%, sedangkan pada kelas perairan selisihnya tercatat sebesar 2,23 Ha atau 11,48%. Sebaliknya, pada kelas perkebunan kelapa sawit dan lahan terbangun, luas hasil prediksi berada di bawah kondisi aktual. Selisih pada perkebunan kelapa

sawit sebesar 3,62 Ha atau 0,17%, sementara pada lahan terbangun mencapai 1,15 Ha atau sekitar 7,91%.

Pemodelan Tutupan Lahan Mangrove Tahun 2034

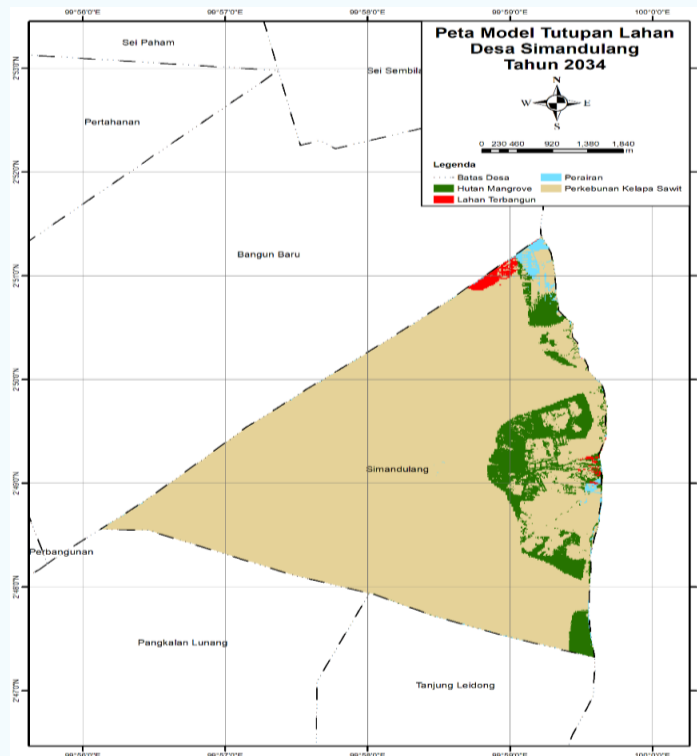
Tahapan lanjutan pemodelan dilakukan untuk menyusun proyeksi tutupan lahan tahun 2034 dengan memanfaatkan variabel driving factor yang sama seperti pada simulasi tahun 2024. Meskipun tidak terdapat perubahan pada variabel yang digunakan, nilai Transition Probability Matrix (TPM) yang dihasilkan pada proyeksi tahun 2034 menunjukkan perbedaan dibandingkan model sebelumnya. Kondisi tersebut mencerminkan adanya perubahan pola spasial dan dinamika temporal yang menjadi pertimbangan dalam simulasi prediksi jangka panjang. Nilai TPM secara rinci disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Matriks Probabilitas Pemodelan Tahun 2034

Tutupan Lahan	Hutan Mangrove	Perkebunan Kelapa Sawit	Perairan	Lahan Terbangun
Hutan Mangrove	0.1134	0.8728	0.0086	0.0052
Perkebunan Kelapa Sawit	0.0814	0.9044	0.0086	0.0057
Perairan	0.0774	0.8730	0.0348	0.0149
Lahan Terbangun	0.0721	0.8779	0.0306	0.0194

Berdasarkan hasil Transition Probability Matrix (TPM), kelas hutan mangrove diproyeksikan memiliki kecenderungan tinggi untuk mengalami konversi menjadi perkebunan kelapa sawit dengan probabilitas sebesar 0,8728. Di sisi lain, probabilitas yang bernilai mendekati 0 menunjukkan bahwa peluang terjadinya perubahan antar kelas tutupan lahan relatif sangat kecil. Visualisasi hasil pemodelan prediksi tutupan lahan Desa Simandulang tahun 2034 disajikan pada Gambar 6.

Berdasarkan hasil pemodelan dengan pendekatan *Cellular Automata–Markov Chain*, kondisi tutupan lahan Desa Simandulang pada tahun 2034 diproyeksikan mengalami komposisi luas yang berbeda pada setiap kelas tutupan lahan. Luas hutan mangrove diperkirakan mencapai 210,06 Ha, sedangkan perkebunan kelapa sawit diproyeksikan seluas 2.219,79 Ha. Adapun luas kelas perairan dan lahan terbangun masing-masing diperkirakan sebesar 22,06 Ha dan 15,2 Ha. Informasi rinci mengenai total luas tiap kelas tutupan lahan dapat dilihat pada Tabel 7.



Gambar 6 Pemodelan tutupan lahan tahun 2034 Desa Simandulang, Kecamatan Kualuh Leidong, Kabupaten Labuhanbatu Utara, Provinsi Sumatera Utara.

Tabel 7. Total luas tiap kelas tutupan lahan

Tutupan Lahan	Luas (Ha)			
	Tahun 2020	Tahun 2022	Tahun 2024	Tahun 2034
Hutan Mangrove	415,01	324,33	270,83	210,06
Perkebunan Kelapa Sawit	2018,86	2108,5	2162,35	2219,79
Perairan	20,79	21,39	19,45	22,06
Lahan Terbangun	12,46	12,91	14,49	15,2
Total	2467.12	2467.12	2467.12	2467.12

Tabel 7 memperlihatkan dinamika tutupan lahan di Desa Simandulang antara tahun 2020 hingga 2024, serta prediksi tahun 2034. Hutan mangrove mengalami penurunan luas secara bertahap: 415,01 Ha (2020), 324,33 Ha (2022), 270,83 Ha (2024), hingga diproyeksikan 210,06 Ha (2034). Sebaliknya, luas perkebunan kelapa sawit meningkat dari 2.018,86 Ha (2020), 2.108,5 Ha (2022), 2.162,35 Ha (2024), hingga 2.219,79 Ha (2034).

Dalam upaya meminimalkan penurunan tutupan lahan mangrove di Desa Simandulang ke depannya, beberapa rekomendasi dapat diajukan. Pertama, perlu adanya penguatan kebijakan dan penegakan hukum terkait perlindungan kawasan

mangrove, termasuk pembatasan konversi lahan mangrove menjadi tambak atau penggunaan lain. Kedua, program rehabilitasi dan restorasi mangrove harus ditingkatkan dengan melibatkan partisipasi aktif masyarakat lokal, terutama di area yang telah mengalami degradasi (Bufedo & Elias, 2021). Ketiga, pengembangan alternatif mata pencaharian berkelanjutan bagi masyarakat pesisir, seperti ekowisata mangrove atau budidaya perikanan ramah lingkungan, dapat mengurangi tekanan terhadap ekosistem mangrove (Arebo & Inayah, 2023). Terakhir, peningkatan kesadaran dan edukasi masyarakat tentang pentingnya menjaga kelestarian mangrove perlu terus dilakukan untuk membangun dukungan jangka panjang dalam upaya konservasi.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini antara lain:

1. Terjadi penurunan luas tutupan lahan mangrove di Desa Simandulang pada periode 2020–2024, yang sebagian besar disebabkan oleh konversi lahan menjadi perkebunan kelapa sawit dan kawasan terbangun. Pada periode yang sama, luas perkebunan kelapa sawit mengalami peningkatan sebesar 143,48 Ha (7,11%), sementara lahan terbangun bertambah sekitar 2,03 Ha (16,32%).
2. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa hutan mangrove akan mengalami penurunan luas sebesar 204,94 Ha pada tahun 2034, terutama akibat konversi menjadi perkebunan kelapa sawit. Peningkatan area perairan dan lahan terbangun turut berperan dalam menurunkan luas hutan mangrove
3. Implementasi rekomendasi-rekomendasi diharapkan dapat membantu menjaga keseimbangan antara pemanfaatan dan pelestarian ekosistem mangrove di Desa Simandulang. Selain itu, penggunaan *CA-Markov* dalam penelitian ini menunjukkan efektivitas teknik pemodelan dalam memprediksi perubahan tutupan lahan. Validasi yang tinggi menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat memberikan proyeksi yang dapat diandalkan untuk perencanaan tata guna lahan dan strategi konservasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmadi, P.N., M. Dimiyati, M.D.M. Manesa, and H. Rakuasa. 2023. Model Perubahan Tutupan Lahan Berbasis Ca-Markov: Studi Kasus Kecamatan Ternate Utara, Kota Ternate. *J. Tanah dan Sumberd. Lahan* 10(2): 451–460. doi: 10.21776/ub.jtsl.2023.010.2.28.

- Aldiansyah, S. 2024. Geomedia Majalah Ilmiah dan Informasi Kegeografian Kajian dan prediksi perubahan tutupan lahan menggunakan Cellular Automata-Markov Chain di Kota Unaaha. 22(1): 1–13. <https://journal.uny.ac.id/index.php/geomedia/index>.
- Andakke, J.N., and A. Tarya. 2022. Variations of Marine Debris In Manado Bay and its environs. J. Ilm. PLATAX 10(2): 224. doi: 10.35800/jip.v10i2.40841.
- Darmawan, S., A. Claudia, and A. Tridawati. 2022. Prediksi Perubahan Kawasan Hutan Mangrove Menggunakan Model Cellular Automata Markov pada Citra Penginderaan Jauh Landsat (Studi Kasus: Kawasan Resort Bama, Taman Nasional Baluran, Kabupaten Situbondo, Jawa Timur). J. Rekayasa Hijau 6(1): 57–72. doi: 10.26760/jrh.v6i1.57-72.
- Fadhli, M., R. Rifardi, and S. Tarumun. 2019. Pemodelan Perubahan Penggunaan Lahan Di Kabupaten Kampar. J. Ilmu Lingkung. 13(2): 162. doi: 10.31258/jil.13.2.p.162-178.
- Febianti, V., B. Sasmito, and N. Bashit. 2022. Pemodelan Perubahan Tutupan Lahan Berbasis Penginderaan Jauh. J. Geod. Undip 11(3): 1–10.
- Fitriyanto, B.R., M. Helmi, and H. -. 2019. Model Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan Dengan Pendekatan Sistem Informasi Geografis Dan Cellular Automata Markov Chain: Studi Kasus Kabupaten Rokan Hulu, Provinsi Riau. J. Teknol. Technoscientia 11(2): 137–147. doi: 10.34151/technoscientia.v11i2.923.
- Kaswanto, R.L., R.M. Aurora, D. Yusri, and S. Sjaf. 2021. Analisis Faktor Pendorong Perubahan Tutupan Lahan selama Satu Dekade di Kabupaten Labuhanbatu Utara. J. Ilmu Lingkung. 19(1): 107–116. doi: 10.14710/jil.19.1.107-116.
- Lukman, R.N., and S. Darmawan. 2023. Prediksi Perubahan Lahan Hutan Mangrove dengan Metode Artificial Neural Network (ANN) Berbasis Citra Satelit Landsat (Studi Kasus: Teluk Ambon, Kota Ambon, Maluku). FTSP Ser.: 1279–1286. <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/ftsp/article/view/2540%0Ahttps://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/ftsp/article/download/2540/1931>.
- Permata, I., and S. Rahayu. 2021. Estimasi Cadangan Karbon Akibat Perubahan Tutupan Lahan di Kabupaten Kendal. Tek. PWK (Perencanaan Wil. Kota) 10(3): 220–230. doi: 10.14710/tpwk.2021.31879.
- Putri, E.S., A. Widiyari, R.A. Karim, L. Somantri, and R. Ridwana. 2021. Pemanfaatan Citra Sentinel-2 Untuk Analisis Kerapatan Vegetasi di Wilayah Gunung Manglayang. J. Jur. Pendidik. Geogr. 9(2): 133–143.
- Rakuasa, H., M. Salakory, and P.C. Latue. 2022. Analisis Dan Prediksi Perubahan

- Tutupan Lahan Menggunakan Model Selular Automata-Markov Chain Di Das Wae Ruhu Kota Ambon. J. Tanah dan Sumberd. Lahan 9(2): 285–295. doi: 10.21776/ub.jtsl.2022.009.2.9.
- Ramdhan, A., O.N. Lense, and R. Purnawati. 2025. The land cover change modeling based Artificial Neural Network (ANN) of mangroves in Teluk Bintuni Regency. *Agricola* 15(1): 11–20. doi: 10.35724/ag.v15i1.6572.
- Rohman, M.S., A. Afrinaldi, A. Syauqani, and M. Safira. 2025. Prediksi Perubahan Tutupan Lahan di Kabupaten Bogor Tahun 2026 Menggunakan Random Forest dengan Citra Satelit Sentinel-2 Terklasifikasi. *Tunas Agrar*. 8(2): 192–218. doi: 10.31292/jta.v8i2.413.
- Sugandhi, N., S. Supriatna, E. Kusratmoko, and H. Rakuasa. 2022. Prediksi Perubahan Tutupan Lahan di Kecamatan Sirimau, Kota Ambon Menggunakan Celular Automata- Markov Chain. *JPG (Jurnal Pendidik. Geogr.* 9(2): 104–118. doi: 10.20527/jpg.v9i2.13880.
- Supriatna, J. Supriatna, R.H. Koestoer, and N.D. Takarina. 2016. Spatial Dynamics Model for Sustainability Landscape in Cimandiri Estuary, West Java, Indonesia. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 227(November 2015): 19–30. doi: 10.1016/j.sbspro.2016.06.038.