

## **Model Spasial Deforestasi dalam Rantai Pasok Komoditas Kelapa Sawit di Kawasan Ekosistem Leuser**

### *Spatial Model of Deforestation in the Palm Oil Commodity Supply Chain in the Leuser Ecosystem Area*

Ihwan Rafina<sup>1\*</sup>, Lilik Budi Prasetyo<sup>2</sup>, & Herry Purnomo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sekolah Pascasarjana IPB University, Jalan Raya Darmaga, Gedung Sekolah Pascasarjana IPB, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Jawa Barat, Indonesia; <sup>2</sup>Program Studi Konservasi Sumberdaya Hutan dan Ekowisata, Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan dan Ekowisata, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB University, Jalan Ulin Lingkar Akademik Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Jawa Barat Indonesia; <sup>3</sup>Program Studi Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan IPB, Jalan Lingkar Akademik Kampus IPB Dramaga, Bogor, 16680, Indonesia. \*Penulis korespondensi. *e-mail*: [ihwanrafina@apps.ipb.ac.id](mailto:ihwanrafina@apps.ipb.ac.id)  
(Diterima: 4 Februari 2025; Perbaikan: 7 Mei 2026; Disetujui: 8 Mei 2026)

### **ABSTRACT**

*The Leuser Ecosystem Area (Kawasan Ekosistem Leuser, KEL), covering more than 2.6 million hectares in Aceh and North Sumatra, Indonesia, is a globally important biodiversity landscape and carbon reserve. It provides habitat for critically endangered Sumatran elephants, orangutans, rhinoceroses, and tigers, while also supporting essential ecosystem services for surrounding communities. However, continued land-use change, particularly oil palm expansion, has increased pressure on forest cover and landscape integrity. This study integrates remote sensing, Cellular Automata-based spatial modeling, and palm oil supply chain analysis to assess historical land-cover change, future oil palm expansion, and deforestation risk in the KEL. Land-cover classification was conducted for 2016, 2020, and 2024 using multi-source satellite imagery, followed by spatial modeling to project land-cover change until 2032. The results show that oil palm plantations increased from 34,956.25 ha in 2016 to 117,112.50 ha in 2024, with projections indicating further expansion to 176,387.50 ha by 2032. The observed expansion between 2016 and 2024 was partly associated with the conversion of forest areas and shrub/agricultural lands. The model incorporated spatial drivers such as proximity to palm oil mills, road networks, settlements, existing oil palm areas, and mill processing capacity. The projected expansion indicates that future deforestation risk is likely to concentrate in areas with strong accessibility and supply chain connectivity. The novelty of this study lies in linking spatial deforestation modeling with palm oil supply chain analysis, allowing deforestation risk to be assessed not only as land-cover change, but also in relation to plantation, mill, and refinery nodes relevant to deforestation-free supply chain commitments. The findings provide a spatially explicit framework to support conservation planning, supply chain traceability, and risk-based mitigation in the Leuser Ecosystem.*

*Keywords: Cellular-Automata, Deforestation, Leuser Ecosystem, Oil Palm*

### **ABSTRAK**

Kawasan Ekosistem Leuser (KEL), yang mencakup lebih dari 2.6 juta hektare di Aceh dan Sumatra Utara, Indonesia, merupakan salah satu lanskap biodiversitas terpenting di dunia sekaligus kawasan penting bagi penyimpanan karbon dan penyediaan jasa ekosistem. KEL menjadi habitat bagi spesies kunci Sumatra yang terancam, seperti gajah, orangutan, badak, dan harimau Sumatra.

Namun, perubahan penggunaan lahan, terutama ekspansi perkebunan kelapa sawit, terus meningkatkan tekanan terhadap tutupan hutan dan integritas ekosistem. Penelitian ini mengintegrasikan penginderaan jauh, pemodelan spasial berbasis Cellular Automata, dan analisis rantai pasok kelapa sawit untuk menganalisis perubahan tutupan lahan, memprediksi potensi ekspansi kelapa sawit, serta mengidentifikasi risiko deforestasi dalam rantai pasok di KEL. Klasifikasi tutupan lahan dilakukan untuk tahun 2016, 2020, dan 2024 menggunakan citra satelit multisumber, kemudian digunakan sebagai dasar pemodelan perubahan tutupan lahan hingga tahun 2032. Hasil penelitian menunjukkan bahwa luas perkebunan kelapa sawit meningkat dari 34,956.25 hektare pada 2016 menjadi 117,112.50 hektare pada 2024, dan diproyeksikan bertambah menjadi 176,387.50 hektare pada 2032. Sebagian ekspansi tersebut berkaitan dengan konversi tutupan hutan dan semak/pertanian. Model Cellular Automata menunjukkan bahwa potensi ekspansi kelapa sawit dipengaruhi oleh kedekatan terhadap pabrik kelapa sawit, jaringan jalan, permukiman, areal sawit eksisting, dan kapasitas pengolahan tandan buah segar. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi antara pemodelan spasial deforestasi dan analisis rantai pasok kelapa sawit, sehingga risiko deforestasi tidak hanya dipahami sebagai perubahan tutupan lahan, tetapi juga dikaitkan dengan simpul produksi dan pengolahan, termasuk kebun, pabrik kelapa sawit, dan refinery. Temuan ini menyediakan kerangka spasial untuk mendukung perencanaan konservasi, penguatan keterlacakan rantai pasok, pemantauan deforestasi, serta mitigasi risiko berbasis lokasi di Kawasan Ekosistem Leuser.

Kata kunci: Cellular-Automata, Deforestasi, Kawasan Ekosistem Leuser, Kelapa Sawit

## PENDAHULUAN

Kawasan Ekosistem Leuser (KEL) adalah salah satu lanskap penting dunia yang berperan dalam konservasi keanekaragaman hayati, seperti orangutan Sumatera, gajah, harimau, dan badak. Kawasan ini juga mendukung jasa ekosistem, termasuk penyerapan karbon dan penyediaan air (Condro *et al.*, 2021). Ditunjuk sebagai Kawasan Strategis Nasional melalui Peraturan Pemerintah Nomor 26 Tahun 2008, KEL menjadi fokus kepentingan nasional untuk alasan ekonomi dan lingkungan. Namun, KEL terus terancam oleh aktivitas manusia seperti pembangunan infrastruktur, *illegal logging*, dan perluasan pertanian, yang mendorong deforestasi secara signifikan (Curtis *et al.*, 2018; Gaveau *et al.*, 2009).

Oleh karena itu, analisis spasial perubahan lahan di KEL perlu dikaitkan dengan kondisi in-situ, khususnya relasi antara ekspansi komoditas, masyarakat sekitar kawasan, dan efektivitas pengelolaan kawasan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada 2021 KEL kehilangan 4,472 hektar hutan, dengan konversi lahan untuk perkebunan kelapa sawit menjadi penyebab utama (Gaveau *et al.*,

2016; Pearson *et al.*, 2017). Pemerintah Indonesia merespons melalui kebijakan moratorium izin ekspansi kelapa sawit berdasarkan Inpres Nomor 8 Tahun 2018. Selain itu, pemerintah juga menerapkan moratorium pemberian izin baru pada hutan primer dan lahan gambut sejak 2011, yang kemudian diperpanjang secara permanen. (Purnomo *et al.*, 2017) yang melarang pemberian konsesi baru di lahan gambut dan hutan primer. Moratorium ini, yang awalnya bersifat sementara, diperpanjang tanpa batas waktu pada tahun 2021. Sejalan dengan komitmen global seperti Deklarasi Hutan New York. Sektor swasta juga berpartisipasi melalui kebijakan *No Deforestation, No Peat, No Exploitation* (NDPE), yang pada 2020 diadopsi oleh lebih dari 83% pedagang minyak kelapa sawit global (Chain Reaction Research, 2020). Namun, deforestasi akibat perubahan penggunaan lahan untuk komoditas, termasuk kelapa sawit, masih terjadi meskipun dalam skala lebih kecil (Curtis *et al.*, 2018).

Penelitian mengenai deforestasi di Kawasan Ekosistem Leuser umumnya telah menyoroti perubahan tutupan hutan, tekanan ekspansi pertanian, pentingnya kawasan bagi

konservasi biodiversitas, serta tantangan tata kelola kawasan. Studi berbasis penginderaan jauh juga telah digunakan untuk memetakan perubahan tutupan hutan dan ekspansi kelapa sawit pada berbagai periode pengamatan. Namun, sebagian besar kajian tersebut masih berfokus pada deteksi perubahan tutupan lahan atau evaluasi kondisi ekologis kawasan, sementara hubungan antara perubahan tutupan lahan, proyeksi risiko deforestasi, dan struktur rantai pasok kelapa sawit belum banyak dianalisis secara terintegrasi dalam satu kerangka spasial.

### **Kesenjangan Penelitian dan Kebaruan**

Kesenjangan utama yang hendak dijawab dalam penelitian ini adalah belum tersedianya analisis yang secara eksplisit menghubungkan dinamika deforestasi historis, proyeksi ekspansi kelapa sawit, faktor pendorong spasial, dan keterlacakan rantai pasok dari kebun, pabrik kelapa sawit, hingga fasilitas pengolahan lanjutan di sekitar Kawasan Ekosistem Leuser. Padahal, dalam konteks komitmen bebas deforestasi dan regulasi pasar yang semakin ketat, risiko deforestasi tidak cukup hanya dipetakan sebagai perubahan tutupan lahan, tetapi perlu dikaitkan dengan aktor, lokasi pengolahan, dan simpul rantai pasok yang berpotensi menerima bahan baku dari area berisiko.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi antara klasifikasi tutupan lahan multitemporal, pemodelan spasial berbasis Cellular Automata, analisis faktor pendorong konversi hutan menjadi sawit, dan penelusuran rantai pasok kelapa sawit dalam satu kerangka analisis risiko deforestasi. Dengan demikian, kontribusi penelitian ini bukan hanya menghasilkan peta perubahan tutupan lahan dan proyeksi ekspansi sawit, tetapi juga memberikan pendekatan untuk mengidentifikasi area dan simpul rantai pasok yang perlu diprioritaskan dalam pemantauan, keterlacakan, dan mitigasi risiko deforestasi di Kawasan Ekosistem Leuser.

Secara spesifik, kebaruan penelitian ini mencakup tiga aspek. Pertama, penelitian ini

mengintegrasikan analisis perubahan tutupan lahan historis dengan model prediktif ekspansi sawit di KEL. Kedua, penelitian ini menghubungkan hasil model deforestasi dengan faktor rantai pasok, khususnya keberadaan PKS, refinery, dan pola keterlacakan bahan baku. Ketiga, penelitian ini menawarkan pendekatan spasial untuk memprioritaskan area dan aktor rantai pasok yang berisiko terhadap deforestasi, sehingga hasilnya dapat digunakan tidak hanya untuk perencanaan konservasi, tetapi juga untuk penguatan komitmen bebas deforestasi dalam rantai pasok kelapa sawit

Berdasarkan kesenjangan tersebut, tujuan utama penelitian ini adalah membangun model spasial risiko deforestasi yang dapat menghubungkan dinamika perubahan tutupan lahan dan ekspansi kelapa sawit dengan rantai pasok kelapa sawit di Kawasan Ekosistem Leuser. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk:

1. mengklasifikasikan dan menganalisis perubahan tutupan lahan KEL pada periode 2016, 2020, dan 2024;
2. mengidentifikasi perubahan tutupan hutan menjadi perkebunan kelapa sawit dan menghitung laju ekspansi sawit pada periode pengamatan;
3. menganalisis faktor pendorong spasial konversi hutan menjadi sawit, termasuk jarak terhadap PKS, jalan, permukiman, area sawit eksisting, dan kapasitas PKS;
4. memodelkan proyeksi perubahan tutupan lahan dan potensi ekspansi sawit hingga tahun 2032 menggunakan pendekatan Cellular Automata; dan
5. mengaitkan hasil pemodelan risiko deforestasi dengan struktur rantai pasok kelapa sawit untuk mengidentifikasi simpul, lokasi, dan fasilitas yang memerlukan prioritas pemantauan dan mitigasi risiko.

### **METODOLOGI**

Penelitian ini dilakukan di areal Ekosistem Leuser, yang terletak di Indonesia, tepatnya di Provinsi Aceh dan Sumatera Utara. Wilayah Ekosistem Leuser mencakup beberapa

kawasan yang dilindungi, termasuk Taman Nasional Gunung Leuser dan Suaka Margasatwa Rawa Singkil. Kawasan ini juga diakui sebagai Situs Warisan Dunia UNESCO (Suhendra *et al.*, 2020). Wilayah studi ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Areal kajian Kawasan Ekosistem Leuser  
 Sumber: KLHK, BIG, ESRI

Selain berfungsi sebagai kawasan konservasi dan area perlindungan, Ekosistem Leuser juga mencakup area budidaya kehutanan dan penggunaan lahan non-kehutanan, seperti perkebunan dan pertanian, yang mencerminkan kombinasi praktik konservasi dan pemanfaatan lahan berkelanjutan. Penelitian ini dilakukan pada periode Januari hingga Desember 2024.

#### Alat, Bahan, Jenis dan Pengumpulan Data

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah aplikasi pengolahan data spasial ESRI ArcGIS Desktop, QGIS dengan tambahan plugin MOLUSCE, Aplikasi pengolahan citra berbasis cloud Google Earth Engine (GEE) dan aplikasi pengolah data Spreadsheet WPS Office. Jenis dan sumber data yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Tipe dan sumber data

Data	Sumber	Catatan
Sentinel-1 Image	European Space Agency (ESA)	Tersedia dalam GEE Platform
Landsat-8 & MODIS Image	United States Geological Survey (USGS)	Tersedia dalam GEE Platform
PlanetScope Image	Planet Labs Inc.	Online Streaming dalam platform GFW
Global Water Surface	ESA dan USGS	Tersedia dalam GEE Platform

Data	Sumber	Catatan
Batas kawasan ekosistem Leuser	Kementerian Kehutanan RI	Download
Batas administrasi pemerintahan	Badan Informasi Geospasial (BIG)	Download
Batas perkebunan kelapa sawit	Berbagai sumber dikompilasi dalam platform Global Forest Watch	Download
Lokasi pabrik kelapa sawit (PKS)	Universal Mill List dikompilasi oleh Rainforest Alliance (RA)	Download
Jalan dan Permukiman	Badan Informasi Geospasial (BIG)	Download
Ketelusuran perkebunan, PKS dan Refinery	Dokumen RSPO, ISPO, Platform Panjiva dan Trase	Download

Sumber: Analisis, 2024

### Kerangka Waktu Penelitian

Penelitian ini menggunakan kerangka data multitemporal untuk menangkap dinamika perubahan tutupan lahan dan ekspansi kelapa sawit di Kawasan Ekosistem Leuser. Tahun 2016 ditetapkan sebagai tahun dasar untuk merepresentasikan kondisi awal tutupan lahan, tahun 2020 digunakan sebagai titik antara untuk membaca dinamika perubahan sebelum periode terbaru, sedangkan tahun 2024 digunakan sebagai kondisi aktual yang menjadi dasar pemodelan spasial dan analisis rantai pasok. Pemilihan tiga titik waktu tersebut dilakukan untuk memperoleh keseimbangan antara ketersediaan citra yang representatif, konsistensi sumber data, dan kebutuhan analisis perubahan lahan dalam periode menengah.

Untuk setiap tahun rujukan, citra satelit tidak dianalisis sebagai citra tunggal, melainkan disusun dalam bentuk komposit tahunan. Komposit tahunan dibuat dari kumpulan citra dalam rentang Januari sampai Desember pada tahun yang sama, dengan mempertimbangkan

kualitas piksel, tutupan awan, bayangan awan, dan konsistensi spektral. Pendekatan ini digunakan untuk mengurangi bias akibat kondisi musiman, gangguan atmosfer, dan variasi kualitas citra pada satu tanggal perekaman tertentu. Dengan demikian, peta tutupan lahan 2016, 2020, dan 2024 merepresentasikan kondisi tahunan, bukan kondisi sesaat pada satu tanggal citra.

Analisis perubahan tutupan lahan dilakukan dengan membandingkan peta hasil klasifikasi antar periode, yaitu 2016 hingga 2020 dan 2020 hingga 2024, serta perubahan kumulatif Tahun 2016 hingga 2024. Luas perubahan dilaporkan dalam satuan hektare untuk menunjukkan total konversi antar periode. Selain itu, untuk menghindari kesalahan interpretasi akibat perbedaan panjang periode, perubahan juga dinyatakan sebagai laju tahunan rata-rata dengan membagi total perubahan pada masing-masing periode dengan jumlah tahun pengamatan. Dengan pendekatan ini, hasil analisis dapat membedakan antara perubahan total dan intensitas perubahan tahunan.

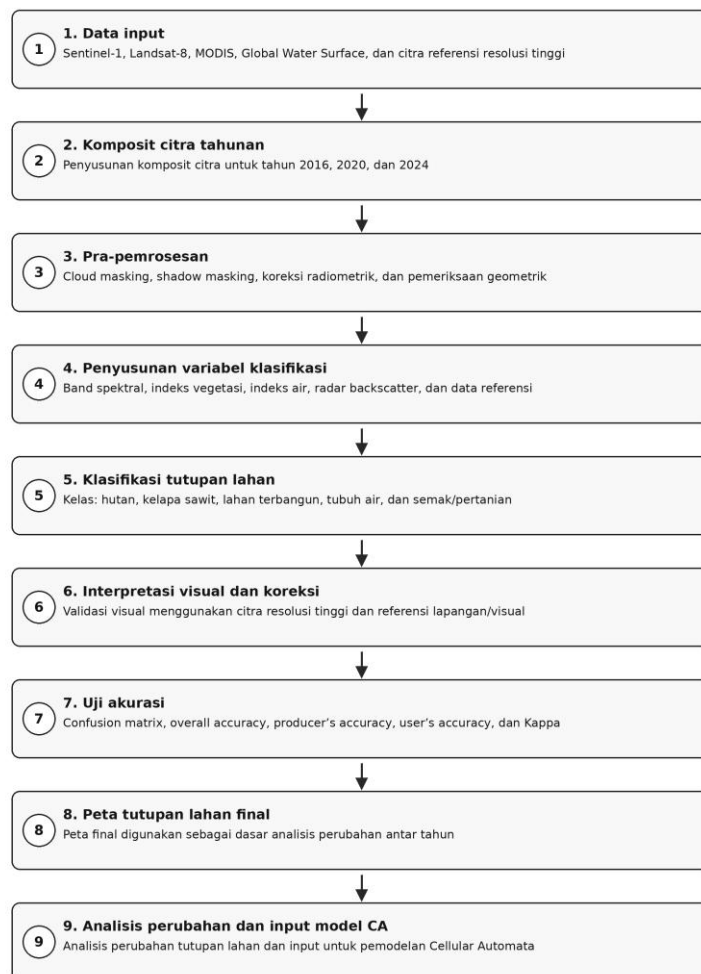
Tabel 2. Kerangka waktu dan fungsi data penelitian

Tahun Data	Fungsi dan analisis	Jenis data utama	Catatan
2016	Tahun dasar atau baseline	Komposit citra tahunan, tutupan lahan, sawit eksisting	Digunakan untuk membaca kondisi awal dan membangun matriks transisi
2020	Tahun antara	Komposit citra tahunan dan peta tutupan lahan	Digunakan untuk membaca dinamika perubahan 2016 hingga 2020
2024	Tahun aktual	Komposit citra tahunan, validasi, data PKS, rantai pasok	Digunakan sebagai kondisi terkini dan dasar analisis risiko
2028/2032	Tahun proyeksi	Hasil simulasi Cellular Automata	Digunakan untuk memprediksi arah ekspansi sawit dan risiko deforestasi

Dalam pemodelan Cellular Automata, peta tutupan lahan tahun 2016 dan 2020 digunakan sebagai data pelatihan untuk membaca pola transisi lahan, sedangkan peta tahun 2024 digunakan untuk validasi model. Setelah model menunjukkan tingkat kesesuaian yang memadai, simulasi digunakan untuk memproyeksikan perubahan tutupan lahan pada periode berikutnya. Variabel pendorong yang digunakan dalam model meliputi jarak terhadap pabrik kelapa sawit, jarak terhadap jalan, jarak terhadap permukiman, jarak terhadap area sawit eksisting, serta kapasitas pabrik TBS. Seluruh variabel tersebut dipilih karena mencerminkan tekanan aksesibilitas, kedekatan terhadap pusat pengolahan, dan kecenderungan ekspansi spasial kelapa sawit di sekitar KEL.

## 1. Klasifikasi Penggunaan Lahan berbasis SEQ

Klasifikasi tutupan/penggunaan lahan merupakan proses untuk memperoleh informasi spasial mengenai kondisi penutup lahan dan bentuk pemanfaatan lahan oleh aktivitas manusia (Samadder *et al.*, 2018). Dalam penelitian ini, klasifikasi tutupan lahan dilakukan dengan memanfaatkan data penginderaan jauh multisumber yang tersedia pada platform Google Earth Engine (GEE), meliputi Sentinel-1, Landsat 8, MODIS, Global Water Surface, serta citra referensi resolusi tinggi. Pemanfaatan data penginderaan jauh sumber terbuka dan platform komputasi awan memungkinkan proses pemetaan dilakukan secara lebih efisien, konsisten, dan hemat biaya, terutama untuk wilayah kajian yang luas dan dinamis seperti Kawasan Ekosistem Leuser (Shaharum *et al.*, 2019).



Gambar 2. Alur klasifikasi tutupan lahan berbasis SEQ.

Untuk meningkatkan kualitas hasil klasifikasi, penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Error Quantification (SEQ) sebagai kerangka pengendalian kualitas data dan kuantifikasi kesalahan. SEQ tidak diposisikan sebagai algoritma klasifikasi tunggal, melainkan sebagai prosedur sistematis yang mendampingi seluruh tahapan klasifikasi tutupan lahan, mulai dari pemilihan data, penyusunan komposit tahunan, pra-pemrosesan citra, penyusunan variabel klasifikasi, interpretasi visual, hingga uji akurasi. Pendekatan ini digunakan karena data penginderaan jauh multitemporal dan multisensor memiliki potensi perbedaan resolusi spasial, kondisi atmosfer, tutupan awan, kualitas piksel, waktu perekaman, serta karakteristik spektral antar periode.

Dalam konteks lanskap tropis seperti KEL, perbedaan tersebut dapat menimbulkan bias klasifikasi, terutama pada kelas yang memiliki kemiripan spektral, seperti hutan sekunder, semak/pertanian, dan kelapa sawit muda. Oleh karena itu, penerapan SEQ dilakukan melalui beberapa tahapan pengendalian kesalahan, yaitu pembuatan komposit citra tahunan, masking awan dan bayangan, pemeriksaan geometrik dan radiometrik, penyusunan variabel klasifikasi, pemilihan sampel referensi, interpretasi visual berbasis citra resolusi tinggi, serta pengujian akurasi menggunakan matriks kesalahan. Dengan tahapan tersebut, kesalahan yang berasal dari perbedaan sensor, gangguan atmosfer, tutupan awan, variasi waktu perekaman, dan kemiripan spektral antar kelas dapat diminimalkan sebelum peta tutupan lahan digunakan untuk analisis perubahan dan pemodelan Cellular Automata.

Alur penerapan SEQ dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 2. Gambar tersebut menunjukkan bahwa proses klasifikasi tidak hanya dilakukan melalui pemrosesan citra satelit, tetapi juga melalui tahapan validasi dan koreksi untuk memastikan hasil klasifikasi memiliki tingkat keandalan yang memadai. Uji akurasi dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi terhadap data referensi melalui

confusion matrix, overall accuracy, producer's accuracy, user's accuracy, dan nilai Kappa. Dengan demikian, kualitas peta tutupan lahan dapat dievaluasi secara kuantitatif sebelum digunakan dalam analisis perubahan lahan.

Klasifikasi tahun 2016 tidak dilakukan melalui backcasting dari peta tahun 2024, melainkan melalui klasifikasi retrospektif menggunakan komposit citra historis tahun 2016. Citra tahun 2016 diproses dengan prosedur yang sama seperti citra tahun 2020 dan 2024, yaitu melalui penyusunan komposit tahunan, koreksi kualitas piksel, klasifikasi tutupan lahan, interpretasi visual, dan uji akurasi. Penggunaan prosedur yang konsisten pada seluruh tahun pengamatan dilakukan untuk menjaga keterbandingan antar periode dan mengurangi bias akibat perbedaan metode klasifikasi.

## 2. Analisis Perubahan Penggunaan Lahan

Untuk membedakan antara perubahan kumulatif dan perubahan tahunan, laju perubahan tutupan lahan dihitung sebagai rata-rata perubahan per tahun. Perhitungan ini penting karena perubahan tutupan lahan di KEL bersifat dinamis dan dapat berbeda intensitasnya antar periode. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$LPT = \frac{L_{t2} - L_{t1}}{t_2 - t_1}$$

Keterangan: LPT adalah laju perubahan tutupan lahan tahunan rata-rata,  $L_{t2}$  adalah luas kelas tutupan lahan pada tahun akhir,  $L_{t1}$  adalah luas kelas tutupan lahan pada tahun awal, dan  $t_2-t_1$  adalah selisih tahun pengamatan. Untuk kelas hutan, nilai negatif menunjukkan kehilangan tutupan hutan, sedangkan untuk kelas kelapa sawit, nilai positif menunjukkan ekspansi

Untuk mengevaluasi perubahan tutupan lahan dari hutan menjadi perkebunan kelapa sawit dari 2016 hingga 2024, digunakan pendekatan confusion matrix dengan membandingkan nilai tutupan lahan tahun 2016 dengan tahun 2024.

### 3. Penilaian Akurasi

Penilaian akurasi klasifikasi penggunaan lahan mengikuti proses yang ketat. Titik acak awalnya dihasilkan menggunakan perangkat lunak QGIS untuk memastikan sampel representatif dari area studi. Titik-titik ini kemudian digunakan untuk pemeriksaan visual dengan membandingkan citra yang terklasifikasi dengan citra Planet dari tahun yang bersangkutan, khususnya 2016 dan tahun 2024. Sebanyak 100 titik acak dipilih untuk tujuan validasi, memungkinkan evaluasi komprehensif terhadap hasil klasifikasi. Penentuan titik ini bertujuan menangkap karakteristik spektral berbagai kelas tutupan lahan, memberikan deskripsi numerik, dan memungkinkan analisis informasi statistik terkait jenis penggunaan lahan.

Penilaian akurasi peta tutupan lahan dilakukan menggunakan matriks kesalahan (*error matrix*) atau matriks kebingungan (*confusion matrix*). Matriks kesalahan adalah tabel silang yang membandingkan kelas tutupan lahan dari peta (baris) dengan data referensi (kolom). Pendekatan ini memungkinkan evaluasi terperinci terhadap akurasi klasifikasi, mengidentifikasi potensi

kesalahan, dan memberikan wawasan tentang keandalan klasifikasi penggunaan lahan. Langkah ini sangat efektif untuk menunjukkan akurasi, karena setiap kategori dijelaskan secara jelas, termasuk kesalahan komisi dan kelalaian yang terdapat dalam klasifikasi. Akurasi keseluruhan, akurasi produsen (*producer's accuracy*), akurasi pengguna (*user's accuracy*), dan statistik Kappa umumnya dilaporkan. Istilah-istilah ini telah dijelaskan secara rinci dalam berbagai penelitian (FAO, 2016; Foody, 2002).

### 4. Pemodelan spasial penggunaan areal hutan untuk sawit

Analisis pemodelan spasial konversi areal hutan untuk sawit ini dilakukan dengan mengintegrasikan parameter kritis yang mempengaruhi ekspansi kelapa sawit, termasuk

distribusi spasial pabrik minyak sawit yang ada, jaringan jalan, perkebunan, dan Permukiman. Faktor-faktor ini dimasukkan ke dalam model berbasis Cellular Automata untuk mensimulasikan perubahan tutupan lahan di masa depan dan mengidentifikasi area berisiko tinggi untuk konversi hutan. Hasilnya memberikan trajektori spasial-temporal yang jelas tentang pengembangan kelapa sawit, menggambarkan baik penggerak maupun skala deforestasi di KEL.

Beberapa faktor yang dinilai akan mempengaruhi konversi areal non sawit (khususnya hutan) menjadi tanaman sawit di Kawasan Ekosistem Leuser diantaranya adalah jarak dan kapasitas pabrik pengolahan kelapa sawit serta jarak dengan jalan, Permukiman dan areal sawit yang sudah tertanam. Kajian Gaveau *et al.* (2021) menunjukkan bahwa jalan trans-papua di Merauke menyebabkan pembukaan lahan untuk industri perkebunan sawit.

Metode analisis yang akan digunakan dalam analisis faktor dominan ini adalah dengan model regresi logistik biner dengan variabel bebas menggunakan informasi diatas, berikut teknis analisis variabel bebas yang mempengaruhi konversi hutan menjadi sawit

Tabel 3. Variabel bebas faktor dominan

Variabel	Analisis	Satuan
Kapasitas pabrik TBS	<i>Grid map</i>	Ton/Jam
Jarak dengan pabrik TBS	<i>Euclidean distance</i>	Km
Jarak dengan jalan	<i>Euclidean distance</i>	Km
Jarak dengan Permukiman	<i>Euclidean distance</i>	Km
Jarak dengan areal sawit eksisting	<i>Euclidean distance</i>	Km

Sumber: Analisis, 2024

Metode analisis pemodelan perubahan tutupan lahan periode 2024 hingga 2032 dengan pendekatan Model Algorithm Cellular Automata menggunakan aplikasi pemodelan MOLUSCE (*Modules for Land Use Change Simulations*) merupakan salah satu plugin pemodelan penggunaan lahan yang

menggunakan data raster multitemporal (NextGIS, 2024).

Model ini menggunakan peta tutupan lahan multitemporal sebagai input untuk membangun matriks transisi dan memproyeksikan perubahan tutupan lahan pada periode berikutnya. Transition potential dihitung menggunakan variabel pendorong spasial yang diasumsikan memengaruhi ekspansi kelapa sawit. Selanjutnya, aturan ketetangaan Cellular Automata digunakan untuk memperhitungkan pengaruh kelas tutupan lahan di sekitar suatu sel terhadap peluang perubahan sel tersebut.

Sebelum digunakan dalam regresi logistik biner, seluruh variabel pendorong diuji untuk memastikan tidak terjadi multikolinearitas yang kuat antar variabel. Uji multikolinearitas dilakukan menggunakan nilai Variance Inflation Factor (VIF) dan matriks korelasi Pearson/Spearman. Variabel dengan nilai VIF lebih dari 10 atau korelasi sangat tinggi, misalnya  $r > 0,80$ , dievaluasi kembali untuk dihapus atau digabungkan agar tidak menyebabkan bias dalam estimasi pengaruh variabel terhadap konversi hutan menjadi kelapa sawit.

Validasi model Cellular Automata dilakukan melalui pendekatan multi-waktu. Peta tutupan lahan tahun 2016 dan 2020 digunakan untuk membangun matriks transisi dan peta potensi perubahan, kemudian model digunakan untuk mensimulasikan tutupan lahan tahun 2024.

Hasil simulasi tahun 2024 dibandingkan dengan peta aktual tahun 2024 menggunakan matriks kesalahan, *overall accuracy*, *Kappa*, serta *Figure of Merit*. Setelah model menunjukkan tingkat kesesuaian yang memadai, model digunakan untuk memproyeksikan perubahan tutupan lahan hingga tahun 2032.

### 5. Analisis rantai pasok kelapa sawit

Rantai nilai kelapa sawit terdiri dari perkebunan, pabrik kelapa sawit, kilang, dan pasar. Petani memproduksi tandan buah segar (TBS) yang diproses oleh pabrik menjadi minyak kelapa sawit mentah (CPO) dan minyak inti sawit (PKO). Produk-produk ini kemudian diolah oleh kilang menjadi minyak goreng, oleo-kimia, dan biodiesel (Purnomo *et al.*, 2020).

Peneliti akan menggunakan metode Spatially Explicit Information on Production to Consumption Systems (SEI-PCS) (Trase 2022) yang dikembangkan oleh Godar *et al.* (2015) dengan menggunakan informasi tersebut untuk melihat keterkaitan antara supply-base di tingkat lapangan (perkebunan), pabrik pengolahan sawit (TBS), fasilitas penyulingan CPO sampai tingkat manufaktur global di berbagai negara.

Fokus analisis rantai pasok dari hulu sampai hilir menggunakan sumber yang berasal dari informasi yang tersedia di publik berupa dokumen sertifikasi RSPO dan ISPO, dokumen publikasi supplier mill dan data export-import data, khususnya produk turunan kelapa sawit.

Tabel 4. Kategori keterpaparan risiko deforestasi berbasis TTP dan TTM

Kategori	Kriteria	Unit analisis	Interpretasi
Rendah	Tidak ada deforestasi di dalam atau dekat areal kebun TTP	Kebun/PKS	Paparan rendah
Sedang	Deforestasi berada dalam radius 1–5 km dari areal kebun TTP	Kebun/PKS	Potensi paparan tidak langsung
Tinggi	Deforestasi overlap atau berbatasan langsung dengan areal kebun TTP	Kebun/PKS	Potensi paparan langsung
Tinggi Hilir	Refinery terhubung dengan PKS berisiko tinggi melalui TTM	Refinery	Risiko terbawa ke rantai pasok hilir

Analisis risiko deforestasi dalam rantai pasok dilakukan dengan pendekatan keterpaparan spasial berbasis data ketelusuran.

Data ketelusuran dari kebun ke pabrik kelapa sawit atau *Traceability to Plantation (TTP)* diperoleh dari dokumen publik RSPO dan ISPO,

sedangkan data ketelusuran dari refinery ke PKS atau *Traceability to Mill* (TTM) diperoleh dari daftar supplier mill, dokumen publik perusahaan, serta data perdagangan ekspor-impor. Pendekatan ini digunakan untuk menghubungkan tiga simpul utama rantai pasok, yaitu areal perkebunan, PKS, dan refinery.

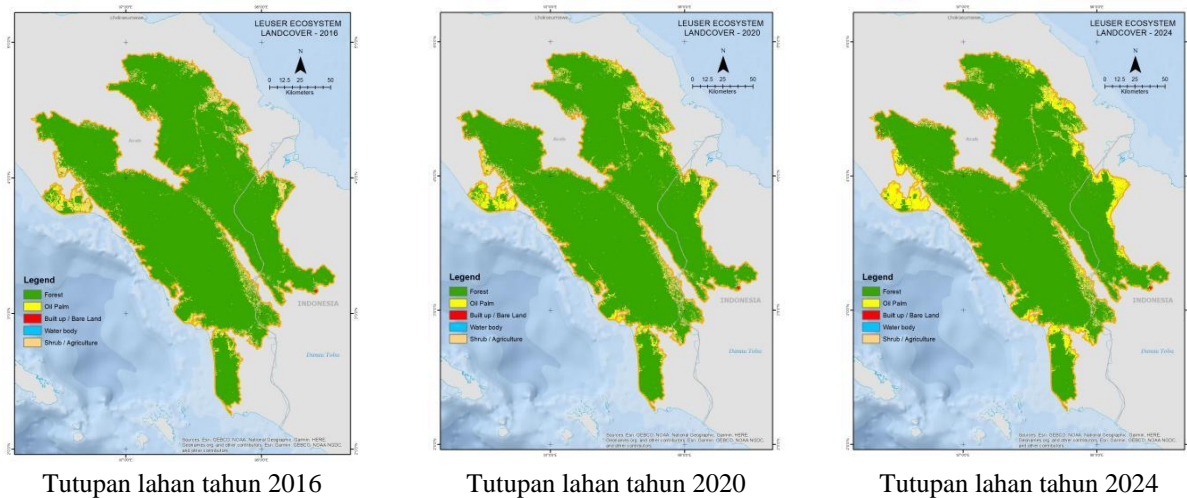
Risiko deforestasi tidak diartikan sebagai bukti langsung bahwa suatu PKS atau refinery menerima TBS dari area deforestasi, melainkan sebagai tingkat keterpaparan terhadap potensi sumber pasokan berisiko. Keterpaparan tersebut dianalisis berdasarkan kedekatan spasial antara areal deforestasi historis atau prediksi deforestasi dengan areal perkebunan yang terhubung ke PKS. Apabila areal deforestasi berada di dalam atau berdekatan dengan areal perkebunan yang tercatat dalam dokumen TTP, maka PKS yang terkait dikategorikan memiliki paparan risiko. Risiko tersebut kemudian diturunkan ke tingkat refinery apabila refinery tersebut tercatat memiliki hubungan TTM dengan PKS yang terpapar risiko.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Klasifikasi Penggunaan Lahan

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji perubahan tutupan lahan dari hutan menjadi perkebunan kelapa sawit. Untuk menganalisis perubahan ini, penelitian mendefinisikan lima kategori tutupan lahan, yaitu hutan, kelapa sawit, lahan terbuka/terbangun, badan air, dan semak/bidang pertanian. Melalui analisis yang dilakukan, kelas tutupan lahan untuk tahun 2016, 2020 dan 2024 diidentifikasi, seperti yang disajikan pada Gambar 3. Ketiga peta tersebut merupakan hasil klasifikasi dari komposit tahunan, sehingga setiap kelas tutupan lahan merepresentasikan kondisi dominan pada masing-masing tahun rujukan.

Luas statistik untuk setiap kelas tutupan lahan disajikan dalam Tabel 5. Analisis ini memberikan wawasan berharga mengenai sejauh mana perubahan tutupan lahan terjadi, khususnya konversi area berhutan menjadi perkebunan kelapa sawit.



Gambar 3. Klasifikasi Tutupan Lahan  
 Sumber: Analisis, 2024

Tabel 5. Penggunaan Lahan di Kawasan Ekosistem Leuser

Tutupan Lahan	2016		2020		2024	
	Area (Ha)	Persen	Area (Ha)	Persen	Area (Ha)	Persen
Hutan	2,425,987.50	91.80%	2,367,275.00	89.69%	2,350,650.00	89.06%
Sawit	34,956.25	1.32%	93,312.50	3.54%	117,112.50	4.44%
Terbangun	1,600.00	0.06%	3,800.00	0.14%	4,206.25	0.16%
Air	1,275.00	0.05%	1,375.00	0.05%	1,481.25	0.06%
Semak	175,593.75	6.65%	173,650.00	6.58%	165,962.50	6.29%
<b>Total</b>	<b>2,639,412.50</b>	<b>100.00%</b>	<b>2,639,412.50</b>	<b>100.00%</b>	<b>2,639,412.50</b>	<b>100.00%</b>

Antara tahun 2016 dan 2024, terjadi perubahan yang signifikan dalam pola penggunaan lahan. Area berhutan mengalami sedikit penurunan dari 91.8% menjadi 89.06% dari total wilayah KEL, menunjukkan pengurangan tutupan hutan. Sebaliknya, perkebunan kelapa sawit mengalami ekspansi signifikan, meningkat dari 1.32% menjadi 4.44% dari total wilayah KEL. Pertambahan ini dalam kurun waktu 8 tahun, lahan perkebunan kelapa sawit meningkat lebih dari 4 (empat) kali lipat.

## 2. Analisis Perubahan Penggunaan Lahan

Matriks perubahan tutupan lahan disajikan pada Tabel 6, memberikan gambaran komprehensif mengenai transformasi yang terjadi. Matriks ini memungkinkan analisis terperinci terhadap perubahan kelas tutupan lahan beserta luasannya selama periode waktu tertentu. Dengan memeriksa sel-sel diagonal pada matriks, yang mewakili jenis tutupan lahan yang terklasifikasi dengan benar, tingkat konversi hutan menjadi perkebunan kelapa sawit dapat ditentukan.

Tabel 6. Matrik analisis perubahan lahan

Perubahan Lahan	2024					Total (Ha)
	Hutan	Kelapa sawit	Terbangun	Air	Semak / Pertanian	
2016 Hutan	2,349,968.75	20,931.25	1,225.00	531.25	53,331.25	<b>2,425,987.50</b>
Kelapa sawit	112.50	25,756.25	31.25	6.25	9,050.00	<b>34,956.25</b>
Terbangun	6.25	-	1,443.75	-	150.00	<b>1,600.00</b>
Air	6.25	-	193.75	912.50	164.50	<b>1,275.00</b>
Semak/Pertanian	556.25	70,425.00	1,312.50	31.25	103,268.75	<b>175,593.75</b>
<b>Total (Ha)</b>	<b>2,350,650.00</b>	<b>117,112.50</b>	<b>4,206.25</b>	<b>1,481.25</b>	<b>165,962.50</b>	<b>2,641,428.50</b>

Sumber: Analisis, 2024

Analisis perubahan tutupan lahan dalam penelitian ini dilakukan terhadap seluruh kelas tutupan lahan yang diklasifikasikan, yaitu hutan, kelapa sawit, lahan terbangun, tubuh air, serta semak/pertanian. Namun, sesuai dengan fokus penelitian, pembahasan utama diarahkan pada transisi dari hutan dan kelas non-sawit lainnya menjadi kelapa sawit, karena transisi tersebut paling relevan dengan analisis risiko deforestasi dalam rantai pasok kelapa sawit. Dengan demikian, perubahan lahan yang dianalisis tidak terbatas hanya pada perubahan menjadi kelapa sawit, tetapi transisi menuju kelapa sawit diperlakukan sebagai fokus utama interpretasi dan pemodelan risiko.

Analisis perubahan tutupan lahan untuk tahun 2024 mengungkapkan pergeseran signifikan dalam pola penggunaan lahan, terutama dalam ekspansi perkebunan kelapa sawit. Gambar 1 menggambarkan perubahan kelas tutupan lahan, menunjukkan transformasi area berhutan menjadi perkebunan kelapa sawit. Dalam kurun waktu 2016 hingga 2024, luas

perkebunan kelapa sawit meningkat sekitar 3.35 kali lipat, dari 34,956.25 ha menjadi 117,112.50 ha.. Ekspansi ini terjadi dengan konversi tutupan hutan, yang berkurang sekitar 20,931.25 hektar. Sementara sekitar 70,425 hektar berasal dari lahan semak dan pertanian.

Peningkatan lahan perkebunan kelapa sawit ini dapat dikaitkan dengan peningkatan permintaan global terhadap minyak nabati, khususnya minyak kelapa sawit. Temuan ini menyoroti pentingnya pengaturan yang lebih ketat dan pemantauan ekspansi kelapa sawit untuk mengurangi dampak negatif terhadap Ekosistem Leuser dan memastikan praktik pengelolaan lahan yang berkelanjutan. Upaya menuju produksi minyak kelapa sawit yang berkelanjutan, pengadaan yang bertanggung jawab, dan inisiatif konservasi sangat penting untuk mencapai keseimbangan antara pembangunan ekonomi dan pelestarian lingkungan di Ekosistem Leuser (Lyons-White & Knight, 2018).

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa perubahan tutupan hutan di KEL berkaitan erat dengan perkembangan komoditas kelapa sawit. Rafina & Prasetyo (2023) melaporkan bahwa pada periode 2016 hingga 2022, tutupan hutan di KEL mengalami penurunan, sementara luas perkebunan kelapa sawit meningkat secara signifikan. Studi tersebut juga menunjukkan bahwa sebagian konversi hutan menjadi sawit berkaitan dengan aktivitas petani skala kecil dan ekspansi yang tidak sepenuhnya berada dalam kerangka tata kelola formal. Dengan demikian, hasil pemodelan dalam penelitian ini memperkuat indikasi bahwa risiko deforestasi di KEL tidak hanya berasal dari keberadaan konsesi besar, tetapi juga dari pola ekspansi tersebar yang terhubung dengan akses jalan, permukiman, dan kedekatan dengan pusat pengolahan kelapa sawit.

### 3. Penilaian Akurasi

Penilaian akurasi memainkan peran penting dalam mengevaluasi keandalan hasil klasifikasi penggunaan lahan (Foody, 2002).

Untuk menilai akurasi klasifikasi penggunaan lahan, proses yang ketat diikuti. Pertama, 100 titik acak dihasilkan menggunakan perangkat lunak QGIS untuk memastikan sampel yang representatif dari area studi. Titik-titik ini kemudian digunakan untuk pemeriksaan visual dengan membandingkan gambar yang diklasifikasikan dengan citra Planet dari tahun yang sesuai, khususnya 2016 dan 2024.

Metode yang umum digunakan untuk penilaian akurasi adalah metode kontingensi, yang menggunakan matriks kontingensi untuk mengkuantifikasi tingkat akurasi. Matriks kontingensi memberikan informasi yang berharga, termasuk akurasi produsen, akurasi keseluruhan, dan akurasi kappa. Akurasi produsen mengukur akurasi dari perspektif produsen peta, sementara akurasi pengguna menilai akurasi dari sudut pandang pengguna (FAO, 2016). Ukuran akurasi ini berfungsi sebagai estimasi untuk akurasi keseluruhan klasifikasi. Tabel 7 dan 8 menyajikan hasil uji akurasi yang dilakukan pada output klasifikasi, memberikan gambaran komprehensif mengenai kinerja akurasi klasifikasi untuk tahun 2016 dan 2024.

Tabel 7. Kalkulasi uji akurasi periode tahun 2016

Kelas Tuplah	Hutan	Kelapa sawit	Terbangun	Air	Semak/Pertanian	Total User
Hutan	31	4	2	7	8	52
Kelapa sawit	0	6		0	2	8
Terbangun			5			5
Air				8		8
Semak/Pertanian	1	6	3		17	27
<b>Total Producer</b>	<b>31</b>	<b>15</b>	<b>9</b>	<b>15</b>	<b>27</b>	<b>100</b>

Tabel 8. Kalkulasi uji akurasi periode tahun 2024

Kelas Tuplah	Hutan	Kelapa sawit	Terbangun	Air	Semak/Pertanian	Total User
Hutan	22				5	27
Kelapa sawit	1	15		1	6	23
Terbangun	1		9	4	2	16
Air				12		12
Semak/Pertanian		2			20	22
<b>Total Producer</b>	<b>24</b>	<b>17</b>	<b>9</b>	<b>17</b>	<b>33</b>	<b>100</b>

Tabel 9. Rekapitulasi hasil uji akurasi

Tahun	Overall Accuracy	Kappa Coefficient
2016	67.00%	0.40
2024	78.00%	0.56

Penilaian akurasi klasifikasi perubahan penggunaan lahan untuk tahun 2016 dan 2024 mengungkapkan wawasan penting mengenai keandalan hasil klasifikasi. Pada tahun 2016, akurasi keseluruhan klasifikasi ditentukan sebesar 67.00%, yang menunjukkan tingkat akurasi sedang. Koefisien kappa, yang mengukur kesepakatan antara klasifikasi dan data referensi, ditemukan sebesar 0.40, yang menunjukkan kesepakatan yang cukup. Namun, pada tahun 2024, akurasi keseluruhan klasifikasi meningkat menjadi 78.00%, menunjukkan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan tahun 2016. Koefisien kappa juga meningkat menjadi 0.560 yang menunjukkan kesepakatan sedang antara klasifikasi dan data referensi.

#### 4. Pemodelan spasial konversi areal hutan untuk sawit

Pemodelan spasial dalam penelitian ini digunakan untuk mendukung analisis risiko rantai pasok, bukan semata-mata untuk menghasilkan simulasi perubahan tutupan lahan. Oleh karena itu, variabel pendorong yang digunakan dipilih berdasarkan relevansinya terhadap ekspansi sawit dan keterkaitan spasialnya dengan rantai pasok, seperti jarak

terhadap PKS, jalan, permukiman, area sawit eksisting, serta kapasitas pengolahan TBS.

Menggunakan kombinasi teknik penginderaan jauh dan pemodelan spasial, penelitian ini menyoroti tingkat perubahan penggunaan lahan terutama konversi area hutan menjadi perkebunan kelapa sawit yang dalam KEL antara 2024 dan 2032. Hasil analisis ditunjukkan dalam tabel 8.

Analisis statistik perubahan model tutupan lahan menunjukkan bahwa akan terjadi pergeseran yang signifikan dalam penggunaan lahan antara tahun 2024 dan 2032. Penurunan terbesar terlihat pada lahan hutan dan semak/pertanian, masing-masing berkurang sebesar 21,312 hektar dan 36,731 hektar, yang menunjukkan tren deforestasi dan konversi lahan untuk keperluan lain. Sebaliknya, lahan kelapa sawit mengalami peningkatan signifikan sebesar 59,275 hektar, mencerminkan ekspansi cukup besar dalam sektor perkebunan. Selain itu, luas area terbangun/terbuka dan badan air juga menurun, masing-masing sebesar 775.00 hektar dan 456.25 hektar, meskipun penurunannya relatif kecil dibandingkan dengan kategori lainnya.

Tabel 10. Perubahan model tutupan lahan tahun 2024 hingga 2032

Kelas Tutupan	Luas Areal (Hektar)		
	Tahun 2024	Tahun 2032	Δ (Perubahan)
Hutan	2,350,650.00	2,329,337.50	-21,312.50
Kelapa sawit	117,112.50	176,387.50	59,275.00
Terbangun /Terbuka	4,206.25	3,431.25	-775.00
Air	1,481.25	1,025.00	-456.25
Semak/Pertanian	165,962.50	129,231.25	-36,731.25

Sumber: Analisis, 2024

Hasil validasi pemodelan yang dilakukan menunjukkan tingkat keakuratan cukup tinggi dengan 92.99% data klasifikasi sesuai referensi. Nilai Kappa (overall) sebesar 0.83 mengindikasikan kesesuaian kuat antara hasil klasifikasi dan referensi, sementara Kappa (histogram) sebesar 0.98 mencerminkan distribusi kelas yang hampir sempurna. Selain itu, Kappa (location) sebesar 0.85 menunjukkan akurasi spasial yang sangat baik. Secara

keseluruhan, model ini memiliki performa yang andal untuk analisis proyeksi tutupan lahan.

Hasil uji korelasi Pearson menunjukkan bahwa nilai korelasi antar variabel pendorong berkisar antara 0.241 hingga 0.772. Korelasi tertinggi terdapat pada hubungan antara kedekatan permukiman dan areal tertanam kelapa sawit dengan nilai  $r = 0.772$ , diikuti oleh kedekatan jalan dan permukiman dengan nilai  $r = 0.692$ . Nilai tersebut menunjukkan adanya hubungan spasial yang cukup kuat, tetapi belum

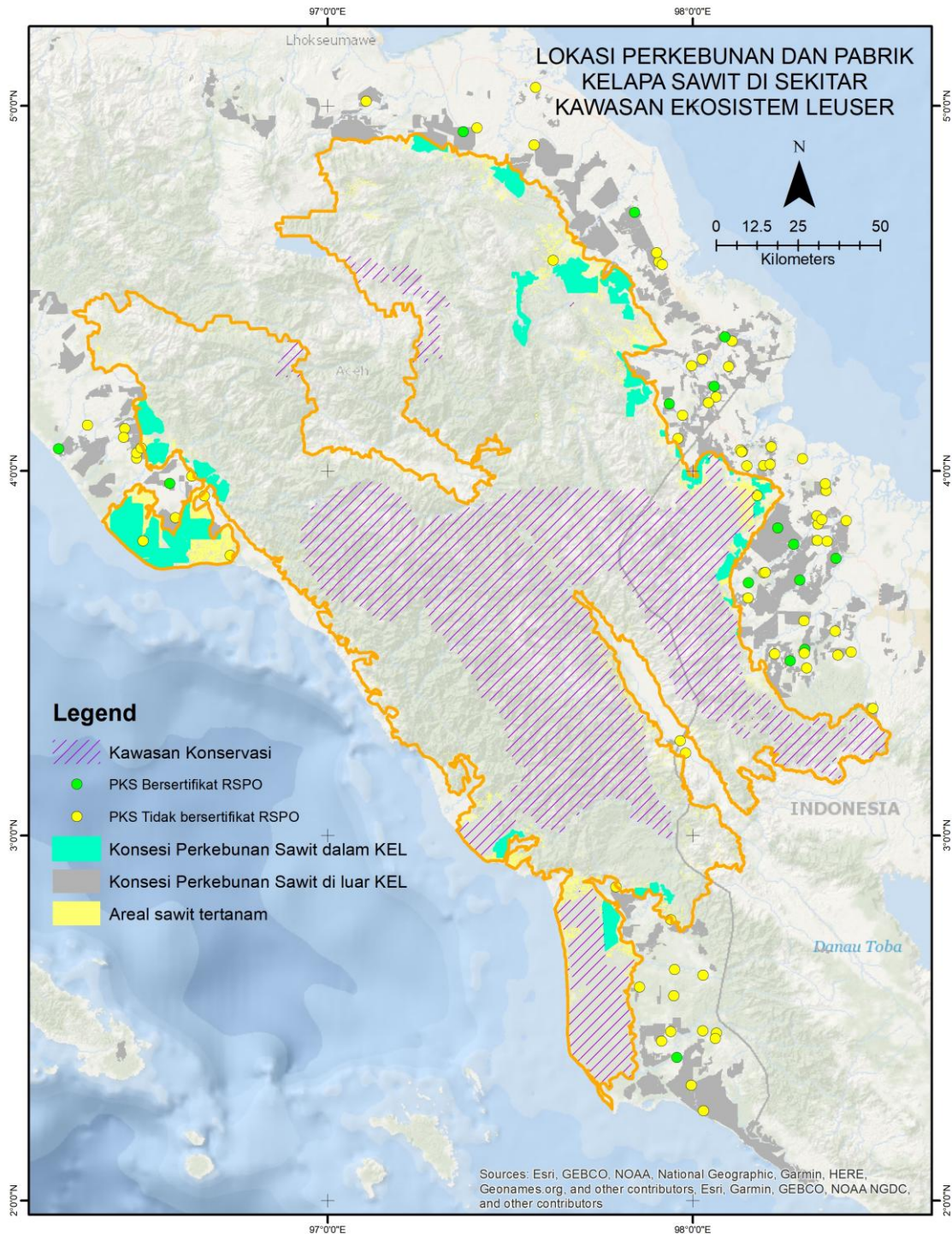
mencapai ambang multikolinearitas sangat tinggi, yaitu  $r \geq 0.80$ . Hubungan antara permukiman, jalan, dan areal sawit eksisting dapat dijelaskan oleh kecenderungan ekspansi kelapa sawit yang berkembang pada area dengan aksesibilitas tinggi dan dekat dengan aktivitas manusia. Sementara itu, korelasi sedang antara areal sawit dan jalan sebesar  $r = 0.601$  serta antara pabrik dan areal sawit sebesar  $r = 0.535$  menunjukkan bahwa keberadaan jalan dan pabrik memiliki peran dalam mendorong ekspansi sawit, tetapi tidak sepenuhnya menggantikan variabel lain. Korelasi rendah antara pabrik dengan permukiman sebesar  $r = 0.284$  dan pabrik dengan jalan sebesar  $r = 0.241$  menunjukkan bahwa variabel kedekatan pabrik memiliki karakteristik spasial yang relatif independen. Berdasarkan hasil tersebut, seluruh variabel tetap dipertahankan dalam model karena masing-masing merepresentasikan aspek pendorong yang berbeda, yaitu aksesibilitas, tekanan aktivitas manusia, kedekatan terhadap pusat pengolahan, dan pola ekspansi sawit eksisting.

Perubahan tutupan lahan di KEL perlu dibaca sebagai proses spasial-temporal yang dipengaruhi oleh aksesibilitas, kedekatan dengan pusat pengolahan kelapa sawit, dan

keberadaan area sawit eksisting. Oleh karena itu, penggunaan laju tahunan rata-rata membantu menjelaskan intensitas perubahan, sementara model Cellular Automata digunakan untuk membaca arah potensi ekspansi berdasarkan pola perubahan historis dan variabel pendorong spasial.

## **5. Analisis rantai pasok kelapa sawit**

Dalam penentuan analisis deforestasi dalam rantai pasok kelapa sawit ini berfokus pada keterlacakan dari fasilitas refinery dengan Pabrik Kelapa Sawit (PKS) yang berada di sekitar areal KEL, dari hasil analisis spasial keberadaan PKS di dalam dan disekitar areal KEL adalah sebanyak 87 PKS, yang terdiri dari 44 PKS yang memiliki areal perkebunan dan 43 PKS Mandiri atau tidak memiliki areal perkebunan. Hanya sebanyak 15 PKS telah memiliki sertifikat RSPO dan 12 PKS bersertifikat ISPO. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar PKS yang belum tersertifikat dan tidak memiliki areal perkebunan sendiri di sekitar KEL sangat rentan terhadap pemasok TBS yang berasal dari areal deforestasi.



Gambar 4. Lokasi Perkebunan dan PKS Sekitar KEL

Sementara temuan dari hasil analisis ketelusuran dari fasilitas refinery dengan PKS yang berada di areal KEL menunjukkan bahwa sebanyak 15 fasilitas refinery di 2 provinsi Sumatera Utara dan Riau di pasok oleh PKS yang berada di sekitar KEL. 15 fasilitas refinery tersebut dimiliki oleh 11 group perusahaan global yang berdasarkan data ekspor

perdagangan tahun 2022 hingga 2024 melakukan ekspor ke berbagai negara tujuan utama seperti Singapura, Malaysia, Pakistan, India, China, Uni Eropa, Amerika Serikat, dan beberapa negara lain dalam volume lebih kecil.

Dalam konteks rantai pasok, kedekatan antara area ekspansi sawit, permukiman, dan pabrik kelapa sawit menunjukkan bahwa risiko

deforestasi di KEL perlu dibaca sebagai kombinasi antara tekanan pasar dan kondisi sosial-ekonomi lokal. Studi in-situ di Desa Sumber Makmur, Aceh Tamiang, menunjukkan bahwa ketergantungan masyarakat terhadap kelapa sawit sebagai sumber pendapatan dapat mendorong pembukaan lahan hingga sebagian masuk ke dalam KEL. Namun, studi yang sama juga menunjukkan bahwa intervensi pemberdayaan dan peningkatan kesadaran ekologis dapat mengubah cara pandang masyarakat dalam menjaga kawasan. Temuan tersebut penting untuk menafsirkan hasil spasial penelitian ini, karena aktor rantai pasok tidak hanya berperan sebagai penerima TBS, tetapi juga sebagai simpul yang dapat memengaruhi praktik produksi, keterlacakan, dan upaya mitigasi risiko deforestasi di tingkat tapak (Nainda *et al.*, 2024).

Beberapa region tujuan ekspor seperti Uni Eropa dan Amerika Serikat memiliki kebijakan yang berkaitan dengan komoditas rantai pasok yang bebas dari deforestasi. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa komoditas kelapa sawit dan produk turunannya masih memiliki risiko yang berasal dari areal deforestasi di areal KEL.

Dari sisi tata kelola, KEL memiliki posisi hukum dan kelembagaan yang kompleks karena berada dalam irisan antara fungsi konservasi, perlindungan ekologis, penggunaan lahan masyarakat, dan kewenangan pemerintahan pusat-daerah. Suhendra *et al.* (2020) menekankan bahwa meskipun kerangka hukum lingkungan Indonesia telah mengalami perkembangan, implementasi perlindungan KEL masih menghadapi tantangan akibat tarik-menarik antara kepentingan pembangunan dan perlindungan lingkungan, serta belum optimalnya penegakan prinsip tanggung jawab lingkungan (Suhendra *et al.*, 2020). Oleh karena itu, hasil pemodelan spasial dalam penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar prioritas pengawasan, penguatan keterlacakan rantai pasok, serta desain intervensi berbasis lokasi pada area yang memiliki risiko deforestasi tinggi.

## KESIMPULAN

Analisis perubahan tutupan lahan di Kawasan Ekosistem Leuser menunjukkan adanya peningkatan luas perkebunan kelapa sawit dari 34,956.25 ha pada 2016 menjadi 117,112.50 ha pada 2024, atau bertambah sekitar 82,156.25 ha. Ekspansi tersebut sebagian berasal dari konversi hutan sebesar 20,931.25 ha dan semak/pertanian sebesar 70,425 ha, yang menunjukkan bahwa tekanan perubahan lahan tidak hanya terjadi pada tutupan hutan, tetapi juga pada mosaik penggunaan lahan non-hutan di sekitar kawasan. Penilaian akurasi menunjukkan peningkatan kualitas klasifikasi, dengan akurasi keseluruhan naik dari 67.00% pada 2016 menjadi 78.00% pada 2024, dan nilai Kappa meningkat dari 0.40 menjadi 0.56.

Pemodelan spasial hingga 2032 menunjukkan bahwa ekspansi kelapa sawit berpotensi terus berlanjut, terutama pada area yang memiliki kedekatan dengan PKS, jaringan jalan, permukiman, areal sawit eksisting, dan kapasitas pengolahan TBS. Hasil validasi model menunjukkan tingkat kesesuaian yang kuat, dengan akurasi sebesar 92.99%, sehingga model dapat digunakan sebagai dasar indikatif untuk mengidentifikasi area berisiko. Integrasi hasil pemodelan dengan analisis rantai pasok menunjukkan bahwa PKS dan fasilitas pengolahan yang terhubung dengan area berisiko perlu menjadi simpul prioritas dalam penguatan keterlacakan, pemantauan deforestasi, dan mitigasi risiko. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini adalah menyediakan kerangka spasial untuk menghubungkan perubahan tutupan lahan, prediksi risiko deforestasi, dan tata kelola rantai pasok kelapa sawit bebas deforestasi di Kawasan Ekosistem Leuser.

Hasil penelitian ini menunjukkan perlunya penguatan pengelolaan risiko deforestasi di Kawasan Ekosistem Leuser melalui integrasi pemantauan spasial dan tata kelola rantai pasok kelapa sawit. Area yang memiliki risiko tinggi terhadap ekspansi sawit, terutama yang berada dekat dengan PKS, jalan, permukiman, areal sawit eksisting, dan pusat

pengolahan TBS, perlu dijadikan prioritas dalam pemantauan berkala, patroli lapangan, dan pengendalian perubahan penggunaan lahan.

Pemerintah dan pengelola kawasan dapat memanfaatkan peta risiko deforestasi sebagai dasar penentuan lokasi prioritas perlindungan, restorasi, dan pengawasan. Sementara itu, pelaku rantai pasok kelapa sawit perlu memperkuat *Traceability to Plantation* (TTP) dan *Traceability to Mill* (TTM) untuk memastikan bahwa kebun, PKS, dan refinery yang terhubung dengan area berisiko dapat diverifikasi dan dimitigasi secara tepat. PKS dan refinery yang memiliki keterpaparan tinggi terhadap area deforestasi perlu menjadi prioritas dalam engagement pemasok, verifikasi lapangan, dan peningkatan sistem ketelusuran.

Penelitian lanjutan disarankan untuk menggunakan data lapangan yang lebih rinci, seperti batas kebun, data pemasok, jaringan pengepul, status legal lahan, dan data transaksi TBS, agar keterkaitan antara deforestasi dan rantai pasok dapat dianalisis secara lebih akurat. Pembaruan data citra satelit secara tahunan dan penggunaan citra resolusi tinggi juga diperlukan untuk meningkatkan akurasi pemantauan serta mendukung sistem peringatan dini deforestasi di KEL.

## DAFTAR PUSTAKA

- Chain Reaction research. (2020). <https://chainreactionresearch.com/report/ndp-e-policies-cover-83-of-palm-oil-refineries-implementation-at-75/>. Diakses pada Desember 2024.
- Condro, A. A., Prasetyo, L. B., Rushayati, S. B., Santikayasa, I. P., Iskandar, E. (2021) Measuring Metrics of Climate Change and Its Implication on the Endangered Mammal Conservation in the Leuser Ecosystem. *Front Environ Sci.* 9, 1–9.
- Curtis, Philip, G., Christy, M., Slay, Nancy L. Harris, Tyukavina, A., & Hansen, M. C. (2018). "Classifying Drivers of Global Forest Loss." *Science* 361(6407):1108–11. doi: 10.1126/science. aau3445.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2016). Map accuracy assessment and area estimation: A practical guide. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Foody, G. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sens. Environ.* 80, 185–201.
- Gaveau, D. L. A., Wich, S., Epting, J., Juhn, D., Kanninen, M., Leader-williams, N. (2009). The future of forests and orangutans (Pongo abelii) in Sumatra: predicting impacts of oil palm plantations, road construction, and mechanisms for reducing carbon emissions from deforestation. *Environ. Res. Lett.* 4, 034013
- Gaveau, D. L. A., Sheil, D., Husnayaen, Salim, M. A., Arjasakusuma, S., Ancrenaz, M., Pacheco, P., & Meijaard, E. (2016). "Rapid Conversions and Avoided Deforestation: Examining Four Decades of Industrial Plantation Expansion in Borneo." *Scientific Reports* 6(June):1–13. doi: 10.1038/srep32017.
- Gaveau, D. L. A., Santos, L., Locatelli, B., Salim, M. A., Husnayaen, H., Meijaard, E., Heatubun, C., & Sheil, D. (2021). Forest loss in Indonesian New Guinea (2001–2019): Trends, drivers and outlook. *Biological Conservation*, 261(May), 109225. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109225>.
- Godar, J., Persson, U. M., Tizado, E. J., & Meyfroidt, P. (2015). Towards more accurate and policy relevant footprint analyses: Tracing fine-scale socio-environmental impacts of production to consumption. *Ecological Economics*, 112. 25–35. DOI:10.1016/j.ecolecon.2015.02.003.
- Joss Lyons-White, Knight, A. T. (2018). Palm Oil Supply Chain Complexity Impedes Implementation of Corporate No-Deforestation Commitments. *Global Environmental Change* 50(April), 303–13.
- Nainda, N., Ilham, I., Chalid, I. (2024). Membangun kesadaran ekologis: intervensi Yayasan HAKA dalam menjaga Kawasan Ekosistem Leuser Aceh. *Jurnal Ilmu Sosial dan Ilmu Politik Malikussaleh.* 5(2):156–173. doi:10.29103/jspm.v5i2.16215.
- Novianti, T. C. (2021). Klasifikasi Landsat 8 OLI Untuk Tutupan Lahan Di Kota Palembang Menggunakan Google Earth Engine. *J. Swarnabhumi.* 6(1), 75–85

- NextGIS. (2024). [https://docs.nextgis.com/docs\\_ngqgis/source/molusce.html#](https://docs.nextgis.com/docs_ngqgis/source/molusce.html#). Diakses pada Desember 2024
- Pearson, H., Brown, S., Murray, L., Sidman, G. (2017). Greenhouse gas emissions from tropical forest degradation: an underestimated source. *Springer Open Journal*.
- Pirard, S., Gnych, P., Pacheco, S., Lawry. (2018). Komitmen nol-deforestasi di Indonesia: Tantangan tata kelola. *Komitmen Nol-Deforestasi Di Indonesia: Tantangan Tata Kelola*, 19, 1–8. <https://doi.org/10.17528/cifor/006897>.
- Poortinga, A., Tenneson, K., Shapiro, A., Nquyen, Q., San Aung, K., Chishtie, F., Saah, D. (2019). Mapping Plantations in Myanmar by Fusing Landsat-8, Sentinel-2 and Sentinel-1 Data along with Systematic Error Quantification. *Remote Sens. 11*, 831
- Purnomo, H., Okarda, B., Dermawan, A., Ilham, Q. P., Bizarani, B. (2017). Proyeksi Sawit Indonesia: Debat kebijakan ekonomi, deforestasi dan moratorium. Disk. dan Konf. pers “Sawit Penyebab atau Penyelamat Deforestasi” yang diselenggarakan oleh Thamrin Sch. *Clim. Chang. Sustain* (April), 1–37.
- Purnomo, H., Okarda, B., Dermawan, A., Ilham, Q. P., Pacheco, P., Nurfatriani, F., & Suhendang, E. (2020). Reconciling oil palm economic development and environmental conservation in Indonesia: A value chain dynamic approach. *Forest Policy and Economics, 111*. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102089>.
- Rafina, I., Prasetyo, L. B. (2023). Mapping forest cover change in relation to oil palm commodities development using Google Earth Engine in the Leuser Ecosystem. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1266*:012083. doi:10.1088/1755-1315/1266/1/012083.
- Samadder, S., & Shivesh, K. (2018). A comparison of different land-use classification techniques for accurate monitoring of degraded coal-mining areas *Environmental Earth Sciences 77*, 713.
- Shaharum, N. S. N., Shafri, H. Z. M., Wawak, G., Samsatli, S., Prince, H. M., Yusuf, B., Hamud, A. M. (2019). Mapping the spatial distribution and changes of oil palm land cover using an open source cloud-based mapping platform. *International Journal of Remote Sensing 40*(19), 7459-7476.
- Suhendra, D., Yahya, A., Faisal, Suhaimi, Syarifuddin. (2020). How Effective is the Environmental Law for the Conservation of the Leuser Ecosystem Area in Indonesia? *Proceedings of the International Conference on Law, Governance and Islamic Society (ICOLGIS 2019) 413*(276), 61–67.
- Trase. (2022). [https://resources.trase.earth/documents/Trase\\_supply\\_chain\\_mapping\\_manual.pdf](https://resources.trase.earth/documents/Trase_supply_chain_mapping_manual.pdf). Diakses pada Desember 2024