

PEMODELAN SPASIAL MULTI-TEMPORAL DEFORESTASI UNTUK EVALUASI KESESUAIAN TATA RUANG DI PROVINSI BENGKULU

Iman Darmatama ^{1)*}, Trinita Wulandari ²⁾, Devianri. M ³⁾, Vioni ⁴⁾, Reflis ⁵⁾

- ¹⁾ Program Studi Pengelolaan Sumber Daya Alam, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia
²⁾ Program Studi Pengelolaan Sumber Daya Alam, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia
³⁾ Program Studi Pengelolaan Sumber Daya Alam, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia
⁴⁾ Program Studi Pengelolaan Sumber Daya Alam, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia
⁵⁾ Program Studi Pengelolaan Sumber Daya Alam, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia

email: idarmatama@gmail.com ^{1)*}, trinitawulandari37@gmail.com ²⁾, viamaulana00@gmail.com ³⁾, florinisia@gmail.com ⁴⁾, reflis@unib.ac.id ⁵⁾

ABSTRAK

Deforestasi dan perubahan tutupan lahan merupakan permasalahan utama dalam pengelolaan lingkungan, khususnya di wilayah tropis yang mengalami tekanan konversi lahan yang tinggi. Namun, sebagian besar penelitian masih bersifat deskriptif dan belum mengintegrasikan analisis perubahan tutupan lahan dengan evaluasi kesesuaian tata ruang secara komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika deforestasi dan mengevaluasi kesesuaian pemanfaatan ruang menggunakan pendekatan pemodelan spasial multi-temporal berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). Penelitian ini mengembangkan model spasial sebagai bagian dari sistem pendukung keputusan (Decision Support System/DSS) dengan menggunakan data tutupan lahan tahun 2015, 2020, dan 2025, di mana data tahun 2025 merupakan hasil proyeksi model spasial, serta peta Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Provinsi Bengkulu. Analisis dilakukan melalui tahapan change detection, matriks transisi tutupan lahan, analisis distribusi spasial, dan overlay kesesuaian tata ruang. Data tutupan lahan diperoleh dari peta Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) yang diolah menggunakan perangkat lunak SIG. Hasil penelitian menunjukkan bahwa luas tutupan hutan menurun dari 716.451 ha pada tahun 2015 menjadi 643.961 ha pada tahun 2025 ($\pm 10,12\%$). Konversi hutan menjadi perkebunan dan pertanian merupakan penyebab utama deforestasi. Selain itu, ditemukan ketidaksesuaian pemanfaatan ruang sebesar ± 40.000 ha, terutama pada kawasan lindung. Model yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi $\geq 85\%$ dengan nilai Kappa $> 0,75$. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan pemodelan spasial multi-temporal dapat digunakan sebagai alat evaluasi kebijakan berbasis data serta sistem pendukung keputusan dalam rekayasa lingkungan untuk mendukung pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan.

Kata kunci: deforestasi, pemodelan spasial, SIG, kesesuaian tata ruang, multi-temporal, decision support system

MULTI-TEMPORAL SPATIAL MODELING OF DEFORESTATION FOR EVALUATING SPATIAL PLANNING SUITABILITY IN BENGKULU PROVINCE

ABSTRACT

Deforestation and land cover change are major issues in environmental management, particularly in tropical regions experiencing high pressure from land conversion. However, most previous studies remain descriptive and have not comprehensively integrated land cover change analysis with spatial planning suitability evaluation. This study aims to analyze the dynamics of deforestation and evaluate land-use suitability using a multi-temporal spatial modeling approach based on Geographic Information Systems (GIS). This study develops a spatial model as part of a Decision Support System (DSS) by utilizing land cover data from 2015, 2020, and 2025, where the 2025 data represent model-based projections, along with the Regional Spatial Plan (RTRW) of Bengkulu Province. The analysis was conducted through several stages, including change detection, land cover transition matrix analysis, spatial distribution analysis, and spatial planning suitability overlay. Land cover data were obtained from maps provided by the Ministry of Environment and Forestry (KLHK) and processed using GIS software. The results indicate that forest cover decreased from 716,451 ha in 2015 to 643,961 ha in 2025 ($\pm 10.12\%$). The conversion of forests into plantations and agricultural land was identified as the primary driver

of deforestation. In addition, spatial analysis revealed land-use inconsistencies of approximately $\pm 40,000$ ha, particularly within protected areas. The developed model achieved an overall accuracy of $\geq 85\%$ with a Kappa coefficient greater than 0.75. These findings demonstrate that a multi-temporal spatial modeling approach can be used as a data-driven policy evaluation tool and a decision support system in environmental engineering to support sustainable natural resource management.

Keywords: deforestation, spatial modeling, GIS, spatial planning, multi-temporal, decision support system

PENDAHULUAN

Deforestasi dan perubahan tutupan lahan merupakan salah satu isu utama dalam pengelolaan lingkungan global yang berdampak signifikan terhadap perubahan iklim, degradasi ekosistem, serta kehilangan keanekaragaman hayati. Sektor perubahan penggunaan lahan dan kehutanan (Land Use, Land Use Change and Forestry/LULUCF) berkontribusi besar terhadap emisi gas rumah kaca global, terutama di wilayah tropis (IPCC, 2022). Studi oleh Curtis et al. (2018) menunjukkan bahwa lebih dari 70% deforestasi global didorong oleh aktivitas pertanian dan ekspansi komoditas, seperti kelapa sawit dan tanaman industri.

Indonesia sebagai negara dengan hutan tropis terbesar ketiga di dunia menghadapi tekanan deforestasi yang cukup tinggi dalam beberapa dekade terakhir. Menurut laporan Global Forest Resources Assessment yang diterbitkan oleh FAO, Indonesia termasuk dalam tiga negara dengan luas hutan tropis terbesar setelah Brasil dan Republik Demokratik Kongo (FAO, 2020). Meskipun terdapat tren penurunan laju deforestasi dalam beberapa tahun terakhir, konversi hutan menjadi perkebunan dan lahan pertanian masih menjadi faktor dominan (Austin et al., 2019; Gaveau et al., 2019). Selain itu, laporan Food and Agriculture Organization (FAO, 2020) menunjukkan bahwa kehilangan hutan di kawasan Asia Tenggara masih terjadi secara signifikan akibat tekanan ekonomi dan pembangunan.

Dalam konteks nasional, pemerintah Indonesia telah menetapkan berbagai kebijakan pengendalian deforestasi melalui instrumen perencanaan tata ruang, salah satunya adalah Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW). RTRW berfungsi sebagai alat pengendalian pemanfaatan ruang untuk memastikan keseimbangan antara pembangunan ekonomi dan keberlanjutan lingkungan. Namun, dalam praktiknya, sering ditemukan ketidaksesuaian antara kondisi aktual penggunaan lahan dengan rencana tata ruang yang telah ditetapkan (Wijaya et al., 2022). Ketidaksesuaian ini dapat menyebabkan konflik pemanfaatan ruang serta mempercepat degradasi lingkungan.

Provinsi Bengkulu sebagai bagian dari Pulau Sumatra merupakan wilayah yang memiliki tutupan hutan cukup luas namun juga mengalami tekanan konversi lahan yang tinggi, terutama untuk kegiatan perkebunan dan pertanian. Berdasarkan data peta tutupan lahan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), perubahan tutupan hutan di Provinsi Bengkulu menunjukkan tren penurunan dalam periode 2015–2020, yang kemudian dianalisis lebih lanjut melalui proyeksi spasial hingga tahun 2025. Kondisi ini mengindikasikan adanya dinamika perubahan tutupan lahan yang perlu dianalisis secara komprehensif, baik dari sisi spasial maupun kebijakan tata ruang.

Perkembangan teknologi Sistem Informasi Geografis (SIG) dan penginderaan jauh memungkinkan analisis perubahan tutupan lahan secara multi-temporal dengan tingkat akurasi yang tinggi (Hansen et al., 2013; Potapov et al., 2022). Pendekatan ini tidak hanya mampu mengidentifikasi pola perubahan lahan, tetapi juga dapat digunakan sebagai dasar dalam pengembangan model spasial untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Dalam perspektif rekayasa lingkungan, pemodelan spasial menjadi alat penting untuk merepresentasikan sistem lingkungan yang kompleks dan dinamis.

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan terkait perubahan tutupan lahan di Indonesia, sebagian besar masih bersifat deskriptif dan belum mengintegrasikan analisis perubahan multi-temporal dengan evaluasi kesesuaian tata ruang secara komprehensif. Penelitian yang menggabungkan analisis spasial dengan pendekatan pemodelan sebagai bagian dari sistem pendukung keputusan (Decision Support System/DSS) masih relatif terbatas, khususnya pada skala provinsi seperti Bengkulu.

Namun demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian (research gap) berupa keterbatasan integrasi antara analisis perubahan tutupan lahan multi-temporal dengan evaluasi kesesuaian tata ruang berbasis model spasial yang terkuantifikasi, khususnya pada skala regional seperti Provinsi Bengkulu. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan pendekatan pemodelan spasial multi-temporal dalam menganalisis dinamika deforestasi serta mengevaluasi kesesuaian pemanfaatan ruang terhadap RTRW di Provinsi Bengkulu. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode evaluasi kebijakan berbasis data serta mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan. Kebaruan penelitian

ini terletak pada integrasi analisis multi-temporal, matriks transisi, serta evaluasi kesesuaian RTRW dalam satu kerangka model spasial berbasis Decision Support System.

METODOLOGI PENELITIAN

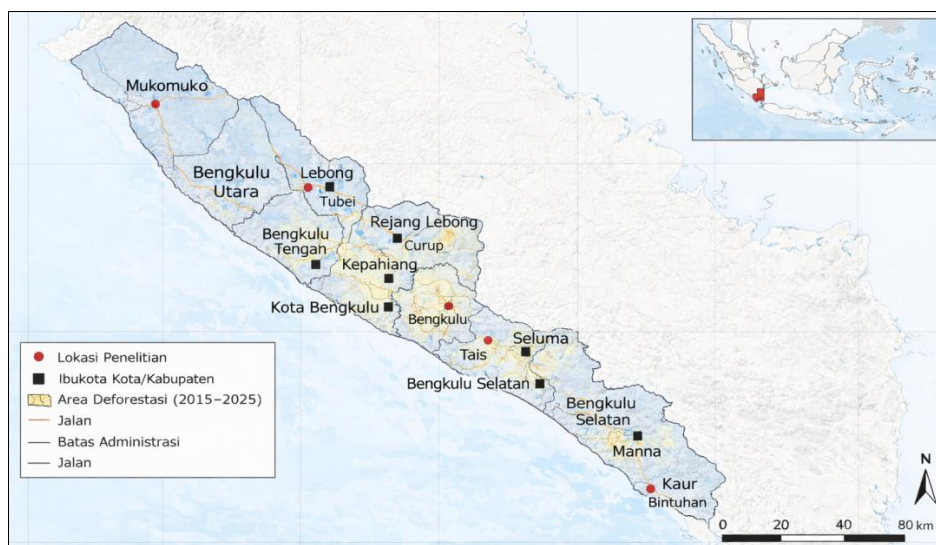
Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk menganalisis dinamika deforestasi dan mengevaluasi kesesuaian pemanfaatan ruang secara kuantitatif. Pendekatan ini dikembangkan sebagai bagian dari sistem pendukung keputusan (Decision Support System/DSS) dalam rekayasa lingkungan, yang mengintegrasikan data tutupan lahan multi-temporal dengan rencana tata ruang wilayah (RTRW).

Model spasial disusun dalam kerangka input–proses–output, di mana input berupa data tutupan lahan dan RTRW, proses meliputi analisis perubahan (*change detection*), matriks transisi, dan overlay spasial, sedangkan output berupa peta distribusi deforestasi, matriks perubahan, dan tingkat kesesuaian tata ruang. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peta tutupan lahan tahun 2015 dan 2020 yang diperoleh dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), serta peta Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Provinsi Bengkulu. Seluruh data spasial diolah dalam format raster dan vektor menggunakan perangkat lunak Sistem Informasi Geografis. Pendekatan ini mengacu pada praktik pemodelan spasial dalam analisis perubahan tutupan lahan berbasis penginderaan jauh (Hansen et al., 2013; Potapov et al., 2022).

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Provinsi Bengkulu, Indonesia, dengan luas wilayah $\pm 1,97$ juta hektar. Wilayah ini dipilih karena mengalami tekanan perubahan tutupan lahan yang signifikan dalam satu dekade terakhir. Periode analisis mencakup tahun 2015, 2020, dan 2025 untuk menangkap dinamika perubahan secara multi-temporal.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian di Provinsi Bengkulu

Pada Gambar 1 menunjukkan lokasi penelitian di Provinsi Bengkulu yang memiliki luas wilayah sekitar $\pm 1,97$ juta hektar. Secara geografis, wilayah ini didominasi oleh bentang alam pegunungan Bukit Barisan di bagian tengah serta dataran rendah di wilayah pesisir barat. Kondisi ini berpengaruh terhadap distribusi tutupan lahan dan pola pemanfaatan ruang. Wilayah dengan topografi landai dan aksesibilitas tinggi cenderung lebih intensif mengalami perubahan penggunaan lahan, khususnya untuk kegiatan pertanian dan perkebunan.

Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder sebagai input model, meliputi:

1. Peta Tutupan Lahan tahun 2015, 2020, dan 2025 dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK)
2. Peta RTRW Provinsi Bengkulu
3. Data pendukung: statistik lingkungan dari BPS serta literatur ilmiah terkait

Seluruh data diproses dalam format raster dan vektor serta disesuaikan dalam sistem koordinat yang seragam. Penggunaan data multi-temporal memungkinkan analisis perubahan tutupan lahan secara akurat (Hansen et al., 2013).

Tabel 1. Jenis Data dan Sumber Data Penelitian

No.	Jenis Data	Tahun	Sumber
1	Peta tutupan lahan	2015	Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK)
2	Peta tutupan lahan	2020	Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK)
3	Peta tutupan lahan (proyeksi)	2025	Hasil pemodelan spasial
4	Peta RTRW Provinsi Bengkulu	2020	Pemerintah Provinsi Bengkulu
5	Batas administrasi	2020	BIG / BPS
6	Data tutupan hutan historis	2000-2022	Mapbiomas Indonesia / Genesis Bengkulu
7	Indeks Kualitas Lingkungan Hidup (IKLH)	2021	Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK)

Analisis perubahan tutupan lahan dilakukan menggunakan data penginderaan jauh dengan resolusi spasial 30 meter yang berasal dari citra Landsat yang telah diproses dalam peta tutupan lahan nasional oleh KLHK.

Variabel dan Asumsi Model

Variabel utama:

- luas tutupan hutan
- perubahan penggunaan lahan
- jarak terhadap infrastruktur (jalan)
- kemiringan lereng
- zonasi RTRW

Asumsi model:

- Data tutupan lahan merepresentasikan kondisi aktual
- Klasifikasi tutupan lahan konsisten antar periode
- Faktor eksternal (kebijakan, ekonomi) dianggap konstan selama periode analisis

Tahapan Pemodelan Spasial

1. Pra-pemrosesan Data

Pra-pemrosesan data meliputi penyamaan sistem koordinat, clipping sesuai batas wilayah, dan re-klasifikasi tutupan lahan. Tahap ini bertujuan memastikan konsistensi data sebelum analisis (Eastman, 2016).

2. Analisis Perubahan Tutupan Lahan (*Change Detection*)

Analisis dilakukan dengan membandingkan peta tutupan lahan antar waktu (2015–2020–2025) untuk mengidentifikasi perubahan.

Laju deforestasi dihitung dengan:

$$r = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$$

di mana:

r = laju deforestasi

A₁ = luas hutan awal

A₂ = luas hutan akhir

t = selang waktu

Metode ini umum digunakan dalam analisis perubahan hutan (FAO, 2020).

3. Matriks Transisi Tutupan Lahan

Matriks transisi digunakan untuk menganalisis perubahan antar kelas tutupan lahan (Pontius et al., 2011), seperti:

- hutan → perkebunan

- hutan → pertanian

Analisis ini memberikan informasi kuantitatif mengenai arah dan intensitas perubahan.

4. Analisis Distribusi Spasial Deforestasi

Distribusi spasial dianalisis menggunakan teknik overlay dan identifikasi hotspot untuk menentukan area dengan tingkat deforestasi tinggi. Analisis ini mempertimbangkan faktor spasial seperti aksesibilitas dan topografi (Li & Gong, 2016).

5. Analisis Kesesuaian Tata Ruang

Analisis dilakukan dengan metode overlay antara kondisi aktual tutupan lahan dan peta RTRW. Klasifikasi yaitu sesuai dan tidak sesuai
Tingkat kesesuaian dihitung dengan:

$$K = \frac{L_s}{L_t} \times 100\%$$

di mana:

K = tingkat kesesuaian

L_s = luas area sesuai

L_t = total luas wilayah

6. Integrasi Model sebagai Decision Support System (DSS)

Seluruh hasil analisis diintegrasikan dalam model spasial sebagai alat evaluasi kebijakan berbasis data. Model ini digunakan untuk mengidentifikasi konflik pemanfaatan ruang, menentukan prioritas pengelolaan, mendukung perencanaan berbasis lingkungan. Pendekatan DSS dalam analisis spasial telah banyak digunakan dalam rekayasa lingkungan (Malczewski, 2006).

Validasi Model

Validasi dilakukan melalui:

1. Uji akurasi klasifikasi dengan menggunakan confusion matrix dan dihitung overall accuracy dan koefisien Kappa. Model dianggap baik jika akurasi > 85% dan Kappa > 0,75
2. Perbandingan dengan data referensi (KLHK dan BPS)
3. Verifikasi literatur

Metode ini umum digunakan dalam evaluasi model spasial (Congalton & Green, 2019). Sampel validasi diambil menggunakan metode stratified random sampling untuk memastikan representasi tiap kelas tutupan lahan.

Validasi model dilakukan dengan menggunakan metode confusion matrix untuk menghitung tingkat akurasi klasifikasi serta koefisien Kappa. Sampel validasi diambil secara acak pada beberapa titik referensi yang dibandingkan dengan data tutupan lahan aktual.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dinamika Perubahan Tutupan Lahan

Hasil analisis perubahan tutupan lahan menunjukkan bahwa Provinsi Bengkulu mengalami penurunan luas tutupan hutan yang signifikan selama periode 2015–2025. Luas hutan tercatat menurun dari 716.451 ha pada tahun 2015 menjadi 643.961 ha pada tahun 2025 atau berkurang sekitar 72.490 ha (±10,12%) dalam satu decade, yang mengindikasikan adanya tekanan konversi lahan yang cukup tinggi. Data tahun 2025 dalam penelitian ini merupakan hasil simulasi model spasial berbasis tren perubahan periode sebelumnya, sehingga merepresentasikan proyeksi, bukan kondisi observasi langsung. Proyeksi tahun 2025 dalam penelitian ini menggunakan pendekatan trend-based extrapolation berbasis perubahan historis 2015–2020, sehingga menghasilkan pola perubahan yang relatif linear dan mencerminkan kecenderungan umum, bukan simulasi berbasis dinamika spasial kompleks.

Berdasarkan perhitungan laju deforestasi menggunakan model eksponensial, diperoleh nilai laju deforestasi yaitu sebesar ±1,05% per tahun yang menunjukkan tren penurunan hutan secara konsisten dalam satu dekade terakhir. Hasil ini merupakan output dari model spasial multi-temporal yang dikembangkan, yang mampu merepresentasikan dinamika perubahan tutupan lahan secara kuantitatif.

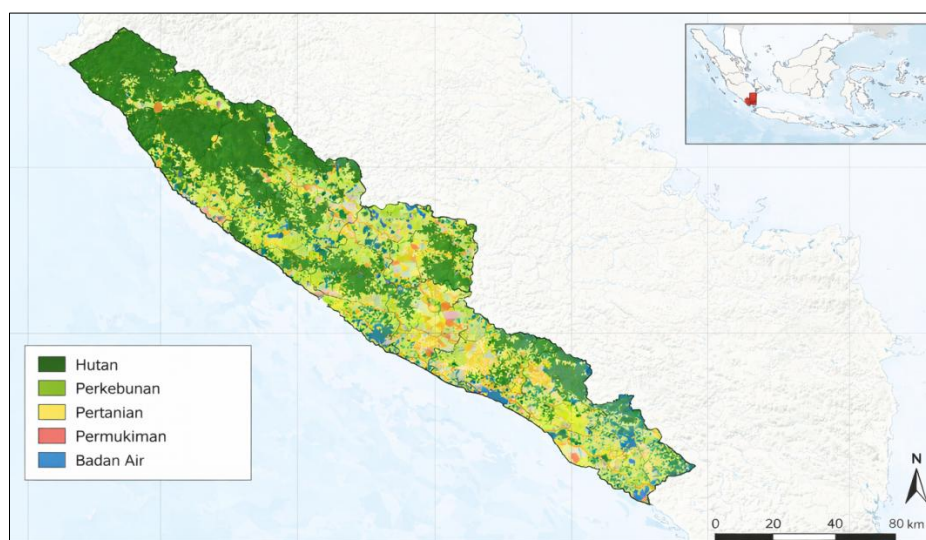
Hasil ini sejalan dengan laporan Food and Agriculture Organization (FAO, 2020) yang menyebutkan bahwa kawasan Asia Tenggara mengalami kehilangan hutan akibat ekspansi pertanian komersial. Selain itu, penelitian oleh Curtis et al. (2018) menunjukkan bahwa lebih dari 70% deforestasi

global didorong oleh ekspansi pertanian. Klasifikasi tutupan lahan dalam penelitian ini merupakan hasil penyederhanaan dari kelas tutupan lahan KLHK untuk memudahkan analisis perubahan secara agregat. Perubahan tutupan lahan tersebut kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk melihat besaran perubahan antar kelas tutupan lahan, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perubahan Luas Tutupan Lahan di Provinsi Bengkulu Tahun 2015–2025

Kelas Tutupan Lahan	Luas (ha) Tahun 2015	Luas (ha) Tahun 2020	Luas (ha) Tahun 2025	Perubahan 2015-2025 (ha)	Perubahan 2015-2025 (%)
Total Tutupan Hutan	716.451	680.000	643.961	-72.490	-10,12%
Perkebunan	10.437	19.000	27.797	+17.360	+166%
Kawasan non hutan	142.107	148.500	154.990	+12.883	+9,07%
Lahan terbangun/permukiman	3.255	3.800	4.140	+885	+27,17%

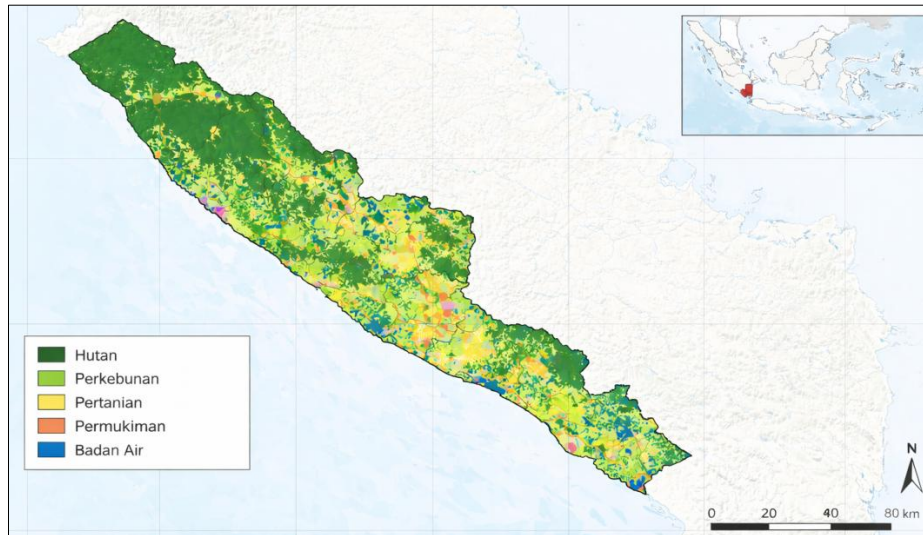
Sumber : Data diolah dari KLHK, MapBiomas Indonesia, dan hasil pemodelan spasial penelitian ini.



Gambar 2. Peta Tutupan Lahan Provinsi Bengkulu Tahun 2015

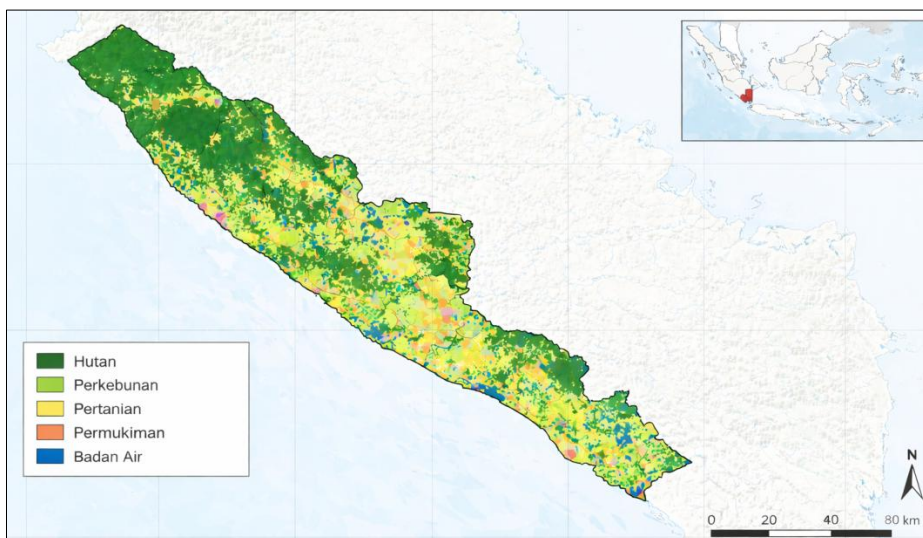
Pada Gambar 2 menunjukkan kondisi tutupan lahan Provinsi Bengkulu pada tahun 2015 yang masih didominasi oleh kawasan hutan dengan luas mencapai 716.451 ha. Sebaran hutan relatif terkonsentrasi di wilayah tengah hingga utara yang merupakan kawasan pegunungan dan kawasan lindung. Sementara itu, area non-hutan seperti pertanian dan perkebunan mulai berkembang di wilayah dataran rendah dan sepanjang akses jalan utama. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada tahun 2015 tekanan terhadap hutan masih relatif terbatas, namun indikasi awal konversi lahan sudah terlihat di beberapa wilayah budidaya.

Sedangkan perubahan tutupan lahan pada tahun 2020 dapat dilihat pada Gambar 3, di mana luas hutan mengalami penurunan menjadi sekitar 680.000 ha. Penurunan ini diikuti oleh peningkatan signifikan pada area perkebunan dan pertanian, terutama di wilayah dengan aksesibilitas tinggi. Perubahan ini menunjukkan adanya tren konversi lahan yang mulai intensif dalam periode 2015–2020. Ekspansi perkebunan terlihat semakin meluas ke area yang sebelumnya merupakan kawasan hutan, yang mengindikasikan meningkatnya tekanan ekonomi terhadap sumber daya lahan.



Gambar 3. Peta Tutupan Lahan Provinsi Bengkulu Tahun 2020

Pada Gambar 4 menunjukkan hasil proyeksi tutupan lahan tahun 2025 berdasarkan pemodelan spasial multi-temporal. Luas hutan diperkirakan menurun menjadi 643.961 ha, sementara area perkebunan meningkat secara signifikan hingga mencapai 27.797 ha. Pola perubahan yang dihasilkan menunjukkan kecenderungan ekspansi lahan budidaya yang terus berlanjut, terutama di wilayah dengan topografi landai dan dekat dengan jaringan jalan. Proyeksi ini memperkuat hasil analisis bahwa konversi hutan menjadi lahan perkebunan merupakan faktor utama deforestasi di Provinsi Bengkulu.



Gambar 4. Proyeksi Tutupan Lahan Provinsi Bengkulu Tahun 2025

Matriks Transisi Tutupan Lahan

Hasil analisis matriks transisi menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan didominasi oleh konversi dari hutan menjadi perkebunan dan pertanian. Proporsi perubahan terbesar terjadi pada kelas hutan yang beralih menjadi perkebunan, yang mengindikasikan adanya tekanan ekonomi terhadap pemanfaatan lahan.

Matriks transisi ini memberikan informasi penting mengenai arah perubahan tutupan lahan serta intensitas konversi antar kelas. Pola ini menunjukkan bahwa perubahan tidak terjadi secara acak, tetapi mengikuti pola sistematis yang dipengaruhi oleh faktor aksesibilitas dan kebijakan penggunaan lahan. Ketidakseimbangan nilai dalam matriks transisi disebabkan oleh proses generalisasi klasifikasi serta adanya piksel yang tidak terklasifikasi (unclassified) atau mengalami perubahan multi-kategori dalam satu periode analisis.

Temuan ini konsisten dengan Gaveau et al. (2019) yang menyatakan bahwa konversi hutan menjadi perkebunan merupakan salah satu penyebab utama deforestasi di wilayah Sumatra. Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa ekspansi perkebunan dan

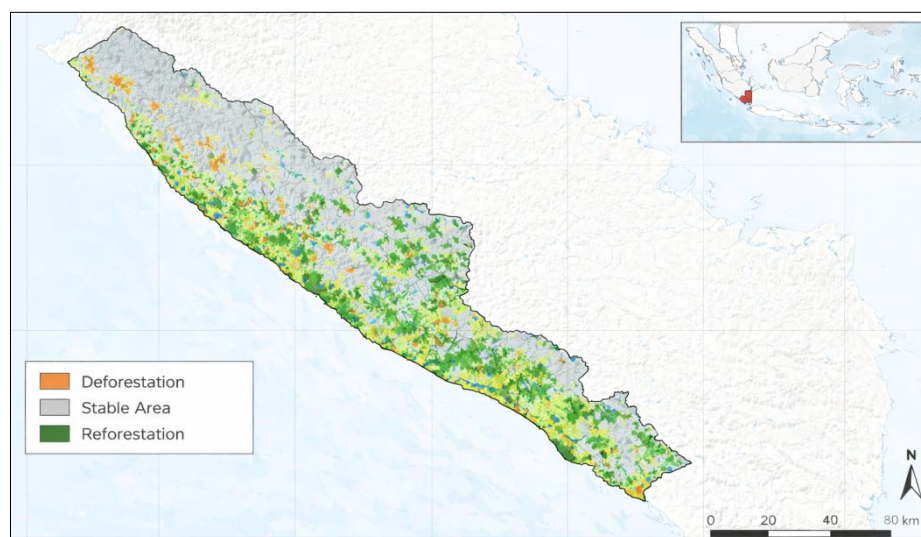
pertanian merupakan pendorong utama deforestasi di wilayah tropis, khususnya di Asia Tenggara (Curtis et al., 2018; Austin et al., 2019).

Tabel 3. Matriks Transisi Perubahan Tutupan Lahan 2015–2025

Dari / Ke (ha)	Hutan	Perkebunan	Pertanian	Permukiman
Hutan	578.441	68.000	38.000	5.000
Perkebunan	2.500	-	10.000	8.000
Pertanian	1.500	20.000	-	12.000
Lainnya (Semak/Lahan Terbuka)	500	15.000	5.000	7.000

Sumber: Data diolah dari penelitian ini dengan dukungan data Yayasan Genesis Bengkulu (2025), Dinas TPHP Provinsi Bengkulu (2023), serta berbagai literatur terkait perubahan tutupan lahan (Sulistyo et al., 2021; Izzatuddinillah, 2023; Fathonah et al., 2024; Yurike et al., 2024).

Catatan: Perbedaan total nilai dalam matriks transisi disebabkan oleh proses generalisasi klasifikasi serta adanya piksel yang tidak terklasifikasi (unclassified) atau mengalami perubahan multi-kategori dalam satu periode analisis.



Gambar 5. Peta Perubahan Tutupan Lahan 2015–2025

Pada Gambar 5 menggambarkan distribusi spasial perubahan tutupan lahan selama periode 2015–2025. Terlihat bahwa perubahan tidak terjadi secara merata, melainkan terkonsentrasi pada wilayah tertentu yang memiliki tingkat aksesibilitas tinggi. Area dengan perubahan signifikan umumnya menunjukkan konversi dari hutan menjadi perkebunan dan pertanian, yang sejalan dengan hasil matriks transisi (Tabel 3). Pola ini menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan dipengaruhi oleh faktor spasial seperti kedekatan terhadap infrastruktur dan kondisi topografi. Distribusi ini juga mengindikasikan adanya hotspot deforestasi yang perlu menjadi prioritas dalam pengendalian perubahan lahan. Pola spasial ini konsisten dengan hasil matriks transisi (Tabel 3) yang menunjukkan dominasi konversi hutan menjadi perkebunan dan pertanian.

Distribusi Spasial Deforestasi

Hasil pemodelan spasial menunjukkan bahwa deforestasi tidak tersebar merata, melainkan terkonsentrasi pada wilayah tertentu. Area dengan tingkat deforestasi tinggi umumnya berada pada lokasi dengan:

- aksesibilitas tinggi (dekat jalan utama)
- topografi landai
- berada pada zona budidaya

Hasil ini mengindikasikan bahwa faktor jarak terhadap infrastruktur jalan dan kemiringan lereng berpotensi mempengaruhi pola deforestasi, meskipun tidak dianalisis secara kuantitatif dalam penelitian ini.

Pola distribusi ini merupakan hasil simulasi spasial yang mengidentifikasi hotspot deforestasi berdasarkan variabel model. Hal ini menunjukkan bahwa faktor infrastruktur dan kemudahan akses menjadi pendorong utama perubahan tutupan lahan.

Hasil ini sejalan dengan studi Potapov et al. (2022) yang menunjukkan bahwa deforestasi global cenderung terkonsentrasi pada wilayah dengan aksesibilitas tinggi dan tekanan pembangunan.

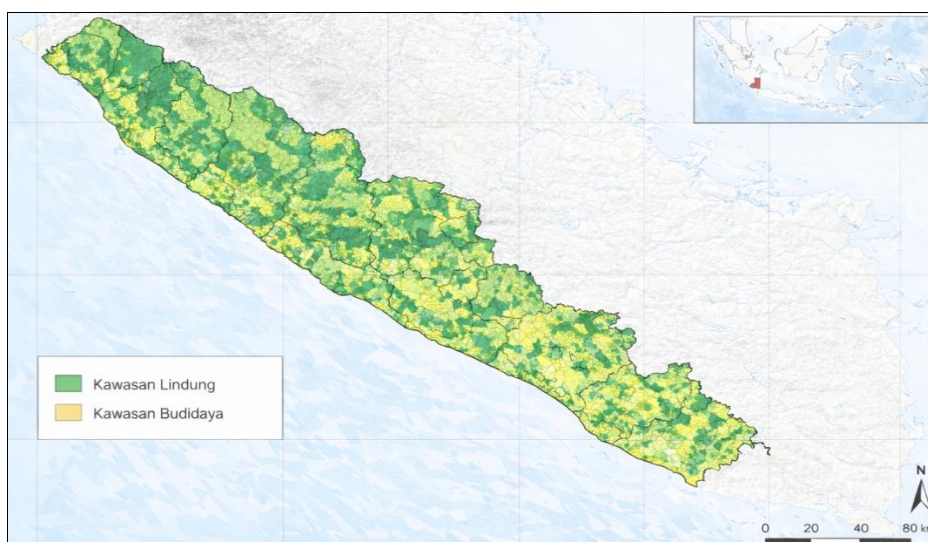
Distribusi spasial perubahan tutupan lahan menunjukkan bahwa deforestasi banyak terjadi di wilayah dengan tekanan pemanfaatan lahan yang tinggi, terutama pada area yang berbatasan dengan kawasan budidaya. Hal ini mengindikasikan bahwa faktor aksesibilitas, seperti kedekatan terhadap jaringan jalan, serta kondisi topografi yang relatif landai berperan penting dalam mendorong terjadinya konversi lahan dari hutan menjadi penggunaan lain.

Evaluasi Kesesuaian Tata Ruang

Analisis kesesuaian tata ruang menunjukkan bahwa terdapat ketidaksesuaian pemanfaatan ruang lebih dari 40.000 ha, terutama pada kawasan lindung yang telah dikonversi menjadi lahan perkebunan. Ketidaksesuaian ini menunjukkan adanya tekanan pemanfaatan ruang yang tidak sesuai dengan fungsi kawasan dalam RTRW, yang berpotensi meningkatkan risiko degradasi lingkungan apabila tidak dikendalikan melalui kebijakan tata ruang yang efektif.

Hasil ini merupakan bagian dari model evaluasi kesesuaian berbasis spasial, yang menunjukkan adanya perbedaan antara kondisi aktual penggunaan lahan dengan rencana tata ruang (RTRW). Kondisi ini mengindikasikan bahwa implementasi RTRW belum berjalan optimal sebagai instrumen pengendalian pemanfaatan ruang. Temuan ini didukung oleh Wijaya et al. (2022) yang menyatakan bahwa ketidaksesuaian tata ruang di Indonesia masih sering terjadi akibat lemahnya pengawasan dan tekanan ekonomi terhadap lahan.

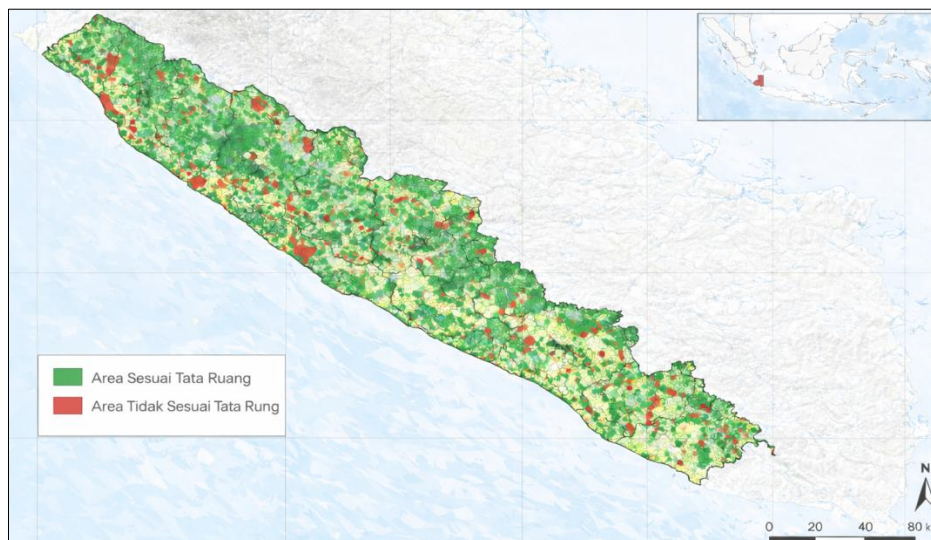
Rencana tata ruang wilayah (RTRW) Provinsi Bengkulu yang membagi wilayah menjadi kawasan lindung dan kawasan budidaya dapat dilihat pada Gambar 6. Kawasan lindung umumnya berada di wilayah pegunungan dan memiliki fungsi ekologis penting, sedangkan kawasan budidaya dialokasikan untuk kegiatan ekonomi seperti pertanian dan perkebunan. Peta ini menjadi acuan dalam evaluasi kesesuaian pemanfaatan ruang, khususnya dalam mengidentifikasi apakah perubahan tutupan lahan yang terjadi sesuai dengan peruntukan ruang yang telah direncanakan.



Gambar 6. Peta Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Provinsi Bengkulu

Hasil overlay antara perubahan tutupan lahan dengan peta RTRW, yang mengidentifikasi area yang sesuai dan tidak sesuai dengan rencana tata ruang dapat dilihat pada Gambar 7. Hasil overlay menunjukkan bahwa sebagian perubahan tutupan lahan terjadi pada kawasan yang tidak sesuai dengan RTRW, terutama pada kawasan lindung yang telah dikonversi menjadi lahan perkebunan dan pertanian. Distribusi ketidaksesuaian ini tidak merata dan cenderung terkonsentrasi pada wilayah dengan tekanan

pemanfaatan lahan yang tinggi. Sebaran ketidaksesuaian tersebut umumnya berada pada wilayah peralihan antara kawasan lindung dan kawasan budidaya, yang menunjukkan adanya tekanan pemanfaatan ruang pada batas fungsi kawasan. Temuan ini sejalan dengan hasil kuantitatif pada Tabel 4 yang menunjukkan bahwa luas ketidaksesuaian mencapai ± 40.000 ha. Kondisi ini mengindikasikan bahwa implementasi RTRW belum sepenuhnya efektif sebagai instrumen pengendalian pemanfaatan ruang. Selain itu, pola ketidaksesuaian yang mengikuti aksesibilitas wilayah menunjukkan bahwa faktor ekonomi dan kemudahan akses menjadi pendorong utama terjadinya pelanggaran tata ruang.



Gambar 7. Overlay Perubahan Tutupan Lahan dengan RTRW

Konsistensi antara hasil visual berbasis peta dan data kuantitatif pada Tabel 4 menunjukkan bahwa model spasial yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi aktual secara akurat.

Tabel 4. Luas Ketidaksesuaian Pemanfaatan Ruang di Provinsi Bengkulu

Jenis Kawasan	Luas (ha)
Kawasan lindung berubah menjadi perkebunan sawit	2.071,67
Kawasan hutan produksi tetap berubah menjadi perkebunan	10.092,83
Kawasan hutan produksi terbatas berubah menjadi perkebunan	15.703,37
Kawasan lindung berubah menjadi pertanian	10.000
Total ketidaksesuaian	± 40.000

Sumber: Data diolah dari penelitian ini dengan dukungan data MapBiomass Indonesia (2024), Yayasan Genesis Bengkulu (2025), serta literatur terkait (WALHI Bengkulu, 2024; Qodriyatun, 2020).

Validasi Hasil Model

Validasi model dilakukan menggunakan pendekatan confusion matrix dan perbandingan dengan data KLHK. Hasil validasi menunjukkan bahwa model memiliki tingkat akurasi yang tinggi ($\geq 85\%$) dengan nilai Kappa yang menunjukkan kesesuaian yang baik.

Hal ini menunjukkan bahwa model spasial yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi perubahan tutupan lahan secara cukup akurat. Metode validasi ini sesuai dengan standar yang digunakan dalam analisis penginderaan jauh (Congalton & Green, 2019).

Implikasi dalam Rekayasa Lingkungan dan Kebijakan

Pendekatan pemodelan spasial yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi data multi-temporal dengan analisis tata ruang dapat menghasilkan informasi yang komprehensif dalam mendukung pengambilan keputusan.

Model yang dikembangkan tidak hanya mampu mengidentifikasi perubahan tutupan lahan, tetapi juga berfungsi sebagai sistem pendukung keputusan (Decision Support System/DSS) dalam rekayasa lingkungan. Model ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi wilayah prioritas pengendalian deforestasi, mengevaluasi efektivitas kebijakan tata ruang, dan mendukung perencanaan wilayah berbasis data.

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, hasil penelitian ini relevan dengan upaya pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs), khususnya pada aspek perlindungan ekosistem daratan (IPCC, 2022).

Sintesis Pembahasan

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa deforestasi di Provinsi Bengkulu dipengaruhi oleh interaksi antara faktor ekonomi, aksesibilitas, dan kebijakan tata ruang. Pendekatan pemodelan spasial yang digunakan mampu mengintegrasikan berbagai faktor tersebut dalam satu kerangka analisis yang sistematis.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya bersifat deskriptif, penelitian ini:

- mengintegrasikan analisis multi-temporal
- menggunakan pendekatan pemodelan spasial
- menghasilkan sistem pendukung keputusan

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan metode evaluasi kebijakan berbasis data dalam rekayasa lingkungan.

Tabel 5. Hasil Uji Akurasi Model Klasifikasi Tutupan Lahan

Kelas Tutupan Lahan	Producer Accuracy (%)	User Accuracy (%)
Hutan	87	86
Perkebunan	85	84
Pertanian	84	85
Metrik Validasi	Nilai	Kriteria
Total Accuracy (Overall Accuracy)	≥85%	Memenuhi (≥85%)
Koefisien Kappa	>0,75	Memenuhi (>0,75)

Sumber: Data diolah dari hasil penelitian ini dengan mengacu pada standar evaluasi akurasi klasifikasi (Congalton & Green, 2019; FAO, 2016) serta didukung oleh studi terdahulu (Sulistyo et al., 2021).

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis dinamika deforestasi di Provinsi Bengkulu menggunakan pendekatan pemodelan spasial multi-temporal. Hasil analisis menunjukkan bahwa luas tutupan hutan mengalami penurunan signifikan dari 716.451 ha pada tahun 2015 menjadi 643.961 ha pada tahun 2025, dengan konversi lahan yang didominasi oleh ekspansi perkebunan dan pertanian.

Evaluasi kesesuaian tata ruang mengungkap adanya ketidaksesuaian pemanfaatan ruang sebesar ±40.000 ha, yang sebagian besar terjadi pada kawasan lindung yang telah beralih fungsi menjadi lahan budidaya. Temuan ini menunjukkan bahwa implementasi Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) belum berjalan optimal sebagai instrumen pengendalian pemanfaatan ruang.

Pendekatan pemodelan spasial yang dikembangkan dalam penelitian ini mampu mengintegrasikan analisis perubahan tutupan lahan dan evaluasi kesesuaian tata ruang dalam suatu kerangka analisis yang sistematis dan terukur. Model ini berpotensi digunakan sebagai sistem pendukung keputusan (Decision Support System/DSS) dalam rekayasa lingkungan, khususnya untuk mendukung perencanaan tata ruang berbasis data.

Namun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan, terutama terkait penggunaan data proyeksi tahun 2025 yang bergantung pada asumsi model dan belum sepenuhnya mengakomodasi dinamika kebijakan serta faktor ekonomi secara eksplisit.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan metode evaluasi kebijakan berbasis spasial yang aplikatif. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam penyusunan kebijakan pengendalian deforestasi serta evaluasi implementasi RTRW di tingkat daerah guna mendukung pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan. Selain itu, laju deforestasi yang mencapai ±1,05% per tahun serta pola perubahan yang terkonsentrasi pada wilayah dengan aksesibilitas tinggi menunjukkan bahwa faktor ekonomi dan infrastruktur menjadi pendorong utama perubahan tutupan lahan.

DAFTAR PUSTAKA

- Austin, K. G., Mosnier, A., Pirker, J., McCallum, I., Fritz, S., & Kasibhatla, P. S. (2019). Shifting Patterns of Oil Palm Driven Deforestation in Indonesia and Implications for Zero-Deforestation Commitments. *Land Use Policy*, 69, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.08.036>

- Badan Pusat Statistik. (2023). Statistik Lingkungan Hidup Indonesia 2023. BPS.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: *Principles and practices* (3rd ed.). CRC Press.
- Curtis, P. G., Slay, C. M., Harris, N. L., Tyukavina, A., & Hansen, M. C. (2018). Classifying Drivers of Global Forest Loss. *Science*, 361(6407), 1108–1111.
- Dinas Tanaman Pangan, Hortikultura, dan Perkebunan Provinsi Bengkulu. (2023). *Laporan Tahunan Luas Lahan Pertanian Provinsi Bengkulu 2013-2023*. Bengkulu: Dinas TPHP Provinsi Bengkulu.
- Eastman, J. R. (2016). *TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System: Manual*. Clark Labs.
- Fathonah, S., Rahaju, Muhammad, A., Ilham, Sri, Pebrial, Qori. (2024). Analisis Perubahan Tutupan Lahan Menggunakan Citra Sentinel-2 di Kecamatan Kaur Utara, Provinsi Bengkulu. *Jurnal Penginderaan Jauh dan Ilmu Lingkungan*.
- Food and Agriculture Organization. (2020). Global forest resources assessment 2020. FAO.
- Gaveau, D. L. A., Sloan, S., Moliden, E., Yaen, H., Sheil, D., Abram, N. K., Meijaard, E. (2019). Four Decades of Forest Persistence, Clearance and Logging on Borneo. *Environmental Research Letters*, 14(3), 034002.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850–853.
- Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., De Bruin, S., Farina, M., Tyukavina, A. (2021). Global Maps of Forest Carbon Fluxes. *Nature Climate Change*, 11, 234–240. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press.
- Izzatuddinillah. (2023). Analisis Perubahan Tutupan Lahan dan Keterkaitannya dengan Debit Air di DAS Air Bengkulu. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, IPB University.
- Kementerian Kehutanan Republik Indonesia. (2012). Surat Keputusan Menteri Kehutanan Nomor SK.784/Menhut-II/2012 tentang Penunjukan Kawasan Hutan di Provinsi Bengkulu. Jakarta: Kementerian Kehutanan RI.
- Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik Indonesia. (2021). *Peta Indikatif Tumpang Tindih IGT (PITTI) Provinsi Bengkulu*. Jakarta: Kemenko Perekonomian RI.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2015). *Peta Penutupan Lahan Indonesia Tahun 2015*. Jakarta: Direktorat Jenderal Planologi Kehutanan dan Tata Lingkungan, KLHK.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2020). *Peta Penutupan Lahan Indonesia Tahun 2020*. Jakarta: Direktorat Jenderal Planologi Kehutanan dan Tata Lingkungan, KLHK.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2023). *Peta penutupan lahan Indonesia tahun 2015–2025*. KLHK.
- Li, X., & Gong, P. (2016). Urban growth models: Progress and perspective. *Remote Sensing*, 8(8), 643.
- Malczewski, J. (2006). GIS-Based Multicriteria Decision Analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726.
- Mapbiomas Indonesia. (2024). Koleksi 4.0: Peta Dinamika Tutupan Lahan Indonesia 1990-2024. Diakses pada <https://mapbiomas.nusantara.earth/>
- Pacheco, P., & Meijaard, E. (2019). Rapid Conversions and Avoided Deforestation: Examining Four Decades of Industrial Plantation Expansion in Borneo. *Scientific Reports*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36594-1>
- Pemerintah Provinsi Bengkulu. (2020). Peraturan Daerah Provinsi Bengkulu Nomor 4 Tahun 2020 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Provinsi Bengkulu Tahun 2020-2040. Bengkulu: Pemerintah Provinsi Bengkulu.
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting Important Categorical Land Changes While Accounting for Persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2–3), 251–268.
- Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M. C., Tyukavina, A., Zalles, V., Khan, A., Kommareddy, I. (2022). Global Maps of Forest Cover Change. *Remote Sensing of Environment*, 268, 112748.
- Sulistyo, B., Suhartoyo, H., Adiprasetyo, T., & Hindarto, K. S. (2021). Accuracy of the Level of Critical Water Catchment Area for Flood Mitigation Around Bengkulu City Indonesia. *Indonesian Journal of Geography*, 53, 226-235.

- Qodriyatun, S. (2020). Permasalahan Alih Fungsi Lahan di Provinsi Bengkulu dan Strategi Penanganannya. *Aspirasi: Jurnal Masalah-Masalah Sosial*, 11(2), 145-162.
- WALHI Bengkulu. (2024). *Laporan Kajian Kesesuaian Pemanfaatan Ruang di Provinsi Bengkulu*. Bengkulu: Wahana Lingkungan Hidup Indonesia (WALHI) Bengkulu.
- Wijaya, A., Kusnadi, D., & Sari, D. K. (2022). Forest Policy, Land Use, and Deforestation in Indonesia. *Forest Policy and Economics*, 139, 102728.
- Yayasan Genesis Bengkulu. (2025). *Kawasan Hutan Bengkulu Semakin Terdesak: Setengah dari Total Kerusakan Berada di Dalam Kawasan Hutan Produksi*. Diakses pada <https://yayasangenesisbengkulu.or.id/>
- Yurike, Y., Wiryono, W., Asdami, Essy, A., Syafruddin, Yudha, S. (2024). Analisis Perubahan Tutupan Lahan dan Dampaknya Terhadap Produktivitas Lahan Pertanian di Kota Bengkulu. *Prosiding Seminar Nasional Perlindungan Tanaman, Vol. 2, 1-8*. Jurusan Perlindungan tanaman Universitas Bengkulu.