

PRIORITAS REHABILITASI LANSKAP TERDEGRADASI BERBASIS NDVI, NBR, FRAGMENTASI, *RANDOM FOREST*, DAN AHP DI PROVINSI BENGKULU

PRIORITIZING DEGRADED LANDSCAPE REHABILITATION USING NDVI, NBR, FRAGMENTATION, RANDOM FOREST, AND AHP IN BENGKULU PROVINCE

¹Iman Darmatama, ²Zakhi Restu Pratama, ³Kemal Alfarid Akbar

^{1,2)} Program Studi Pengelolaan Sumber Daya Alam, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Bengkulu,
Indonesia

Jl. WR Supratman, Kandang Limun, Kec. Muara Bangkahulu, Kota Bengkulu, Bengkulu 38371
Email: idarmatama@gmail.com

³⁾ Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia
Jl. WR Supratman, Kandang Limun, Kec. Muara Bangkahulu, Kota Bengkulu, Bengkulu 38371

Diterima: 02 April 2026; Direvisi: 05 Mei 2026; Disetujui: 23 Juni 2026

ABSTRACT

Landscape degradation caused by declining vegetation quality, habitat fragmentation, and increasing land-use pressure has become a major challenge for sustainable natural resource management in Bengkulu Province, Indonesia. This study aims to identify the level of landscape degradation, analyze the dominant factors influencing degradation, and determine watershed-based rehabilitation priority areas. The analysis utilized Sentinel-2 and Landsat imagery from 2015-2025 integrated with slope, road network, watershed (DAS), Regional Spatial Planning (RTRW), and flood and landslide risk data. Landscape degradation was assessed using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Burn Ratio (NBR), and landscape fragmentation metrics. Random Forest analysis was employed to identify dominant factors (Overall Accuracy = 89.2%, Kappa = 0.87), while the Analytical Hierarchy Process (AHP) was applied to establish rehabilitation priorities (CR = 0.068). The results indicate that approximately 156,000 ha (7.8%) of Bengkulu Province are classified as degraded to highly degraded, with a Fragmentation Index value of 0.65, indicating a high level of landscape fragmentation. Random Forest analysis revealed that vegetation condition, landscape fragmentation, and road accessibility were the most influential factors driving degradation. Spatial analysis showed that degraded areas tend to be concentrated near road networks and in areas inconsistent with regional spatial planning. The integration of all indicators identified 129,800 ha as high to very high rehabilitation priority areas, primarily located within the Air Bengkulu, Ketahun, and Seluma watersheds. These findings demonstrate that an integrated approach combining NDVI, NBR, landscape fragmentation, Random Forest, and AHP provides a comprehensive scientific basis for landscape rehabilitation planning and sustainable spatial management in Bengkulu Province.

Keywords: *landscape rehabilitation; NDVI; landscape fragmentation; spatial planning; Bengkulu Province.*

ABSTRAK

Degradasi lanskap akibat penurunan kualitas vegetasi, fragmentasi habitat, dan tekanan pemanfaatan ruang menjadi tantangan utama dalam pengelolaan sumber daya alam berkelanjutan di Provinsi Bengkulu. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat degradasi lanskap, menganalisis faktor-faktor yang memengaruhinya, serta menentukan kawasan prioritas rehabilitasi berbasis daerah aliran sungai (DAS). Analisis dilakukan menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat periode 2015-2025 yang diintegrasikan

dengan data kemiringan lereng, jaringan jalan, DAS, Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW), serta peta risiko banjir dan longsor. Tingkat degradasi lanskap dievaluasi menggunakan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Burn Ratio* (NBR), dan metrik fragmentasi lanskap. Faktor-faktor dominan penyebab degradasi diidentifikasi menggunakan *Random Forest* (akurasi keseluruhan 89,2%; *Kappa* 0,87), sedangkan penentuan prioritas rehabilitasi dilakukan melalui metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dengan *Consistency Ratio* (CR) 0,068. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sekitar 156.000 ha (7,8%) wilayah Provinsi Bengkulu berada pada kondisi terdegradasi hingga sangat terdegradasi, dengan nilai *Fragmentation Index* sebesar 0,65 yang mengindikasikan tingkat fragmentasi lanskap yang tinggi. Analisis *Random Forest* menunjukkan bahwa kondisi vegetasi, fragmentasi lanskap, dan aksesibilitas jalan merupakan faktor dominan yang memengaruhi degradasi. Area terdegradasi cenderung terkonsentrasi di sekitar jaringan jalan dan kawasan yang tidak sesuai dengan arahan RTRW. Integrasi seluruh indikator menghasilkan kawasan prioritas rehabilitasi kategori tinggi hingga sangat tinggi seluas 129.800 ha yang terutama tersebar pada DAS Air Bengkulu, DAS Ketahun, dan DAS Seluma. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan integratif berbasis NDVI, NBR, fragmentasi lanskap, *Random Forest*, dan AHP mampu menyediakan dasar ilmiah yang komprehensif untuk mendukung rehabilitasi lanskap dan pengelolaan tata ruang berkelanjutan di Provinsi Bengkulu.

Kata kunci: rehabilitasi lanskap; NDVI; fragmentasi lanskap; tata ruang; Provinsi Bengkulu.

PENDAHULUAN

Degradasi lanskap merupakan salah satu tantangan utama dalam pengelolaan sumber daya alam berkelanjutan di wilayah tropis, termasuk Indonesia. Degradasi tidak hanya ditandai oleh hilangnya tutupan hutan, tetapi juga oleh penurunan kualitas vegetasi, meningkatnya fragmentasi habitat, serta terganggunya fungsi ekologis suatu kawasan. Kondisi tersebut berdampak pada menurunnya kemampuan lingkungan dalam menyediakan jasa ekosistem, seperti pengaturan tata air, penyimpanan karbon, konservasi keanekaragaman hayati, dan perlindungan terhadap bencana hidrometeorologi. Menurut Food and Agriculture Organization (FAO, 2020), rehabilitasi lanskap merupakan pendekatan strategis untuk memulihkan fungsi ekosistem sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan. Pendekatan ini juga menjadi bagian penting dalam implementasi Forest Landscape Restoration (FLR) yang mendukung pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya tujuan ke-6 (air bersih dan sanitasi), ke-13 (penanganan perubahan iklim), dan ke-15 (ekosistem daratan). Selain pemulihan tutupan vegetasi, rehabilitasi lanskap diarahkan untuk meningkatkan integritas ekologis, konektivitas habitat, dan ketahanan sosial-ekologis suatu wilayah (Reed et al., 2020).

Provinsi Bengkulu memiliki luas wilayah sekitar 19.919,33 km² dengan karakteristik fisiografi yang didominasi Pegunungan Bukit Barisan, curah hujan tinggi, serta sejumlah daerah aliran sungai (DAS) yang bermuara ke Samudera Hindia. Dalam beberapa dekade terakhir, pertumbuhan penduduk, ekspansi perkebunan, pembangunan infrastruktur, dan perubahan penggunaan lahan telah meningkatkan tekanan terhadap lanskap. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan kualitas vegetasi, meningkatkan fragmentasi habitat, serta mengganggu fungsi hidrologis DAS yang pada akhirnya meningkatkan risiko erosi, sedimentasi, banjir, dan longsor. Data Direktorat Jenderal Pengendalian DAS dan Rehabilitasi Hutan (KLHK, 2023) menunjukkan bahwa beberapa DAS di Provinsi Bengkulu mengalami peningkatan tekanan penggunaan lahan yang berpotensi menurunkan kualitas lingkungan dan fungsi hidrologisnya.

Penelitian Ardiansyah dan Suryadi (2021) menunjukkan bahwa analisis berbasis NDVI efektif untuk mendeteksi perubahan kondisi vegetasi, namun belum mempertimbangkan aspek struktur lanskap dan faktor tata ruang. Sementara itu, Putra et al. (2022) berfokus pada analisis fragmentasi lanskap untuk mengevaluasi konektivitas habitat, tetapi belum mengintegrasikan indikator biofisik lainnya seperti kondisi vegetasi, risiko lingkungan, dan fungsi hidrologi DAS. Dengan demikian, masih terdapat keterbatasan penelitian yang mengintegrasikan indikator kesehatan vegetasi, struktur lanskap, aksesibilitas, risiko bencana, fungsi DAS, dan

kesesuaian tata ruang ke dalam satu kerangka analisis spasial untuk menentukan prioritas rehabilitasi lanskap secara komprehensif. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut melalui pendekatan integratif yang mengombinasikan NDVI, NBR, metrik fragmentasi lanskap, *Random Forest*, *Kernel Density*, dan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk menentukan prioritas rehabilitasi lanskap di Provinsi Bengkulu.

Perkembangan teknologi penginderaan jauh dan sistem informasi geografis memungkinkan pemantauan degradasi lanskap secara lebih efektif. Citra Sentinel-2 dan Landsat dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi vegetasi melalui *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Normalized Burn Ratio* (NBR). NDVI menggambarkan tingkat kehijauan dan produktivitas vegetasi, sedangkan NBR sensitif terhadap perubahan biomassa dan gangguan vegetasi (Nadzirah et al., 2023). Selain itu, kondisi struktur lanskap dapat dianalisis melalui metrik fragmentasi seperti *Patch Density* (PD), *Edge Density* (ED), *Largest Patch Index* (LPI), dan *Fragmentation Index* (FI). Integrasi NDVI, NBR, dan metrik fragmentasi memungkinkan identifikasi degradasi lanskap yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan berbasis perubahan tutupan lahan semata (Arifin et al., 2020).

Dalam menentukan prioritas rehabilitasi, perlu dipertimbangkan berbagai faktor yang memengaruhi tingkat kerentanan dan urgensi pemulihan suatu wilayah, antara lain aksesibilitas jalan, kondisi DAS, kemiringan lereng, risiko banjir dan longsor, serta kesesuaian pemanfaatan ruang dengan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW). Untuk mengidentifikasi faktor-faktor dominan penyebab degradasi digunakan pendekatan *Random Forest*, sedangkan penentuan prioritas rehabilitasi dilakukan menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Kombinasi kedua pendekatan tersebut memungkinkan identifikasi faktor pengendali degradasi sekaligus menghasilkan prioritas rehabilitasi yang lebih objektif dan terukur.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat degradasi lanskap di Provinsi Bengkulu menggunakan NDVI, NBR, dan metrik fragmentasi lanskap, menganalisis faktor-faktor dominan yang memengaruhi degradasi menggunakan *Random Forest*, serta menentukan kawasan prioritas rehabilitasi melalui pendekatan AHP. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi indikator kesehatan vegetasi, fragmentasi lanskap, aksesibilitas jalan, kondisi DAS, risiko bencana, dan kesesuaian tata ruang dalam satu kerangka analisis spasial terpadu. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar ilmiah dalam penyusunan strategi rehabilitasi lanskap, pengelolaan DAS, dan perencanaan tata ruang yang lebih efektif dan berkelanjutan di Provinsi Bengkulu.

TINJAUAN PUSTAKA

Degradasi Lanskap dan Rehabilitasi Lanskap

Degradasi lanskap merupakan proses penurunan kualitas lingkungan yang ditandai oleh berkurangnya fungsi ekologis, produktivitas lahan, dan kemampuan ekosistem dalam menyediakan jasa lingkungan. Degradasi tidak hanya terjadi akibat hilangnya tutupan hutan, tetapi juga dapat berupa penurunan kualitas vegetasi, perubahan struktur habitat, erosi tanah, gangguan hidrologi, serta meningkatnya tekanan akibat aktivitas manusia.

Menurut Food and Agriculture Organization (FAO, 2020), rehabilitasi lanskap merupakan upaya pemulihan fungsi ekologis, sosial, dan ekonomi suatu kawasan melalui pendekatan terpadu yang mempertimbangkan kebutuhan konservasi dan pembangunan. Pendekatan lanskap semakin banyak digunakan karena mampu menjembatani berbagai kepentingan penggunaan lahan, termasuk kehutanan, pertanian, infrastruktur, dan kesejahteraan masyarakat. Reed et al. (2020) menjelaskan bahwa *integrated landscape approaches* bertujuan menyeimbangkan berbagai kepentingan dalam suatu lanskap melalui tata kelola yang adaptif dan kolaboratif sehingga dapat meningkatkan keberlanjutan pengelolaan sumber daya alam.

Dalam konteks rehabilitasi, identifikasi wilayah terdegradasi menjadi tahapan penting untuk memastikan bahwa intervensi dilakukan pada lokasi yang tepat. Penentuan prioritas rehabilitasi yang hanya didasarkan pada perubahan tutupan lahan sering kali belum mampu menggambarkan kondisi aktual di lapangan. Sehingga diperlukan pendekatan yang dapat mengevaluasi kondisi vegetasi, struktur lanskap, serta faktor-faktor yang memengaruhi degradasi secara bersamaan.

NDVI dan NBR dalam Identifikasi Degradasi Vegetasi

Pemanfaatan data penginderaan jauh telah berkembang menjadi salah satu metode utama dalam pemantauan kondisi vegetasi. Salah satu indeks yang paling banyak digunakan adalah *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). NDVI dihitung dari perbedaan reflektansi pita merah (*red*) dan inframerah dekat (*near infrared/NIR*) untuk menggambarkan tingkat kehijauan dan kesehatan vegetasi. Secara matematis, NDVI dirumuskan sebagai:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Nilai NDVI berkisar antara -1 hingga $+1$. Nilai yang mendekati $+1$ menunjukkan vegetasi yang rapat dan sehat, sedangkan nilai yang rendah mengindikasikan vegetasi jarang atau lahan terbuka. Nadzirah et al. (2023) menyatakan bahwa NDVI pada citra Sentinel-2 mampu memberikan informasi yang baik untuk mengevaluasi kondisi vegetasi dan klasifikasi tutupan lahan pada wilayah tropis.

Selain NDVI, *Normalized Burn Ratio* (NBR) banyak digunakan untuk mendeteksi gangguan vegetasi, termasuk kebakaran hutan dan degradasi ekosistem. NBR memanfaatkan pita NIR dan *short-wave infrared* (SWIR) sehingga lebih sensitif terhadap perubahan kadar air vegetasi. Persamaan NBR dituliskan sebagai berikut:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Arifin et al. (2020) menunjukkan bahwa kombinasi NDVI dan NBR dapat meningkatkan kemampuan deteksi devegetasi dan revegetasi dibandingkan penggunaan satu indeks saja. Integrasi kedua indeks tersebut memungkinkan identifikasi degradasi vegetasi secara lebih komprehensif, terutama pada wilayah tropis yang memiliki dinamika penggunaan lahan yang tinggi.

Fragmentasi Lanskap sebagai Indikator Kualitas Ekosistem

Fragmentasi lanskap merupakan proses terpecahnya habitat yang sebelumnya kontinu menjadi unit-unit yang lebih kecil akibat perubahan penggunaan lahan atau pembangunan infrastruktur. Kondisi ini dapat menyebabkan penurunan konektivitas habitat, meningkatnya efek tepi (*edge effect*), serta berkurangnya kemampuan ekosistem dalam mendukung keanekaragaman hayati. Menurut Haddad et al. (2019), fragmentasi habitat merupakan salah satu penyebab utama hilangnya keanekaragaman hayati secara global karena mengubah struktur dan fungsi ekosistem dalam jangka panjang. Fragmentasi juga dapat mengurangi kemampuan lanskap dalam menyediakan jasa lingkungan, termasuk pengaturan tata air dan penyimpanan karbon.

Analisis fragmentasi umumnya menggunakan beberapa metrik spasial, antara lain:

- *Patch Density* (PD), yaitu jumlah *patch* per satuan luas;
- *Edge Density* (ED), yaitu panjang total batas antar *patch*;
- *Largest Patch Index* (LPI), yaitu persentase *patch* terbesar terhadap total luas lanskap;

- *Fragmentation Index* (FI), yaitu indeks gabungan yang menggambarkan tingkat keterpecahan lanskap.

Semakin tinggi nilai FI menunjukkan semakin tinggi tingkat fragmentasi dan semakin rendah konektivitas habitat. Fragmentasi yang tinggi umumnya berkaitan dengan tekanan antropogenik seperti pembukaan lahan, pembangunan infrastruktur, dan perubahan penggunaan lahan. Fragmentasi lanskap dapat digunakan sebagai indikator degradasi ekologis karena menggambarkan penurunan kualitas habitat dan fungsi ekosistem. Dalam penelitian ini, metrik fragmentasi digunakan untuk mendukung identifikasi tingkat degradasi dan penentuan prioritas rehabilitasi lanskap.

Pengaruh Aksesibilitas Jalan dan Kesesuaian Tata Ruang terhadap Degradasi Lanskap

Jaringan jalan memiliki peran penting dalam pembangunan wilayah karena meningkatkan konektivitas dan aksesibilitas. Namun, keberadaan jalan juga sering dikaitkan dengan meningkatnya tekanan terhadap sumber daya alam. Jalan membuka akses menuju kawasan yang sebelumnya sulit dijangkau sehingga dapat memicu pembukaan lahan, eksploitasi sumber daya hutan, serta perubahan penggunaan lahan.

Laurance et al. (2018) menjelaskan bahwa pembangunan jalan di kawasan tropis sering menjadi pemicu awal berbagai bentuk degradasi lingkungan karena meningkatkan intensitas aktivitas manusia pada kawasan alami. Analisis *buffer* jalan banyak digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara kedekatan terhadap jalan dan tingkat degradasi lanskap.

Selain faktor aksesibilitas, kesesuaian pemanfaatan ruang terhadap Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) juga menjadi aspek penting dalam pengelolaan lanskap. RTRW berfungsi sebagai instrumen pengendalian pemanfaatan ruang agar sesuai dengan daya dukung lingkungan dan tujuan pembangunan wilayah. Ketidaksesuaian antara penggunaan lahan aktual dengan arahan RTRW dapat meningkatkan risiko degradasi dan konflik pemanfaatan ruang.

***Analytical Hierarchy Process* (AHP) dalam Penentuan Prioritas Rehabilitasi**

Penentuan prioritas rehabilitasi lanskap melibatkan berbagai faktor yang memiliki tingkat kepentingan berbeda sehingga memerlukan pendekatan pengambilan keputusan multikriteria. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Analytical Hierarchy Process* (AHP), yaitu metode yang memungkinkan penyusunan masalah ke dalam bentuk hierarki, melakukan perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) antar kriteria, serta menentukan bobot prioritas berdasarkan tingkat kepentingan relatif masing-masing kriteria. Menurut Saaty dan Vargas (2021), AHP efektif digunakan untuk menyelesaikan permasalahan kompleks karena mampu mengintegrasikan pertimbangan kuantitatif dan kualitatif secara sistematis dan terstruktur.

Tahapan utama AHP meliputi penyusunan hierarki keputusan, pembentukan matriks perbandingan berpasangan, perhitungan bobot prioritas, dan pengujian konsistensi melalui *Consistency Ratio* (CR). Nilai $CR \leq 0,10$ menunjukkan bahwa tingkat konsistensi penilaian masih dapat diterima. Dalam penelitian ini, AHP digunakan untuk mengintegrasikan berbagai indikator spasial, yaitu NDVI, NBR, fragmentasi lanskap, kedekatan terhadap jalan, kemiringan lereng, kondisi DAS, dan kesesuaian RTRW. Bobot setiap kriteria ditentukan melalui perbandingan berpasangan dan diuji konsistensinya untuk menghasilkan prioritas rehabilitasi lanskap yang mempertimbangkan kondisi ekologis, hidrologis, dan tata ruang secara terpadu.

***Random Forest* dalam Analisis Faktor Dominan Degradasi**

Random Forest merupakan algoritma *machine learning* berbasis ensemble yang menggabungkan banyak *decision tree* untuk meningkatkan akurasi klasifikasi dan mengurangi

overfitting. Metode ini banyak digunakan dalam penelitian lingkungan karena mampu mengolah data multivariabel dan mengevaluasi tingkat kepentingan masing-masing variabel (*variable importance*). Dalam studi degradasi lahan, *Random Forest* digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor dominan yang memengaruhi perubahan kondisi vegetasi dan tutupan lahan. Menurut Hidayat et al. (2023), *Random Forest* memiliki kinerja yang baik dalam analisis spasial lingkungan karena mampu menangani hubungan nonlinier antarvariabel dan menghasilkan interpretasi faktor dominan secara lebih akurat dibandingkan metode statistik konvensional. *Random Forest* bekerja dengan membangun sejumlah pohon keputusan secara acak melalui teknik *bootstrap sampling* dan *random feature selection*. Tingkat kepentingan variabel (*variable importance*) dihitung berdasarkan kontribusi masing-masing variabel dalam meningkatkan akurasi klasifikasi. Metode ini banyak digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor dominan yang memengaruhi perubahan lingkungan dan degradasi lahan.

***Kernel Density* untuk Identifikasi *Hotspot* Degradasi**

Kernel Density merupakan metode analisis spasial yang digunakan untuk mengidentifikasi konsentrasi suatu fenomena berdasarkan distribusi lokasi kejadian. Dalam penelitian degradasi lanskap, metode ini digunakan untuk mengidentifikasi *hotspot* degradasi sehingga wilayah dengan tekanan lingkungan tertinggi dapat diketahui secara lebih akurat. Menurut Siregar et al. (2021), *Kernel Density* efektif digunakan dalam kajian lingkungan untuk menentukan wilayah prioritas pengelolaan berbasis distribusi spasial kejadian.

Berdasarkan berbagai kajian terdahulu, degradasi lanskap merupakan fenomena multidimensi yang dipengaruhi oleh interaksi kondisi vegetasi, struktur spasial habitat, tekanan antropogenik, serta kebijakan pemanfaatan ruang. Sehingga identifikasi prioritas rehabilitasi memerlukan pendekatan yang mampu mengintegrasikan berbagai indikator tersebut secara simultan. Dalam penelitian ini, NDVI dan NBR digunakan untuk mengevaluasi kondisi vegetasi, fragmentasi lanskap digunakan untuk menggambarkan kualitas struktur habitat, sedangkan aksesibilitas jalan, DAS, risiko bencana, dan kesesuaian tata ruang digunakan untuk mengevaluasi faktor pendorong dan tingkat urgensi rehabilitasi.

Kerangka Konseptual Penelitian

Penelitian ini dibangun berdasarkan pemahaman bahwa degradasi lanskap merupakan hasil interaksi antara kondisi biofisik, tekanan antropogenik, dan tata kelola pemanfaatan ruang. Kondisi biofisik direpresentasikan melalui NDVI, NBR, kemiringan lereng, dan fragmentasi lanskap. Tekanan antropogenik dievaluasi melalui kedekatan terhadap jaringan jalan sebagai indikator aksesibilitas dan intensitas aktivitas manusia. Aspek tata kelola diwakili oleh kesesuaian RTRW dan prioritas DAS.

Integrasi seluruh indikator dilakukan melalui dua tahapan analisis. *Random Forest* digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor dominan yang memengaruhi degradasi lanskap berdasarkan tingkat kepentingan masing-masing variabel. Selanjutnya, metode AHP digunakan untuk mengintegrasikan indikator-indikator spasial menjadi peta prioritas rehabilitasi lanskap di Provinsi Bengkulu. Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan rekomendasi rehabilitasi yang lebih objektif, terukur, dan dapat diterapkan sebagai dasar penyusunan kebijakan pengelolaan lanskap berkelanjutan.

Integrasi Metode dalam Penentuan Prioritas Rehabilitasi

Penentuan prioritas rehabilitasi lanskap memerlukan pendekatan yang mampu mengintegrasikan berbagai dimensi degradasi secara simultan. NDVI dan NBR memberikan informasi tentang kondisi dan gangguan vegetasi, sedangkan metrik fragmentasi menggambarkan struktur spasial habitat. *Random Forest* berfungsi mengidentifikasi faktor-

faktor dominan yang memengaruhi degradasi, sehingga kebijakan rehabilitasi dapat diarahkan pada variabel yang paling berpengaruh. *Kernel Density* melengkapi analisis dengan menunjukkan konsentrasi spasial degradasi (*hotspot*). Terakhir, AHP mengintegrasikan seluruh indikator menjadi prioritas rehabilitasi yang mempertimbangkan tingkat kepentingan relatif masing-masing faktor. Integrasi metode ini memungkinkan penyusunan strategi rehabilitasi yang lebih komprehensif, terukur, dan berbasis bukti spasial yang kuat.

METODE

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Provinsi Bengkulu yang terletak pada koordinat $2^{\circ}16'-5^{\circ}31'$ LS dan $101^{\circ}01'-103^{\circ}41'$ BT. Wilayah penelitian memiliki luas sekitar 19.919,33 km² dan terdiri atas sembilan kabupaten dan satu kota, yaitu Kabupaten Bengkulu Selatan, Rejang Lebong, Bengkulu Utara, Kaur, Seluma, Mukomuko, Lebong, Kepahiang, Bengkulu Tengah, serta Kota Bengkulu. Secara ekologis, Provinsi Bengkulu memiliki karakteristik lanskap yang beragam, mulai dari dataran pesisir, kawasan budidaya, hingga kawasan pegunungan Bukit Barisan yang berfungsi sebagai daerah tangkapan air penting di Pulau Sumatera.

Penelitian difokuskan pada periode tahun 2015–2025 untuk memperoleh gambaran dinamika kondisi vegetasi dan degradasi lanskap dalam satu dekade terakhir. Pengolahan data dan analisis dilakukan pada tahun 2026 menggunakan perangkat lunak *Google Earth Engine* (GEE), QGIS, ArcGIS, serta perangkat lunak statistik pendukung.

Data batas daerah aliran sungai (DAS) diperoleh dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK/BPDASHL), sedangkan data risiko banjir dan longsor diperoleh dari InaRISK BNPB. Data jaringan jalan diperoleh dari OpenStreetMap (OSM), dan data kemiringan lereng diturunkan dari DEMNAS yang diterbitkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG).

Prapengolahan Data Citra

Tahap awal penelitian dilakukan melalui prapengolahan data citra untuk memperoleh citra yang siap dianalisis. Pada citra Sentinel-2 dilakukan penyaringan awan menggunakan nilai *CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE* kurang dari 20%, sedangkan pada Landsat digunakan *CLOUD_COVER* kurang dari 10%. Selanjutnya dilakukan proses *cloud masking* menggunakan band kualitas (*quality assessment*) untuk menghilangkan piksel yang terpengaruh awan dan bayangan awan. Seluruh citra kemudian direproyeksi ke sistem koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM) Zona 48S agar memiliki keseragaman sistem referensi spasial sebelum dilakukan analisis lanjutan.

Citra yang telah bebas awan kemudian dikompositkan menggunakan metode median untuk menghasilkan representasi kondisi vegetasi tahunan. Menurut Zhu dan Woodcock (2018), penggunaan komposit median efektif mengurangi pengaruh awan pada wilayah tropis dan meningkatkan kualitas informasi spektral. Untuk mengakomodasi dinamika temporal, nilai NDVI dan NBR yang digunakan merupakan nilai median dari seluruh citra yang tersedia pada periode 2015–2025, sehingga menghasilkan peta kondisi vegetasi rata-rata untuk periode tersebut.

Validasi Data dan Pengambilan Sampel

Untuk meningkatkan keandalan hasil analisis, dilakukan validasi menggunakan 150 titik sampel yang tersebar secara proporsional di seluruh wilayah Provinsi Bengkulu. Titik sampel ditentukan menggunakan metode *stratified random sampling* berdasarkan strata tutupan lahan (hutan, perkebunan, pertanian lahan kering, pemukiman, dan lahan terbuka) yang diperoleh dari interpretasi citra resolusi tinggi *Google Earth*. Jumlah titik sampel per strata ditentukan secara proporsional terhadap luas masing-masing strata. Validasi dilakukan secara visual pada

citra *Google Earth* untuk memverifikasi kondisi tutupan lahan aktual pada setiap titik sampel. Selain itu, sebanyak 30 titik sampel (20% dari total) digunakan sebagai data uji independen untuk mengevaluasi akurasi model *Random Forest*. Seluruh titik sampel didokumentasikan koordinatnya dan digunakan untuk kalibrasi ambang batas NDVI.

Penentuan Ambang Batas NDVI Berbasis Kalibrasi Lapangan

Ambang batas NDVI untuk klasifikasi tingkat degradasi ditentukan melalui kalibrasi menggunakan data titik sampel lapangan dan citra resolusi tinggi. Proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai NDVI pada setiap titik sampel dengan kondisi tutupan lahan aktual yang terverifikasi. Berdasarkan hasil kalibrasi, diperoleh ambang batas sebagai berikut: sangat terdegradasi (<0,20), terdegradasi (0,20–0,40), sedang (0,40–0,60), dan baik hingga sangat baik (>0,60). Ambang batas ini juga mengacu pada penelitian Lasaponara et al. (2018) untuk wilayah tropis basah serta disesuaikan dengan karakteristik vegetasi di Provinsi Bengkulu.

Analisis Degradasi Lanskap Menggunakan NDVI dan NBR

Kondisi vegetasi dievaluasi menggunakan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Normalized Burn Ratio* (NBR). NDVI digunakan untuk menggambarkan tingkat kehijauan dan kesehatan vegetasi, sedangkan NBR digunakan untuk mendeteksi gangguan vegetasi yang berkaitan dengan degradasi. NDVI dihitung menggunakan persamaan:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Keterangan:

NDVI = indeks vegetasi;

NIR = reflektansi inframerah dekat;

Red = reflektansi pita merah.

Sementara itu, NBR dihitung dengan persamaan:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Keterangan:

NBR = *Normalized Burn Ratio*;

SWIR = reflektansi gelombang inframerah pendek.

Analisis Fragmentasi Lanskap

Fragmentasi lanskap dianalisis untuk menggambarkan perubahan struktur spasial habitat. Analisis dilakukan menggunakan metrik ekologi lanskap yang dihitung melalui perangkat lunak FRAGSTATS. Metrik yang digunakan meliputi:

- *Patch Density* (PD), yaitu jumlah *patch* per satuan luas;
- *Edge Density* (ED), yaitu panjang total batas antar *patch* per satuan luas;
- *Largest Patch Index* (LPI), yaitu persentase luas *patch* terbesar terhadap total lanskap;
- *Fragmentation Index* (FI), yaitu indeks yang menggambarkan tingkat keterpecahan lanskap.

Untuk memberikan konteks terhadap nilai FI=0,65 yang diperoleh, hasil ini dibandingkan dengan penelitian Putra et al. (2022) di Provinsi Jambi yang memperoleh FI=0,58 dan penelitian Wibowo et al. (2023) di Sumatera Selatan dengan FI=0,62. Perbandingan ini menunjukkan bahwa tingkat fragmentasi di Bengkulu tergolong tinggi untuk wilayah yang masih memiliki tutupan hutan cukup luas.

Analisis Pengaruh Jalan dan Kesesuaian Tata Ruang

Pengaruh aksesibilitas terhadap degradasi lanskap dianalisis menggunakan metode *buffer* jalan. Jaringan jalan diklasifikasikan berdasarkan jenis jalan utama, kemudian dibuat zona *buffer* dengan jarak 0–1 km, 1–2 km, 2–5 km, dan lebih dari 5 km. Luas area terdegradasi pada setiap zona *buffer* dihitung untuk mengetahui hubungan spasial antara degradasi dan kedekatan terhadap jalan. Uji statistik chi-square dilakukan untuk menguji signifikansi hubungan antara jarak terhadap jalan dan tingkat degradasi.

Selain itu, dilakukan analisis kesesuaian tata ruang melalui *overlay* antara area terdegradasi dengan RTRW Provinsi Bengkulu. Hasil *overlay* diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu sesuai dan tidak sesuai dengan arahan pemanfaatan ruang. Ketidaksesuaian diidentifikasi berdasarkan perbedaan antara tutupan lahan aktual dengan zona peruntukan dalam RTRW.

Analisis Faktor Dominan Degradasi Menggunakan *Random Forest*

Untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap degradasi lanskap, digunakan algoritma *Random Forest*. Variabel yang dianalisis meliputi *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Burn Ratio* (NBR), kemiringan lereng, jarak terhadap jalan, kondisi daerah aliran sungai (DAS), risiko banjir, risiko longsor, dan kesesuaian tata ruang. Model *Random Forest* dibangun menggunakan data sampel spasial yang diklasifikasikan ke dalam kategori terdegradasi dan tidak terdegradasi berdasarkan hasil interpretasi citra satelit serta verifikasi visual pada citra beresolusi tinggi. Sebanyak 150 titik sampel digunakan dalam pemodelan, dengan pembagian 70% (105 titik) sebagai data pelatihan (*training data*) dan 30% (45 titik) sebagai data pengujian (*testing data*). Model dikembangkan menggunakan 500 pohon keputusan (*decision trees*) untuk meningkatkan stabilitas model dan mengurangi risiko *overfitting*.

Kinerja model dievaluasi menggunakan *confusion matrix* dengan parameter *Overall Accuracy*, *Precision*, *Recall*, *F1-Score*, dan *Kappa Coefficient* berdasarkan data pengujian. Selanjutnya, nilai *variable importance* yang dihasilkan digunakan untuk mengidentifikasi kontribusi relatif masing-masing variabel terhadap degradasi lanskap di Provinsi Bengkulu. Dalam penelitian ini, *Random Forest* tidak digunakan untuk menghasilkan peta prioritas rehabilitasi secara langsung, melainkan sebagai metode analisis untuk mengidentifikasi faktor-faktor dominan penyebab degradasi. Adapun penentuan kawasan prioritas rehabilitasi dilakukan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) melalui integrasi indikator biofisik dan tata ruang dalam analisis spasial berbasis Sistem Informasi Geografis.

Analisis *Hotspot* Degradasi Menggunakan *Kernel Density*

Kernel Density digunakan untuk mengidentifikasi konsentrasi spasial area terdegradasi. Analisis dilakukan menggunakan fungsi *Kernel Density* pada perangkat lunak ArcGIS dengan radius pencarian (*search radius*) 2 km. Pemilihan radius 2 km didasarkan pada analisis variogram yang menunjukkan jarak spasial autokorelasi optimal untuk sebaran area terdegradasi di Provinsi Bengkulu, serta mengacu pada studi Siregar et al. (2021) yang menggunakan radius serupa untuk analisis *hotspot* perubahan tutupan lahan di wilayah Sumatra.

Hasil *Kernel Density* dinormalisasi ke dalam rentang nilai 0–1 dan kemudian diklasifikasikan menjadi lima kategori *hotspot*, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi menggunakan metode *natural breaks* (Jenks). Metode *natural breaks* dipilih karena mampu memaksimalkan perbedaan antar kelas berdasarkan distribusi data aktual.

Penentuan Prioritas Rehabilitasi Menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP)

Prioritas rehabilitasi ditentukan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dengan melibatkan 7 (tujuh) orang ahli dari berbagai disiplin ilmu, yaitu:

- 2 orang ahli rehabilitasi lahan (dosen dan peneliti dari Jurusan Kehutanan),
- 2 orang ahli penginderaan jauh dan SIG (dosen dan peneliti dari Jurusan Geografi),
- 2 orang ahli perencanaan wilayah (dosen dan praktisi dari perencanaan tata ruang),
- 1 orang ahli hidrologi dan pengelolaan DAS (peneliti dari BPDASHL).

Kriteria yang digunakan meliputi NDVI, NBR, *Fragmentation Index* (FI) sebagai representasi tingkat fragmentasi lanskap, kesesuaian RTRW, DAS, risiko banjir, risiko longsor, kemiringan lereng, dan aksesibilitas jalan. Penambahan NBR dan FI dilakukan karena kedua indikator tersebut merepresentasikan tingkat gangguan vegetasi dan kualitas struktur lanskap yang menjadi komponen utama degradasi lanskap. FI dipilih karena mampu menggambarkan tingkat keterpecahan habitat secara menyeluruh dan lebih mudah diintegrasikan ke dalam analisis multikriteria dibandingkan penggunaan beberapa metrik fragmentasi secara terpisah. Matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) disusun berdasarkan pendapat para ahli menggunakan skala Saaty (1–9). Bobot akhir diperoleh melalui rata-rata geometrik dari seluruh matriks ahli. Nilai konsistensi dihitung menggunakan *Consistency Ratio* (CR):

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

dengan:

CI = *Consistency Index*;

RI = *Random Index*.

Matriks perbandingan dinyatakan konsisten apabila nilai $CR \leq 0,10$ (Saaty & Vargas, 2021). Nilai eigen maksimum (λ_{max}), *Consistency Index* (CI), dan *Consistency Ratio* (CR) dihitung untuk menguji konsistensi matriks.

Analisis Sensitivitas Bobot AHP

Untuk menguji ketahanan (*robustness*) hasil prioritas rehabilitasi terhadap perubahan bobot kriteria, dilakukan analisis sensitivitas dengan memvariasikan bobot masing-masing kriteria sebesar $\pm 10\%$ dan $\pm 20\%$ dari bobot awal. Perubahan luas area prioritas tinggi dan sangat tinggi diamati untuk setiap skenario. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar perubahan bobot memengaruhi hasil akhir dan apakah prioritas tetap konsisten pada DAS-DAS utama.

Analisis dan Penyusunan Peta Prioritas Rehabilitasi

Seluruh variabel yang telah dianalisis distandarisasi ke dalam skala yang sama sebelum dilakukan pembobotan menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Sebelum proses standardisasi dan *weighted overlay* dilakukan, area yang tidak menjadi target rehabilitasi dikeluarkan dari analisis menggunakan teknik masking. Area yang dikeluarkan meliputi:

- Badan air (sungai, danau, waduk): sekitar 28.000 ha;
- Kawasan terbangun permanen (permukiman padat, industri): sekitar 95.000 ha;
- Kawasan konservasi yang telah memiliki skema pengelolaan restorasi dan rehabilitasi tersendiri (Taman Nasional Kerinci Seblat dan Taman Nasional Bukit Barisan Selatan), sehingga tidak menjadi fokus analisis prioritas rehabilitasi dalam penelitian ini: sekitar 620.933 ha.

Total area yang dikeluarkan dari analisis adalah sekitar 743.933 ha, sehingga area evaluasi yang berpotensi menjadi sasaran rehabilitasi seluas sekitar 1.248.000 ha. Selanjutnya, proses integrasi dilakukan melalui teknik *weighted overlay* pada Sistem Informasi Geografis untuk menghasilkan indeks prioritas rehabilitasi. Nilai indeks kemudian dikelompokkan menjadi lima kelas prioritas menggunakan metode *natural breaks* (Jenks): sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi.

Peta prioritas rehabilitasi yang dihasilkan digunakan untuk mengidentifikasi wilayah yang memerlukan tindakan rehabilitasi secara lebih mendesak, terutama pada DAS yang memiliki tingkat degradasi tinggi, fungsi ekologis penting, dan tingkat kerentanan lingkungan yang relatif besar.

Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara bertahap: (1) pengumpulan data; (2) prapengolahan citra; (3) perhitungan NDVI dan NBR; (4) analisis fragmentasi lanskap; (5) analisis *buffer* jalan dan overlay RTRW; (6) validasi dan kalibrasi ambang batas; (7) analisis faktor dominan menggunakan *Random Forest*; (8) analisis *hotspot* degradasi menggunakan *Kernel Density*; (9) pembobotan kriteria menggunakan AHP; (10) analisis sensitivitas; (11) integrasi parameter melalui *weighted overlay*; serta (12) penyusunan peta prioritas rehabilitasi dan rekomendasi pengelolaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tingkat Degradasi Lanskap Berdasarkan NDVI dan NBR

Analisis degradasi lanskap menggunakan indikator NDVI dan NBR menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Provinsi Bengkulu masih memiliki kondisi vegetasi yang relatif baik. Namun demikian, terdapat sejumlah kawasan yang mengalami penurunan kualitas vegetasi sehingga memerlukan perhatian dalam upaya rehabilitasi. Integrasi NDVI dan NBR mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi vegetasi karena tidak hanya menunjukkan tingkat kehijauan, tetapi juga sensitif terhadap gangguan vegetasi dan perubahan kondisi biofisik lahan (Arifin et al., 2020).

Hasil analisis dikelompokkan ke dalam beberapa kelas berdasarkan rentang nilai NDVI yang telah dikalibrasi dengan data lapangan dan didukung oleh interpretasi NBR sebagai indikator gangguan vegetasi. Seluruh hasil kuantitatif diperoleh melalui pengolahan citra Sentinel-2 tahun 2016–2025 dan Landsat 8/9 tahun 2015–2025 menggunakan *Google Earth Engine*. Luas masing-masing kategori dihitung berdasarkan jumlah piksel hasil klasifikasi yang kemudian dikonversi ke satuan hektare menggunakan sistem proyeksi UTM Zona 48S.

Tabel 1. Tingkat Degradasi Lanskap Provinsi Bengkulu Tahun 2025 Berdasarkan NDVI dan NBR

Tingkat Degradasi	Kriteria NDVI	Luas (ha)	Persentase (%)
Sangat Terdegradasi	<0,20	48.000	2,4
Terdegradasi	0,20–0,40	108.000	5,4
Sedang	0,40–0,60	340.000	17,1
Baik–Sangat Baik	>0,60	1.495.933	75,1
Total		1.991.933	100

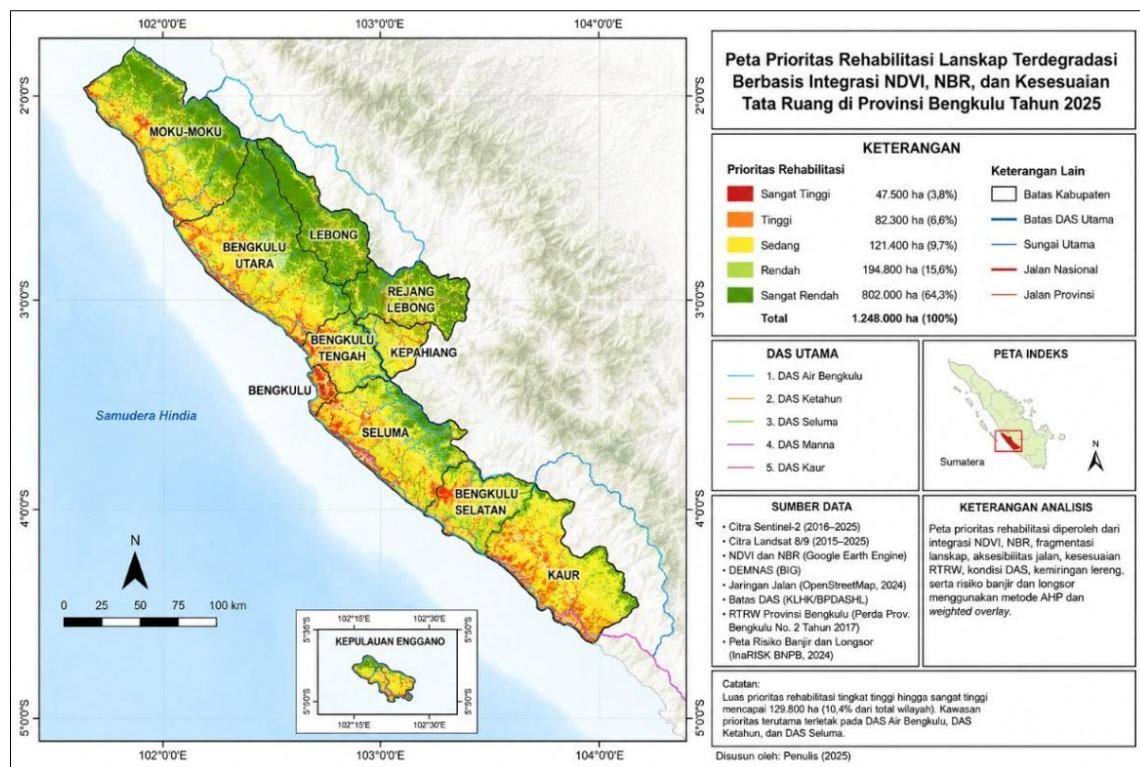
Sumber: Hasil olahan penulis berdasarkan analisis NDVI dan NBR menggunakan citra Sentinel-2 tahun 2016–2025 dan Landsat 8/9 tahun 2015–2025 melalui *Google Earth Engine*, 2025.

Berdasarkan Tabel 1, kategori vegetasi baik hingga sangat baik masih mendominasi Provinsi Bengkulu dengan luas mencapai 1.495.933 ha atau sekitar 75,1% dari total wilayah yang dianalisis. Meskipun demikian, keberadaan area terdegradasi dan sangat terdegradasi seluas sekitar 156.000 ha menunjukkan bahwa sebagian lanskap telah mengalami penurunan kualitas vegetasi yang memerlukan perhatian dalam perencanaan rehabilitasi. Nilai NDVI yang rendah dan didukung oleh indikasi gangguan dari NBR mengindikasikan berkurangnya kerapatan serta kesehatan vegetasi, yang pada akhirnya dapat menurunkan fungsi ekologis seperti penyimpanan karbon, perlindungan tanah, dan pengaturan tata air. FAO (2020) menyatakan bahwa pemantauan kondisi vegetasi menggunakan data penginderaan jauh merupakan pendekatan yang efektif untuk mendeteksi degradasi pada tahap awal sehingga tindakan rehabilitasi dapat dilakukan secara lebih tepat waktu dan efisien.

PRIORITAS REHABILITASI LANSKAP TERDEGRADASI BERBASIS NDVI, NBR, FRAGMENTASI, RANDOM FOREST, DAN AHP DI PROVINSI BENGKULU

Temuan tersebut menunjukkan bahwa strategi rehabilitasi di Provinsi Bengkulu tidak hanya difokuskan pada kawasan yang telah mengalami perubahan tutupan lahan permanen, tetapi juga pada wilayah dengan tutupan vegetasi yang masih ada namun mengalami penurunan kualitas berdasarkan indikator spektral. Pendekatan ini sejalan dengan konsep rehabilitasi lanskap yang menekankan pemulihan fungsi ekosistem secara menyeluruh. Arifin et al. (2020) menyatakan bahwa kombinasi NDVI dan NBR lebih sensitif dalam mendeteksi degradasi dan pemulihan vegetasi dibandingkan analisis tutupan lahan saja. Wibowo et al. (2023) juga menunjukkan bahwa penurunan NDVI berkorelasi dengan peningkatan tekanan penggunaan lahan dan penurunan fungsi ekologis di wilayah tropis Indonesia. Sehingga integrasi kedua indeks ini penting untuk penentuan prioritas rehabilitasi dan kebijakan pengelolaan lanskap berkelanjutan di Provinsi Bengkulu.

Selain itu, pemantauan berkala NDVI dan NBR dapat menjadi instrumen peringatan dini degradasi lahan. Keberadaan daerah aliran sungai (DAS) juga menjadi faktor penting karena kawasan terdegradasi pada DAS strategis berpotensi meningkatkan risiko penurunan kualitas tata air, sedimentasi, dan bencana hidrologi. Hasil integrasi parameter biofisik, risiko lingkungan, dan tata ruang kemudian divisualisasikan dalam peta prioritas rehabilitasi untuk menunjukkan sebaran wilayah yang membutuhkan intervensi berdasarkan tingkat degradasi dan kepentingan ekologis.



Gambar 1. Peta Prioritas Rehabilitasi Lanskap Terdegradasi Berbasis Integrasi NDVI, NBR, dan Kesesuaian Tata Ruang di Provinsi Bengkulu Tahun 2025

Sumber: Hasil olahan penulis berdasarkan citra Sentinel-2 (2016–2025), Landsat 8/9 (2015–2025), DEMNAS BIG, OpenStreetMap, RTRW Provinsi Bengkulu, data DAS KLHK, dan InaRISK BNPB menggunakan metode AHP dan *weighted overlay*, 2025.

Gambar 1 menunjukkan distribusi spasial prioritas rehabilitasi lanskap terdegradasi di Provinsi Bengkulu yang diperoleh melalui integrasi indikator *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Burn Ratio* (NBR), dan kesesuaian tata ruang. Berdasarkan hasil analisis, wilayah diklasifikasikan ke dalam empat tingkat prioritas, yaitu

sangat tinggi, tinggi, sedang, dan rendah. Kawasan dengan prioritas sangat tinggi dan tinggi umumnya terkonsentrasi pada wilayah budidaya, sekitar koridor jalan utama, serta sebagian daerah hilir DAS yang mengalami tekanan pemanfaatan lahan dan penurunan kualitas vegetasi. Sebaliknya, kawasan dengan prioritas rendah lebih banyak berada pada wilayah hutan yang masih relatif utuh dengan kondisi vegetasi yang baik, terutama di bagian tengah hingga timur Provinsi Bengkulu. Pola ini menunjukkan bahwa aksesibilitas dan intensitas aktivitas manusia berkontribusi terhadap meningkatnya kebutuhan rehabilitasi lanskap.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi NDVI, NBR, dan kesesuaian tata ruang mampu mengidentifikasi wilayah prioritas rehabilitasi secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan yang hanya mengandalkan perubahan tutupan lahan. Pendekatan ini memungkinkan deteksi dini terhadap kawasan yang masih memiliki tutupan vegetasi tetapi telah mengalami penurunan kualitas ekologis sehingga memerlukan intervensi rehabilitasi. Temuan ini sejalan dengan penelitian Julianto et al. (2022) yang menunjukkan bahwa pemanfaatan citra Sentinel-2 dan *Google Earth Engine* efektif untuk memantau dinamika vegetasi secara spasial dan temporal, serta didukung oleh Rahmawati dan Apriyanti (2023) yang menyatakan bahwa analisis berbasis Sentinel-2 dapat meningkatkan akurasi evaluasi kondisi tutupan lahan. Sehingga peta prioritas rehabilitasi yang dihasilkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam penyusunan program restorasi ekosistem, rehabilitasi DAS, dan perencanaan tata ruang berkelanjutan di Provinsi Bengkulu.

Fragmentasi Lanskap di Provinsi Bengkulu

Selain penurunan kualitas vegetasi, degradasi lanskap juga tercermin melalui meningkatnya fragmentasi habitat. Fragmentasi menyebabkan habitat yang semula menyatu terpecah menjadi unit-unit yang lebih kecil sehingga dapat mengurangi konektivitas ekologis dan meningkatkan kerentanan terhadap gangguan lingkungan (Haddad et al., 2019). Hasil analisis metrik fragmentasi menunjukkan bahwa lanskap Provinsi Bengkulu telah mengalami tingkat fragmentasi yang relatif tinggi.

Tabel 2. Metrik Fragmentasi Lanskap Provinsi Bengkulu Tahun 2025

Metrik	Nilai	Interpretasi
<i>Patch Density</i> (PD)	13,2 <i>patch</i> /100 ha	Fragmentasi sedang–tinggi
<i>Edge Density</i> (ED)	45,1 m/ha	Banyak batas antar <i>patch</i>
<i>Largest Patch Index</i> (LPI)	19,4%	<i>Patch</i> besar semakin terbatas
<i>Fragmentation Index</i> (FI)	0,65	Fragmentasi tinggi

Sumber: Hasil olahan penulis berdasarkan analisis *buffer* jaringan jalan OpenStreetMap (OSM), RTRW Provinsi Bengkulu, serta peta degradasi lanskap tahun 2025.

Nilai *Fragmentation Index* sebesar 0,65 menunjukkan bahwa lanskap Bengkulu telah mengalami keterpecahan yang cukup tinggi, lebih tinggi dibandingkan provinsi tetangga Jambi (0,58) dan Sumatera Selatan (0,62). Nilai tersebut mengindikasikan tingkat fragmentasi yang relatif tinggi untuk wilayah yang masih memiliki tutupan hutan cukup luas. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tekanan pembangunan, ekspansi lahan budidaya, dan peningkatan aksesibilitas telah menyebabkan habitat alami terpecah menjadi unit-unit yang lebih kecil sehingga berpotensi menurunkan konektivitas ekologis lanskap. Rendahnya nilai *Largest Patch Index* (19,4%) mengindikasikan bahwa habitat berukuran besar semakin terbatas dan berpotensi mengurangi fungsi ekologis kawasan. Kondisi tersebut perlu menjadi pertimbangan dalam penentuan lokasi rehabilitasi agar upaya pemulihan tidak hanya meningkatkan kualitas vegetasi, tetapi juga memperbaiki konektivitas lanskap.

Pengaruh Aksesibilitas Jalan dan Kesesuaian Tata Ruang

Keberadaan infrastruktur jalan merupakan salah satu faktor yang dapat meningkatkan tekanan terhadap sumber daya lahan. Jalan memberikan kemudahan akses menuju kawasan yang sebelumnya sulit dijangkau sehingga berpotensi memicu pembukaan lahan dan degradasi vegetasi (Laurance et al., 2018).

Analisis *buffer* jalan menunjukkan bahwa sebagian besar area terdegradasi berada pada radius dekat dengan jaringan jalan. Selain itu, evaluasi kesesuaian tata ruang menunjukkan bahwa masih terdapat area terdegradasi yang berada pada lokasi yang tidak sesuai dengan arahan RTRW. Untuk mengetahui hubungan antara aksesibilitas dan tingkat degradasi lanskap, area terdegradasi dianalisis berdasarkan jaraknya terhadap jaringan jalan. Selain itu, dilakukan evaluasi kesesuaian terhadap RTRW untuk mengidentifikasi sejauh mana degradasi terjadi pada kawasan yang telah ditetapkan fungsi ruangnya.

Tabel 3. Distribusi Area Terdegradasi Berdasarkan *Buffer* Jalan dan Kesesuaian RTRW

Parameter	Kategori	Luas (ha)	Persentase (%)
Buffer Jalan	0–1 km	53.040	34,0
	1–2 km	48.360	31,0
	2–5 km	35.880	23,0
	>5 km	18.720	12,0
Kesesuaian RTRW	Sesuai	115.600	74,1
	Tidak sesuai	40.400	25,9

Sumber: Hasil olahan penulis berdasarkan analisis *buffer* jaringan jalan OpenStreetMap (OSM), peta degradasi lanskap, dan RTRW Provinsi Bengkulu Tahun 2025.

Sebanyak 65% area terdegradasi berada pada jarak kurang dari 2 km dari jalan, menunjukkan bahwa aksesibilitas memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap degradasi lanskap (uji chi-square: $\chi^2 = 124,5$; $p < 0,001$). Sementara itu, sekitar 25,9% area terdegradasi berada pada kawasan yang tidak sesuai dengan arahan RTRW ($\chi^2 = 56,2$; $p < 0,001$). Temuan ini menunjukkan pentingnya penguatan fungsi pengendalian pemanfaatan ruang untuk mengurangi tekanan terhadap kawasan yang memiliki fungsi ekologis penting. Kedekatan dengan jaringan jalan memperbesar peluang terjadinya pembukaan lahan, pemanfaatan sumber daya alam secara intensif, serta perkembangan permukiman dan aktivitas ekonomi lainnya. Oleh sebab itu, kawasan yang berada pada *buffer* jalan dengan tingkat degradasi tinggi memerlukan strategi pengawasan dan rehabilitasi yang lebih intensif dibandingkan wilayah dengan aksesibilitas rendah. Temuan ini mendukung hasil penelitian Pratama et al. (2021) yang menunjukkan bahwa pembangunan infrastruktur jalan berperan sebagai faktor pendorong perubahan tutupan lahan karena meningkatkan akses terhadap kawasan yang sebelumnya relatif terlindungi.

Faktor Dominan Degradasi Lanskap Berdasarkan *Random Forest*

Analisis *Random Forest* dilakukan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap degradasi lanskap di Provinsi Bengkulu. Kinerja model menunjukkan *Overall Accuracy* sebesar 89,2% pada data pengujian dan 87,8% pada data uji independen, dengan nilai *Kappa Coefficient* 0,87 (data pengujian) dan 0,85 (data uji independen). Nilai *Precision*, *Recall*, dan *F1-Score* untuk kelas terdegradasi berturut-turut adalah 0,88, 0,86, dan 0,87, yang menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan klasifikasi yang baik dan stabil.

Tabel 4. Tingkat Kepentingan Variabel Degradasi Lanskap Berdasarkan Analisis *Random Forest*

Variabel	Importance (%)	Peringkat	Interpretasi
NDVI	28,7	1	Faktor utama yang merepresentasikan kondisi dan kesehatan vegetasi

PRIORITAS REHABILITASI LANSKAP TERDEGRADASI BERBASIS NDVI, NBR, FRAGMENTASI, RANDOM FOREST, DAN AHP DI PROVINSI BENGKULU

Jarak terhadap Jalan	22,4	2	Menunjukkan pengaruh aksesibilitas terhadap tekanan pemanfaatan lahan
NBR	18,6	3	Menggambarkan tingkat gangguan dan degradasi vegetasi
DAS	11,2	4	Berperan dalam menentukan sensitivitas hidrologis kawasan
Kemiringan Lereng	8,1	5	Mempengaruhi potensi erosi dan stabilitas lahan
Risiko Longsor	4,9	6	Berkaitan dengan kerentanan kawasan terhadap gangguan geomorfologi
Risiko Banjir	3,7	7	Menunjukkan kerentanan hidrologis wilayah terdegradasi
Kesesuaian RTRW	2,4	8	Faktor tata ruang yang memengaruhi arah pemanfaatan lahan
Total	100,0		

Sumber: Hasil olahan penulis berdasarkan analisis *Random Forest* menggunakan data NDVI, NBR, kemiringan lereng (*slope*), jarak terhadap jalan, kondisi DAS, risiko banjir, risiko longsor, dan kesesuaian RTRW di Provinsi Bengkulu, 2025.

Hasil analisis *Random Forest* menunjukkan bahwa NDVI merupakan variabel dengan tingkat kepentingan tertinggi (28,7%), diikuti oleh jarak terhadap jalan (22,4%) dan NBR (18,6%), yang mengindikasikan bahwa kondisi vegetasi dan aksesibilitas merupakan faktor utama yang memengaruhi degradasi lanskap di Provinsi Bengkulu. Tingginya pengaruh kedekatan terhadap jaringan jalan menunjukkan bahwa aktivitas manusia di sekitar koridor transportasi berkontribusi terhadap penurunan kualitas vegetasi dan meningkatnya tekanan pemanfaatan lahan, sedangkan kondisi DAS dan kemiringan lereng berperan sebagai faktor biofisik yang memengaruhi kerentanan suatu wilayah terhadap degradasi. Dalam penelitian ini, *Fragmentation Index* (FI) tidak digunakan sebagai variabel prediktor pada model *Random Forest* karena difungsikan sebagai indikator lanskap tingkat lanjut dalam tahap penentuan prioritas rehabilitasi melalui metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP), sehingga menghindari redundansi informasi dan memastikan bahwa *Random Forest* berfokus pada identifikasi faktor dominan degradasi, sementara AHP digunakan untuk mengintegrasikan berbagai indikator dalam penyusunan peta prioritas rehabilitasi secara komprehensif.

Hotspot Degradasi Lanskap

Analisis *Kernel Density* dengan *search radius* 2 km menunjukkan bahwa konsentrasi degradasi tertinggi berada pada koridor jalan utama serta wilayah DAS Air Bengkulu, Ketahun, dan Seluma. Pola tersebut menunjukkan adanya keterkaitan yang kuat antara tekanan aktivitas manusia dan munculnya area degradasi. Selain aksesibilitas jalan, beberapa area degradasi juga beririsan dengan kawasan budidaya yang mengalami tekanan pemanfaatan lahan secara intensif. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengelolaan pemanfaatan ruang dan penerapan praktik penggunaan lahan yang berkelanjutan menjadi penting untuk mencegah penurunan kualitas lanskap yang lebih lanjut serta mendukung efektivitas program rehabilitasi.

Prioritas Rehabilitasi Lanskap

Penentuan prioritas rehabilitasi dilakukan melalui integrasi berbagai indikator menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang melibatkan 7 orang ahli. Hasil uji konsistensi menunjukkan nilai $\lambda_{\max} = 7,52$, $CI = 0,087$, dan $CR = 0,068$, lebih kecil dari batas 0,10, sehingga matriks dinyatakan konsisten dan layak digunakan dalam pembobotan.

Tabel 5. Bobot Kriteria AHP dan Luas Prioritas Rehabilitasi Lanskap Provinsi Bengkulu Tahun 2025

Komponen	Kategori	Nilai	Satuan
Bobot Kriteria AHP	NDVI	22	%
	RTRW	15	%
	Fragmentasi Lanskap	15	%

PRIORITAS REHABILITASI LANSKAP TERDEGRADASI BERBASIS NDVI, NBR, FRAGMENTASI, RANDOM FOREST, DAN AHP DI PROVINSI BENGKULU

	DAS	12	%
	NBR	12	%
	Risiko banjir	8	%
	Risiko longsor	6	%
	Lereng	5	%
	Jalan	5	%
	Total	100	%
Prioritas Rehabilitasi	Sangat Tinggi	47.500	ha
	Tinggi	82.300	ha
	Sedang	121.400	ha
	Rendah	194.800	ha
	Sangat Rendah	802.000	ha
	Total	1.248.000	ha

Sumber: Hasil olahan penulis berdasarkan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dan integrasi parameter degradasi lanskap menggunakan teknik *weighted overlay*, 2025.

Berdasarkan Tabel 5, NDVI memiliki bobot tertinggi (22%) karena secara langsung menggambarkan kondisi kesehatan vegetasi. Selain itu, NBR (12%) digunakan untuk merepresentasikan tingkat gangguan vegetasi, sedangkan fragmentasi lanskap (15%) digunakan untuk menggambarkan tingkat keterhubungan habitat dan kualitas struktur lanskap. Bobot yang relatif tinggi pada indikator vegetasi, fragmentasi lanskap, tata ruang, dan DAS menunjukkan bahwa kondisi ekologis serta fungsi ruang dan hidrologi menjadi pertimbangan utama dalam penentuan prioritas rehabilitasi. Hasil integrasi menunjukkan area prioritas tinggi dan sangat tinggi mencapai 129.800 ha. Wilayah ini memiliki degradasi vegetasi tinggi, fungsi ekologis penting, serta kerentanan lingkungan yang besar, sedangkan sebagian besar wilayah lainnya termasuk kategori rendah hingga sangat rendah karena kondisi vegetasi yang masih baik.

Kemiringan lereng turut memengaruhi prioritas rehabilitasi karena meningkatkan risiko erosi pada wilayah curam. Risiko banjir juga berkontribusi karena degradasi vegetasi dapat meningkatkan limpasan permukaan, sedangkan wilayah rawan longsor menjadi prioritas karena vegetasi berperan dalam stabilitas lereng.

Luas prioritas rehabilitasi tidak mencakup seluruh wilayah Provinsi Bengkulu karena analisis hanya dilakukan pada area yang memenuhi kriteria evaluasi. Area yang dikeluarkan meliputi badan air, kawasan terbangun permanen, kawasan konservasi yang tidak menjadi fokus rehabilitasi, serta area lain yang tidak memenuhi kriteria analisis.

Pendekatan AHP memungkinkan proses prioritisasi dilakukan secara sistematis dan transparan (Saaty & Vargas, 2021), serta mendukung pengambilan keputusan yang mempertimbangkan banyak faktor secara simultan. Hasil ini dapat digunakan sebagai dasar perencanaan rehabilitasi hutan dan lahan, restorasi DAS, serta pembangunan berkelanjutan di Provinsi Bengkulu. Temuan ini juga sejalan dengan Hidayat et al. (2023) yang menunjukkan bahwa indikator vegetasi berbasis penginderaan jauh efektif dalam mengidentifikasi wilayah yang mengalami penurunan kualitas ekosistem.

Analisis Sensitivitas Bobot AHP

Daerah aliran sungai (DAS) merupakan unit penting dalam pengelolaan rehabilitasi lanskap karena berperan dalam fungsi hidrologi, pengendalian erosi, dan penyediaan air. Oleh karena itu, identifikasi DAS prioritas dilakukan melalui *overlay* peta prioritas rehabilitasi dengan batas DAS utama di Provinsi Bengkulu untuk mengetahui wilayah dengan konsentrasi area prioritas tertinggi. Hasil analisis sensitivitas dengan memvariasikan bobot masing-masing kriteria sebesar $\pm 10\%$ dan $\pm 20\%$ menunjukkan bahwa perubahan bobot NDVI dan RTRW memberikan pengaruh terbesar terhadap luas area prioritas, dengan variasi luas berkisar antara

**PRIORITAS REHABILITASI LANSKAP TERDEGRADASI BERBASIS NDVI, NBR,
FRAGMENTASI, RANDOM FOREST, DAN AHP DI PROVINSI BENGKULU**

4,2% hingga 7,8% dari total prioritas tinggi-sangat tinggi. Sementara itu, perubahan bobot pada variabel lain (DAS, risiko banjir, risiko longsor, lereng, jalan) memberikan pengaruh yang lebih kecil (variasi <3%). DAS Air Bengkulu, Ketahun, dan Seluma tetap menjadi tiga DAS prioritas tertinggi pada seluruh skenario sensitivitas, menunjukkan bahwa hasil prioritas relatif robust (tahan) terhadap perubahan preferensi ahli.

Tabel 6. Prioritas Rehabilitasi Berdasarkan DAS Utama di Provinsi Bengkulu

DAS	Luas Prioritas Tinggi (ha)	Tingkat Prioritas
Air Bengkulu	25.000	Sangat Tinggi
Ketahun	20.000	Tinggi
Seluma	18.000	Tinggi
Manna	11.000	Sedang
Kaur	8.000	Sedang
Lainnya (8 DAS)	47.800	Bervariasi
Total	129.800	

Sumber: Hasil olahan penulis berdasarkan overlay peta prioritas rehabilitasi dengan batas DAS utama Provinsi Bengkulu dari KLHK/BPDASHL, 2025.

DAS Air Bengkulu merupakan wilayah dengan prioritas rehabilitasi tertinggi dengan luas 25.000 ha. Tingginya prioritas rehabilitasi pada DAS Air Bengkulu berkaitan dengan tingginya kepadatan penduduk, perkembangan kawasan perkotaan, aktivitas pertanian intensif, serta kedekatan dengan jaringan jalan utama yang meningkatkan tekanan pemanfaatan lahan dan mempercepat penurunan kualitas vegetasi. Selain itu, kondisi hidrologi DAS yang rentan terhadap banjir dan sedimentasi turut memperbesar kebutuhan rehabilitasi untuk menjaga fungsi ekologis dan tata air wilayah. DAS Ketahun dan DAS Seluma juga menunjukkan luas prioritas tinggi yang signifikan sehingga memerlukan perhatian dalam strategi rehabilitasi karena memiliki kombinasi tekanan penggunaan lahan, degradasi vegetasi, dan kerentanan lingkungan yang relatif tinggi.

Hasil ini menegaskan bahwa pendekatan berbasis DAS masih sangat relevan dalam mendukung pemulihan fungsi hidrologi wilayah. Rahman et al. (2024) menyatakan bahwa rehabilitasi berbasis DAS memberikan dampak lebih efektif terhadap pengurangan erosi, peningkatan kualitas air, dan pengendalian banjir dibanding pendekatan non-hidrologis.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa rehabilitasi lanskap di Provinsi Bengkulu perlu diarahkan secara spasial dengan mempertimbangkan kondisi vegetasi, fragmentasi lanskap, aksesibilitas jalan, kesesuaian tata ruang, dan fungsi hidrologi DAS. Pendekatan terintegrasi semacam ini dinilai lebih efektif dibandingkan rehabilitasi yang hanya didasarkan pada perubahan tutupan lahan. Temuan ini mendukung pendekatan rehabilitasi lanskap terpadu (*integrated landscape restoration*) yang menekankan pentingnya pemulihan fungsi ekologis sekaligus mendukung keberlanjutan pembangunan wilayah (Reed et al., 2020).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi analisis NDVI, NBR, fragmentasi lanskap, *Random Forest*, dan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) mampu mengidentifikasi tingkat dan pola spasial degradasi lanskap, menentukan faktor-faktor dominan yang memengaruhinya, serta menyusun prioritas rehabilitasi secara lebih komprehensif di Provinsi Bengkulu. Sebagian besar wilayah masih berada pada kategori vegetasi baik hingga sangat baik, namun sekitar 156.000 ha telah mengalami degradasi sedang hingga sangat tinggi. Kondisi ini mencerminkan adanya tekanan antropogenik, terutama pada wilayah dengan aktivitas manusia dan perubahan penggunaan lahan yang intensif.

Hasil NDVI dan NBR menunjukkan penurunan kualitas vegetasi terkonsentrasi pada kawasan budidaya dan area dengan tekanan pembangunan tinggi. Analisis fragmentasi mengindikasikan kondisi sedang hingga tinggi ($FI=0,65$), lebih tinggi dibandingkan provinsi

tetangga, ditandai peningkatan jumlah *patch* dan penurunan *core area* yang berdampak pada melemahnya konektivitas ekologis. Lebih dari 60% area terdegradasi berada dalam radius 0–2 km dari jaringan jalan utama (uji chi-square: $p < 0,001$), menunjukkan peran infrastruktur jalan sebagai faktor pendorong utama perubahan penggunaan lahan.

Hasil *Random Forest* (*Overall Accuracy* = 89,2%; *Kappa* = 0,87) menunjukkan NDVI, jarak terhadap jalan, dan NBR sebagai faktor dominan, sementara DAS, lereng, risiko banjir, risiko longsor, dan RTRW memperkuat bahwa degradasi merupakan hasil interaksi faktor biofisik, antropogenik, dan tata ruang. Analisis *Kernel Density* dengan search radius 2 km menunjukkan *hotspot* degradasi terkonsentrasi pada koridor jalan utama serta DAS Air Bengkulu, Ketahun, dan Seluma.

Integrasi seluruh indikator melalui AHP (*CR* = 0,068) menghasilkan area prioritas rehabilitasi tinggi hingga sangat tinggi seluas 129.800 ha. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa hasil prioritas relatif robust terhadap perubahan bobot, dengan DAS Air Bengkulu, Ketahun, dan Seluma tetap menjadi prioritas tertinggi pada seluruh skenario.

Secara ekologis, degradasi lanskap berdampak pada penurunan fungsi hidrologi DAS, peningkatan risiko banjir dan longsor, serta penurunan keanekaragaman hayati akibat fragmentasi habitat. Secara sosial ekonomi, kondisi ini berpotensi menurunkan produktivitas lahan, ketersediaan air bersih, serta keberlanjutan mata pencaharian masyarakat yang bergantung pada sumber daya alam.

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat lima rekomendasi kebijakan operasional yang dapat ditindaklanjuti. Pertama, rehabilitasi diprioritaskan pada DAS Air Bengkulu seluas 25.000 ha melalui skema agroforestri berbasis masyarakat dan penanaman tanaman multiguna untuk memulihkan fungsi hidrologis dan ekonomi. Kedua, pemerintah daerah perlu menerapkan moratorium sementara izin pembukaan lahan pada *buffer* jalan 0–2 km di area prioritas rehabilitasi guna mengurangi tekanan degradasi. Ketiga, pelibatan masyarakat dalam program rehabilitasi perlu dilakukan melalui skema padat karya dengan insentif berbasis kinerja, seperti pembayaran jasa lingkungan, untuk meningkatkan efektivitas dan keberlanjutan program. Keempat, pengendalian pemanfaatan ruang perlu diperkuat pada kawasan yang tidak sesuai RTRW (25,9% area terdegradasi) melalui penegakan hukum dan pemberian insentif bagi masyarakat yang patuh terhadap tata ruang. Kelima, pemantauan berkala menggunakan citra Sentinel-2 setiap 3–6 bulan perlu dilakukan untuk mendeteksi perubahan kondisi vegetasi secara dini. Rekomendasi tersebut diharapkan menjadi panduan operasional bagi pemerintah dan pemangku kepentingan dalam merumuskan kebijakan rehabilitasi lanskap yang terarah, terukur, dan berkelanjutan di Provinsi Bengkulu.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa integrasi NDVI, NBR, fragmentasi lanskap, aksesibilitas jalan, DAS, kemiringan lereng, risiko bencana, kesesuaian RTRW, *Random Forest*, dan *Kernel Density* dalam kerangka AHP mampu menghasilkan model prioritas rehabilitasi lanskap yang lebih komprehensif, terukur, dan spasial. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar ilmiah dalam mendukung rehabilitasi hutan dan lahan, pengelolaan DAS, perencanaan tata ruang, serta implementasi kebijakan Indonesia's FOLU Net Sink 2030 menuju pengelolaan lanskap yang berkelanjutan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan data penginderaan jauh resolusi tinggi seperti PlanetScope atau UAV, mengembangkan model prediksi perubahan lanskap berbasis *machine learning* yang lebih kompleks, serta melakukan analisis ekonomi biaya-manfaat rehabilitasi untuk mendukung pengambilan keputusan investasi publik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, M., & Suryadi, A. (2021). Analisis Perubahan Tutupan Lahan Berbasis NDVI Menggunakan Citra Landsat di Wilayah Tropis. *Jurnal Geografi Lingkungan*, 19(2), 115–126.
- Arifin, S., Kartika, T., Dirgahayu, D., & Nugroho, G. (2020). Monitoring Model of Land Cover Change for the Indication of Devegetation and Revegetation Using Sentinel-2. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 17(2), 93–106.
- Badan Informasi Geospasial. (2022). *DEMNAS (Digital Elevation Model Nasional) Indonesia*. BIG.
- BNPB. (2021). *InaRISK: Indonesia Disaster Risk Information System*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Copernicus Programme. (2023). *Sentinel-2 User Guide and Data Products*. European Space Agency. <https://sentinel.esa.int/>
- FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., Lovejoy, T. E., Sexton, J. O., Austin, M. P., Collins, C. D., Cook, W. M., Damschen, E. I., Ewers, R. M., Foster, B. L., Jenkins, C. N., King, A., Laurance, W. F., Levey, D. J., Margules, C. R., Townshend, J. R. (2019). Habitat Fragmentation and its Lasting Impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 5(7), eaax8992.
- Hidayat, F., Wijaya, A., & Ramdani, F. (2023). Pemanfaatan Random Forest untuk Identifikasi Faktor Perubahan Tutupan lahan di Indonesia. *Jurnal Geografi Indonesia*, 15(2), 87–99.
- Julianto, F. D., Putri, D. P. D., & Safi'i, H. H. (2022). Analisis Perubahan Vegetasi Dengan Data Sentinel-2 Menggunakan Google Earth Engine (Studi Kasus Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta). *Jurnal Penginderaan Jauh Indonesia*, 2(2), 13–18.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2023). *Data dan Informasi Rehabilitasi Hutan dan Lahan Indonesia*. Jakarta: KLHK.
- Lasaponara, R., Lanorte, A., & Estes, L. (2018). Vegetation Dynamics Assessment Using NDVI Time Series in Tropical Regions. *Remote Sensing*, 10(4), 567.
- Laurance, W. F., Campbell, M. J., Alamgir, M., & Mahmoud, M. I. (2018). Road Expansion and the Fate of Africa's Tropical Forests. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6, 75.
- Laurance, W. F., Sloan, S., Weng, L., & Sayer, J. A. (2018). Estimating the Environmental Costs of Forest Loss and Degradation. *Science Advances*, 4(10), eaar2860
- Nadzirah, R., Rizqon, M. K., & Indarto. (2023). Application of Sentinel-2A Images for Land Cover Classification Using NDVI in Jember Regency. *Geosfera Indonesia*, 9(1), 1–15.
- Pratama, R., Syartinilia, & Baskoro, D. (2021). Pengaruh Jaringan Jalan Terhadap Perubahan Penggunaan Lahan di Wilayah Hutan Tropis Indonesia. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 45(2), 101–113.
- Putra, A., Kuswantoro, D., & Nugroho, B. (2022). Analisis Fragmentasi Lanskap Hutan Tropis Menggunakan Metrik Spasial. *Jurnal Sylva Lestari*, 10(2), 145–156.
- Rahman, A., Kurniawan, B., & Yulianti, D. (2024). Prioritas Rehabilitasi DAS Berbasis Analisis Spasial untuk Mendukung Pengelolaan Sumber Daya Air Berkelanjutan. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, 12(1), 35–49.

- Rahmawati, S. D., & Apriyanti, D. (2023). Klasifikasi Area Vegetasi dan Non Vegetasi Pada Citra Sentinel-2 Menggunakan Metode EVI dengan Google Earth Engine (Studi Kasus: Kabupaten Klaten). *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 3(1), 1–13.
- Reed, J., Ickowitz, A., Chervier, C., et al. (2020). Integrated Landscape Approaches in the Tropics. *Land Use Policy*, 99, 104822.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2021). *The Analytic Hierarchy Process: Advances in Decision Making and Applications*. RWS Publications.
- Siregar, R., Harini, R., & Suharyadi. (2021). Analisis Hotspot Perubahan Penggunaan Lahan Menggunakan Metode Kernel Density. *Majalah Geografi Indonesia*, 35(2), 110–121.
- USGS. (2023). *Landsat 8–9 data users handbook*. United States Geological Survey.
- Wibowo, A., Nugroho, B., & Setiawan, Y. (2023). Analisis Perubahan Kondisi Vegetasi Menggunakan NDVI Berbasis Citra Sentinel-2 Pada Kawasan Hutan Tropis Indonesia. *Jurnal Sylva Lestari*, 11(2), 145–157.
- Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2018). Continuous Change Detection and Classification of Land Cover Using All Available Landsat Data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152–171.