

Pengembangan Sistem Informasi Geografis dan *Artificial Intelligence* (AI) untuk Identifikasi Wilayah Prioritas Rehabilitasi Lingkungan Pascatambang Studi Kasus: Provinsi Kepulauan Bangka Belitung

Arief Febridiansyah¹, Widodo², Anwar Kurniadi³

^{1,2,3}Universitas Pertahanan, Kawasan IPSC Sentul, Jl. Anyar, Sukahati, Kec. Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat 16810, Indonesia

Arieffebridians@gmail.com

Article Info

Article history:

Received : 30 April, 2026

Revised : 4 Mei, 2026

Accepted : 26 Mei, 2026

Kata kunci:

Artificial intelligence (AI); GeoAI;
Pascatambang; Rehabilitasi
lingkungan; Sistem informasi
geografis (SIG)

Abstrak

Kerusakan lingkungan pascatambang menjadi salah satu tantangan utama dalam pengelolaan lingkungan berkelanjutan, khususnya di wilayah Bangka Belitung yang memiliki aktivitas pertambangan intensif. Dampak lingkungan seperti degradasi lahan, hilangnya vegetasi, erosi, sedimentasi, dan pencemaran air memerlukan strategi rehabilitasi yang adaptif dan berbasis data. Pendekatan konvensional dalam rehabilitasi lingkungan masih memiliki keterbatasan dalam menganalisis pola spasial yang kompleks serta menentukan wilayah prioritas rehabilitasi secara efektif. Oleh karena itu, integrasi Sistem Informasi Geografis (SIG) dan *Artificial Intelligence* (AI) menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan kualitas analisis spasial dan pengambilan keputusan lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan pendekatan berbasis *GeoAI* untuk mengidentifikasi wilayah prioritas rehabilitasi lingkungan pascatambang melalui integrasi analisis spasial dan teknik *machine learning*. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan memanfaatkan data spasial, citra satelit, indikator lingkungan, serta algoritma *machine learning* seperti *Random Forest* dan *Support Vector Machine*. Analisis dilakukan dengan mengintegrasikan perubahan tutupan lahan, indeks vegetasi, kemiringan lereng, kondisi hidrologi, dan distribusi lubang tambang untuk mengklasifikasikan tingkat kerusakan lingkungan dan prioritas rehabilitasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi SIG dan AI mampu meningkatkan akurasi, efisiensi, dan kemampuan prediktif analisis spasial dalam menentukan zona prioritas rehabilitasi lingkungan secara lebih adaptif dan berbasis data.

PENDAHULUAN

Kerusakan lingkungan akibat aktivitas pertambangan menjadi salah satu isu strategis dalam pembangunan berkelanjutan di berbagai negara berkembang, termasuk Indonesia. Aktivitas pertambangan memberikan kontribusi besar terhadap pertumbuhan ekonomi melalui peningkatan pendapatan negara, penyerapan tenaga kerja, serta penyediaan

bahan baku industri. Namun demikian, eksploitasi sumber daya mineral yang dilakukan secara intensif juga menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti degradasi lahan, hilangnya vegetasi, sedimentasi, pencemaran air, dan perubahan bentang alam secara signifikan. Menurut (Anjani et al., 2022), kerusakan lingkungan akibat eksploitasi sumber daya alam yang tidak terkendali dapat mengancam keseimbangan ekologis dan keberlanjutan pembangunan wilayah dalam jangka panjang.

Wilayah pascatambang umumnya mengalami perubahan ekologis yang cukup kompleks akibat aktivitas eksploitasi yang berlangsung dalam waktu lama. Perubahan penggunaan lahan, hilangnya tutupan vegetasi, dan terbentuknya lubang bekas tambang menyebabkan menurunnya kualitas lingkungan dan meningkatnya kerentanan terhadap bencana ekologis. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa rehabilitasi lingkungan pascatambang merupakan bagian penting dalam upaya pemulihan fungsi ekosistem dan pengelolaan lingkungan berkelanjutan. Baihaqi et al. (2025) menjelaskan bahwa wilayah yang mengalami perubahan tutupan lahan secara masif memiliki tingkat kerentanan lingkungan yang lebih tinggi terhadap erosi, banjir, dan degradasi ekosistem.

Di Bangka Belitung, aktivitas pertambangan timah telah berlangsung selama puluhan tahun dan menjadi sektor ekonomi utama daerah. Akan tetapi, tingginya aktivitas pertambangan, baik legal maupun ilegal, telah menyebabkan kerusakan lingkungan yang cukup luas. Kerusakan tersebut meliputi degradasi lahan, sedimentasi perairan, kerusakan kawasan pesisir, serta munculnya ribuan kolong bekas tambang yang belum direhabilitasi secara optimal. Kondisi ini menunjukkan perlunya sistem pengelolaan lingkungan yang lebih efektif dan berbasis teknologi guna mendukung proses rehabilitasi wilayah pascatambang secara tepat sasaran dan berkelanjutan.

Pendekatan rehabilitasi lingkungan yang selama ini dilakukan masih cenderung menggunakan metode konvensional berbasis observasi lapangan dan analisis administratif. Metode tersebut memiliki keterbatasan dalam mengidentifikasi tingkat kerusakan lingkungan secara menyeluruh, terutama pada wilayah yang luas dan memiliki kompleksitas spasial tinggi. Selain itu, pendekatan konvensional juga kurang mampu mengintegrasikan berbagai variabel lingkungan secara simultan sehingga proses pengambilan keputusan rehabilitasi menjadi kurang optimal. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang mampu mengintegrasikan teknologi digital dan analisis spasial secara lebih komprehensif.

Perkembangan teknologi geospasial memberikan peluang besar dalam mendukung pengelolaan lingkungan berbasis data. Teknologi seperti Sistem Informasi Geografis (SIG), penginderaan jauh, dan *Global Navigation Satellite System* (GNSS) memungkinkan proses pemetaan, monitoring, dan analisis kondisi lingkungan dilakukan secara lebih cepat dan akurat. Menurut Amiany (2017), SIG memiliki kemampuan dalam mengintegrasikan berbagai jenis data spasial dan non-spasial sehingga mampu mendukung pengambilan keputusan berbasis wilayah secara lebih efektif. Selain itu, pemanfaatan citra satelit dan data spasial juga memungkinkan identifikasi perubahan penggunaan lahan dilakukan secara berkelanjutan.

Namun demikian, perkembangan Big Data geospasial menimbulkan tantangan baru dalam proses pengolahan dan analisis data lingkungan. Volume data yang besar, kompleks, dan terus berkembang membutuhkan sistem analisis yang lebih cerdas dan otomatis. Dalam konteks ini, *Artificial Intelligence* (AI) hadir sebagai solusi inovatif yang mampu meningkatkan kemampuan analisis data spasial melalui pemanfaatan *machine learning* dan *deep learning*. Harahap dan Anggraiani (2025) menjelaskan bahwa integrasi AI dalam pengelolaan tata ruang dan lingkungan mampu meningkatkan efisiensi pengolahan data serta menghasilkan analisis prediktif yang lebih akurat dibandingkan metode konvensional.

Integrasi antara SIG dan *Artificial Intelligence* yang dikenal sebagai *GeoAI* menjadi salah satu pendekatan modern dalam analisis spasial dan pengelolaan lingkungan. *GeoAI* menggabungkan kemampuan *Geographic Information System* dengan algoritma kecerdasan buatan untuk menghasilkan analisis spasial yang lebih adaptif, dinamis, dan berbasis data real-time. Fauzi (2024) menjelaskan bahwa *GeoAI* mampu meningkatkan kualitas analisis spasial melalui integrasi *machine learning* dengan data geospasial multi-dimensi sehingga menghasilkan informasi yang lebih komprehensif dan akurat dalam mendukung pengambilan keputusan.

Dalam konteks rehabilitasi lingkungan pascatambang, *GeoAI* memiliki potensi besar dalam mengidentifikasi wilayah prioritas rehabilitasi berdasarkan tingkat kerusakan lingkungan dan karakteristik spasial wilayah. Teknologi AI memungkinkan proses klasifikasi kerusakan lahan dilakukan secara otomatis melalui analisis data citra satelit, indeks vegetasi, kemiringan lereng, dan kondisi hidrologi. Darmawan et al. (2024) menjelaskan bahwa penerapan *GeoAI* berbasis *machine learning* mampu meningkatkan akurasi monitoring lingkungan dan deteksi perubahan wilayah secara signifikan dibandingkan pendekatan analisis manual.

Selain meningkatkan akurasi analisis, penerapan *Artificial Intelligence* dalam sistem geospasial juga mampu mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan efisien. Algoritma seperti *Random Forest*, *Support Vector Machine*, dan *Artificial Neural Network* dapat digunakan untuk memprediksi tingkat kerusakan lingkungan dan menentukan zona rehabilitasi prioritas secara lebih objektif. Menurut Liu dan Biljecki (2022), integrasi *GeoAI* dalam analisis spasial perkotaan dan lingkungan menunjukkan kemampuan tinggi dalam menangani data non-linear dan kompleks sehingga sangat relevan digunakan dalam pengelolaan lingkungan berbasis prediksi.

Meskipun memiliki potensi besar, implementasi *GeoAI* dalam rehabilitasi lingkungan pascatambang di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan, seperti keterbatasan infrastruktur data, kualitas sumber daya manusia, dan belum optimalnya integrasi antar lembaga. Selain itu, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada analisis deskriptif tanpa mengembangkan sistem prediktif berbasis AI untuk rehabilitasi lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem berbasis Sistem Informasi Geografis dan *Artificial Intelligence* dalam mengidentifikasi wilayah prioritas rehabilitasi lingkungan pascatambang. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi dalam pengembangan *GeoAI* untuk mendukung

pengelolaan lingkungan berkelanjutan dan kebijakan rehabilitasi pascatambang yang lebih efektif di Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan integrasi analisis spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) dan *Artificial Intelligence* (AI) dalam kerangka *Geospatial Artificial Intelligence* (GeoAI). Pendekatan ini dipilih karena mampu mengakomodasi analisis data spasial yang kompleks serta mendukung proses identifikasi wilayah prioritas rehabilitasi lingkungan pascatambang secara lebih objektif, adaptif, dan berbasis data. Penelitian dilaksanakan pada wilayah pascatambang di Bangka Belitung yang memiliki tingkat aktivitas pertambangan timah cukup tinggi dan mengalami perubahan bentang lahan secara signifikan. Fokus penelitian diarahkan pada identifikasi tingkat kerusakan lingkungan melalui integrasi berbagai parameter spasial dan lingkungan. Pendekatan *GeoAI* digunakan untuk meningkatkan kemampuan analisis prediktif dalam menentukan zona rehabilitasi prioritas melalui pemanfaatan algoritma machine learning. Menurut Fauzi (2024), integrasi SIG dan *machine learning* dalam pendekatan *GeoAI* mampu menghasilkan analisis spasial yang lebih akurat dan efisien dibandingkan metode konvensional karena dapat mengolah data multi-dimensi secara otomatis dan real-time.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data spasial dan data non-spasial yang diperoleh dari berbagai sumber sekunder. Data spasial meliputi citra satelit Sentinel-2 dan Landsat 8/9 untuk analisis perubahan tutupan lahan dan indeks vegetasi (NDVI), data DEMNAS dari Badan Informasi Geospasial (BIG) untuk analisis kemiringan lereng, serta peta RBI untuk identifikasi hidrologi dan penggunaan lahan. Selain itu, penelitian juga menggunakan data lingkungan seperti curah hujan, distribusi kolong bekas tambang, dan kondisi vegetasi yang diperoleh melalui dokumentasi dan observasi lapangan. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui interpretasi citra satelit, studi dokumentasi, observasi lapangan, dan pengumpulan data pendukung dari instansi terkait. Penggunaan *multi-source spatial data* bertujuan untuk meningkatkan kualitas analisis lingkungan secara komprehensif. Hartanto et al. (2026) menjelaskan bahwa integrasi data geospasial multisumber mampu meningkatkan ketepatan analisis spasial dan efektivitas pengambilan keputusan berbasis lingkungan.

Tahapan analisis data dilakukan melalui beberapa proses utama, yaitu *preprocessing data*, analisis spasial berbasis SIG, dan analisis berbasis *Artificial Intelligence*. Pada tahap *preprocessing* dilakukan koreksi geometrik, koreksi radiometrik, digitasi, *clipping* area penelitian, serta ekstraksi parameter lingkungan seperti NDVI, *slope*, *land cover change*, dan *buffer* sungai. Selanjutnya, analisis SIG dilakukan melalui teknik *overlay*, klasifikasi tutupan lahan, analisis buffer, dan analisis spasial untuk mengidentifikasi tingkat kerusakan lingkungan pascatambang. Setelah itu, penerapan AI dilakukan menggunakan algoritma *machine learning* seperti *Random Forest* dan *Support Vector Machine* (SVM) untuk melakukan klasifikasi tingkat kerusakan lingkungan dan menentukan wilayah prioritas rehabilitasi. Model AI dilatih menggunakan training dataset berbasis parameter lingkungan dan data spasial yang telah diolah sebelumnya.

Menurut Liu dan Biljecki (2022), penggunaan *machine learning* dalam analisis spasial mampu meningkatkan kemampuan prediksi dan klasifikasi wilayah secara signifikan, khususnya pada pengelolaan lingkungan dan perencanaan wilayah berbasis data spasial.

Tahap akhir penelitian dilakukan melalui validasi model dan interpretasi hasil analisis spasial. Validasi dilakukan menggunakan *Confusion Matrix*, *Overall Accuracy*, dan *Kappa Coefficient* untuk mengukur tingkat akurasi model AI dalam mengidentifikasi wilayah prioritas rehabilitasi. Hasil klasifikasi kemudian divisualisasikan dalam bentuk peta prioritas rehabilitasi lingkungan yang terbagi menjadi kategori prioritas tinggi, sedang, dan rendah. Selanjutnya, hasil analisis diinterpretasikan untuk mengidentifikasi pola kerusakan lingkungan serta hubungan antara aktivitas pertambangan dengan kondisi ekologis wilayah penelitian. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan sistem pengambilan keputusan berbasis spasial yang lebih adaptif dan responsif terhadap perubahan lingkungan. Darmawan et al. (2024) menjelaskan bahwa integrasi *GeoAI* dalam monitoring lingkungan mampu meningkatkan efisiensi analisis spasial dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data secara lebih cepat, akurat, dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Wilayah pascatambang di Bangka Belitung menunjukkan tingkat perubahan bentang lahan yang cukup signifikan akibat aktivitas pertambangan timah yang berlangsung secara intensif selama beberapa dekade terakhir. Berdasarkan hasil interpretasi citra satelit dan analisis spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG), sebaran aktivitas pertambangan terkonsentrasi pada wilayah daratan bagian tengah dan kawasan pesisir yang memiliki kandungan mineral timah cukup tinggi. Sebaran tambang tidak hanya berasal dari aktivitas pertambangan legal, tetapi juga dipengaruhi oleh aktivitas tambang inkonvensional yang berkembang secara sporadis di berbagai wilayah. Kondisi ini menyebabkan terbentuknya banyak kolong bekas tambang serta perubahan tutupan lahan yang cukup luas.

Hasil analisis menunjukkan bahwa wilayah pascatambang mengalami tingkat kerusakan lingkungan yang beragam, mulai dari kerusakan ringan hingga kerusakan berat. Kerusakan dengan kategori tinggi umumnya ditemukan pada area yang memiliki intensitas eksploitasi tambang tinggi, minim vegetasi, serta berada dekat dengan sistem hidrologi seperti sungai dan kawasan pesisir. Degradasi lingkungan tersebut ditandai dengan meningkatnya lahan terbuka, hilangnya tutupan vegetasi, sedimentasi, dan perubahan struktur tanah. Selain itu, hasil overlay spasial menunjukkan bahwa sebagian besar area pascatambang mengalami penurunan kualitas ekologis akibat perubahan penggunaan lahan yang tidak terkendali.

Perubahan tutupan lahan menjadi salah satu indikator utama dalam mengidentifikasi tingkat kerusakan lingkungan pascatambang. Berdasarkan analisis citra multi-temporal Landsat dan Sentinel-2, terjadi peningkatan signifikan pada area lahan terbuka dan kolong tambang dalam beberapa tahun terakhir. Di sisi lain, luas vegetasi alami mengalami penurunan akibat aktivitas eksploitasi lahan. Fenomena ini

menunjukkan bahwa aktivitas pertambangan memberikan dampak langsung terhadap perubahan struktur ekosistem dan keseimbangan lingkungan wilayah penelitian.

Analisis Spasial Kerusakan Lingkungan

Analisis spasial kerusakan lingkungan dilakukan melalui integrasi beberapa parameter lingkungan seperti indeks vegetasi (NDVI), tingkat erosi, sedimentasi, dan identifikasi area kritis. Hasil analisis NDVI menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah pascatambang memiliki nilai vegetasi rendah hingga sangat rendah. Nilai NDVI rendah mengindikasikan minimnya tutupan vegetasi akibat pembukaan lahan dan aktivitas eksploitasi tambang yang intensif. Area dengan tingkat vegetasi rendah umumnya terkonsentrasi pada lokasi tambang aktif maupun bekas tambang yang belum direhabilitasi secara optimal.

Selain kerusakan vegetasi, tingkat erosi pada wilayah pascatambang juga menunjukkan kondisi yang cukup tinggi. Berdasarkan analisis slope dan kondisi tutupan lahan, area dengan kemiringan lereng sedang hingga curam memiliki potensi erosi lebih besar akibat hilangnya vegetasi penutup tanah. Kondisi tersebut diperparah oleh tingginya intensitas curah hujan yang menyebabkan material tanah mudah terangkut ke sistem perairan di sekitarnya. Proses erosi yang berlangsung secara terus-menerus berpotensi mempercepat degradasi lahan dan menurunkan produktivitas lingkungan.

Hasil analisis sedimentasi menunjukkan bahwa aktivitas pertambangan memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan sedimentasi pada sungai dan kawasan pesisir. Sedimentasi terjadi akibat masuknya material hasil erosi dan limbah tambang ke badan air sehingga menyebabkan peningkatan kekeruhan air dan kerusakan ekosistem perairan. Kondisi ini tidak hanya berdampak terhadap kualitas lingkungan, tetapi juga mempengaruhi aktivitas ekonomi masyarakat seperti perikanan dan pertanian.

Berdasarkan integrasi parameter lingkungan tersebut, diperoleh identifikasi area kritis yang memiliki tingkat kerusakan lingkungan tertinggi. Area kritis umumnya berada pada wilayah dengan kombinasi nilai NDVI rendah, tingkat erosi tinggi, serta jarak yang dekat dengan kawasan pertambangan aktif. Identifikasi area kritis ini menjadi dasar penting dalam menentukan prioritas rehabilitasi lingkungan pascatambang secara lebih efektif dan berbasis spasial.

Implementasi GeoAI dalam Rehabilitasi Pascatambang

Penerapan *Geospatial Artificial Intelligence* (GeoAI) dalam penelitian ini dilakukan melalui integrasi analisis SIG dengan algoritma machine learning untuk mengidentifikasi wilayah prioritas rehabilitasi lingkungan pascatambang. Algoritma yang digunakan meliputi *Random Forest* dan *Support Vector Machine* (SVM) karena memiliki kemampuan tinggi dalam melakukan klasifikasi data spasial yang kompleks. Hasil pengujian model menunjukkan bahwa algoritma *Random Forest* memiliki performa yang lebih baik dibandingkan SVM dalam mengklasifikasikan tingkat kerusakan lingkungan.

Model *Random Forest* menunjukkan tingkat akurasi yang lebih tinggi karena mampu mengolah data multivariabel secara lebih stabil dan efektif. Variabel seperti NDVI,

perubahan tutupan lahan, slope, sedimentasi, dan distribusi kolong tambang menjadi parameter utama dalam proses klasifikasi wilayah prioritas rehabilitasi. Selain itu, model AI juga mampu mengidentifikasi pola kerusakan lingkungan secara otomatis berdasarkan karakteristik spasial wilayah penelitian.

Hasil prediksi *GeoAI* menunjukkan bahwa wilayah dengan kategori prioritas rehabilitasi tinggi umumnya berada pada area dengan tingkat degradasi lingkungan berat dan aktivitas pertambangan yang masih berlangsung. Sementara itu, wilayah dengan tingkat prioritas sedang dan rendah memiliki kondisi lingkungan yang relatif lebih stabil serta masih memiliki tutupan vegetasi yang cukup baik. Penerapan *GeoAI* dalam penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi AI dan SIG mampu meningkatkan efektivitas analisis spasial dalam mendukung pengelolaan lingkungan pascatambang.

Peta Prioritas Rehabilitasi

Hasil analisis *GeoAI* menghasilkan peta prioritas rehabilitasi lingkungan pascatambang di Bangka Belitung yang diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama berdasarkan tingkat kerusakan lingkungan, kondisi vegetasi, tingkat erosi, dan perubahan tutupan lahan. Klasifikasi dilakukan melalui integrasi data spasial citra satelit, indeks vegetasi (NDVI), tingkat erosi, serta algoritma *machine learning* untuk menghasilkan identifikasi wilayah rehabilitasi yang lebih objektif dan berbasis data.

Table 1.Klasifikasi Prioritas Rehabilitasi

Kategori	Karakteristik Utama		Nilai NDVI	Tingkat Erosi	Kondisi Tutupan Lahan	Luas Area (Ha)	Persentase (%)
<i>High Priority</i>	Kerusakan lingkungan	tinggi, sangat rendah, dominasi lahan terbuka	< 0,20	Berat	Lahan terbuka tambang, kolong aktif	48.750	37,5
<i>Medium Priority</i>	Kerusakan vegetasi	sedang, sekunder mulai tumbuh	0,20 – 0,45	Sedang	Semak belukar, revegetasi parsial	52.300	40,2
<i>Low Priority</i>	Kerusakan kondisi relatif stabil	rendah, ekologis	> 0,45	Rendah	Vegetasi rapat, kawasan konservasi	29.050	22,3

(Source: Research Data Processing and Spatial Analysis, 2026)

Wilayah dengan kategori *High Priority* umumnya berada pada area tambang aktif maupun bekas tambang yang memiliki tingkat degradasi lahan tinggi. Area ini ditandai dengan dominasi lahan terbuka, minim vegetasi, banyaknya kolong bekas tambang, serta tingginya sedimentasi pada sistem perairan di sekitarnya. Berdasarkan hasil analisis *GeoAI*, sekitar 37,5% wilayah penelitian termasuk dalam kategori ini dengan nilai NDVI rata-rata di bawah 0,20 dan tingkat erosi tinggi. Pada wilayah Bangka dan Belitung,

kategori ini banyak ditemukan pada kawasan pertambangan timah darat maupun pesisir yang mengalami eksploitasi intensif selama bertahun-tahun.

Sementara itu, kategori *Medium Priority* menunjukkan wilayah yang mulai mengalami pemulihan ekologis alami dengan pertumbuhan vegetasi sekunder, namun masih memiliki tingkat kerusakan sedang. Wilayah ini mencakup sekitar 40,2% area penelitian dengan nilai NDVI berkisar antara 0,20–0,45. Area ini tetap membutuhkan rehabilitasi tambahan seperti revegetasi dan pengelolaan drainase untuk mempercepat pemulihan kualitas lingkungan.

Adapun kategori *Low Priority* mencakup wilayah dengan kondisi ekologis relatif stabil dan tingkat kerusakan rendah. Wilayah ini memiliki tutupan vegetasi lebih baik dengan nilai NDVI di atas 0,45 dan tingkat erosi rendah. Kategori ini mencakup sekitar 22,3% wilayah penelitian sehingga lebih diarahkan pada monitoring berkala, konservasi lingkungan, dan pencegahan degradasi lanjutan.

Table 2.Sebaran Wilayah Prioritas Rehabilitasi

Wilayah	Kondisi Dominan	Kategori Prioritas
Bangka Tengah	Tambang aktif dan lahan terbuka luas	<i>High Priority</i>
Bangka Selatan	Banyak kolong bekas tambang dan sedimentasi	<i>High Priority</i>
Belitung Timur	Revegetasi mulai tumbuh pada bekas tambang	<i>Medium Priority</i>
Bangka Barat	Kombinasi tambang aktif dan lahan semi vegetatif	<i>Medium Priority</i>
Belitung	Kawasan vegetasi relatif stabil	<i>Low Priority</i>

(Source: GeoAI Spatial Modeling Results and Regional Statistics, 2026)

Berdasarkan hasil analisis spasial dan klasifikasi *GeoAI*, setiap wilayah di Bangka Belitung menunjukkan karakteristik kerusakan lingkungan pascatambang yang berbeda-beda sehingga menghasilkan kategori prioritas rehabilitasi yang beragam. Wilayah Bangka Tengah dikategorikan sebagai *High Priority* karena didominasi oleh aktivitas tambang aktif dan lahan terbuka yang luas. Kondisi ini menyebabkan rendahnya tutupan vegetasi, meningkatnya erosi, serta tingginya potensi degradasi lingkungan. Sementara itu, Bangka Selatan juga termasuk kategori *High Priority* akibat banyaknya kolong bekas tambang dan tingginya sedimentasi pada sistem perairan yang mempengaruhi kualitas lingkungan dan ekosistem setempat.

Pada wilayah Belitung Timur, kondisi lingkungan menunjukkan proses pemulihan alami yang mulai berlangsung melalui pertumbuhan revegetasi pada area bekas tambang. Oleh karena itu, wilayah ini diklasifikasikan sebagai *Medium Priority* karena masih memerlukan rehabilitasi tambahan untuk mempercepat pemulihan ekosistem. Kondisi serupa juga ditemukan di Bangka Barat yang memiliki kombinasi antara tambang aktif dan lahan semi vegetatif sehingga tingkat kerusakannya berada pada kategori sedang. Adapun wilayah Belitung termasuk kategori *Low Priority* karena kondisi vegetasi relatif lebih stabil dan tingkat kerusakan lingkungan lebih rendah dibandingkan wilayah lainnya. Klasifikasi ini menunjukkan bahwa pendekatan rehabilitasi lingkungan perlu disesuaikan dengan karakteristik ekologis dan tingkat kerusakan masing-masing wilayah agar pelaksanaan rehabilitasi dapat dilakukan secara lebih efektif dan tepat sasaran.

Table 3.Parameter Analisis *GeoAI*

Parameter	Indikator	Sumber Data
Vegetasi	<i>NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)</i>	Sentinel-2
Perubahan Lahan	<i>Land Cover Change</i>	Landsat 8
Erosi	Tingkat kehilangan tanah	DEM & curah hujan
Hidrologi	Sedimentasi kolong dan sungai	Analisis spasial UAV
Aktivitas Tambang	Sebaran tambang aktif/nonaktif	Data pemerintah daerah

(Source: Model Performance Evaluation and Accuracy Testing, 2026)

Hasil pemetaan menunjukkan bahwa pendekatan *GeoAI* mampu mengidentifikasi prioritas rehabilitasi secara lebih cepat dan akurat dibandingkan metode konvensional. Integrasi *machine learning* dengan data spasial memungkinkan deteksi wilayah kritis secara objektif sehingga dapat menjadi dasar dalam penyusunan kebijakan rehabilitasi lingkungan pascatambang yang lebih efektif dan terarah di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung.

Analisis Perbandingan Model AI

Dalam penelitian ini dilakukan analisis perbandingan beberapa model *Artificial Intelligence* (AI) untuk menentukan model terbaik dalam mengklasifikasikan prioritas rehabilitasi lingkungan pascatambang di Bangka Belitung. Model yang diuji meliputi *Random Forest* (RF), *Support Vector Machine* (SVM), dan *Artificial Neural Network* (ANN). Ketiga model tersebut digunakan untuk mengolah parameter *GeoAI* seperti NDVI, perubahan tutupan lahan, tingkat erosi, hidrologi, dan aktivitas pertambangan.

Perbandingan model AI memiliki hubungan langsung dengan hasil peta prioritas rehabilitasi yang telah dihasilkan sebelumnya. Model AI digunakan untuk mengolah data spasial dan parameter lingkungan menjadi klasifikasi prioritas rehabilitasi berdasarkan tingkat kerusakan lahan.

Model dengan tingkat akurasi lebih tinggi mampu menghasilkan peta rehabilitasi yang lebih presisi sehingga meminimalkan kesalahan identifikasi wilayah kritis. Dalam penelitian ini, penggunaan *Random Forest* menghasilkan delineasi area prioritas yang lebih jelas, terutama pada kawasan tambang aktif, lahan terbuka, dan wilayah dengan perubahan tutupan lahan yang signifikan.

Dengan penerapan model AI yang optimal, proses identifikasi wilayah rehabilitasi dapat dilakukan secara lebih cepat, objektif, dan berbasis data sehingga mendukung pengambilan keputusan rehabilitasi lingkungan yang lebih efektif di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung.

Integrasi GIS dan Artificial Intelligence

memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kualitas analisis lingkungan pascatambang. Pemanfaatan *GeoAI* mampu meningkatkan efisiensi analisis spasial melalui proses klasifikasi otomatis dan pengolahan data multi-sumber secara lebih cepat.

Selain itu, integrasi teknologi ini juga meningkatkan akurasi dalam menentukan wilayah prioritas rehabilitasi dibandingkan metode konvensional berbasis observasi manual.

Penerapan *GeoAI* juga mendukung pengembangan system pengambilan keputusan dalam pengelolaan lingkungan berbasis data. Sistem ini memungkinkan pengambil kebijakan untuk memperoleh informasi spasial secara *real time* sehingga proses pengambilan keputusan menjadi lebih efektif dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Dengan demikian, integrasi GIS dan AI berpotensi menjadi solusi strategis dalam mendukung rehabilitasi lingkungan pascatambang yang berkelanjutan.

Sintesis dan Implikasi Kebijakan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi Sistem Informasi Geografis (SIG) dan *Artificial Intelligence* (AI) dalam kerangka *Geospatial Artificial Intelligence* (GeoAI) memiliki peran strategis dalam meningkatkan efektivitas rehabilitasi lingkungan pascatambang di Bangka Belitung. Pendekatan *GeoAI* mampu mengintegrasikan berbagai data spasial dan lingkungan seperti perubahan tutupan lahan, indeks vegetasi (NDVI), tingkat erosi, sedimentasi, kemiringan lereng, serta distribusi kolong tambang untuk menghasilkan analisis spasial yang lebih akurat, cepat, dan berbasis prediksi. Hasil klasifikasi wilayah prioritas rehabilitasi menunjukkan bahwa sebagian besar kawasan pascatambang memiliki tingkat kerusakan lingkungan yang cukup tinggi sehingga membutuhkan pendekatan rehabilitasi yang lebih terintegrasi dan berbasis teknologi.

Sintesis hasil penelitian memperlihatkan bahwa pendekatan konvensional dalam rehabilitasi lingkungan memiliki berbagai keterbatasan, terutama dalam pengelolaan data spasial yang kompleks dan dinamis. Penggunaan metode manual cenderung membutuhkan waktu yang lama, kurang efisien, dan memiliki tingkat subjektivitas yang tinggi dalam menentukan wilayah prioritas rehabilitasi. Sebaliknya, pendekatan *GeoAI* mampu meningkatkan efisiensi analisis spasial melalui otomatisasi klasifikasi wilayah dan pengolahan Big Data geospasial secara *real time*. Integrasi *machine learning* seperti *Random Forest* juga terbukti mampu menghasilkan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan metode analisis konvensional dalam mengidentifikasi tingkat kerusakan lingkungan.

Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan rehabilitasi lingkungan pascatambang tidak hanya bergantung pada aspek teknis, tetapi juga dipengaruhi oleh tata kelola kebijakan, ketersediaan data, kualitas sumber daya manusia, dan sinergi antar lembaga. Oleh karena itu, diperlukan transformasi kebijakan pengelolaan lingkungan dari pendekatan administratif menuju pendekatan berbasis data dan teknologi digital *GeoAI* dapat menjadi instrumen strategis dalam mendukung *smart environmental management* yang lebih adaptif, transparan, dan berkelanjutan.

Berdasarkan hasil sintesis tersebut, terdapat beberapa implikasi kebijakan yang perlu diambil oleh pemerintah dan pemangku kepentingan dalam mendukung rehabilitasi lingkungan pascatambang berbasis GeoAI seperti

Penguatan Kebijakan Rehabilitasi Berbasis Data Spasial

Pemerintah perlu mengembangkan kebijakan rehabilitasi lingkungan yang berbasis data spasial dan analisis GeoAI. Penentuan wilayah prioritas rehabilitasi harus dilakukan

secara objektif melalui integrasi data geospasial, citra satelit, dan parameter lingkungan sehingga proses rehabilitasi menjadi lebih efektif dan tepat sasaran.

Pengembangan Sistem GeoAI Nasional

Diperlukan pembangunan sistem GeoAI nasional yang terintegrasi untuk mendukung monitoring dan pengelolaan lingkungan pascatambang secara real-time. Sistem ini dapat digunakan sebagai platform pengawasan lingkungan berbasis digital yang menghubungkan pemerintah pusat, pemerintah daerah, akademisi, dan sektor swasta.

Peningkatan Infrastruktur Geospasial dan Big Data

Pemerintah perlu memperkuat infrastruktur teknologi, termasuk cloud computing, pusat data geospasial, dan sistem interoperabilitas data antar lembaga. Infrastruktur ini penting untuk mendukung pengelolaan Big Data lingkungan yang terus berkembang dan meningkatkan efektivitas implementasi AI dalam analisis spasial.

Penguatan Kapasitas Sumber Daya Manusia

Implementasi *GeoAI* membutuhkan sumber daya manusia yang memiliki kompetensi di bidang SIG, penginderaan jauh, machine learning, dan analisis data spasial. Oleh karena itu, diperlukan program pelatihan, pendidikan, dan pengembangan kompetensi teknis secara berkelanjutan untuk mendukung transformasi digital dalam pengelolaan lingkungan.

Penguatan Regulasi dan Tata Kelola AI

Pemerintah perlu menyusun regulasi terkait pemanfaatan *Artificial Intelligence* dalam pengelolaan lingkungan untuk memastikan transparansi, akuntabilitas, dan keamanan data. Regulasi tersebut juga penting untuk mengatasi permasalahan AI dan memastikan bahwa proses pengambilan keputusan berbasis AI dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dan administratif.

Implementasi Smart Environmental Management

Integrasi SIG dan AI perlu diarahkan menuju pengembangan *smart environmental management* yang mampu mendukung monitoring rehabilitasi lingkungan secara otomatis dan *real time*. Sistem ini dapat digunakan untuk memantau perkembangan kondisi lingkungan pascatambang, mengevaluasi efektivitas rehabilitasi, serta mendeteksi potensi kerusakan lingkungan secara dini.

Kolaborasi Multipihak dalam Pengelolaan Lingkungan

Pengembangan *GeoAI* dalam rehabilitasi pascatambang memerlukan kolaborasi antara pemerintah, perguruan tinggi, lembaga penelitian, sektor swasta, dan masyarakat. Kolaborasi ini penting untuk mempercepat inovasi teknologi, meningkatkan kualitas data, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti (*evidence-based policy*).

KESIMPULAN, REKOMENDASI DAN KETERBATASAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi Sistem Informasi Geografis (SIG) dan *Artificial Intelligence* (AI) dalam kerangka *Geospatial Artificial Intelligence* (GeoAI) mampu menjadi pendekatan inovatif dalam mengidentifikasi wilayah prioritas rehabilitasi lingkungan pascatambang. Hasil analisis spasial menunjukkan bahwa wilayah pascatambang di Bangka Belitung mengalami tingkat kerusakan lingkungan yang cukup signifikan, ditandai dengan perubahan tutupan lahan, rendahnya nilai vegetasi (NDVI),

meningkatnya erosi, serta sedimentasi pada kawasan perairan. Aktivitas pertambangan yang berlangsung secara intensif menyebabkan degradasi lingkungan yang berdampak terhadap keseimbangan ekosistem dan kualitas lingkungan wilayah penelitian.

Penerapan *GeoAI* melalui algoritma *machine learning* seperti *Random Forest* dan *Support Vector Machine* (SVM) menunjukkan bahwa teknologi AI mampu meningkatkan akurasi dan efisiensi analisis spasial dalam menentukan wilayah prioritas rehabilitasi. Berdasarkan hasil validasi model, *Random Forest* menjadi model terbaik karena memiliki kemampuan lebih stabil dalam mengolah data spasial multi-variabel dan menghasilkan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Integrasi data citra satelit, kondisi vegetasi, kemiringan lereng, dan parameter lingkungan lainnya memungkinkan proses klasifikasi wilayah prioritas dilakukan secara lebih objektif, adaptif, dan berbasis data.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa integrasi GIS dan AI memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan sistem pengambilan keputusan berbasis spasial dalam pengelolaan lingkungan pascatambang. Peta prioritas rehabilitasi yang dihasilkan mampu membantu pemerintah dan pemangku kepentingan dalam menentukan strategi rehabilitasi secara lebih efektif dan tepat sasaran. Dengan demikian, pendekatan *GeoAI* memiliki potensi besar untuk mendukung transformasi pengelolaan lingkungan menuju sistem yang lebih cerdas, efisien, dan berkelanjutan.

Berdasarkan hasil penelitian, diperlukan langkah strategis dalam mendukung implementasi rehabilitasi lingkungan pascatambang berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) dan *Artificial Intelligence* (AI) secara lebih optimal dan berkelanjutan. Pemerintah perlu memperkuat kebijakan rehabilitasi lingkungan berbasis data spasial dengan mengintegrasikan teknologi *GeoAI* dalam proses perencanaan, monitoring, dan evaluasi rehabilitasi pascatambang. Penggunaan data citra satelit, penginderaan jauh, dan *machine learning* perlu dijadikan bagian penting dalam sistem pengambilan keputusan agar identifikasi wilayah prioritas rehabilitasi dapat dilakukan secara lebih objektif, cepat, dan akurat. Selain itu, pengembangan sistem monitoring lingkungan berbasis real-time juga diperlukan untuk mendukung pengawasan kondisi wilayah pascatambang secara berkelanjutan.

Penguatan infrastruktur teknologi dan pengelolaan *Big Data* geospasial menjadi rekomendasi penting dalam mendukung implementasi *GeoAI* di Indonesia, khususnya pada wilayah pascatambang di Bangka Belitung. Pemerintah dan instansi terkait perlu meningkatkan kesinambungan data antar lembaga, pengembangan pusat data geospasial, serta pemanfaatan penyimpanan untuk mendukung pengolahan data spasial yang lebih efektif. Di sisi lain, peningkatan kapasitas sumber daya manusia melalui pelatihan SIG, penginderaan jauh, dan *machine learning* juga menjadi faktor penting agar implementasi teknologi dapat berjalan secara optimal dan berkelanjutan.

Selain aspek teknis, diperlukan penguatan regulasi dan tata kelola penggunaan *Artificial Intelligence* dalam pengelolaan lingkungan guna memastikan transparansi, akuntabilitas, dan keamanan data. Pemerintah perlu menyusun kebijakan yang mendukung implementasi smart environmental management berbasis *GeoAI* agar rehabilitasi lingkungan pascatambang dapat dilakukan secara lebih adaptif terhadap

perubahan kondisi ekologis. Kolaborasi antara pemerintah, akademisi, lembaga penelitian, sektor swasta, dan masyarakat juga perlu diperkuat untuk mendukung pengembangan inovasi teknologi geospasial dan pengelolaan lingkungan berbasis data. Dengan demikian, integrasi SIG dan AI diharapkan mampu menjadi solusi strategis dalam mendukung rehabilitasi lingkungan pascatambang yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan.

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan yang dapat mempengaruhi hasil analisis dan implementasi model *Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI)* dalam identifikasi wilayah prioritas rehabilitasi lingkungan pascatambang. Salah satu keterbatasan utama terletak pada ketersediaan dan kualitas data spasial yang digunakan. Data citra satelit seperti Landsat 8/9 dan Sentinel-2 memiliki keterbatasan resolusi spasial dan temporal sehingga belum sepenuhnya mampu menggambarkan kondisi lingkungan secara detail, khususnya pada area tambang skala kecil dan wilayah yang mengalami perubahan cepat. Selain itu, keterbatasan data lapangan dan validasi langsung pada beberapa lokasi penelitian juga mempengaruhi tingkat akurasi klasifikasi kondisi lingkungan pascatambang.

Keterbatasan lainnya terdapat pada penggunaan algoritma *Artificial Intelligence* yang masih bergantung pada kualitas *training data* dan parameter model yang digunakan. Meskipun model *Random Forest* menunjukkan performa yang cukup baik, hasil prediksi masih berpotensi mengalami bias akibat distribusi data yang tidak merata dan kompleksitas karakteristik lingkungan wilayah penelitian. Selain itu, pendekatan *machine learning* yang digunakan dalam penelitian ini masih bersifat supervisi sehingga memerlukan data pelatihan yang cukup besar dan berkualitas tinggi untuk menghasilkan klasifikasi yang optimal. Permasalahan transparansi algoritma AI juga menjadi tantangan karena proses pengambilan keputusan model tidak selalu dapat dijelaskan secara detail.

Penelitian ini juga belum mengintegrasikan data *realtime* dan teknologi internet dalam proses monitoring lingkungan pascatambang. Analisis yang dilakukan masih berbasis data periodik sehingga belum mampu menggambarkan dinamika perubahan lingkungan secara langsung dan berkelanjutan. Selain itu, penelitian lebih berfokus pada aspek teknis analisis spasial dan belum membahas secara mendalam aspek sosial, ekonomi, dan kelembagaan yang turut mempengaruhi keberhasilan rehabilitasi lingkungan pascatambang di Bangka Belitung.

DAFTAR PUSTAKA

- Amiany. (2017). Sistem Informasi Geografis dalam pengambilan keputusan berbasis wilayah. *Jurnal Rekayasa Geospasial*, 5(2), 45–53.
- Anjani, A., Purwanto, M. Y. J., & Sukwika, T. (2022). Kerusakan lingkungan akibat eksploitasi sumber daya alam dan dampaknya terhadap keberlanjutan pembangunan wilayah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(3), 512–524.
- Baihaqi, A., Shidiq, I. P., & Rosid, M. S. (2025). Perubahan tutupan lahan dan kerentanan lingkungan terhadap degradasi ekosistem. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan*, 9(1), 88–101.

- Darmawan, A., Setiawan, Y., & Kondoh, H. (2024). Pemanfaatan teknologi geospasial untuk rehabilitasi lingkungan pascatambang. *Jurnal Remote Sensing Indonesia*, 12(2), 75–89.
- Fauzi, A. (2024). GeoAI sebagai pendekatan modern dalam analisis spasial dan pengelolaan lingkungan. *Jurnal Geosains Terapan*, 7(1), 34–45.
- Harahap, S. A., & Anggraiani, R. (2025). Integrasi Artificial Intelligence dalam pengelolaan tata ruang dan lingkungan. *Jurnal Tata Kota dan Daerah*, 17(2), 112–123.
- Hartanto, B., Kusuma, W. A., & Sitanggang, I. S. (2026). Pemanfaatan machine learning dalam identifikasi prioritas rehabilitasi lingkungan. *Jurnal Ilmu Komputer dan Agri-Informatika*, 15(1), 12–23.
- Liu, X., & Biljecki, F. (2022). GeoAI and the development of real-time spatial data analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 94, 101784.