

ANALISIS PARADOKS HILIRISASI NIKEL DAN DEGRADASI LINGKUNGAN DI RAJA AMPAT MENGGUNAKAN *SUPPORT VECTOR MACHINE* (SVM)

*(Analysis of the Paradox of Nickel Downstreaming and Environmental Degradation in
Raja Ampat Using Support Vector Machine (SVM))*

Dzakiya Fikri Murtianingsih¹, Putri Wahyuni², Rakhshanda Shaina A.H³

¹Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Ciracas No.38, Serang, Kec. Serang, Kota Serang,
Banten 42116, Indonesia

²Program Studi Sistem Informasi Kelautan, kampus Serang, Universitas Pendidikan
Indonesia, Serang, Kec. Serang, Kota Serang, Banten 42116, Indonesia
e-mail: dzakiyafikrimurtianingsih_27@upi.edu

ABSTRACT

Nickel downstreaming on Gag Island, Raja Ampat, creates a paradox between efforts to increase economic added value and the risk of ecological degradation in coastal areas with high biodiversity. This study aims to analyze the relationship between downstreaming activities and changes in marine ecosystems through spatial mapping using the Lyzenga algorithm-based Support Vector Machine (SVM) method. Landsat 8 images from 2015 and 2025 were classified into four ecosystem classes: live coral, dead coral, seagrass, and deep sea. The results show an increase in the area of live coral from 522.50 ha to 1,178.24 ha and an expansion of seagrass from 10.51 ha to 21.76 ha, indicating a natural recovery process. However, the increase in dead coral from 57.57 ha to 97.35 ha shows that ecological pressure is still ongoing due to sedimentation and the impact of mining activities. This condition places the Gag Island ecosystem in a critical state between recovery and degradation. This study provides a scientific basis for the formulation of more sustainable downstream policies through the strengthening of conservation, ecosystem rehabilitation, and the application of Environmental, Social, and Governance (ESG) principles.

Keywords: Nickel Downstreaming, Environmental Degradation, Marine Ecosystem, Support Vector Machine (SVM), Lyzenga.

ABSTRAK

Hilirisasi nikel di Pulau Gag, Raja Ampat, menimbulkan paradoks antara upaya peningkatan nilai tambah ekonomi dan risiko degradasi ekologis pada kawasan pesisir yang memiliki keanekaragaman hayati tinggi. Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan antara aktivitas hilirisasi dengan perubahan ekosistem laut melalui pemetaan spasial menggunakan metode *Support Vector Machine* (SVM) berbasis algoritma Lyzenga. Citra Landsat 8 tahun 2015 dan 2025 diklasifikasikan menjadi empat kelas ekosistem: karang hidup, karang mati, lamun, dan laut dalam. Hasil menunjukkan peningkatan luas karang hidup dari 522,50 ha menjadi 1.178,24 ha serta perluasan lamun dari 10,51 ha menjadi 21,76 ha yang mengindikasikan proses pemulihan alami. Namun, peningkatan karang mati dari 57,57

ha menjadi 97,35 ha menunjukkan tekanan ekologis masih berlangsung akibat sedimentasi dan pengaruh aktivitas pertambangan. Kondisi ini menempatkan ekosistem Pulau Gag pada keadaan kritis antara pemulihan dan degradasi. Penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi perumusan kebijakan hilirisasi yang lebih berkelanjutan melalui penguatan konservasi, rehabilitasi ekosistem, serta penerapan prinsip *Environmental, Social, and Governance* (ESG).

Kata kunci: Hilirisasi Nikel, Degradasi Lingkungan, Ekosistem Laut, Support Vector Machine (SVM), Lyzenga.

PENDAHULUAN

Kepulauan Raja Ampat yang berada di bagian barat Pulau Papua dikenal secara global sebagai salah satu kawasan dengan nilai ekologis tertinggi di dunia. Wilayah ini kerap dijuluki sebagai “surga keanekaragaman hayati” sekaligus “surga terakhir di bumi” berkat keindahan alamnya yang memukau serta kekayaan ekosistem yang dimilikinya. Namun, pada beberapa tahun terakhir wilayah ini ikut merasakan dampak dari ekspansi industrialisasi nikel yang merupakan bagian dari program hilirisasi mineral nasional (Siregar, 2025). Aktivitas penambangan serta pembangunan fasilitas pengolahan mineral di kawasan pesisir telah menimbulkan berbagai gangguan ekologis, antara lain meningkatnya kekeruhan air laut, proses sedimentasi yang intensif, dan kerusakan terumbu karang yang berfungsi sebagai habitat penting bagi keanekaragaman hayati laut di Raja Ampat. Fenomena ini juga terlihat jelas di Kabupaten Raja Ampat, Provinsi Papua Barat Daya, yang kini menjadi salah satu kawasan pesisir yang terkena dampak langsung dari ekspansi hilirisasi nikel dan mulai menarik perhatian publik. Daerah yang dahulu dikenal karena kemurnian serta kelestarian lingkungannya, kini mulai menghadapi ancaman kerusakan ekologis akibat kegiatan industri. Operasional pertambangan beserta pembangunan infrastruktur pendukungnya berpotensi mempercepat degradasi lingkungan, khususnya pada wilayah pesisir yang rentan dan menjadi habitat utama keanekaragaman hayati laut (Sani & Syamsuddin, 2025).

Pulau Gag menjadi salah satu lokasi yang paling terdampak. Pulau ini merupakan salah satu pulau kecil dalam gugusan Raja Ampat yang memiliki cadangan nikel berkadar tinggi sehingga menjadi sasaran utama eksploitasi industri mineral (Putra, 2025). Keberadaan cadangan nikel tersebut menimbulkan dilema besar, secara ekonomi dipandang sebagai komoditas strategis, terutama dalam mendukung agenda hilirisasi dan peningkatan nilai tambah mineral nasional. Namun, secara ekologis berada pada kawasan pesisir yang memiliki tingkat kerentanan tinggi dan menjadi penyangga utama keanekaragaman hayati laut. Fenomena ini memunculkan paradoks dimana di satu sisi hilirisasi nikel diklaim sebagai strategi peningkatan nilai tambah dan kesejahteraan ekonomi, namun di sisi lain menyebabkan tekanan serius terhadap ekosistem yang menjadi fondasi kehidupan masyarakat local (Lalenda & Santoso, 2025). Program hilirisasi nikel memicu perbedaan tidak hanya biologis, tetapi masuk ke ranah kebijakan di mana sebagian mendukung kelanjutannya sebagai strategi peningkatan nilai tambah ekonomi nasional, sementara pihak lain menyoroti dampak sosial dan ekologisnya. Dalam debat calon wakil presiden yang mengusung tema lingkungan hidup, pembangunan berkelanjutan, dan sumber daya alam, salah satu kandidat

menegaskan bahwa hilirisasi nikel diyakini mampu membawa Indonesia keluar dari *middle income trap* serta memperkuat industri dalam negeri. Namun demikian, implementasi kebijakan ini masih menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait partisipasi masyarakat lokal dalam rantai industri serta persoalan lingkungan yang muncul di wilayah pertambangan.

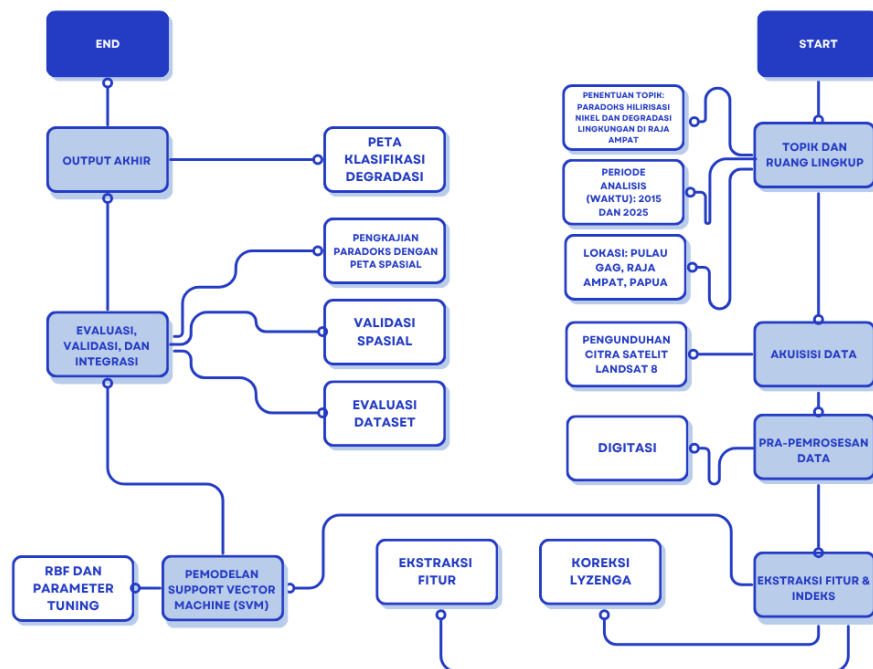
Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pengelolaan sumber daya mineral yang tidak disertai prinsip keberlanjutan dapat menimbulkan ketimpangan sosial dan kerusakan ekologis yang serius (Azaharah & Ameliyah, 2025). Permasalahan ini tampak nyata di kawasan Raja Ampat, Papua Barat, yang dikenal sebagai kawasan dengan keanekaragaman hayati laut tertinggi di dunia. Aktivitas pertambangan nikel di beberapa pulau kecil seperti Gag, Kawe, dan Manuran menimbulkan kekhawatiran serius terhadap kelestarian ekosistem setempat. Menurut laporan Greenpeace (2025), eksploitasi nikel di wilayah tersebut telah menyebabkan deforestasi lebih dari 500 hektare dan meningkatnya sedimentasi di pesisir akibat limpasan tanah dari kegiatan tambang. Dampak ini berpotensi mengancam keberlanjutan ekosistem terumbu karang dan perairan yang menjadi rumah bagi 75 persen spesies karang dunia serta ribuan spesies ikan endemik (WWF Indonesia, 2021). Mengingat Raja Ampat telah ditetapkan sebagai Global Geopark oleh UNESCO, urgensi untuk menyeimbangkan kepentingan ekonomi melalui hilirisasi dengan konservasi lingkungan menjadi hal yang mutlak demi menjaga keberlanjutan sumber daya alam Indonesia.

Studi mengenai dampak hilirisasi di Pulau Gag umumnya masih didominasi pendekatan deskriptif-ekologis yang berfokus pada fenomena kerusakan lingkungan tanpa disertai analisis pemetaan spasial. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara aktivitas hilirisasi nikel dengan perubahan kondisi lingkungan di kawasan Pulau Gag, Raja Ampat. Dengan menggunakan pendekatan machine learning, penelitian ini membangun model klasifikasi berbasis *Support Vector Machine* (SVM) untuk mengidentifikasi dan memetakan area yang terdampak akibat aktivitas hilirisasi secara lebih akurat (Sari et al., 2025). Hasil analisis ini selanjutnya digunakan untuk menjelaskan bentuk paradoks pembangunan yang muncul, yaitu pertentangan antara upaya peningkatan nilai tambah ekonomi melalui program hilirisasi mineral dan risiko degradasi ekologis yang mengancam keberlanjutan lingkungan Pulau Gag, Raja Ampat. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi perumusan kebijakan pembangunan berkelanjutan di wilayah pertambangan, khususnya dalam pengelolaan sumber daya alam yang berorientasi pada keseimbangan antara aspek ekonomi dan ekologi. Selain itu, penelitian ini menunjukkan potensi penerapan machine learning sebagai alat analisis yang efektif dalam pemantauan dan evaluasi kondisi lingkungan, sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan yang lebih berbasis data dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuantitatif. Dalam konteks ini, pendekatan machine learning berbasis *Support Vector Machine* (SVM) digunakan pada penelitian ini untuk mengukur dan memetakan degradasi lingkungan di wilayah penelitian. SVM merupakan salah satu metode yang dapat menyelesaikan masalah peramalan dan

mampu mengatasi overfitting sehingga dapat meningkatkan akurasi hasil prediksi. Studi aplikasi SVM untuk prediksi menunjukkan bahwa model berbasis RBF (*Radial Basis Function*) sering menghasilkan tingkat kesalahan yang lebih rendah dibandingkan model lain dalam beberapa set waktu (Hamid et al., 2023). Metode ini dipilih karena algoritma SVM telah terbukti efektif dalam klasifikasi tutupan lahan dan deteksi perubahan lingkungan melalui citra satelit dalam penelitian mengenai Pemantau degradasi vegetasi di India dengan menggabungkan data satelit multi-sensor, multi-waktu, dan multi-skala menggunakan machine learning di *Google Earth Engine* untuk mengidentifikasi tren perubahan vegetasi serta menentukan faktor penyebabnya, baik iklim maupun aktivitas manusia (Sur et al., 2024). Hasil akhir dari penelitian ini berupa peta *klasifikasi degradasi lingkungan* yang divisualisasikan secara spasial dan mencerminkan tingkat dampak dari kegiatan hilirisasi nikel terhadap lingkungan di Pulau Gag, Raja Ampat, Papua. Tahapan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar. 1, sebagai berikut.



Gambar 1. Proses pengumpulan data

1. Penentuan Topik dan Ruang Lingkup

Tahapan awal dimulai dengan menentukan subjek penelitian yaitu paradoks hilirisasi nikel dan kerusakan lingkungan Raja Ampat. Paradoks ini berkaitan dengan situasi di mana aktivitas hilirisasi yang bertujuan untuk meningkatkan nilai ekonomi malah dapat menyebabkan kerusakan lingkungan. Penelitian ini menganalisis perubahan spasial jangka menengah di Pulau Gag, Raja Ampat, Papua, dari tahun 2015 dan 2025. Pilihan lokasi dan waktu didasarkan pada intensitas aktivitas penambangan dan ketersediaan data satelit (Landsat 8).

2. Akuisisi Data

Pada tahap kedua dilakukan pengunduhan citra satelit Landsat 8 dari portal resmi seperti USGS Earth Explorer. Citra yang digunakan mencakup band-band penting seperti Red, Green, Blue, Near Infrared (NIR), dan Shortwave Infrared (SWIR). Pemilihan citra mempertimbangkan tingkat awan yang rendah serta kesesuaian waktu akuisisi agar hasil klasifikasi lebih akurat (USGS, 2020).

3. Pra-pemrosesan Data

Pra-pemrosesan meningkatkan kualitas gambar agar siap untuk analisis. Dalam langkah ini, dilakukan digitasi untuk membuat batas wilayah penelitian dan area pengamatan secara manual menggunakan software GIS seperti ArcGIS atau QGIS. Tahap ini meliputi penentuan region of interest (ROI) serta pembuatan poligon kelas penutup lahan (misalnya: vegetasi, tambang, badan air, lahan terbuka) yang digunakan sebagai data latih.

4. Ekstraksi Fitur dan Indeks

Fokus dari tahapan ini adalah koreksi kolom air untuk menghilangkan dampak dari perbedaan kedalaman perairan pada pantulan spektral dasar laut yaitu menggunakan algoritma Lyzenga. Reflektansi dasar (*substrate reflectance*) memiliki nilai penting karena dapat dibandingkan antar lokasi dengan kedalaman yang berbeda. Metode Lyzenga memisahkan daratan dari lautan, sehingga pengolahan hanya terjadi di wilayah lautan (Lubis et al., 2017). Algoritma lysega yang yaitu (Lyzenga, 1978) dengan rumus dibawah ini.

$$Y = \ln(L_i) - \left[\left(\frac{k_i}{k_j} \right) \times \ln(L_j) \right]$$

Selanjutnya ekstraksi fitur dengan memperoleh fitur penting dari citra hasil koreksi, seperti pantulan spektral permukaan laut, sedimen, dan vegetasi pesisir. Proses ini tidak menggunakan indeks vegetasi seperti NDVI atau NDWI, melainkan menekankan pada kombinasi band multispektral hasil koreksi Lyzenga untuk menghasilkan fitur utama, seperti rasio Band 5/Band 2, yang menunjukkan kekeruhan perairan dan sedimen. Selanjutnya, untuk memastikan bahwa hanya variabel informatif yang digunakan dalam klasifikasi, fitur-fitur hasil ekstraksi diproses menggunakan metode reduksi dimensi yang dikenal sebagai *Principal Component Analysis* atau PCA.

5. Pembuatan Dataset

Pada tahap ini dilakukan labeling dengan menandai data latih sesuai dengan kelas penutup lahan yang telah diidentifikasi. Nilai-nilai piksel dari fitur band spektral seperti NDWI kemudian dimasukkan ke dalam format yang sesuai untuk pelatihan model SVM.

6. Pemodelan Support Vector Machine (SVM)

Model SVM dibangun menggunakan fungsi kernel *Radial Basis Function* (RBF) untuk menangani data yang tidak terpisah secara linear. Proses pencarian jalur mengubah parameter penting seperti gamma dan C (*regularization*) untuk menghasilkan kombinasi terbaik yang menghasilkan akurasi tinggi (Hsu et al., 2016).

7. Evaluasi, Validasi dan Integrasi

Pada tahap ini dilakukan *Overall Accuracy* dan *Kappa Coefficient* yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja model. Validasi spasial dilakukan guna memastikan hasil klasifikasi dapat diinterpretasikan secara geospasial dengan membandingkannya terhadap data referensi atau peta penggunaan lahan sebelumnya. Selain itu, hasil klasifikasi juga diintegrasikan untuk diklasifikasikan dengan data spasial lain, seperti peta topografi atau tata guna lahan. Tujuannya adalah untuk menyelidiki bagaimana aktivitas hilirisasi nikel dan tingkat degradasi lingkungan di Pulau Gag berkorelasi secara spasial. Selain itu, dilakukan pengkajian paradoks dengan menggunakan peta klasifikasi degradasi lingkungan, yang merupakan peta spasial untuk menunjukkan ketidakseimbangan antara kerusakan lingkungan yang dihasilkan dan keuntungan ekonomi yang menunjukkan wilayah di mana aktivitas pertambangan berdampak.

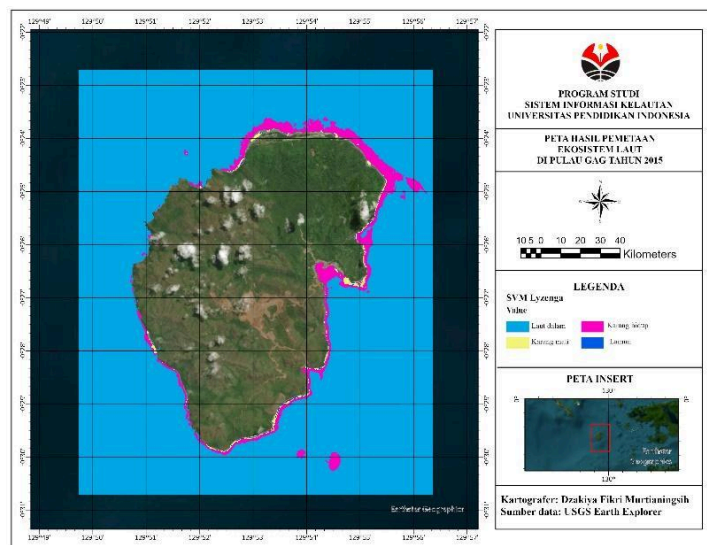
8. Output Akhir

Tahap akhir menghasilkan peta spasial degradasi lingkungan serta laporan analisis yang menjelaskan hubungan antara hilirisasi nikel dan kondisi ekologis Pulau Gag. Hasil ini diharapkan memberikan dasar ilmiah bagi kebijakan pembangunan berkelanjutan di kawasan pertambangan Raja Ampat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Klasifikasi Support Vector Machine (SVM) dengan Algoritma Lyzenga Tahun 2015

Penggunaan metode *Support Vector Machine* (SVM) dengan Algoritma Lyzenga yang diperoleh dari hasil pemetaan sebaran ekosistem laut di Pulau Gag yang mencakup empat kelas utama, yaitu karang hidup, karang mati, lamun, dan laut dalam. Hasil klasifikasi ini menggambarkan distribusi spasial setiap tipe ekosistem laut berdasarkan perbedaan karakteristik spektral yang terekam oleh citra satelit. Peta hasil klasifikasi kemudian divisualisasikan untuk memperlihatkan persebaran spasial dari masing-masing kelas pada tahun 2015 dan 2025 yang terdapat pada gambar 2.



Gambar 2. Peta Hasil Pemetaan Ekosistem Laut di Pulau Gag Tahun 2015

Hasil klasifikasi ekosistem laut Pulau Gag memperlihatkan empat kelas utama yang ditampilkan dengan warna berbeda sesuai legenda peta, yaitu warna biru menunjukkan laut dalam, warna kuning menandakan karang mati, warna magenta (pink) menunjukkan karang hidup, dan warna hijau merepresentasikan lamun. Peta hasil klasifikasi tersebut menggambarkan distribusi spasial yang jelas antara ekosistem perairan dangkal dan laut lepas. Dari hasil tersebut, dapat diamati bahwa sebaran karang hidup cenderung mendominasi area di bagian barat dan selatan Pulau Gag, terutama pada wilayah perairan dangkal yang relatif terlindung dari pengaruh gelombang besar. Luas area karang hidup tercatat sebesar 522,5023 hektar, yang menunjukkan bahwa kondisi ekosistem terumbu karang di wilayah tersebut masih tergolong relatif baik dan produktif. Sebaliknya, area karang mati yang ditunjukkan dengan warna kuning teridentifikasi di beberapa bagian pesisir utara dan timur Pulau Gag, mengindikasikan adanya tekanan lingkungan seperti peningkatan kekeruhan, sedimentasi, atau peristiwa pemutihan karang (*bleaching*). Adapun lamun yang direpresentasikan dengan warna hijau tersebar di perairan dangkal bagian timur laut dan tenggara, yang umumnya memiliki substrat pasir halus serta kondisi perairan yang tenang. Sementara itu, laut dalam yang ditandai dengan warna biru tua menempati area terluas di sekitar Pulau Gag, mencakup perairan di luar batas zona pesisir dangkal. Distribusi spasial ini secara ekologis menunjukkan zonasi alami ekosistem laut, di mana karang dan lamun mendominasi area peralihan menuju laut dalam. Untuk memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai hasil klasifikasi, luas masing-masing kelas ekosistem laut pada Pulau Gag disajikan pada Tabel 1 berikut.

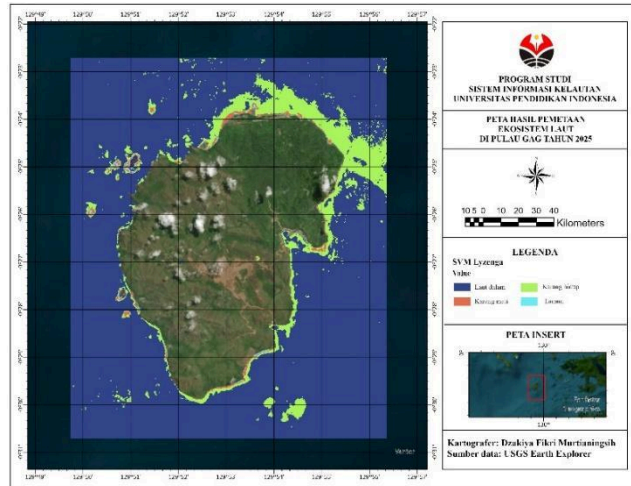
No	Kelas	Luasan (ha)
1	Karang Hidup	522,5023
2	Karang Mati	57,574
3	Lamun	10,514
4	Laut Dalam	11410,4941

Tabel 1. Hasil Luasan Kelas Ekosistem di Tahun 2015

Sumber: Peneliti, 2025

Klasifikasi Support Vector Mechine (SVM) dengan Algoritma Lyzenga Tahun 2025

Hasil klasifikasi ekosistem laut Pulau Gag tahun 2025 seperti ditunjukkan pada Gambar 4 memperlihatkan empat kelas utama ekosistem laut, yaitu karang hidup, karang mati, lamun, dan laut dalam, yang masing-masing direpresentasikan dengan warna biru tua, oranye, hijau, dan biru muda pada legenda peta.



Gambar 3. Peta Hasil Pemetaan Ekosistem Laut di Pulau Gag Tahun 2025

Distribusi spasial menunjukkan bahwa karang hidup masih ditemukan mendominasi wilayah perairan barat dan selatan Pulau Gag, terutama pada area dangkal yang terlindung dari arus kuat dan ombak besar. Luas karang hidup tercatat sebesar 1.178,24 hektar. Sementara itu, karang mati yang ditunjukkan dengan warna kuning tersebar di bagian utara dan timur Pulau Gag, yang mengindikasikan adanya tekanan ekologis seperti peningkatan suhu permukaan laut, sedimentasi, atau aktivitas antropogenik di sekitar pesisir. Lamun, yang direpresentasikan oleh warna hijau, tampak mendominasi wilayah timur laut dan tenggara pulau, di area perairan dangkal dengan substrat pasir halus serta kondisi perairan yang lebih tenang. Adapun laut dalam (warna biru tua) menempati area terluas di luar zona pesisir, menggambarkan batas alami ekosistem dangkal dengan wilayah oseanik. Luasan masing-masing kelas hasil klasifikasi tahun 2025 disajikan pada Tabel 2 berikut.

No	Kelas	Luasan (ha)
1	Karang Hidup	1178,2364
2	Karang Mati	97,348
3	Lamun	21,757
4	Laut Dalam	10684,6637

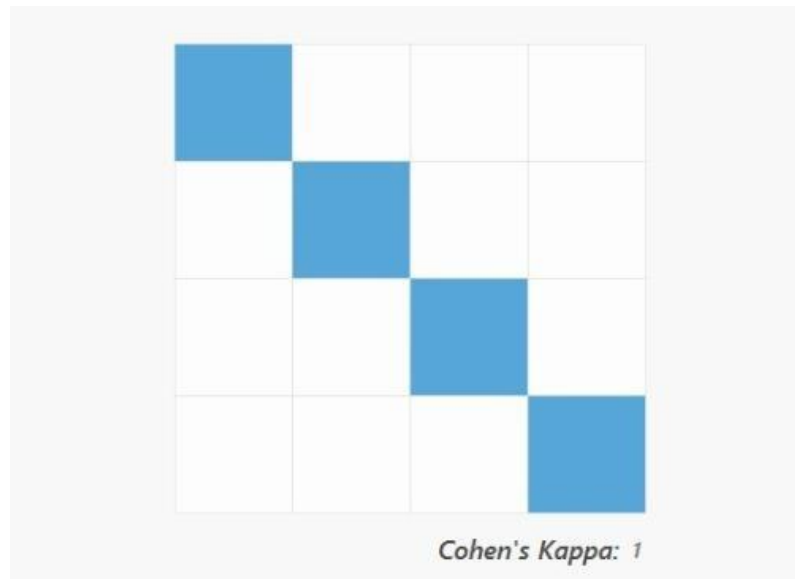
Tabel 2. Hasil Luasan Kelas Ekosistem di Tahun 2025

Sumber: Peneliti, 2025

Evaluasi Akurasi Klasifikasi

Evaluasi akurasi dilakukan untuk memastikan bahwa hasil pemetaan tahun 2015 dan 2025, berdasarkan perhitungan *confusion matrix*, diperoleh nilai *Overall Accuracy* (OA) dan *Cohen's Kappa*, di mana nilai Kappa mencapai 1.00. Nilai ini mencerminkan tingkat kesesuaian yang sangat baik antara hasil klasifikasi SVM dan data referensi, yang berarti seluruh sampel validasi berhasil dikenali dengan tepat tanpa terjadi kesalahan klasifikasi. Temuan ini menunjukkan bahwa model SVM mampu membedakan variasi karakteristik spektral setiap kelas ekosistem secara konsisten, sehingga peta tutupan yang dihasilkan memiliki akurasi yang sangat tinggi. Hasil akurasi ini memperkuat validitas peta klasifikasi pada tahun 2015 dan 2025 serta menjadi dasar yang kuat untuk tahap interpretasi perubahan

ekosistem. Visualisasi *confusion matrix* yang digunakan sebagai dasar evaluasi ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 4. Hasil Confusion Matrix dan Nilai Cohen's Kappa

Perubahan Luasan Tiap Kelas Ekosistem Laut Pulau Gag Tahun 2015–2025

Hasil perbandingan klasifikasi ekosistem laut antara tahun 2015 dan 2025 menunjukkan adanya perubahan signifikan pada distribusi dan luasan tiap kelas ekosistem, meliputi karang hidup, karang mati, lamun, dan laut dalam. Perubahan tersebut menggambarkan dinamika ekologis yang terjadi selama satu dekade terakhir di perairan Pulau Gag.

1. Karang hidup mengalami peningkatan luas yang cukup signifikan, dari 522,50 ha pada tahun 2015 menjadi 1.178,24 ha pada tahun 2025 atau meningkat sebesar 655,73 ha (sekitar 125%). Peningkatan ini mengindikasikan adanya proses pemulihan ekosistem terumbu karang di beberapa wilayah, terutama pada bagian barat dan selatan Pulau Gag yang relatif terlindung dari tekanan gelombang besar dan aktivitas manusia. Faktor seperti peningkatan kualitas perairan dan keberhasilan regenerasi alami kemungkinan berkontribusi terhadap pertumbuhan karang baru di area tersebut.
2. Karang mati juga mengalami peningkatan luas, dari 57,57 ha menjadi 97,35 ha. Walaupun peningkatan karang mati tampak kecil secara absolut, hal ini menandakan masih adanya tekanan lingkungan seperti pemutihan karang (coral bleaching) akibat suhu permukaan laut yang tinggi, sedimentasi, atau aktivitas penangkapan ikan destruktif di area tertentu. Kenaikan luasan karang mati dapat diinterpretasikan sebagai indikasi degradasi lokal pada beberapa titik perairan di sekitar pulau.
3. Ekosistem lamun menunjukkan peningkatan luas dari 10,51 ha menjadi 21,76 ha. Peningkatan ini menunjukkan perluasan habitat lamun ke arah timur laut dan tenggara, yaitu wilayah dengan substrat pasir halus dan kedalaman perairan yang sesuai. Pergeseran ini dapat diartikan sebagai proses kolonisasi alami atau respon adaptif terhadap perubahan tutupan karang dan sedimentasi yang lebih stabil di wilayah dangkal.

4. Laut dalam mengalami penurunan luas sebesar 725,83 ha, dari 11.410,49 ha pada tahun 2015 menjadi 10.684,66 ha pada tahun 2025. Penurunan ini tidak menunjukkan perubahan ekologis yang signifikan, melainkan pergeseran batas klasifikasi spasial akibat peningkatan luasan ekosistem dangkal (karang hidup, karang mati, dan lamun) yang teridentifikasi lebih luas melalui citra tahun 2025. Dengan demikian, laut dalam relatif stabil secara ekologis, hanya mengalami perubahan dalam batas klasifikasi area.

Analisis Potensi Penyebab Perubahan Ekosistem Laut Pulau Gag (2015–2025)

Perubahan luasan ekosistem laut di Pulau Gag selama periode 2015 dan 2025 tidak terjadi secara acak, melainkan merupakan hasil dari kombinasi antara aktivitas antropogenik dan faktor alamiah yang saling berinteraksi dalam memengaruhi kondisi perairan pesisir. Aktivitas pertambangan nikel yang berlangsung di daratan Pulau Gag berpotensi meningkatkan sedimentasi dan kekeruhan air laut akibat limpasan material tanah dan limbah tambang yang terbawa ke perairan pesisir. Peningkatan kekeruhan ini dapat menghambat penetrasi cahaya ke dasar laut sehingga mengganggu proses fotosintesis karang dan lamun. Dalam jangka panjang, kondisi tersebut menyebabkan penurunan tutupan karang hidup di beberapa titik serta memicu munculnya karang mati di area pesisir utara dan timur pulau. Selain itu, pembangunan infrastruktur pertambangan dan dermaga turut mengubah morfologi pesisir dan memengaruhi pola arus lokal, yang berdampak pada pergeseran zonasi ekosistem laut.

Pulau Gag berada di zona gelombang tinggi dan arus kuat, terutama di sisi barat laut yang berhadapan langsung dengan Samudra Pasifik. Tekanan fisik dari gelombang besar dapat menyebabkan kerusakan mekanis pada struktur karang serta memperlambat proses pemulihan alami. Fenomena pemutihan karang (*coral bleaching*) juga menjadi salah satu penyebab penting degradasi karang. Kenaikan suhu permukaan laut global akibat perubahan iklim menyebabkan stres termal pada zooxanthellae yang hidup bersimbiosis dengan karang, sehingga mengakibatkan kematian karang di beberapa area dangkal. Peristiwa ini tercermin dari peningkatan luasan karang mati antara tahun 2015 dan 2025.

Interpretasi Hasil dan Paradoks Hilirisasi Nikel dan Degradasi Lingkungan

Hilirisasi diklaim sebagai strategi nasional untuk meningkatkan nilai tambah ekonomi, memperluas lapangan kerja, dan mendorong industrialisasi sumber daya mineral, namun di sisi lain menimbulkan tekanan serius terhadap ekosistem pesisir dan laut yang menjadi fondasi kehidupan masyarakat lokal (Lalenda & Santoso, 2025). Paradoks ini mencerminkan ketegangan antara agenda pertumbuhan ekonomi dan prinsip pembangunan berkelanjutan, terutama di wilayah-wilayah pulau kecil seperti Pulau Gag yang memiliki tingkat kerentanan ekologis tinggi.

Program hilirisasi nikel memicu perdebatan multidimensional tidak hanya dalam ranah biologis dan ekologis, tetapi juga dalam kebijakan dan keadilan sosial. Sebagian pihak mendukungnya sebagai langkah strategis untuk memperkuat daya saing ekonomi nasional dan mengurangi ketergantungan terhadap ekspor bahan mentah, sementara pihak lain menyoroti biaya ekologis yang ditanggung daerah penghasil, termasuk degradasi hutan, pencemaran pesisir, serta menurunnya kualitas ekosistem laut.

Dalam debat calon wakil presiden bertema lingkungan hidup, pembangunan berkelanjutan, dan sumber daya alam, salah satu kandidat menegaskan bahwa hilirisasi nikel merupakan jalan menuju transformasi industri dan solusi untuk keluar dari *middle income trap* melalui penguatan rantai pasok logam energi nasional. Namun, implementasi kebijakan ini masih menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait minimnya partisipasi masyarakat lokal

dalam rantai industri, lemahnya mekanisme pengawasan lingkungan, dan belum optimalnya penerapan prinsip Environmental, Social, and Governance (ESG) di sektor pertambangan.

Sejumlah studi menunjukkan bahwa aktivitas pertambangan nikel di pulau-pulau kecil seperti Pulau Gag dapat meningkatkan laju sedimentasi, kekeruhan air, serta menurunkan tingkat penetrasi cahaya ke dasar laut, yang pada akhirnya memengaruhi kesehatan ekosistem terumbu karang dan padang lamun. Dampak tersebut tidak hanya bersifat ekologis, tetapi juga sosial ekonomi, karena menurunnya produktivitas perikanan tangkap dan terganggunya mata pencaharian masyarakat pesisir.

Signifikansi Hasil dan Arah Rekomendasi Pengelolaan

Hasil studi mengenai perubahan ekosistem laut di Pulau Gag selama periode 2015–2025 menunjukkan dampak signifikan terhadap pengelolaan sumber daya pesisir dan laut secara berkelanjutan. Meningkatnya cakupan karang hidup dan lamun mengindikasikan adanya potensi pemulihan alami di beberapa wilayah yang dilindungi, sementara peningkatan luas karang mati menandakan tekanan ekologis yang masih tinggi akibat aktivitas manusia, khususnya dari pertambangan nikel dan kegiatan pesisir lainnya. Secara ekologis, kondisi di Pulau Gag menunjukkan bahwa ekosistem berada pada titik kritis antara pemulihan dan degradasi. Jika tekanan lingkungan terus meningkat tanpa adanya pengelolaan adaptif, kemampuan ekosistem untuk pulih secara alami dapat menurun secara signifikan dalam jangka panjang. Pada sisi kebijakan, temuan ini memberikan dasar ilmiah bagi pemerintah daerah maupun nasional untuk mengevaluasi kembali strategi hilirisasi nikel di pulau-pulau kecil seperti Pulau Gag, yang memiliki kapasitas ekosistem terbatas. Pendekatan pengelolaan berbasis ekosistem perlu diterapkan secara konsisten dengan mempertimbangkan daya pulih lingkungan, kapasitas asimilasi ekosistem, serta kebutuhan masyarakat lokal. Selain itu, penerapan prinsip *Environmental, Social, and Governance* (ESG) dalam industri pertambangan harus diperkuat untuk memastikan bahwa setiap aktivitas ekonomi di wilayah pesisir tetap memperhatikan keberlanjutan lingkungan laut dan kesejahteraan masyarakat.

Rekomendasi Langkah-Langkah Mitigasi

Berdasarkan temuan dan analisis di atas, beberapa langkah strategis yang direkomendasikan untuk mitigasi dampak dan konservasi ekosistem laut di Pulau Gag antara lain sebagai berikut:

1. Integrasi Kebijakan Industri dan Konservasi

Pemerintah perlu mengembangkan mekanisme kebijakan yang mensinergikan sektor pertambangan dengan perlindungan ekosistem laut, misalnya melalui penetapan zona larangan aktivitas tambang di wilayah pesisir sensitif, peningkatan standar pengelolaan limbah tambang, dan pengawasan berbasis komunitas. Pendekatan kolaboratif antara pemerintah, industri, akademisi, dan masyarakat lokal akan menjadi kunci dalam mewujudkan tata kelola sumber daya pesisir yang adil, berkelanjutan, dan berbasis ekosistem.

2. Rehabilitasi Ekosistem Karang dan Lamun

Program rehabilitasi ekosistem laut yang terstruktur dan berbasis bukti ilmiah, terutama di wilayah pesisir utara dan timur Pulau Gag yang mengalami degradasi. Langkah-langkah yang bisa diterapkan antara lain pemasangan karang buatan (artificial reef), transplantasi karang hidup, serta restorasi padang lamun pada perairan dangkal dengan substrat pasir halus. Pelaksanaan kegiatan ini sebaiknya melibatkan masyarakat pesisir, lembaga

konservasi, dan pihak industri sebagai wujud tanggung jawab sosial dan lingkungan (corporate social responsibility/CSR).

3. Penerapan Teknologi Ramah Lingkungan dalam Industri

Industri pertambangan nikel dianjurkan untuk mengadopsi teknologi yang meminimalkan sedimentasi, kekeruhan, dan polusi air laut. Contohnya penggunaan sistem pengendalian limbah cair yang lebih efisien, penanaman vegetasi penahan erosi di sekitar tambang, serta metode pertambangan yang mengurangi gangguan morfologi pesisir. Penerapan prinsip ESG harus menjadi bagian dari setiap tahap operasi industri, termasuk tahap perencanaan, operasional, dan pasca-tambang.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkap adanya paradoks antara program hilirisasi nikel dan kondisi ekosistem laut di Pulau Gag, Raja Ampat, di mana aktivitas hilirisasi yang dimaksudkan untuk meningkatkan nilai tambah ekonomi dan mendukung industrialisasi nasional justru menimbulkan tekanan ekologis signifikan, seperti peningkatan sedimentasi, kekeruhan air, dan kematian karang di beberapa wilayah pesisir. Analisis berbasis *Support Vector Machine* (SVM) dengan algoritma Lyzenga menunjukkan bahwa antara tahun 2015 dan 2025 terjadi peningkatan luas karang hidup dan lamun, menandakan adanya proses pemulihan alami, namun peningkatan karang mati tetap menunjukkan tekanan lingkungan yang tinggi, sehingga ekosistem Pulau Gag berada pada titik kritis antara pemulihan dan degradasi. Temuan ini menjadi dasar ilmiah bagi penyusunan kebijakan pembangunan berkelanjutan di kawasan pertambangan, dengan penekanan pada integrasi antara kebijakan industri dan konservasi, rehabilitasi ekosistem karang dan lamun, serta penerapan teknologi ramah lingkungan berbasis prinsip Environmental, Social, and Governance (ESG), sekaligus menegaskan pentingnya pendekatan berbasis ekosistem dan partisipasi masyarakat lokal untuk menyeimbangkan kepentingan ekonomi melalui hilirisasi nikel dengan keberlanjutan lingkungan laut.

DAFTAR PUSTAKA

- Azaharah, Y., & Ameliyah, F. (2025). Analisis Dampak Lingkungan Akibat Kegiatan Pertambangan dalam Perspektif Maqhashid Syariah. *Jurnal Media Akademik (JMA)*, 3(5).
- Hamid, A. A. K. A., Nawir, W. I. A. W. M., Lola, M. S., Mustafa, W. A., Abdul Malik, S. M., Zakaria, S., Aruchunan, E., Zainuddin, N. H., Gobithaasan, R. U., & Abdullah, M. T. (2023). Improvement of time forecasting models using machine learning for future pandemic applications based on COVID-19 data 2020–2022. *Diagnostics*, 13(6), 1121. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13061121>
- Hsu, C. W., Chang, C. C., & Lin, C. J. (2016). *A Practical Guide to Support Vector Classification*. National Taiwan University.
- Indonesia, W. W. F. (2021). *Raja Ampat: Pusat keanekaragaman hayati terumbu karang dunia*. https://wwf.panda.org/discover/knowledge_hub/where_we_work/coraltriangle/
- Lalenda, R. P., & Santoso, E. B. (2025). *Dampak Aktivitas Pertambangan Nikel Terhadap Kondisi Sosial Ekonomi Masyarakat Kabupaten Morowali Utara (Kasus Pada Pt. Gunbuster Nickel Industry)*. Institut Pemerintahan Dalam Negeri.
- Lubis, M. Z., Sari, D. P., Aprilliyanti, T., Daulay, A. K., Hanafi, A., Ananda, F., Saputri, D. A., Aminah, S., Zabid, M. A. P., & Ibrahim, M. M. (2017). Penggunaan Citra Landsat 8

- untuk Pemetaan Persebaran Lamun di Pesisir Pulau Batam. *Dinamika Maritim*, 6(1), 7–11. <https://ojs.umrah.ac.id/index.php/dinamikamaritim>
- Putra, D. Y. (2025). Perlindungan Hukum Bagi Masyarakat Yang Terdampak Pertambangan Nikel Di Pulau Gag Raja Ampat. *Iuris Studia: Jurnal Kajian Hukum*, 6(2), 446–453.
- Sani, H., & Syamsuddin, S. (2025). Konflik Penambangan Nikel di Raja Ampat: Analisis Etika Lingkungan dan Rekayasa Pertambangan untuk Konservasi Berkelanjutan. *RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business*, 4(2), 3453–3461.
- Sari, D. P., Risman, R., Maulana, F., Efrizoni, L., & Rahmaddeni, R. (2025). Model Prediksi Dampak Perubahan Iklim pada Ketahanan Pangan Menggunakan Algoritma Support Vector Machine and K-Nearest Neighbors. *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, 5(3), 851–861.
- Siregar, R. K. (2025). Kecenderungan Media dalam Polemik Tambang Nikel Raja Ampat:(Analisis Bingkai Berita Kompas.com). *Prosiding Seminar Nasional Komunikasi (SENAKOM)*, 2(2).
- Sur, K., Verma, V. K., Panwar, P., Shukla, G., Chakravarty, S., & Nath, A. J. (2024). Monitoring vegetation degradation using remote sensing and machine learning over India – a multi-sensor, multi-temporal and multi-scale approach. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, 1382557. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1382557>
- USGS. (2020). *Landsat 8 Data User Handbook*. United States Geological Survey.