

## Pendekatan Mixed-Method Penginderaan Jauh untuk Analisis Sosial Lingkungan terhadap Deforestasi dan Degradasi Ekologis di Wilayah Pertambangan Papua Barat

Ceni Febi Kurnia Sari<sup>1\*</sup>, Maliya Syabriyana<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Universitas Papua, Manokwari– Papua Barat – 98312. Indonesia.

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Kimia, Universitas Serambi Mekkah, Batoh- Banda Aceh 23245, Aceh. Indonesia.

Email: [c.sari@unipa.ac.id](mailto:c.sari@unipa.ac.id)<sup>1</sup>, [maliya.syabriyana@serambimekkah.ac.id](mailto:maliya.syabriyana@serambimekkah.ac.id)<sup>2</sup>

\*Corresponding author, email: [c.sari@unipa.ac.id](mailto:c.sari@unipa.ac.id)

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara terpadu dampak sosial dan lingkungan akibat kegiatan pertambangan terbuka di Papua Barat, dengan fokus pada tiga wilayah utama yaitu Teluk Bintuni, Fakfak, dan Pulau Gag. Pendekatan mixed-method digunakan melalui kombinasi analisis spasial penginderaan jauh, uji laboratorium lingkungan, serta survei sosial partisipatif. Data spasial diolah menggunakan perangkat lunak ArcGIS Pro 3.2 dan QGIS 3.34, sedangkan data sosial diperoleh dari ±60 responden melalui wawancara dan *Focus Group Discussion* (FGD) yang diolah dengan NVivo 14. Hasil penginderaan jauh menunjukkan peningkatan luas deforestasi hingga lebih dari 1.000 hektar selama periode 2013–2024, disertai penurunan nilai *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dari 0,78 menjadi 0,40. Analisis laboratorium memperlihatkan peningkatan kadar logam berat timbal (Pb) dan tembaga (Cu) yang melebihi baku mutu lingkungan nasional. Dari sisi sosial, indeks kepuasan masyarakat menurun hingga 40 poin, dipengaruhi oleh hilangnya lahan adat, penurunan kualitas air, dan keterbatasan akses terhadap sumber penghidupan. Korelasi negatif antara luas deforestasi dan indeks sosial ( $R^2 \approx 0,78$ ) menguatkan keterkaitan antara degradasi ekologis dan ketidakstabilan sosial masyarakat adat. Penelitian ini merekomendasikan penerapan reklamasi progresif berbasis spesies endemik, pemantauan independen kualitas lingkungan, serta penguatan mekanisme *Free, Prior, and Informed Consent* (FPIC) sebagai langkah menuju tata kelola pertambangan yang adil, partisipatif, dan berkelanjutan di Papua Barat.

**Kata Kunci:** Mixed-Method, Penginderaan Jauh, Sosial Lingkungan, Deforestasi, Degradasi Ekologis.

### ABSTRACT

*This study provides an integrated assessment of the social and environmental impacts of open-pit mining in West Papua, Indonesia, focusing on three major mining regions: Teluk Bintuni, Fakfak, and Gag Island. A mixed-method approach was employed, combining remote sensing-based spatial analysis, environmental laboratory testing, and participatory social surveys. Spatial data were processed using ArcGIS Pro 3.2 and QGIS 3.34, while social data were collected from approximately 60 respondents through interviews and focus group discussions (FGDs) analyzed with NVivo 14. Remote sensing analysis revealed a significant increase in deforestation, exceeding 1,000 hectares between 2013 and 2024, accompanied by a decline in the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from 0.78 to 0.40. Laboratory results indicated elevated concentrations of lead (Pb) and copper (Cu) exceeding national environmental quality standards. Social assessments showed a 40-point decline in community satisfaction indices, driven by land loss, reduced water quality, and restricted access to traditional livelihoods. A strong negative correlation ( $R^2 \approx 0.78$ ) between deforestation extent and social well-being indicates the interdependence between ecological degradation and local social instability. The study recommends the implementation of progressive reclamation using endemic plant species, independent environmental monitoring, and the Free, Prior, and Informed Consent (FPIC) mechanism to promote socially equitable, participatory, and sustainable mining governance in West Papua.*

**Keywords:** Mixed-Method, Remote Sensing, Social Environment, Deforestation, Ecological Degradation,

## 1. PENDAHULUAN

Pertambangan terbuka (*open-pit mining*) di kawasan tropis telah menjadi bentuk dominan eksploitasi sumber daya mineral. Aktivitas ini menghasilkan manfaat ekonomi yang besar, namun juga menimbulkan dampak ekologis dan sosial yang signifikan [1], [2], [3]. Di Papua Barat, kegiatan tersebut mempercepat deforestasi, fragmentasi habitat, penurunan keanekaragaman hayati, serta perubahan kualitas air dan tanah. Dampak lingkungan tersebut terjadi bersamaan dengan distribusi manfaat ekonomi yang tidak merata, sehingga menciptakan ketimpangan sosial dan konflik sumber daya di tingkat lokal [4], [5].

Secara ekologis, tambang terbuka mengubah bentang alam dan mengurangi luasan habitat alami. Aktivitas ini memicu penurunan jumlah spesies, peningkatan erosi tanah, serta pencemaran air dan tanah di sekitarnya [6], [7], [8]. Studi di wilayah Papua dan Melanesia melaporkan bahwa deforestasi akibat tambang bersifat berkelanjutan, disertai fragmentasi ekosistem dan pencemaran hilir akibat pembuangan tailing yang sulit dipulihkan bahkan setelah penutupan tambang [9], [10].

Penelitian pasca-tambang menunjukkan bahwa revegetasi selama lebih dari satu dekade belum mampu mengembalikan tingkat keanekaragaman hayati seperti kondisi hutan primer [8], [11], [12], [13], [14]. Selain itu, tanah di sekitar area tambang sering mengalami akumulasi logam berat seperti timbal (Pb) dan tembaga (Cu), yang menurunkan kesuburan tanah dan fungsi ekologis lahan [6], [15], [16].

Dampak sosial juga menjadi perhatian penting. Berbagai studi menunjukkan keterkaitan erat antara aktivitas pertambangan dan pengusuran masyarakat adat, degradasi budaya, serta peningkatan risiko kesehatan masyarakat [17], [18], [19], [20], [21]. Kasus di tambang Grasberg/Freeport, misalnya, memperlihatkan kehilangan tanah adat masyarakat Amungme dan Kamoro, serta melemahnya sistem kepemilikan tradisional dan nilai budaya lokal [4], [11], [22]. Selain itu, konflik mengenai kompensasi, hak atas tanah, dan distribusi pendapatan sering muncul. Hal ini diakibatkan oleh ketimpangan kekuasaan dan rendahnya partisipasi masyarakat dalam pengambilan keputusan [5], [12], [23], [24].

Secara ekonomi, sektor ini memang meningkatkan pendapatan sebagian masyarakat dan mempercepat pembangunan infrastruktur lokal, seperti yang terjadi di Pulau Gag dan proyek nikel di Raja Ampat [12], [13]. Namun, manfaat tersebut masih terkonsentrasi pada kelompok tertentu, sehingga sebagian besar masyarakat adat tetap termarginalisasi [4]. Pola serupa terlihat di tambang Melanesia seperti Ok Tedi dan Porgera, yang memperlihatkan hubungan erat antara pengelolaan limbah yang buruk, pencemaran lingkungan, dan konflik sosial berkepanjangan [1], [25], [26].

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang menggabungkan analisis spasial lingkungan dan penilaian sosial-budaya masyarakat lokal untuk mengevaluasi dampak tambang terbuka di Papua Barat. Meskipun berbagai studi terdahulu telah menyoro-ti isu lingkungan dan sosial secara terpisah, kajian yang

menghubungkan kedua aspek tersebut secara sistematis menggunakan basis data geospasial dan partisipasi masyarakat masih terbatas. Selain itu, belum ada penelitian komprehensif yang secara kuantitatif mengukur luas kehilangan hutan, tingkat kontaminasi tanah dan air, serta dampaknya terhadap kesejahteraan masyarakat di wilayah ini.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Lokasi dan Desain Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di tiga wilayah pertambangan terbuka di Provinsi Papua Barat, yaitu Teluk Bintuni ( $1^{\circ}57'-2^{\circ}12' \text{LS}$ ;  $133^{\circ}02'-133^{\circ}31' \text{BT}$ ), Kabupaten Fakfak ( $2^{\circ}57'-3^{\circ}20' \text{LS}$ ;  $132^{\circ}05'-132^{\circ}45' \text{BT}$ ), dan Pulau Gag, Kepulauan Raja Ampat ( $0^{\circ}28'-0^{\circ}33' \text{LS}$ ;  $129^{\circ}50'-130^{\circ}05' \text{BT}$ ). Ketiga lokasi ini dipilih secara purposif karena mewakili variasi geologi dan ekosistem khas wilayah pesisir-pegunungan yang menjadi pusat eksplorasi nikel, tembaga, dan emas.

Data citra satelit Landsat 8 OLI (periode 2013, 2018, dan 2024) serta Sentinel-2 MSI (periode 2016 dan 2024) digunakan untuk analisis spasial tutupan lahan dan perubahan vegetasi.

Penelitian ini menggunakan pendekatan *mixed-method* yang menggabungkan analisis spasial penginderaan jauh, kajian laboratorium lingkungan, serta penilaian sosial partisipatif. Desain ini dipilih untuk memperoleh pemahaman komprehensif mengenai hubungan antara dampak ekologis dan konsekuensi sosial-budaya akibat aktivitas tambang terbuka [22], [24], [27].

### 2.2. Jenis dan Sumber Data

Data terdiri dari data primer dan sekunder. Data primer mencakup: observasi lapangan, pengukuran kualitas lingkungan (tanah dan air), dan wawancara dan FGD dengan masyarakat lokal. Data sekunder meliputi citra satelit, laporan AMDAL, dan dokumen perusahaan maupun pemerintah daerah. Citra Landsat 8 dan Sentinel-2 digunakan untuk mendeteksi perubahan tutupan lahan menggunakan kanal spektral NIR dan Red. Kombinasi kanal 5-4-3 (Landsat 8) dan 8-4-3 (Sentinel-2) digunakan untuk analisis vegetasi, dengan koreksi geometrik dan radiometrik dilakukan di ArcGIS Pro 3.2.

Sampel tanah dan air diambil dalam radius 0-5 km dari titik pusat tambang, dengan tiga kategori jarak pengamatan: radius dekat (0-1 km), menengah (1-3 km), dan jauh (3-5 km). Analisis laboratorium dilakukan menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) untuk menentukan kadar logam berat Pb, Cu, dan Zn [6].

Sementara itu, data sosial diperoleh melalui wawancara mendalam dan FGD terhadap  $\pm 60$  responden (masyarakat adat, tokoh kampung, aparat lokal, dan perwakilan industri tambang). Pengumpulan data sosial dilakukan dengan prinsip *Free, Prior, and Informed Consent* (FPIC) [19].

### 2.3. Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dalam tiga tahapan utama berupa:

- Tahap pertama adalah data spasial dilakukan akuisisi citra satelit Landsat 8 (2013, 2018, 2024) dan Sentinel-2 (2016, 2024). Setelah koreksi geometrik dan radiometrik, klasifikasi penutupan lahan dilakukan dengan algoritma *Supervised Classification (Maximum Likelihood)*. Sebanyak 150 training sampel digunakan untuk setiap kelas (hutan primer, sekunder, area tambang, air, permukiman, dan lahan terbuka). Validasi hasil dilakukan dengan *confusion matrix* dan uji akurasi menggunakan *Overall Accuracy (OA)* dan koefisien Kappa ( $\kappa$ ). Nilai OA dan  $\kappa \geq 0,85$  dianggap memenuhi kriteria akurasi tinggi [23], [28].
- Tahap kedua adalah pengambilan sampel lingkungan, dilakukan pada musim kering (Juni-Agustus 2024) untuk meminimalkan bias hidrologi. Sampel tanah dan air diambil pada setiap zona radius ( $n = 18$  untuk tanah,  $n = 12$  untuk air).
- Tahap ketiga adalah survei sosial, wawancara semi-terstruktur dan FGD dilaksanakan dengan protokol etika dan FPIC. Data naratif dikoding tematik menggunakan NVivo 14 [29].

## 2.4. Analisis Data

### (a) Analisis Spasial

Data spasial diolah menggunakan ArcGIS Pro 3.2 dan QGIS 3.34 untuk menghitung luas deforestasi, perubahan NDVI, dan fragmentasi ekosistem. NDVI dihitung dengan persamaan:

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

dengan NIR dan Red berasal dari kanal 5 dan 4 (Landsat 8) serta 8 dan 4 (Sentinel-2) [23], [30], [31].

### (b) Analisis Laboratorium

Konsentrasi logam berat dibandingkan dengan baku mutu tanah dan air berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 [32].

### (c) Analisis Sosial

Data sosial dianalisis dengan *descriptive thematic coding* untuk mengelompokkan persepsi masyarakat menjadi kategori: dampak lingkungan, kesehatan, ekonomi, dan sosial-budaya.

### (d) Analisis Statistik Integratif

Korelasi antara tingkat deforestasi dan indeks sosial diuji menggunakan korelasi Pearson, dengan tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$  dan  $n = 60$  responden. Nilai  $R^2$  digunakan untuk menentukan kekuatan hubungan antara degradasi ekologis dan kesejahteraan sosial. Analisis dilakukan menggunakan IBM SPSS 26.

## 2.5. Validasi dan Etika Penelitian

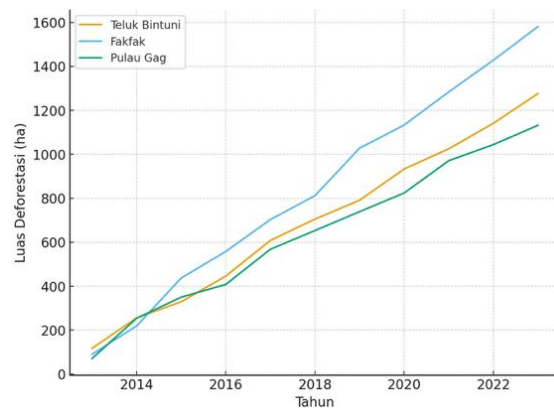
Penelitian memperoleh persetujuan etik dari LPPM Universitas Papua (Nomor: 12/UNIPA/LPPM/2024). Partisipan diberikan penjelasan mengenai tujuan penelitian dan memberikan persetujuan sukarela sesuai prinsip FPIC [19]. Validasi dilakukan melalui triangulasi sumber (lapangan, citra, dan dokumen perusahaan) serta member checking untuk memastikan keakuratan interpretasi data.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Dinamika Deforestasi dan Degradasi Ekosistem

Analisis multitemporal menunjukkan bahwa tingkat deforestasi di tiga wilayah pertambangan terbuka, yaitu Teluk Bintuni, Fakfak, dan Pulau Gag, meningkat signifikan sepanjang 2013–2024, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pulau Gag mencatat kehilangan tutupan hutan tertinggi, mencapai  $1.560 \pm 45$  ha pada tahun 2024, diikuti Teluk Bintuni ( $1.245 \pm 30$  ha) dan Fakfak ( $890 \pm 25$  ha). Interval kepercayaan 95% dihitung berdasarkan variasi spasial antar-piksel hasil klasifikasi.

Pada Gambar 2, hubungan negatif antara luas deforestasi dan indeks vegetasi (NDVI) menunjukkan bahwa semakin luas area terbuka, semakin rendah kerapatan vegetasi alami. Nilai NDVI rata-rata menurun dari  $0,78 \pm 0,02$  (2013) menjadi  $0,40 \pm 0,03$  (2024). Penurunan ini selaras dengan hasil penelitian Pajmans dan Löffler [3] yang menemukan pemulihan vegetasi di bawah 60% bahkan setelah satu dekade reklamasi. Peningkatan ini menggambarkan tekanan ekosistem yang kuat di wilayah pesisir dan perbukitan yang sebelumnya tertutup vegetasi primer.



Gambar 1. Tren deforestasi di wilayah tambang terbuka papua barat (2013-2024). Data spasial diperoleh dari akuisisi citra satelit Landsat 8 (2013, 2018, 2024) dan Sentinel-2 (2016, 2024) dan diolah dengan ArcGIS Pro 3.2 dan QGIS 3.34 (tahun 2023) untuk menghitung luas deforestasi.

### 3.2. Kualitas Lingkungan: Kadar Logam Berat pada Tanah dan Air

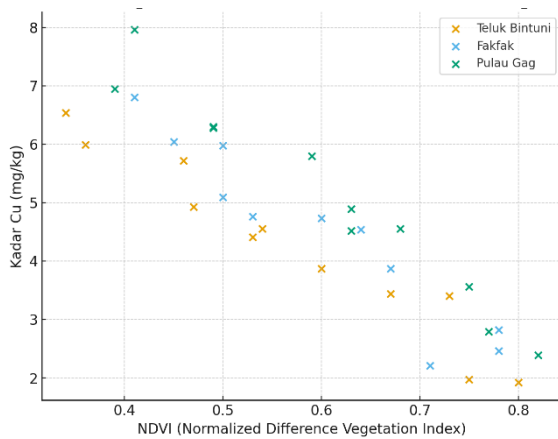
Analisis laboratorium terhadap sampel tanah menunjukkan peningkatan logam berat Pb dan Cu di seluruh lokasi studi. Pada tahun 2024, kadar Pb berkisar antara 3,8–5,2 mg/kg, sedangkan kadar Cu mencapai 6,4–8,2 mg/kg, melampaui ambang batas baku mutu tanah pertanian (4,0 mg/kg untuk Pb dan 5,0 mg/kg untuk Cu; PP No. 22 Tahun 2021 [32]). Peningkatan konsentrasi logam berat berkorelasi positif dengan jarak kedekatan area operasi tambang, terutama di zona pembuangan tailing dan area pengangkutan mineral.

Analisis laboratorium pada Tabel 1 menunjukkan peningkatan signifikan kadar logam berat Pb dan Cu pada seluruh lokasi studi. Nilai rata-rata dan deviasi standar

dihitung dari tiga radius pengamatan (0–1 km, 1–3 km, 3–5 km) untuk setiap lokasi tambang.

Tabel 1. Kadar Logam Berat (Pb dan Cu) pada Tanah di Tiga Lokasi Tambang (mg/kg)

Lokasi	Pb (mean ± SD)	Cu (mean ± SD)	Baku Mutu (PP No. 22/2021)
Teluk Bintuni	4,8 ± 0.3	7,5 ± 0.4	Pb = 4,0; Cu = 5,0
Fakfak	3,9 ± 0.2	6,4 ± 0.3	Pb = 4,0; Cu = 5,0
Pulau Gag	5,2 ± 0.4	8,2 ± 0.5	Pb = 4,0; Cu = 5,0



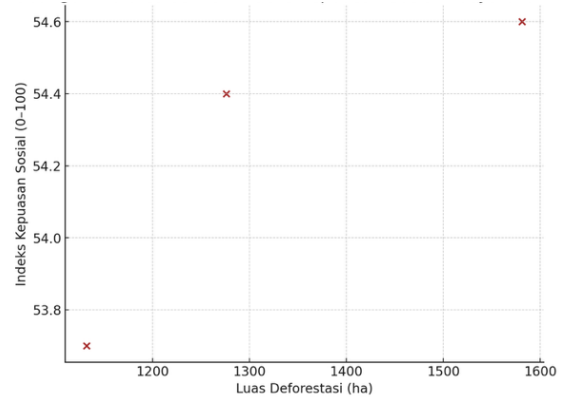
Gambar 2. Hubungan NDVI dan kadar Cu di lokasi tambang.

Semua nilai Pb dan Cu melampaui baku mutu lingkungan nasional [25], dengan peningkatan terbesar pada zona radius dekat (0–1 km) yang berasosiasi dengan area pembuangan tailing [6]. Hubungan antara NDVI dan kadar Cu menunjukkan korelasi negatif ( $R^2 = 0,71$ ), yang berarti akumulasi logam berat menghambat regenerasi vegetasi alami. Hal ini konsisten dengan temuan Hamuna et al. [6] dan [6], [15], yang menyatakan bahwa logam berat mengganggu fungsi fisiologis tumbuhan dan menurunkan biomassa vegetasi. Dampak ekologis tersebut berpotensi menurunkan kemampuan tanah untuk mendukung kegiatan pertanian subsisten masyarakat lokal, yang masih bergantung pada hasil kebun dan sumber daya hutan.

### 3.3. Dampak Sosial dan Persepsi Masyarakat

Hasil survei sosial memperlihatkan adanya penurunan indeks kepuasan sosial masyarakat di sekitar tambang dari rata-rata 85 poin pada 2013 menjadi 54 poin pada 2024, dengan nilai terendah tercatat di Pulau Gag (49 poin). Indeks ini disusun dari 15 butir pertanyaan mencakup empat dimensi utama: (1) kualitas lingkungan, (2) ekonomi rumah tangga, (3) kesehatan, dan (4) budaya lokal. Skala yang digunakan adalah Likert 1–5, dengan total skor distandarkan menjadi 0–100. Reliabilitas instrumen diuji menggunakan Cronbach's  $\alpha = 0,86$ , menunjukkan konsistensi internal yang baik. Analisis korelasi pada data Gambar 3 menunjukkan hubungan

negatif kuat ( $R^2 = 0,78$ ) antara luas deforestasi dan indeks sosial. Ini mengindikasikan bahwa degradasi lingkungan berkontribusi signifikan terhadap ketidakpuasan sosial dan meningkatnya potensi konflik.



Gambar 3. Hubungan deforestasi dan indeks kepuasan sosial masyarakat 2024.

Wawancara mendalam mengungkapkan empat isu dominan:

- (1) hilangnya akses terhadap lahan dan sumber daya tradisional;
- (2) penurunan kualitas air dan hasil pertanian;
- (3) perubahan pola budaya dan nilai komunitas adat; serta
- (4) ketidakjelasan mekanisme kompensasi dan keterlibatan masyarakat dalam pengambilan keputusan.

Temuan ini mendukung analisis Ballard & Banks [5] dan Kirsch [33], yang menekankan bahwa konflik sosial di kawasan Melanesia bukan sekadar persoalan lingkungan, tetapi juga berkaitan dengan penguasaan ruang dan otonomi masyarakat adat dalam menentukan arah pembangunan lokal.

### 3.4. Implikasi terhadap Kebijakan Mitigasi dan Tata Kelola

Hasil menunjukkan keterkaitan erat antara indikator ekologis (deforestasi, NDVI, logam berat) dan sosial (indeks kepuasan masyarakat). Oleh karena itu, pendekatan pengelolaan tambang terbuka di Papua Barat harus bersifat lintas-disiplin.

Rangka mitigasi yang direkomendasikan meliputi: (a) reklamasi progresif dengan spesies endemik Papua, (b) pemantauan independen kualitas tanah dan air yang melibatkan universitas lokal, dan (c) penerapan penuh mekanisme FPIC sebagaimana dianjurkan oleh World Bank [19] dan UNEP [18].

Pendekatan ini sejalan dengan prinsip *sustainable mining governance* yang menekankan transparansi, akuntabilitas, dan keadilan sosial [34], [35]. Selain itu, hasil penelitian ini mengindikasikan perlunya penguatan regulasi pasca-tambang, khususnya terkait pemantauan

limbah *tailing* dan peran lembaga adat dalam evaluasi reklamasi [9], [36].

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa pendekatan *mixed-method* yang mengintegrasikan penginderaan jauh, analisis laboratorium lingkungan, dan survei sosial partisipatif sangat efektif dalam mengkaji pertambangan terbuka di Papua Barat. Pendekatan ini efektif untuk menilai keterkaitan antara dampak ekologis dan sosial akibat pertambangan terbuka di Papua Barat. Analisis penginderaan jauh mengungkap peningkatan deforestasi lebih dari seribu hektar dan penurunan NDVI dari 0,78 menjadi 0,40, menandakan degradasi vegetasi yang serius. Hasil laboratorium menunjukkan kadar Pb dan Cu melebihi ambang batas baku mutu, sedangkan survei sosial memperlihatkan penurunan signifikan kesejahteraan masyarakat. Korelasi negatif antara deforestasi dan indeks sosial menegaskan bahwa kerusakan lingkungan berdampak langsung pada ketidakstabilan sosial. Dengan demikian, keberlanjutan pertambangan menuntut tata kelola yang tidak hanya berorientasi teknis, tetapi juga memperhatikan keadilan sosial dan ekologis melalui reklamasi progresif dan pemantauan independent. Kedepannya dapat diterapkan teknologi partisipatif berbasis digital dapat memperkuat keterlibatan masyarakat adat dalam pemantauan lingkungan. Secara keseluruhan, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan tata kelola pertambangan yang lebih berkelanjutan, partisipatif, dan berkeadilan sosial-ekologis, sekaligus membuka ruang bagi inovasi metodologis dan penelitian lintas-disiplin di masa depan.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Gastauer *et al.*, “Revegetation on tropical steep slopes after mining and infrastructure projects: challenges and solutions,” *Sustainability*, vol. 14, no. 24, p. 17003, 2022.
- [2] T. Sudarmadji and W. Hartati, “Keterpulihan ekosistem lahan pasca tambang batubara tertinggal jauh di belakang keberhasilan rehabilitasi lahan,” *ULIN J. Hutan Trop.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, 2023.
- [3] T. Lingkungan and S. Oktorina, “KEBIJAKAN REKLAMASI DAN REVEGETASI LAHAN BEKAS TAMBANG ( STUDI KASUS TAMBANG BATUBARA INDONESIA ),” vol. 3, no. 1, pp. 16–20, 2017.
- [4] D. Leith, *The politics of power: Freeport in Suharto’s Indonesia*. University of Hawaii Press, 2002.
- [5] C. Ballard and G. Banks, “Resource wars: the anthropology of mining,” *Annu. Rev. Anthropol.*, vol. 32, no. 1, pp. 287–313, 2003.
- [6] B. Hamuna and E. Wanimbo, “Heavy metal contamination in sediments and its potential ecological risks in Youtefa Bay, Papua Province, Indonesia,” *J. Ecol. Eng.*, vol. 22, no. 8, 2021.
- [7] R. H. Ifroh, “Environmental Quality on Surrounding Community of Coal Mining Area in Samarinda, East Kalimantan, Indonesia,” *Public Heal. Indones.*, 2019.
- [8] T. N. I. Liborang, K. I. Tewernusa, and S. M. Parinusa, “Dampak Sosial Ekonomi Penambangan Pasir dan Batu di Kabupaten Manokwari (Studi Kasus PT Pulau Lemon, Kampung Maruni),” *Lensa Ekon.*, vol. 17, no. 01, pp. 38–53, 2023.
- [9] H. B. So, I. R. da Silva, L. C. Gomes, and T. S. de Oliveira, “of Mined Land and Tailings,” *Subsoil Constraints Crop Prod.*, p. 161, 2022.
- [10] K. F. Morrison, *Tailings management handbook: a lifecycle approach*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2022.
- [11] D. Kemp and J. R. Owen, “Corporate affairs and the conquest of social performance in mining,” *Extr. Ind. Soc.*, vol. 7, no. 3, pp. 835–837, 2020.
- [12] M. A. Ulat, A. Mulya, H. Poltak, P. Kelautan, and P. Kelautan, “Analysis of the Social , Economic , and Ecological Impact of Mining Activities of PT . Gag Nickel on Society and Coral Reef Ecosystem in Gag Island , Raja Ampat District,” vol. 3, no. 10, pp. 3731–3746, 2024.
- [13] N. Mining, “Red Alert: Nickel Mining Threats to Raja Red Alert: Nickel Mining Threats to Raja Ampat,” 2025.
- [14] U. Jefferson, R. Carmenta, W. Daeli, and J. Phelps, “Characterising policy responses to complex socio-ecological problems: 60 fire management interventions in Indonesian peatlands,” *Glob. Environ. Chang.*, vol. 60, p. 102027, 2020.
- [15] R. I. S. Karubuy, J. Manan, E. Manangkalangi, L. Sembel, and D. Saleky, “Analisis Kandungan Logam Berat Kadmium (Cd) pada Gastropoda Conus spp. di Hampanan Lamun Perairan Pesisir Manokwari, Propinsi Papua Barat,” *J. Kelaut. Trop.*, vol. 26, no. 3, pp. 433–441, 2023.
- [16] A. Mustafa, R. Asaf, and I. N. Radiart, “Konsentrasi dan Status Mutu Logam Berat dalam Air dan Sedimen di Kawasan Pesisir Kabupaten Kepulauan Sangihe,” *J. Ilmu Dan Teknol. Kelaut. Trop.*, vol. 13, no. 1, pp. 185–200, 2021.
- [17] A. A. Muthalib and A. M. Nuryadi, “The

- economic adaptation pattern of seaweed cultivator community affected by nickel mine waste in North Konawe Regency, Indonesia,” *Aquac. Aquarium, Conserv. Legis.*, vol. 16, no. 1, pp. 427–435, 2023.
- [18] I. Citaristi, “United Nations Environment Programme—UNEP,” in *The Europa directory of international organizations 2022*, Routledge, 2022, pp. 193–199.
- [19] The World Bank, “Commercial & Industrial Development in Indigenous Peoples’ Territories,” 2024. [Online]. Available: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099061824185018818/pdf/P17729113b153d0519af81af5df39a5451.pdf>
- [20] F. N. Almira, “Impact Analysis of NGOs’ Role in Marine Biodiversity Protection in Raja Ampat, Indonesia.” University of Twente, 2023.
- [21] A. A. Meutia, D. Bachriadi, and N. A. Gafur, “Environment degradation, health threats, and legality at the artisanal small-scale gold mining sites in Indonesia,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 20, no. 18, p. 6774, 2023.
- [22] R. Amalia, “Analisis Dampak Pertambangan terhadap Ekonomi dan Lingkungan di Provinsi Papua:(Studi Kasus PT Freeport Indonesia),” *J. Econ. Dev. Issues*, vol. 6, no. 1, pp. 25–32, 2023.
- [23] A. Rifai, H. Rakuasa, P. C. Latue, and L. Cover, “Spatial Dynamics of Land Cover Change of Gag Island , Indonesia,” vol. 3, no. 02, pp. 57–65, 2025.
- [24] G. Banks, D. Kuir-Ayius, D. Kombako, and B. Sagir, “Conceptualizing mining impacts, livelihoods and corporate community development in Melanesia,” *Community Dev. J.*, vol. 48, no. 3, pp. 484–500, 2013.
- [25] S. Brown and A. E. Lugo, “Rehabilitation of tropical lands: a key to sustaining development,” *Restor. Ecol.*, vol. 2, no. 2, pp. 97–111, 1994.
- [26] S. Timsina *et al.*, “Tropical surface gold mining: A review of ecological impacts and restoration strategies,” *L. Degrad. Dev.*, vol. 33, no. 18, pp. 3661–3674, 2022.
- [27] S. Amaruzaman, D. K. Bardsley, and R. Stringer, “Reflexive policies and the complex socio-ecological systems of the upland landscapes in Indonesia,” *Agric. Human Values*, vol. 39, no. 2, pp. 683–700, 2022.
- [28] R. Ferrer Velasco, M. Köthke, M. Lippe, and S. Günter, “Scale and context dependency of deforestation drivers: Insights from spatial econometrics in the tropics,” *PLoS One*, vol. 15, no. 1, p. e0226830, 2020.
- [29] Q. International, “QSR International, NVivo 14 User Manual, QSR International Pty Ltd, 2023.” 2023. [Online]. Available: <https://community.lumivero.com>
- [30] B. T. Fraser and R. G. Congalton, “Estimating primary forest attributes and rare community characteristics using unmanned aerial systems (UAS): An enrichment of conventional forest inventories,” *Remote Sens.*, vol. 13, no. 15, p. 2971, 2021.
- [31] N. Camarretta *et al.*, “Monitoring forest structure to guide adaptive management of forest restoration: a review of remote sensing approaches,” *New For.*, vol. 51, no. 4, pp. 573–596, 2020.
- [32] P. Indonesia, “Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Jakarta, 2021.” [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/161852/p-p-no-22-tahun-2021>
- [33] S. Kirsch, *Mining capitalism: the relationship between corporations and their critics*. Univ of California Press, 2014.
- [34] Y. E. Rachmad, *Rehabilitation and Post-Mining Land Use Planning*. The United Nations and The Education Training Centre, 2015.
- [35] N. Nancy, “Potential distortion of sustainable development in the conflict of interest of nickel mining and indigenous communities in Halmahera, North Maluku,” *J. Glob. Environ. Dyn.*, vol. 3, no. 2, pp. 11–20, 2022.
- [36] A. Scheidel *et al.*, “Global impacts of extractive and industrial development projects on Indigenous Peoples’ lifeways, lands, and rights,” *Sci. Adv.*, vol. 9, no. 23, p. eade9557, 2023.