

Analisis Spasial Dampak Lingkungan Akibat ASGM Menggunakan Indeks NDVI dan Fe-Oxide dari Citra Landsat-9 di Kecamatan Lantung, Sumbawa, Indonesia

Ari Nuryaddin Putra¹, Joni Syafaat², Sukuryadi³

Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Muhammadiyah Mataram, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 Juli 2025

Revised: 11 Desember 2025

Accepted: 18 Desember 2025

Keywords:

ASGM

Landsat-9

NDVI

Fe Oxide

Penginderaan Jauh

Published by

Impression : Jurnal Teknologi dan Informasi

Copyright © 2023 by the Author(s) | This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ABSTRACT

Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa, memberikan dampak signifikan terhadap lingkungan, khususnya terhadap kondisi vegetasi dan mineralisasi permukaan. Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi indikasi degradasi lingkungan akibat aktivitas ASGM menggunakan data penginderaan jauh dari satelit Landsat-9. Analisis dilakukan dengan memanfaatkan indeks vegetasi seperti NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) serta indeks oksida besi (Fe-Oxide) melalui rasio spektral band 4/2 dan 4/3. Hasil penggabungan spasial menunjukkan bahwa zona dengan nilai NDVI ≤ 0.1 dan rasio Fe-oxide tinggi terkonsentrasi pada lokasi pertambangan aktif. Temuan ini mengindikasikan tekanan lingkungan kuat terhadap vegetasi, yang dapat digunakan sebagai indikator awal untuk deliniasi wilayah risiko. Total area yang teridentifikasi sebagai zona tekanan lingkungan mencapai $\pm 65,33$ hektar dari total area studi ± 2.278 hektar. Metodologi ini terbukti efektif untuk pemetaan awal dampak ASGM, khususnya di wilayah minim data laboratorium.

Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) activities in Lantung District, Sumbawa Regency, have significantly impacted the environment, particularly in terms of vegetation condition and surface mineralization. This study aims to detect early signs of environmental degradation caused by ASGM using remote sensing data from the Landsat-9 satellite. The analysis employed vegetation indices such as NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) along with an iron oxide index derived from spectral band ratios (Band 4/2 and 4/3). Spatial penggabungan results revealed that zones with NDVI values ≤ 0.1 and high Fe-oxide ratios were concentrated around active mining areas. These findings indicate strong environmental pressure on vegetation, which can serve as an early indicator for delineating risk-prone areas. A total of approximately 65.33 hectares out of the 2,278-hectare study area was identified as environmentally stressed. This methodology proves effective for preliminary ASGM impact mapping, especially in data-scarce regions.

Corresponding Author:

Ari Nuryaddin Putra

Master's Program in Environmental Science, Universitas Muhammadiyah Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia

Jalan KH Ahmad Dahlan No. 1, Pagesangan, Kecamatan Mataram, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat

Email: arinuryaddin@gmail.com

PENDAHULUAN

Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) merupakan salah satu aktivitas pertambangan yang banyak dijumpai di wilayah pedesaan negara berkembang, termasuk Indonesia. Kegiatan ini umumnya dilakukan secara tradisional dengan teknologi sederhana dan sering kali tanpa izin resmi, sehingga menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan dan sosial (Hilson, 2002; Veiga et al., 2006). Di Indonesia, praktik ASGM berkembang pesat pada wilayah yang memiliki potensi emas aluvial

maupun primer, salah satunya di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa, yang dalam beberapa tahun terakhir mengalami peningkatan aktivitas penambangan rakyat.

Aktivitas ASGM berpotensi menyebabkan degradasi lingkungan yang signifikan, baik secara langsung maupun tidak langsung. Dampak langsung meliputi pembukaan lahan dan penggundulan vegetasi untuk lokasi tambang, pembuatan lubang galian, serta pembuangan material sisa pengolahan (tailing) di sekitar area tambang (Donkor et al., 2006). Sementara itu, dampak tidak langsung atau sekunder dapat berupa perubahan kualitas tanah dan air akibat terbentuknya air asam tambang (acid mine drainage), yang terjadi ketika mineral sulfida dan oksida besi terekspos ke permukaan dan bereaksi dengan oksigen serta air (Younger et al., 2002). Kondisi ini dapat mempercepat pelindian logam berat dan memperluas area terdampak di luar lokasi penambangan.

Pemantauan lingkungan pada wilayah ASGM, khususnya di daerah terpencil dengan keterbatasan data laboratorium dan akses lapangan seperti Kecamatan Lantung, membutuhkan pendekatan yang efisien, berbiaya relatif rendah, serta mampu memberikan informasi spasial secara luas dan berulang. Dalam konteks ini, teknologi penginderaan jauh menjadi alternatif yang sangat relevan karena mampu merekam perubahan permukaan bumi secara temporal dan spektral (Lillesand et al., 2015). Analisis spektral citra satelit telah banyak digunakan untuk mendeteksi perubahan tutupan lahan, degradasi vegetasi, serta indikasi mineralisasi permukaan pada kawasan pertambangan (Crósta & Moore, 1989; Pour & Hashim, 2012).

Salah satu indeks yang paling umum digunakan dalam pemantauan kondisi vegetasi adalah Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). NDVI sensitif terhadap kandungan klorofil dan struktur kanopi, sehingga efektif untuk mengidentifikasi tekanan ekologis, degradasi vegetasi, dan perubahan tutupan lahan akibat aktivitas antropogenik, termasuk pertambangan (Rouse et al., 1974; Tucker, 1979). Nilai NDVI yang rendah umumnya mengindikasikan berkurangnya vegetasi atau kondisi lahan terbuka yang sering dijumpai pada area tambang aktif dan bekas tambang.

Selain indikator vegetasi, keberadaan mineral oksida besi di permukaan merupakan ciri khas area tambang terbuka dan zona pelapukan mineralisasi. Fe-Oxide Index yang dihitung dari rasio band tertentu pada citra Landsat telah terbukti efektif untuk mendeteksi konsentrasi oksida besi, seperti hematit dan goetit, yang sering diasosiasikan dengan aktivitas pertambangan dan potensi pembentukan air asam tambang (Crósta & Moore, 1989; Sabins, 1999). Oleh karena itu, penggunaan Fe-Oxide Index dapat memberikan indikasi awal mengenai area yang berpotensi mengalami degradasi geokimia.

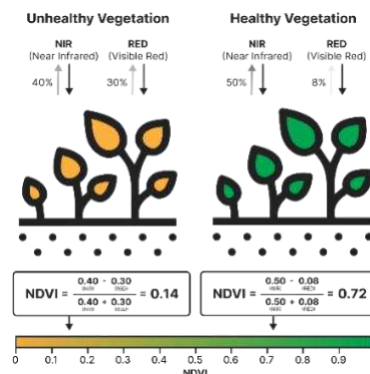
Meskipun NDVI dan Fe-Oxide Index telah banyak digunakan secara terpisah, studi yang mengintegrasikan kedua indeks tersebut secara simultan untuk mendeteksi dampak lingkungan ASGM masih relatif terbatas, terutama pada wilayah terpencil di Indonesia bagian timur. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan citra Landsat-9 OLI, yang memiliki kualitas radiometrik lebih baik dan ketersediaan data terbaru, untuk mengombinasikan analisis NDVI dan Fe-Oxide Index dalam mengidentifikasi degradasi vegetasi serta indikasi mineralisasi permukaan akibat ASGM.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi kombinasi NDVI dan Fe-Oxide Index berbasis citra Landsat-9 dalam mendeteksi degradasi lingkungan pada kawasan ASGM di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa. Secara teoretis, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan metodologi pemantauan spasial berbasis penginderaan jauh pada kawasan yang rentan terhadap gangguan antropogenik. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar informasi awal bagi pemerintah daerah dan lembaga lingkungan dalam upaya mitigasi, pengendalian, serta pengelolaan dampak lingkungan akibat aktivitas ASGM.

URAIAN TEORI

Penginderaan jauh (remote sensing) merupakan pendekatan ilmiah yang memanfaatkan informasi spektral satelit untuk mendeteksi dan memetakan kondisi biofisik permukaan bumi tanpa kontak langsung. Dalam konteks pemantauan lingkungan, teknologi ini efektif untuk mengidentifikasi perubahan tutupan lahan, degradasi vegetasi, serta distribusi mineral permukaan secara spasial dan temporal (Lillesand et al., 2015; Zhu et al., 2020). Salah satu indeks vegetasi yang paling umum digunakan adalah *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), yang dihitung dari reflektansi pita Near-Infrared

(NIR) dan Red. NDVI mampu menunjukkan tingkat kehijauan dan kesehatan vegetasi; nilai tinggi mengindikasikan vegetasi lebat, sedangkan nilai rendah atau negatif mencerminkan area terbuka, stres vegetasi, atau permukaan non-vegetatif (Tucker, 1979; Jiang et al., 2021).



Gambar 1. Ilustrasi jumlah cahaya yang dipantulkan oleh tanaman yang mencerminkan kondisi kesehatannya.

Tumbuhan sehat memantulkan persentase cahaya NIR dan green yang tinggi (Sumber: <https://www.petersonfarmsseed.com/what-are-uavs-looking-at/>).

Dalam kaitannya dengan aktivitas pertambangan, penginderaan jauh juga dapat digunakan untuk mendeteksi mineral permukaan, terutama oksida besi (*Fe-Oxide*) yang memiliki karakteristik reflektansi kuat pada pita spektral tertentu. Beberapa rasio spektral berbasis citra Landsat-9, seperti Band 4/2 atau Band 4/3, telah terbukti efektif untuk mengekstraksi anomali *Fe-Oxide* dan zona alterasi hidrotermal pada berbagai studi geologi dan pertambangan (Abay et al., 2024; Rajendran & Nasir, 2021). Nilai rasio yang tinggi umumnya terkait dengan kehadiran mineral hematit atau goethit, yang sering muncul pada area terbuka, zona galian, atau lokasi pembuangan tailing. Secara kimiawi, senyawa oksida besi memainkan peran penting dalam lingkungan karena dapat berfungsi sebagai penyerap (sorben) logam berat seperti As, Pb, dan Hg. Namun, pada kondisi lingkungan tertentu –khususnya pH rendah akibat proses oksidasi sulfida– *Fe-Oxide* dapat mengalami pelarutan ulang, sehingga melepaskan logam berat terikat ke tanah dan air (Cornell & Schwertmann, 2003; Johnson & Hallberg, 2020). Pada konteks Kecamatan Lantung, aktivitas ASGM yang melibatkan penggalian terbuka dan pengolahan bijih sederhana berpotensi mengekspos lapisan batuan yang kaya mineral sulfida dan oksida besi. Ketika lapisan tersebut terpapar udara dan air hujan, proses pelapukan dan oksidasi dapat meningkatkan kandungan *Fe-Oxide* di permukaan, yang kemudian dapat menjadi indikator awal potensi pelepasan logam berat ke lingkungan. Dengan demikian, integrasi NDVI dan *Fe-Oxide* Index menjadi pendekatan yang relevan untuk mendeteksi tekanan ekologis pada wilayah ASGM. Indeks vegetasi dapat merekam degradasi tutupan lahan secara langsung, sedangkan indeks *Fe-Oxide* berfungsi sebagai indikator permukaan yang menunjukkan area terpapar mineralisasi atau potensi kontaminasi logam berat. Pendekatan multindeks ini sangat bermanfaat pada wilayah yang minim data pemantauan laboratorium, seperti Kecamatan Lantung, sehingga memberikan gambaran awal mengenai zona berisiko tinggi dan mendukung proses penilaian awal kualitas lingkungan (Niajay et al., 2022; Tiwari et al., 2023).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan citra satelit Landsat-9 OLI tahun akuisisi 2024 sebagai sumber data utama untuk mendeteksi indikasi degradasi lingkungan akibat aktivitas Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa. Citra Landsat-9 OLI memiliki resolusi spasial 30 meter untuk seluruh band reflektif dan 15 meter untuk band pankromatik, dengan resolusi temporal 16 hari. Kemudian tahap awal meliputi koreksi atmosferik dan geometrik untuk memastikan konsistensi radiometrik dan ketelitian posisi spasial. Koreksi atmosferik dilakukan menggunakan metode *surface reflectance*, sedangkan koreksi geometrik mengacu pada sistem proyeksi UTM zona 50S sesuai letak

geografis lokasi penelitian. Analisis vegetasi dilakukan menggunakan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dengan formula standar: $NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$ di mana *NIR* menggunakan Band 5 dan *Red* menggunakan Band 4 Landsat-9 OLI, kemudian pemilihan ambang $NDVI \leq 0.1$ digunakan untuk mengidentifikasi area non-vegetatif atau wilayah dengan degradasi vegetasi tinggi. Threshold ini mengacu pada literatur bahwa nilai NDVI mendekati nol atau bernilai rendah merepresentasikan permukaan tanah terbuka, batuan, tailing, atau lahan terdegradasi (Tucker, 1979; Jiang et al., 2021). Untuk mendeteksi kemungkinan akumulasi oksida besi (Fe-oxide), dilakukan ekstraksi rasio spektral Band 4/2 dan Band 4/3 yang umum digunakan dalam pemetaan mineralisasi permukaan (Abay et al., 2024; Rajendran & Nasir, 2021). Rasio yang lebih tinggi menandakan intensitas reflektansi terkait mineral oksida besi seperti hematit dan goethit yang sering muncul pada wilayah penambangan terbuka atau area yang mengalami pelapukan kuat. Seluruh perhitungan indeks dilakukan menggunakan perangkat lunak QGIS melalui *Raster Calculator*. Peta NDVI dan indeks *Fe-Oxide* kemudian dipenggabungan untuk menghasilkan zona tekanan lingkungan tinggi, yang ditandai oleh kombinasi NDVI rendah dan nilai *Fe-Oxide* tinggi. Zona ini diasumsikan sebagai area yang berpotensi terdampak langsung oleh aktivitas ASGM, baik melalui hilangnya vegetasi maupun ekspos lapisan mineral permukaan. Validasi data dilakukan menggunakan pendekatan *Spectral Consistency Profiling* (SCP) untuk memastikan kesesuaian karakteristik spektral citra dengan kondisi permukaan di lapangan. Titik validasi ditentukan dengan metode *stratified random sampling* pada tiga kategori utama zona NDVI rendah, zona *Fe-Oxide* tinggi, dan zona kombinasi keduanya dengan total 30 titik. Pada setiap titik dikumpulkan data berupa koordinat, dokumentasi visual, serta deskripsi kondisi biofisik sebagai dasar pembuatan kurva spektral referensi. Nilai reflektansi setiap band Landsat-9 kemudian diekstraksi dan dibandingkan dengan pola spektral rujukan untuk menilai konsistensi tren reflektansi antar-band.

HASIL PENELITIAN

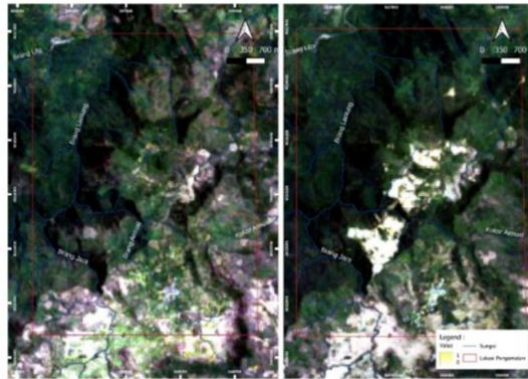
Penelitian potensi pencemaran mineral logam di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa, memanfaatkan citra satelit Landsat-9 untuk menganalisis dampak aktivitas *Artisanal and Small-Scale Gold Mining* (ASGM) terhadap lingkungan. Analisis menggunakan indeks *Fe-oxide* dan indeks vegetasi NDVI, untuk menilai kondisi vegetasi dan indikasi kontaminasi. Metode clustering seperti *k-means* atau *hierarchical clustering* diterapkan untuk mengelompokkan piksel citra berdasarkan nilai kombinasi Fe dan indeks vegetasi tersebut. Hasil pengelompokan ini membantu mengidentifikasi area dengan vegetasi serupa atau mendeteksi zona yang terdampak mikro-kontaminasi mineral logam, sehingga bermanfaat dalam pemantauan lingkungan dan pengelolaan sumber daya alam.

Index	Calculation Formula	Reference	Comment
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Rouse et al. [21]	normalized vegetation index
GNDVI	$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Gitelson et al. [9]	Green normalized vegetation index
BNDVI	$BNDVI = \frac{NIR - Blue}{NIR + Blue}$	Wang Fu-ming et al. [3]	Blue normalized vegetation index
GRNDVI	$GRNDVI = \frac{NIR - (Green + Red)}{NIR + (Green + Red)}$	Wang Fu-ming et al. [3]	Green and Red normalized vegetation index
GBNDVI	$GBNDVI = \frac{NIR - (Green + Blue)}{NIR + (Green + Blue)}$	Wang Fu-ming et al. [3]	Green and Blue normalized vegetation index
RBNDVI	$RBNDVI = \frac{NIR - (Red + Blue)}{NIR + (Red + Blue)}$	Wang Fu-ming et al. [3]	Red and Blue normalized vegetation index

Gambar 2. Indeks Vegetasi (NDVI, GNDVI, dll.) yang digunakan dalam penelitian. Rouse et al. (1974), Gitelson et al. (1996), Wang Fu-ming et al. (2007)

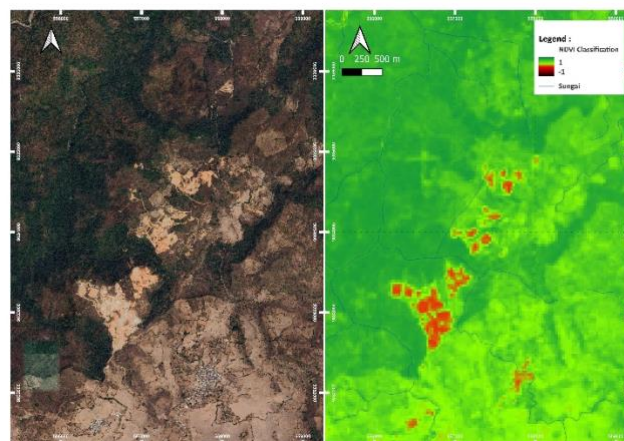
Dalam penelitian ini, metode klasifikasi NDVI juga digunakan sebagai dasar dari perhitungan luasan lahan yang teridentifikasi sebagai area artisanal mining Kelas NDVI $< 0 / -1$ diinterpretasikan sebagai area

terbuka atau rusak, karena nilai indeks ini mengindikasikan tidak adanya atau minimnya tutupan vegetasi. Nilai ini digunakan untuk mengidentifikasi lokasi-lokasi yang diduga sebagai zona tambang rakyat aktif maupun bekas aktivitas penambangan. Raster hasil klasifikasi NDVI kemudian dikonversi menjadi data polygon menggunakan fungsi *Polygonize (Raster to Vector)* di QGIS. Proses ini memungkinkan penghitungan luas zona terbuka secara spasial menggunakan ekspresi : $\$area / 10,000$ untuk memperoleh hasil dalam satuan hektar.

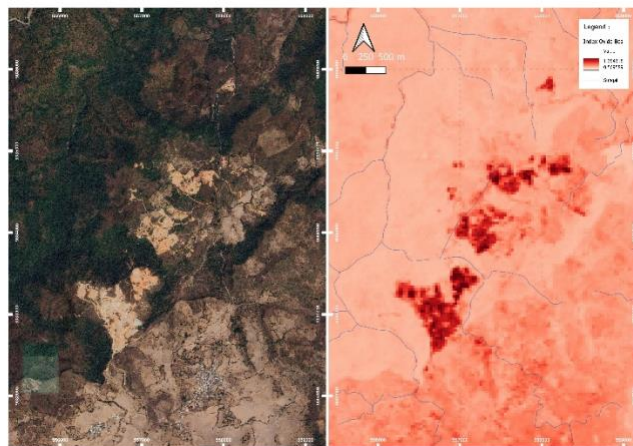


Gambar 3. Peta area pertambangan pada tahun 2015 (Kiri) dan 2024 (Kanan), di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa. Data: Landsat-9 OLI (USGS, 2024); diolah oleh penulis menggunakan perangkat lunak QGIS."

Penelitian ini menghasilkan gambaran menyeluruh tentang kondisi pencemaran lingkungan akibat aktivitas ASGM di Kecamatan Lantung, yang ditunjukkan melalui analisis spasial berbasis citra Landsat-9 dan data laboratorium dari sembilan titik pengamatan. Nilai NDVI yang rendah ≤ 0.1 (Gambar 5) dan tingginya indeks oksida besi (Gambar 6) pada zona ASGM aktif mengindikasikan degradasi vegetasi signifikan.

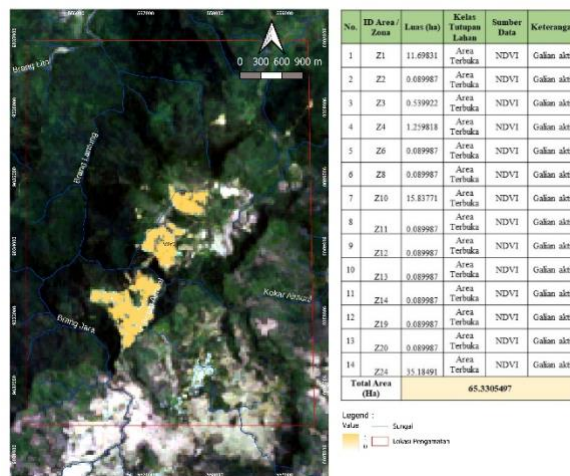


Gambar 4. Peta Anomali NDVI di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa. Data: Landsat-9 OLI (USGS, 2024); diolah oleh penulis menggunakan perangkat lunak QGIS.



Gambar 5. Peta Anomali Fe Oxide dan Lokasi Sampling di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa. Data: Landsat-9 OLI (USGS, 2024); diolah oleh penulis menggunakan perangkat lunak QGIS.

Analisis citra menunjukkan variasi nilai NDVI dan *Fe-Oxide* yang signifikan di wilayah Kecamatan Lantung. Nilai NDVI berkisar antara -0.1 hingga 0.6, yang mengindikasikan perbedaan tingkat kerapatan vegetasi. Zona dengan nilai $NDVI \leq 0.1$ teridentifikasi sebagai wilayah dengan tekanan lingkungan tinggi, didominasi oleh aktivitas pertambangan emas skala kecil (ASGM). Area ini mengalami degradasi vegetasi yang signifikan, terlihat dari permukaan tanah yang gundul atau hanya ditumbuhi vegetasi jarang. Sebaliknya, wilayah dengan $NDVI \geq 0.4$ menunjukkan kondisi vegetasi yang sehat dan relatif tidak terganggu. Sementara itu, rasio *Fe-Oxide* yang diperoleh dari band rasio 4/2 dan 4/3 menunjukkan konsentrasi tinggi di sekitar lokasi tambang aktif. Nilai rasio tinggi mengindikasikan adanya paparan mineral oksida besi di permukaan, yang berkorelasi dengan gangguan aktivitas tambang. Ketika hasil NDVI dan *Fe-Oxide* di-penggabungan, terlihat bahwa area dengan nilai *Fe-Oxide* tinggi secara spasial berimpit dengan area bernilai NDVI rendah. Hal ini menegaskan bahwa degradasi vegetasi di Kecamatan Lantung secara langsung berkaitan dengan aktivitas penambangan, dan indeks *Fe-Oxide* dapat digunakan sebagai indikator awal untuk mendeteksi mineralisasi akibat gangguan lahan. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa aktivitas tambang emas skala kecil (ASGM) memberikan dampak langsung terhadap perubahan tutupan lahan alami di wilayah studi, terutama pada tiga zona prioritas yang mengalami degradasi paling signifikan dengan total luas mencapai sekitar $\pm 65,33$ hektar. Perubahan ini terdeteksi melalui nilai NDVI yang sangat rendah dan peningkatan indeks *Fe-oxide*, yang menunjukkan hilangnya vegetasi secara spasial. Secara ilmiah, degradasi vegetasi tersebut dapat diartikan sebagai respons ekologis terhadap gangguan fisik di permukaan lahan, seperti pembukaan area tambang tanpa reklamasi, hilangnya lapisan tanah atas (topsoil) yang kaya bahan organik, serta peningkatan erosi. Selain itu, paparan langsung terhadap bahan kimia beracun seperti merkuri dan sianida yang digunakan dalam proses pemisahan emas juga berkontribusi terhadap kerusakan fisiologis tanaman dan terganggunya regenerasi vegetatif alami. Kombinasi Hasil antara tekanan mekanik, kimia, dan biologis inilah yang menyebabkan tutupan vegetasi berkurang drastis dan membentuk lahan terbuka yang rentan terhadap degradasi lanjutan jika tidak dilakukan upaya pemulihan lingkungan secara aktif.



Gambar 6. Peta luasan area pertambahan di daerah penelitian Data: Landsat-9 OLI (USGS, 2024); diolah oleh penulis menggunakan perangkat lunak QGIS.

Metode validasi data yang digunakan dalam validasi ini adalah random sampling (SCP Plugin QGIS), di mana sejumlah titik sampel dipilih secara acak untuk dibandingkan dengan data referensi guna mengukur tingkat kesesuaian klasifikasi. Tabel ini memberikan hasil analisis akurasi klasifikasi citra satelit dengan membandingkan hasil klasifikasi dengan data referensi lapangan. Klasifikasi dilakukan untuk empat kategori utama tutupan lahan, yaitu Non Vegetasi, Vegetasi Jarang, Vegetasi Sedang, dan Vegetasi Rapat. Setiap kelas dianalisis berdasarkan akurasi pengguna (*user accuracy*), yang menunjukkan proporsi piksel yang benar diklasifikasikan dalam suatu kelas dibandingkan total piksel pada kelas tersebut, serta akurasi produsen (*producer accuracy*), yang menggambarkan persentase piksel referensi lapangan yang berhasil diklasifikasikan dengan benar untuk masing-masing kelas. Tabel ini juga mencantumkan luas area total setiap kelas (dalam meter persegi) serta bobotnya (W_i), yang sering digunakan untuk menghitung indeks evaluasi, seperti nilai Kappa. Hasil analisis menunjukkan tingkat keakuratan keseluruhan (*Overall Accuracy*) sebesar 86,67%, yang menandakan bahwa klasifikasi ini cukup andal untuk merepresentasikan kondisi tutupan lahan di wilayah penelitian. Nilai standar deviasi sebesar 0,06312 mengindikasikan variasi yang rendah dalam hasil klasifikasi, menunjukkan konsistensi yang baik. Dengan kombinasi hasil akurasi ini, analisis citra satelit dapat dianggap valid dan relevan untuk mendukung penelitian lebih lanjut, seperti pemantauan perubahan tutupan lahan atau evaluasi dampak lingkungan.

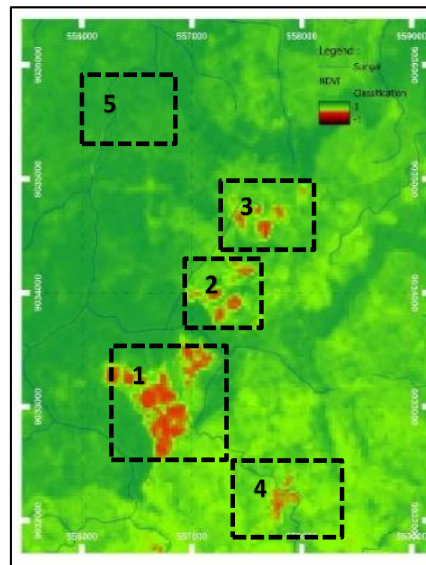
Tabel 1. Hasil Analisis, Accuracy assessment results dari Citra Satellite

		Validation				Total	User Accuracy	Total Class Area(m ²)	Wi
		1 (Non Vegetasi)	2 (Vegetasi Jarang)	3 (Vegetasi Sedang)	4 (vegetasi Rapat)				
Thematic Map Classes	1	3	0	0	0	3	1	6734081.711	0.11718
	2	3	5	0	0	7	0.71429	12184257.58	0.21202
	3	0	0	10	1	11	0.90909	12247168.08	0.21311
	4	1	0	0	8	9	0.88889	26302791.52	0.45769
	Total	6	5	10	9	30		57468298.89	
Producer Accuracy		0.5	1	1	0.88889				

Overall Accuracy	Standard Deviation
0.86667	0.06312

PEMBAHASAN

Hasil analisis spasial menunjukkan adanya variasi nilai vegetasi dari indeks utama NDVI, memberikan gambaran kondisi tutupan lahan dan tingkat kesehatan vegetasi di wilayah Kecamatan Lantung seperti yang terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Peta Anomali kombinasi dari NDVI di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa. Data: Landsat-9 OLI (USGS, 2024); diolah oleh penulis menggunakan perangkat QGIS

Indeks tersebut telah diolah dan dianalisis secara terpisah untuk mengidentifikasi indikasi gangguan vegetasi yang dapat berasosiasi dengan aktivitas pertambangan emas skala kecil (ASGM), baik secara langsung maupun tidak langsung. Zona-zona anomali yang telah diidentifikasi kemudian dikelompokkan ke dalam lima area prioritas. Setelah dilakukan analisis spasial terhadap indeks vegetasi utama, yaitu NDVI ditemukan pola yang mengindikasikan sebaran tingkat kesehatan vegetasi di wilayah penelitian. Indeks tersebut menunjukkan klasifikasi nilai yang relatif seragam dalam mengidentifikasi area dengan tingkat kehijauan rendah hingga tinggi. Kesamaan pola ini memperkuat interpretasi awal bahwa anomali nilai vegetasi pada area tertentu khususnya di sekitar zona pertambangan dapat dikaitkan dengan tekanan ekologis akibat aktivitas *Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM)*. Untuk memastikan validitas hasil interpretasi citra, dilakukan verifikasi lapangan pada titik-titik yang sebelumnya teridentifikasi sebagai zona anomali. Verifikasi ini bertujuan untuk mengecek kesesuaian antara data indeks vegetasi dengan kondisi sebenarnya di lapangan, serta untuk mengontrol kebenaran indikasi degradasi atau stres vegetasi yang terdeteksi dari citra. Berikut adalah hasil interpretasi yang diperoleh berdasarkan klasifikasi nilai indeks vegetasi serta pengecekan langsung di lapangan. Setiap kelas nilai NDVI menunjukkan karakteristik yang cukup konsisten dengan kondisi aktual di lokasi penelitian. Area dengan nilai indeks rendah terbukti merupakan zona yang mengalami gangguan vegetatif berat, seperti pit tambang dan lahan terbuka. Sementara itu, zona dengan nilai menengah hingga tinggi menunjukkan tingkat tutupan vegetasi yang bervariasi, dari area yang mulai mengalami tekanan hingga wilayah yang masih dalam kondisi sehat. Rangkuman interpretasi dan hasil verifikasi lapangan tersebut disajikan dalam Tabel 2 serta Gambar 8, 9 dan 10 berikut.

Tabel 2. Hasil Analisis Kelas index NDVI pada Daerah Penelitian

No	KelasNilai NDVI	Interpretasi
1, 2 & 3	-1 s/d 0	Pit dan infrastruktur tambang, dominasi warna merah menunjukkan area dengan vegetasi yang stres, terdegradasi, atau tidak memiliki tutupan vegetasi, sering kali akibat aktivitas pertambangan dan deforestasi.
4	0 s/d 0.33	Bukaan lahan dan pemukiman, memperlihatkan gradasi warna dari merah menuju hijau muda, memperlihatkan perubahan dari bukaan lahan tanpa vegetasi menjadi hijau muda yang merupakan pemukiman (desa). Cekaman vegetasi terlihat
5	0.33 s/d 1	Warna hijau tua di bagian utara yang merupakan yang mengindikasikan vegetasi yang baik dan sehat. Namun, terdapat gradasi warna dari hijau tua ke hijau muda di sekitar wilayah pertambangan, yang dapat mengindikasikan adanya dampak aktivitas manusia seperti mikro-kontaminasi logam berat dan cekaman vegetasi.



Gambar 8. Area 1,2 & 3 Pada peta Anomali diambil oleh penulis menggunakan DJI mini 2SE

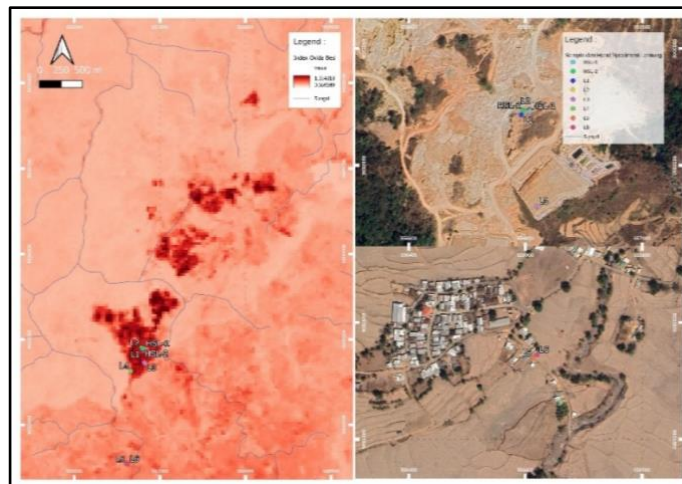


Gambar 9. Area 4 Pada peta Anomali diambil oleh penulis menggunakan DJI mini 2SE



Gambar 10. Area 5 Pada peta Anomali diambil oleh penulis menggunakan DJI mini 2SE

Berdasarkan hasil analisis citra satelit menggunakan *Clay Mineral Index*, ditemukan indikasi adanya nilai anomali *Fe oxide* yang tinggi pada permukaan pada wilayah penelitian seperti yang terlihat pada Gambar 8. Anomali ini menunjukkan keberadaan oksida besi yang signifikan, yang biasanya terkait dengan proses geokimia tertentu, seperti pelapukan mineral atau hasil aktivitas hidrotermal yang tersingkap karena adanya pembukaan lahan. Ketika *Fe oxide* tersingkap ke permukaan, terutama akibat aktivitas manusia seperti penambangan emas skala kecil, dapat menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan. *Fe oxide*, terutama yang terdiri dari senyawa seperti *hematit* (Fe_2O_3) atau *magnetit* (Fe_3O_4), dapat berfungsi sebagai penanda mineralisasi bawah permukaan, tetapi juga dapat mempengaruhi kualitas air dan tanah.



Gambar 11. Peta Anomali Fe Oxide dan Lokasi Sampling di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa. Data: Landsat-9 OLI (USGS, 2024); diolah oleh penulis menggunakan perangkat lunak QGIS

Hasil verifikasi lapangan menunjukkan bahwa keberadaan *Fe oxide* yang diidentifikasi melalui citra satelit dikonfirmasi dengan observasi langsung terhadap mineral oksida di lokasi penelitian. Dua sampel utama yang diamati menunjukkan karakteristik berbeda:

- Sampel HSL-1 memiliki dominasi warna putih dengan adanya mineral oksida dengan bercak hitam dan kemerahan, yang mengindikasikan keberadaan *hematit* (Fe_2O_3) atau *magnetit* (Fe_3O_4) dan oksida tembaga, dan mineral silika dan clay mineral (*illite*) sebagai mineral utama.
- Sampel HSL-2 memiliki dominasi warna putih dengan mineral kuning keemasan yang mengindikasikan keberadaan mineral *Pyrite* (FeS_2), dan mineral *kaoline* sebagai mineral utama.

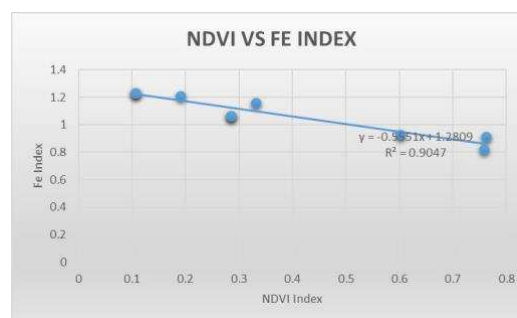


Gambar 12. Batuan yang ter-oksidasi pada lokasi-1 dengan mineral magnetit (Fe_3O_4) atau hematit (Fe_2O_3) dan oksida tembaga, di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa. Data: diambil oleh penulis



Gambar 13. Batuan yang masih dalam keadaan fresh pada lokasi-1 dengan adanya mineral Pyrite (FeS_2), di Kecamatan Lantung, Kabupaten Sumbawa. Data: diambil oleh penulis

Berdasarkan hasil analisis statistik dan visualisasi scatter plot, ditemukan adanya hubungan negatif yang sangat kuat antara nilai *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Fe Index* pada lokasi penelitian. Hasil perhitungan regresi linier menghasilkan persamaan sebagai berikut: $\text{Fe Index} = -0.5551 \times \text{NDVI} + 1.2809$, dengan koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0.9047$, dapat disimpulkan bahwa sekitar 90,47% variasi nilai *Fe Index* dapat dijelaskan oleh perubahan nilai NDVI. Nilai korelasi Pearson sebesar -0.9047 mengindikasikan bahwa semakin tinggi tingkat vegetasi (NDVI), maka kandungan besi cenderung semakin rendah. Hubungan ini dapat diinterpretasikan sebagai indikasi bahwa kawasan dengan tutupan vegetasi yang tinggi memiliki tingkat kontaminasi logam Fe yang lebih rendah.



Gambar 14. Analisis Hubungan antara Index NDVI dengan Fe

PENUTUP

Analisis citra Landsat-9 OLI tahun 2024 menunjukkan bahwa aktivitas Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) di Kecamatan Lantung memberikan dampak nyata terhadap kondisi biofisik lingkungan, terutama terkait kerusakan vegetasi dan paparan mineral permukaan. Hasil ekstraksi NDVI mengidentifikasi zona dengan nilai $\text{NDVI} \leq 0.1$ sebagai area dengan tingkat degradasi vegetasi tinggi, yang banyak ditemukan di sekitar lokasi penggalian aktif dan tumpukan tailing. Sementara itu, indeks Fe-Oxide yang dihitung melalui rasio band 4/2 dan 4/3 menunjukkan intensitas anomali mineral oksida

besi pada area yang sama, mengindikasikan keterbukaan lapisan tanah kaya mineral akibat aktivitas tambang. Overlay kedua indeks tersebut mengungkapkan bahwa luas zona tekanan lingkungan mencapai $\pm 65,33$ hektar dari total wilayah studi ± 2.278 hektar – luasan yang cukup signifikan secara ekologis karena berada terpusat pada daerah hulu dan zona tangkapan air yang sensitif. Korelasi kuat antara kedua indikator (Pearson -0.9047 ; $R^2 = 0.8185$) memperlihatkan bahwa degradasi vegetasi berhubungan erat dengan peningkatan paparan Fe-Oxide permukaan, yang secara ilmiah dapat berpotensi memicu pelindian logam berat pada kondisi kimia lingkungan tertentu.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan penting, terutama terkait resolusi spasial Landsat-9 (30 m) yang belum sepenuhnya mampu menangkap fitur mikro seperti lubang tambang kecil dan alur tailing sempit, serta keterbatasan verifikasi lapangan yang belum mencakup seluruh zona anomali. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh perlu dipahami sebagai deteksi awal (early detection), bukan sebagai pemetaan detail kontaminasi. Rekomendasi lanjutan mencakup perlunya pemantauan berkala menggunakan kombinasi citra resolusi tinggi (misalnya Sentinel-2, PlanetScope) dan sampel lapangan untuk validasi kimia tanah dan air, serta penerapan model serupa di wilayah ASGM lain di Nusa Tenggara Barat atau daerah tambang rakyat lainnya di Indonesia untuk menguji konsistensi kerangka analisis.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi penting dengan mengintegrasikan NDVI dan Fe-Oxide Index sebagai kerangka kerja deteksi dini risiko lingkungan pada ASGM. Pendekatan multindeks ini membuktikan bahwa penginderaan jauh dapat digunakan secara efektif sebagai sistem peringatan awal (early warning system) di wilayah minim data laboratorium. Hasil studi dapat menjadi dasar penyusunan zonasi risiko, prioritas pengawasan, serta perencanaan mitigasi dan pemulihan lingkungan berbasis spasial oleh pemerintah daerah dan pemangku kepentingan terkait.

REFERENSI

- Abay, A., Berhanu, B. & Alemu, Y. (2024) 'Mapping iron oxide minerals using Landsat-9 OLI spectral ratios in hydrothermally altered terrains', *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 129, pp. 103–118.
- Aliyu, A.O., Youngu, T.T. & Bala, A., 2022. Relationship of the seasonal vegetation indices against the NDVI and LST in the region of Kamuku Game Reserve and Kwiambana National Park, Nigeria. *Indonesian Journal of Earth Sciences*, 2(2), pp. 203–225. doi:10.52562/injoes.v2i2.409
- Cornell, R.M. & Schwertmann, U. (2003) *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses*. 2nd edn. Weinheim: Wiley-VCH.
- Jiang, Z., Huete, A., Didan, K. & Miura, T. (2021) 'Vegetation indices and their applications in remote sensing of ecosystem functional processes', *Remote Sensing of Environment*, 252, pp. 112–134.
- Johnson, D.B. & Hallberg, K.B. (2020) 'Acid mine drainage remediation: A review of current technologies and future research needs', *Science of the Total Environment*, 739, 139–145.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. & Chipman, J.W. (2015) *Remote Sensing and Image Interpretation*. 7th edn. New York: Wiley.
- Muradyan, V., Tepanosyan, G., Asmaryan, S., Maghakyan, N. & Saghatelyan, A., 2018. Assessing the stress of agricultural crops associated with heavy metal pollution in mining area using high resolution remote sensing data. *Environmental Earth Sciences*, 77(7), p. 264. doi:10.1007/s12665-018-7397-2
- Niajay, M., Rahman, M. & Matori, A. (2022) 'Remote sensing-based assessment of artisanal mining impacts on land cover and soil properties', *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(5), pp. 1–17.
- Ning, Z. et al., 2023. The impact of environmental factors on the transport and survival of pathogens in agricultural soils from karst areas of Yunnan province. *Frontiers in Microbiology*, 14: 1143900
- Pranoto, M. & Budianta, W., 2020. Phytoremediation of heavy metals contaminated soil in artisanal gold mining at Selogiri, Wonogiri District, Central Java, Indonesia. *Indonesian Journal of Geography*, 52(2), pp. 130–138. doi:10.22146/ijg.50655

- Rajendran, S. & Nasir, S. (2021) 'Detection of iron oxide and alteration minerals using multi-spectral satellite data', *Ore Geology Reviews*, 134, 104–326.
- Saepuloh, A., 2020. *Prinsip dan Aplikasi Penginderaan Jauh Geologi Gunung Api: Pendekatan Fisis dan Observasi Geologi Lapangan*. Bandung: ITB Press.
- Tiwari, P., Singh, S.K. & Kumar, S. (2023) 'Monitoring environmental degradation in mining zones using Landsat-8/9 spectral indices', *Journal of Environmental Management*, 336, pp. 117–301.
- Traba, J., Gómez-Catasús, J., Barrero, A., Bustillo-de la Rosa, D., Zurdo, J., Hervás, I., Pérez-Granados, C., García de la Morena, E.L., Santamaría, A. & Reverter, M., 2022. *Comparative assessment of satellite- and drone-based vegetation indices to predict arthropod biomass in shrub-steppes*. *Ecological Applications*, 32(8), e2707. doi:10.1002/eap.2707 U.S. Geological Survey, 2022. *Landsat 9 Data Users Handbook*. Sioux Falls, SD: U.S. Geological Survey.
- Tucker, C.J. (1979) 'Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation', *Remote Sensing of Environment*, 8(2), pp. 127–150.
- Zhu, Z., Woodcock, C.E. & Olofsson, P. (2020) 'Continuous monitoring of land cover change using remote sensing', *Annual Review of Environment and Resources*, 45, pp. 231–260.