

Analisis Komparasi Melalui Citra Satelit Sentinel dan Landsat untuk Pemantauan Pelaksanaan Reklamasi Lahan Bekas Tambang Batubara

Tedy Meilyanto^{a*}, Hery Suhartoyo^b, Yansen^b, Wiryono^b & Agus Susatya^b

^aProgram Studi Pengelolaan Sumber Daya Alam Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu,
Kandang Limun, Bengkulu 38371, Indonesia

^bJurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu, Kandang Limun,
Bengkulu 38371, Indonesia

*Corresponding author: tedymeilyanto@gmail.com

Submitted: 2025-07-24. Revised: 2025-09-15. Accepted: 2025-10-31

ABSTRACT

Mining activities can cause environmental degradation, especially in the form of changes in land cover and loss of vegetation. Therefore, monitoring the success of reclamation is important to ensure the restoration of post-mining ecosystems. This study aims to (1) monitor the implementation of post-mining land reclamation of PT. Bukit Sunur by analyzing canopy density or vegetation cover through Landsat and Sentinel imagery using the ArcGIS 10.8 platform, and (2) compare the NDVI values from both satellite images in the 2016, 2020, and 2024 periods to see the differences in the level of reclamation success detected by each satellite sensor. This study uses a remote sensing analysis method, where Landsat and Sentinel images are processed to extract NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) values to identify changes in vegetation density over time. Vegetation density classification is carried out using the Kappa index and Overall Accuracy (OA) calculations to measure the accuracy of image classification. The results show that the reclamation of post-mining land of PT. Bukit Sunur experienced a significant increase in vegetation density. In 2016, most of the area was still dominated by the Low to Moderate Vegetation category, but in 2020 there was an increase in the area of High Vegetation due to the transition from the Fairly High Vegetation class. Furthermore, in 2024, Very High Vegetation increased drastically from 0 ha to 267 ha, indicating the success of reclamation in improving land cover. Furthermore, a comparison of Landsat and Sentinel imagery shows a similar trend of NDVI changes, although Sentinel provides a higher resolution in detecting detailed vegetation changes. Overall Accuracy (OA) and Kappa Index (KA) values reached 97%-100%, indicating a very high level of classification accuracy. The conclusion of this study is that reclamation monitoring using satellite imagery has proven effective in identifying vegetation changes over time, with Sentinel showing superiority in more detailed resolution compared to Landsat. The results of this study can be used as a basis for evaluating mine reclamation programs and planning for post-mining ecosystem sustainability.

Keywords: Landsat, Mining Land Reclamation, NDVI, Sentinel, Vegetation Density

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu produsen dan eksportir utama batu bara di dunia. Sektor batu bara memiliki peran penting dalam perekonomian Indonesia. Industri ini menyumbang pendapatan negara melalui pajak dan royalti. Namun, sektor ini juga memiliki tantangan terkait dampak lingkungan dan sosial yang perlu diatasi. Berdasarkan Data Kementerian ESDM produksi batu bara Indonesia pada 2023 mencapai 766,95 juta ton. Angka tersebut setidaknya 110,43 persen dari target yang telah ditetapkan sebesar 694 juta ton (ESDM, 2024).

Daerah penambangan batu bara di Indonesia memiliki proporsi yang bervariasi tergantung pada lokasi, jenis batu bara, dan perusahaan yang terlibat. Sebagian besar penambangan batu bara di Indonesia terfokus di dua pulau utama, yaitu Kalimantan (terutama Kalimantan Timur, Kalimantan Selatan, dan Kalimantan Tengah) dan Sumatera (terutama Sumatera Selatan dan Sumatera Utara). Namun demikian, menurut Buta et al. (2019) bahwa proporsi penambangan batu bara ini dapat berubah seiring waktu karena dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kebijakan pemerintah, permintaan pasar, dan perubahan dalam kondisi ekonomi global.

Provinsi Bengkulu juga menjadi salah satu daerah dengan potensi cadangan batu bara yang signifikan. Provinsi ini pada tahun 2023 telah mengekspor batu bara sebesar 32,10 juta ton, dimana negara tujuan ekspor terbesar Provinsi Bengkulu pada tahun 2023 yaitu ke India sebesar 16,30 juta ton (50,01 persen), China sebesar 7,93 juta ton (24,32 persen), dan Thailand sebesar 5,29 juta ton (16,22 persen) (BPS, 2024).

Hampir sebagian besar penambangan batu bara di Provinsi Bengkulu menggunakan penambangan terbuka, yaitu metode ekstraksi bahan batu bara dari bumi yang dilakukan dengan cara membuka permukaan tanah. Neugirg et al. (2016) mengatakan penambangan terbuka umumnya dilakukan di lokasi yang memiliki konsentrasi tinggi bahan galian yang diinginkan.

Hal ini dapat mencakup daerah pegunungan, dataran tinggi, atau dataran rendah tergantung pada jenis mineral yang ditambang. Namun demikian, penambangan terbuka dapat memiliki dampak lingkungan yang signifikan, termasuk kerusakan habitat, penurunan kualitas air, emisi debu, dan lainnya. Oleh karena itu, praktik-praktik ramah lingkungan dan keberlanjutan semakin menjadi fokus dalam industri ini.

Reklamasi merupakan salah satu praktik keberlanjutan dan usaha penambangan batu bara. Upaya ini untuk mengembalikan lahan bekas tambang ke kondisi yang layak untuk digunakan kembali atau memulihkan fungsi ekologisnya. Ini melibatkan penutupan lubang tambang, penataan kembali tanah, dan penanaman vegetasi (revegetasi) (Bostjančić et al., 2023). Andini et al. (2018) mengatakan bahwa revegetasi bertujuan untuk mencegah erosi tanah yang dapat terjadi setelah penggundulan hutan atau pengambilan tanah yang intensif. Tanaman yang ditanam dapat membantu menjaga struktur tanah dan meminimalkan kerugian tanah.

Revegetasi membutuhkan perencanaan yang cermat dan pemantauan berkelanjutan untuk memastikan keberhasilan dalam memulihkan lahan dan ekosistem yang terpengaruh. Dalam pelaksanaan kegiatan reklamasi telah diatur melalui Kepmen 1827 K/30/MEM/2018 lampiran VI tentang Pedoman Pelaksanaan Reklamasi dan Pascatambang Serta Pascaoperasi Pada Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral Dan Batubara ini sebagai standardisasi dalam memantau persentase tutupan lahan oleh tanaman yang tumbuh. Tutupan lahan yang baik dapat membantu mengurangi erosi tanah, meminimalkan kerugian tanah, dan mendukung perkembangan ekosistem yang lebih stabil. Metode yang paling cepat untuk melihat perubahan tutupan lahan adalah dengan memanfaatkan teknologi citra satelit.

Banyak orang telah menggunakan data citra satelit penginderaan jauh untuk memetakan tutupan lahan bekas tambang saat ini. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa penginderaan jauh banyak digunakan untuk studi pelaksanaan reklamasi lahan bekas tambang, terutama untuk mengetahui kerapatan dan kesehatan tutupan lahan bekas tambang batu bara. Ini disebabkan oleh fakta bahwa penginderaan jauh merupakan teknologi yang cepat dan efisien untuk memantau pelaksanaan reklamasi lahan bekas tambang, meskipun banyak kemudahan yang sulit dijangkau dan biaya yang tinggi, citra satelit diantaranya Landsat – 8 OLI dan Citra Sentinel 2-A (Ahmed, 2020; Alexiou et al., 2021)

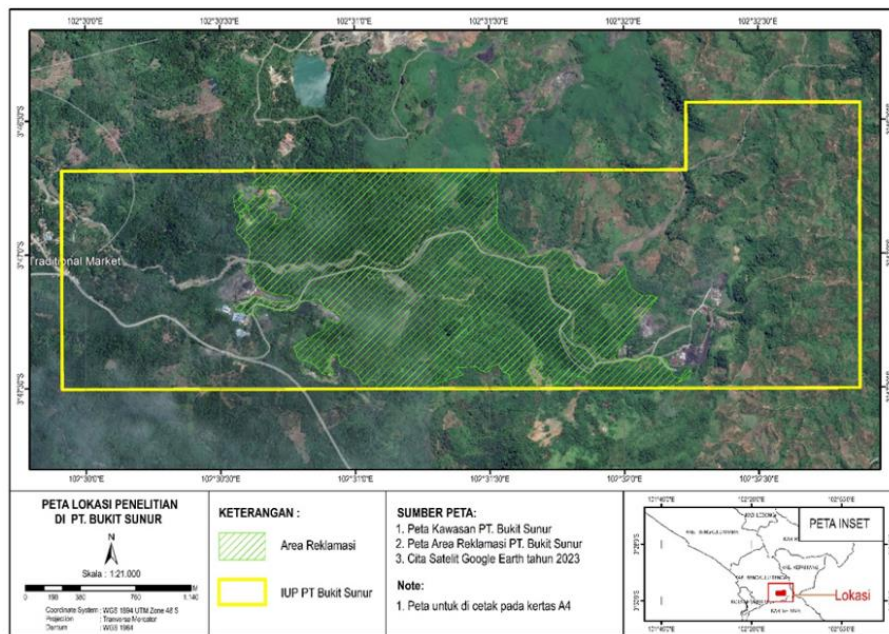
Sejak era berkembangnya gambar multisensor, citra Landsat-8 OLI sangat populer di Indonesia dan digunakan di berbagai bidang terapan (Rafsenja et al., 2020). Sensor gambar tanah operasional (OLI) dan sensor inframerah panas (TIRS) Landsat 8 memiliki 11 kanal; kanal OLI memiliki resolusi spasial 30 m, sedangkan kanal *panchromatic* memiliki resolusi spasial 15 m; kanal TIR-1 dan TIR-2 memiliki resolusi spasial 100 m, dan kanal 10 dan 11 memiliki resolusi 100 m (Irawan & Malau, 2016). Secara berkala di suatu area dengan cakupan yang luas untuk mengetahui kerapatan dan kesehatan tutupan tanah bekas tambang yang sebenarnya. Meskipun Sentinel 2-A memiliki tiga belas band dan memiliki resolusi spasial, temporal, dan gambar multispektral yang lebih baik, dan area sapuan 290 km, gambarnya memiliki beberapa keterbatasan dalam pengawasan (Ridayat & Suroso, 2022).

Meskipun pemantauan penginderaan jarak jauh mudah dilakukan, seringkali sulit bagi data satelit tunggal untuk menjamin kelangsungan ruang dan waktu. Oleh karena itu, mengeksplorasi hubungan antara satelit-satelit yang berbeda adalah hal yang kondusif untuk melengkapi berbagai jenis data satelit, sehingga mewujudkan kebutuhan pemantauan jangka panjang dan menyeluruh (Hu et al., 2022). Ada banyak penelitian tentang penggunaan teknologi penginderaan jauh untuk memantau pertumbuhan vegetasi guna mengetahui korelasi antara berbagai sensor, baik secara lokal maupun global. Berdasarkan data reflektansi terukur di lapangan dan model PROSALL, Zhao et al. (2018) membandingkan LAI dan biomassa segar data satelit Lingkungan dan satelit Landsat, serta menganalisis pengaruh faktor utama antara kedua sensor. Hu et al. (Hu et al., 2022) mengidentifikasi area reklamasi sebagai objek penelitian menggunakan penginderaan jauh multi sumber, yaitu sensor satelit China HJ, Sentinel-2 dan data satelit Landsat 8 sebagai sumber data, penelitian ini menggunakan NDVI untuk mengkarakterisasi pertumbuhan vegetasi dan analisis regresi linier untuk membandingkan korelasi sensor multi-sumber untuk memantau vegetasi di area. Pada penelitian ini menggunakan hasil analisis NDVI dengan satelit Landsat 8 dan Sentinel-2 untuk memantau tutupan vegetasi di kawasan reklamasi lahan bekas tambang batubara PT. Bukit Sunur Provinsi Bengkulu seluas 280, 17 Ha.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan memanfaatkan data citra penginderaan jauh untuk mengevaluasi keberhasilan reklamasi lahan bekas tambang batubara milik PT. Bukit Sunur di Kabupaten Bengkulu Tengah, Provinsi Bengkulu. Evaluasi dilakukan dengan menganalisis perubahan tutupan vegetasi dari tahun 2016, 2020, dan 2024 menggunakan citra satelit Landsat 8 OLI dan Sentinel-2A. Lokasi penelitian terletak di Desa Kota Niur, Kecamatan Taba Penanjung, dan pelaksanaannya dijadwalkan berlangsung antara bulan Oktober hingga November 2024 (Gambar 1).

Penelitian dilakukan di kawasan reklamasi PT. Bukit Sunur, dengan periode pengambilan data dan pengolahan citra direncanakan selama dua bulan. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada karakteristik lahan yang merupakan area bekas tambang yang sedang dalam proses reklamasi vegetasi, sehingga cocok untuk dianalisis menggunakan metode indeks vegetasi berbasis citra satelit.



Gambar 2. Peta Desa Kota Donok

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini berupa citra satelit Landsat 8 OLI dan Sentinel-2A, yang diunduh melalui situs resmi United States Geological Survey (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Citra Landsat 8 memiliki resolusi spasial 15–30 meter, sedangkan Sentinel-2A memiliki resolusi spasial 10–20 meter, dengan cakupan temporal pada tahun 2016, 2020, dan 2024 untuk Landsat, serta tahun 2017, 2020, dan 2024 untuk Sentinel. Pemilihan kedua jenis citra ini didasarkan pada ketersediaan data jangka panjang dan kemampuan deteksi vegetasi yang baik.

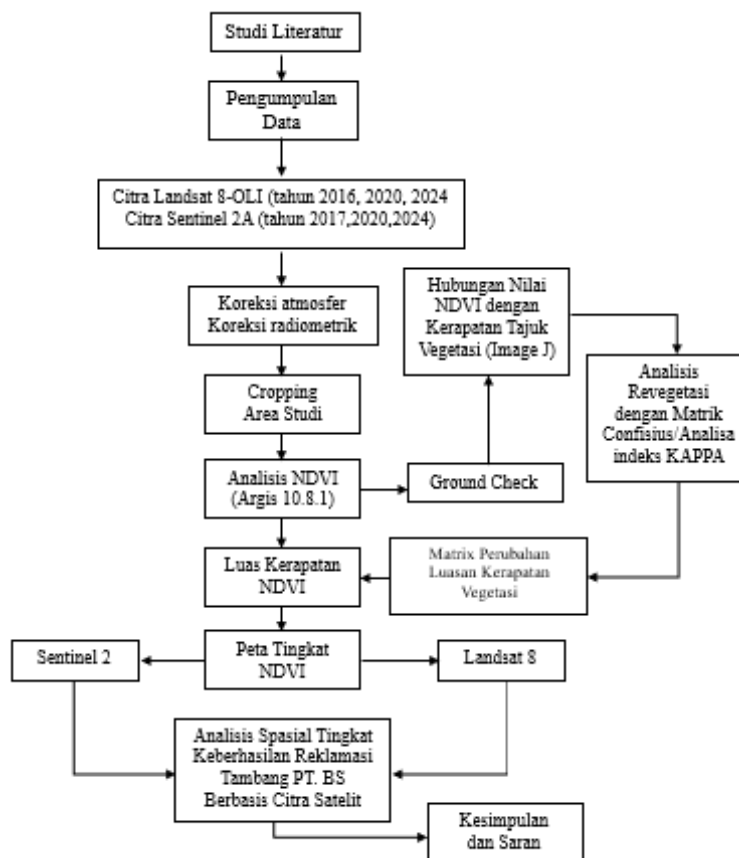
Pengolahan data dimulai dengan melakukan koreksi radiometrik dan atmosferik untuk memperbaiki gangguan sinyal akibat kondisi atmosfer dan posisi sensor. Citra Landsat 8 dikalibrasi menggunakan perangkat lunak ENVI 5.3 dan dilakukan koreksi atmosfer menggunakan metode FLAASH. Sementara itu, citra Sentinel-2A dikoreksi menggunakan plugin Sen2Cor 02.09.00 yang dikembangkan oleh ESA (*European Space Agency*). Proses ini menghasilkan data reflektan permukaan yang lebih akurat dan siap untuk analisis lebih lanjut.

Setelah koreksi, citra kemudian dipotong (*cropping*) sesuai dengan area of interest (AOI), yaitu kawasan reklamasi tambang PT. Bukit Sunur. Selanjutnya dilakukan perhitungan indeks vegetasi menggunakan rumus Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) untuk masing-masing citra. Perhitungan NDVI dilakukan berdasarkan rasio perbedaan antara pantulan gelombang cahaya near-infrared (NIR) dan red (merah), di mana nilai NDVI menunjukkan kepadatan dan kesehatan vegetasi. Untuk citra Landsat 8, NDVI dihitung menggunakan kanal band 5 (NIR) dan band 4 (Red), sedangkan pada Sentinel-2A menggunakan band 8 (NIR) dan band 4 (Red). Data NDVI kemudian dianalisis untuk melihat tren perubahan vegetasi dari waktu ke waktu, serta dibandingkan antara kedua jenis citra untuk menilai konsistensi hasil.

Sebagai langkah validasi data citra, dilakukan verifikasi lapangan (*ground check*) dengan mengambil foto-foto tutupan lahan dan vegetasi pada titik-titik sampling yang telah ditentukan. Foto lapangan tersebut kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak ImageJ untuk menghitung persentase tutupan tajuk vegetasi. ImageJ memungkinkan pengukuran nilai piksel dan area pada gambar, sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi luasan tutupan vegetasi secara visual.

Untuk mengukur tingkat akurasi klasifikasi citra NDVI, digunakan dua parameter evaluasi: *Overall Accuracy* (OA) dan *Kappa Accuracy* (KA). OA menghitung persentase sampel yang diklasifikasikan secara benar dibandingkan dengan total sampel, sedangkan KA mengukur akurasi yang telah disesuaikan dengan kemungkinan klasifikasi yang terjadi secara kebetulan. Nilai Kappa mendekati 1 menunjukkan bahwa hasil klasifikasi sangat akurat dan tidak dipengaruhi oleh kebetulan.

Hasil NDVI yang telah dihitung dipetakan untuk menunjukkan distribusi spasial kepadatan vegetasi pada masing-masing tahun pengamatan. Kemudian dilakukan analisis spasial terhadap perubahan luasan tutupan vegetasi untuk mengetahui tingkat keberhasilan reklamasi tambang. Selain itu, dibuat matriks perubahan dan peta tingkat NDVI untuk masing-masing tahun sebagai bahan evaluasi visual dan kuantitatif. Hasil akhir dari analisis ini digunakan untuk memberikan rekomendasi dalam pengelolaan dan perencanaan reklamasi yang lebih efektif berbasis data spasial (Gambar 2).



Gambar 3. Alur Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

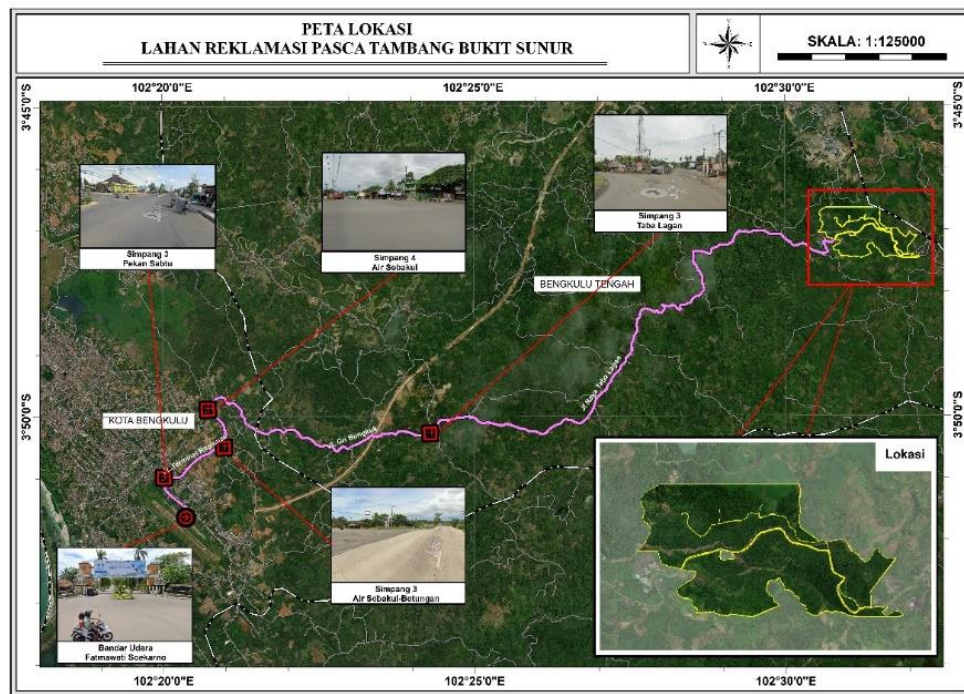
PT. Bukit Sunur adalah perusahaan yang bergerak dibidang pertambangan batubara yang berlokasi di wilayah Desa Kota Niur, Kecamatan Taba Penanjung, Kabupaten Bengkulu Tengah, Provinsi Bengkulu. Pada Tahun 2013 mendapatkan ijin pinjam pakai kawasan hutan produksi tetap berdasarkan Keputusan Menteri Kehutanan Nomor : SK.117/Menhut-II/2013 tanggal 14 Februari 2013 seluas IUP.OP. 885 Ha yang diberi ijin seluas 700 Ha, dan berakhir pada tanggal 20 Mei 2015, atas pertimbangan sisa cadangan batubara serta secara teknis dan ekonomis masih dapat dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan batubara dan membuka peluang kesempatan kerja serta pendapatan daerah, mengajukan permohonan untuk memperpanjang IUP/ijin usaha pertambangan Kembali (Gambar 3).

Perpanjangan ijin pinjam pakai kawasan dikeluarkan oleh Kepala Badan Koordinasi Penanaman Modal (BKPM) dengan nomor: 49/1/IPPKH/PMDN/2016 tanggal 24 Juni 2016 dalam rangka pemenuhan Kewajiban Ijin Pinjam Pakai Kawasan Hutan sesuai Keputusan Menteri Kehutanan Nomor: SK.117/Menhut-II/2013 tanggal 14 Februari 2013, mendapatkan Ijin Pinjam Pakai Kawasan Hutan pada Kawasan Hutan Produksi Tetap Hutan Rindu Hati seluas 700 Ha.

Lokasi ijin pinjam pakai kawasan hutan PT. Bukit Sunur berdasarkan letak administrasi pemerintahan berada di wilayah Desa Kota Niur, Kecamatan Taba Penanjung, Kabupaten Bengkulu Tengah Provinsi Bengkulu. Berdasarkan letak geografis berada pada $102^{\circ} 29' 38'' - 102^{\circ} 32' 39''$ BT dan $03^{\circ} 46' 41,6' - 03^{\circ} 47' 33,1'$ LS, menurut fungsi kawasan berada pada Kawasan Hutan Produksi Tetap, Semidang Bukit Kabu, Kelompok Hutan Rindu Hati Register 75. Sedangkan menurut tata kelola kawasan hutan berada di wilayah kesatuan pengelolaan hutan (KPH) Bukit Daun. Wilayah Kecamatan Taba Penanjung keadaan topografinya secara umum berbukit bukit dan banyak lereng dengan ketinggian 60 – 541 m dpl. Keadaan lapangan areal pinjam pakai PT. Bukit Sunur pada umumnya bergelombang sedang sampai dengan berat, dengan kelereng landau sampai curam 8% - 40%.

Kondisi penutupan lahan areal pinjam pakai PT. Bukit Sunur pada lahan reklamasi secara visual telah tertutup hijau oleh ekosistem pertumbuhan flora, berdasarkan strata tajuk pohon didominasi oleh jenis acacia mangium, sengon dan tanaman muda seperti polupodium, rumput gajah dan chromolena Odorata. Kondisi di lapangan bisa dilihat dari dominasi suku Poaceae yang

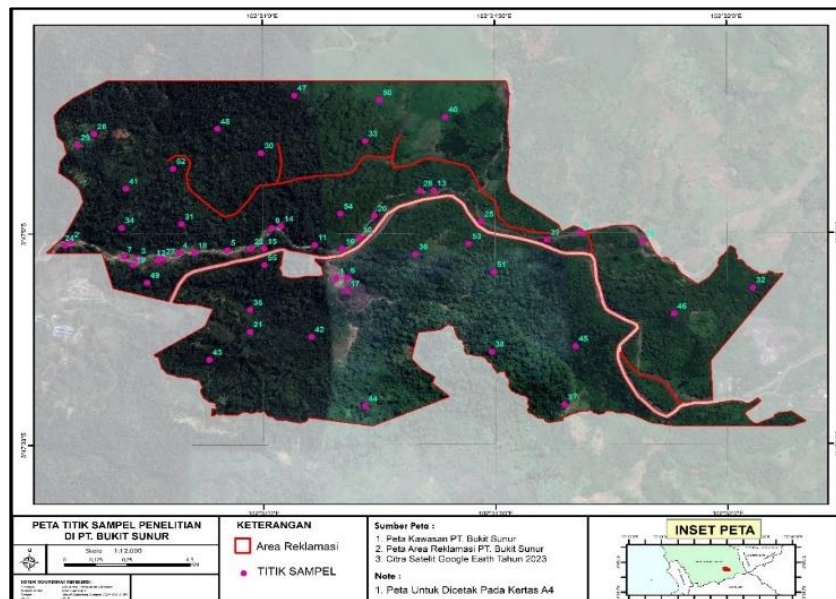
merupakan jenis suku pioneer pada takson pertama yang telah muncul (klonisasi) pasca tambang. Terdapat juga pertumbuhan Akasia (*Acacia mangium*), Sengon (*paraserianthes falcataria*), Bambang Lanang, ketapang (*Terminalia catappa*), trembesi (*Samanea saman*), randu (*Ceiba pentandra*) dan Pulai (*Alstonia scholaris*).



Gambar 4. Peta Lokasi Lahan Reklamasi Pasca Tambang Bukit Sunur

Perbandingan Nilai NDVI citra Satelit Landsat dan Sentinel Periode 2016, 2020, 2024

Analisis dilakukan dengan menghitung nilai NDVI dan mengklasifikasikan tingkat kerapatan vegetasi berdasarkan titik sampel sebanyak 55 titik yang dipilih secara acak di area penelitian. Titik-titik ini digunakan untuk validasi hasil klasifikasi NDVI serta untuk analisis akurasi spasial (Gambar 4).



Gambar 5. Titik Pengambilan Sampel

Tabel 1. Matriks Kesalahan Landsat

Hasil interpretasi (Pembuat)	Survei Lapangan (Pengguna)								
	Klas	Tidak bervegetasi	Vegetasi rendah	Vegetasi agak rendah	Vegetasi sedang	Vegetasi cukup tinggi	Vegetasi tinggi	Vegetasi sangat tinggi	Jumlah
	Tidak bervegetasi	5							5
	Vegetasi rendah		5						5
	Vegetasi agak rendah			4					4
	Vegetasi sedang		1		5				6
	Vegetasi cukup tinggi			1		7			8
	Vegetasi tinggi		1				9	1	11
	Vegetasi sangat tinggi			2				14	16
	Jumlah	5	7	7	5	7	9	15	55

Klasifikasi NDVI dari citra Sentinel-2A menunjukkan hasil yang sangat baik. *Nilai Overall Accuracy* (OA) mencapai 89%, yang berarti mayoritas klasifikasi yang dilakukan sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Selain itu, nilai Indeks Kappa sebesar 88% menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat tinggi dan hampir tidak terpengaruh oleh klasifikasi acak. Hampir semua kelas vegetasi memiliki akurasi pengguna dan akurasi pembuat yang tinggi, dengan sebagian besar mencapai 100%, kecuali untuk kategori vegetasi rendah dan agak rendah yang masing-masing menunjukkan sedikit deviasi dengan akurasi pembuat 71% dan 57%.

Tabel 2. Matriks Kesalahan Landsat

Hasil interpretasi (Pembuat)	Survei Lapangan (Pengguna)								
	Klas	Tidak bervegetasi	Vegetasi rendah	Vegetasi agak rendah	Vegetasi sedang	Vegetasi cukup tinggi	Vegetasi tinggi	Vegetasi sangat tinggi	Jumlah
	Tidak bervegetasi	0							0
	Vegetasi rendah		0						0
	Vegetasi agak rendah	3	4	7					14
	Vegetasi sedang	1	3		5				9
	Vegetasi cukup tinggi	1				7			8
	Vegetasi tinggi						9		9
	Vegetasi sangat tinggi							15	15
	Jumlah	5	7	7	5	7	9	15	55

Hasil klasifikasi citra Landsat 8 juga menunjukkan performa yang cukup baik namun berada di bawah Sentinel-2A. Nilai *Overall Accuracy* dari klasifikasi ini adalah 78%, sedangkan nilai *Indeks Kappa* sebesar 77%, yang dikategorikan sebagai “baik” menurut skala interpretasi indeks Kappa. Meskipun beberapa kelas seperti vegetasi sedang, cukup tinggi, tinggi, dan sangat tinggi memiliki akurasi yang tinggi (mencapai 100% dalam akurasi pembuat), namun terdapat kelemahan dalam mendeteksi area tanpa vegetasi dan vegetasi rendah, yang keduanya memiliki akurasi pengguna dan pembuat sebesar 0%. Hal ini menunjukkan keterbatasan citra Landsat dalam membedakan area dengan tutupan vegetasi yang sangat minim.

Citra Sentinel-2A memberikan hasil klasifikasi yang lebih akurat dan konsisten dibandingkan dengan citra Landsat 8, terutama dalam mendeteksi kategori vegetasi rendah hingga sangat tinggi. Keunggulan ini disebabkan oleh resolusi spasial Sentinel-2A yang lebih tinggi (hingga 10 meter), yang memberikan detail yang lebih tajam pada area tutupan vegetasi yang bervariasi. Sebaliknya, keterbatasan resolusi pada Landsat 8 mengurangi sensitivitasnya terhadap variasi kecil dalam kerapatan vegetasi. Hasil ini menegaskan bahwa Sentinel-2A lebih andal untuk pemantauan reklamasi vegetasi di lahan bekas tambang, karena mampu mendeteksi variasi kerapatan tajuk secara lebih akurat. Oleh karena itu, untuk keperluan pemantauan lingkungan dengan skala detail menengah hingga tinggi, penggunaan Sentinel-2A direkomendasikan sebagai alat utama dalam analisis spasial berbasis NDVI.

Perhitungan kerapatan vegetasi dilakukan dengan menghitung jumlah individu tumbuhan per hektar dan mengelompokkan hasilnya ke dalam tujuh kelas kerapatan: tidak bervegetasi, vegetasi rendah, agak rendah, sedang, cukup tinggi, tinggi, dan sangat tinggi.

Tabel 3. Perhitungan Kerapatan Vegetasi

No.	X	Y	Pixel Kanopi/ jumlah individu	Pixel Total/ luas petak ukur	% Tutupan Kanopi/ % Kerapatan vegetasi	Kelas
1	102.519376	-3.785104				Tidak Bervegetasi
2	102.509854	-3.783641				Tidak Bervegetasi
3	102.512254	-3.7843				Tidak Bervegetasi
4	102.51375	-3.784086				Tidak Bervegetasi
5	102.515477	-3.783983				Tidak Bervegetasi
6	102.519769	-3.785081	11	100	0.11	Vegetasi Rendah
7	102.511761	-3.784244	19	100	0.19	Vegetasi Rendah
8	102.528157	-3.783328	23	100	0.23	Vegetasi Rendah
9	102.517076	-3.783122	16	100	0.16	Vegetasi Rendah
10	102.520215	-3.783482	12	100	0.12	Vegetasi Rendah
11	102.518609	-3.783788	41	100	0.41	Vegetasi Agak Rendah
12	102.512976	-3.784381	35	100	0.35	Vegetasi Agak Rendah
13	102.522881	-3.781655	32	100	0.32	Vegetasi Agak Rendah
14	102.517395	-3.783048	38	100	0.38	Vegetasi Agak Rendah
15	102.516795	-3.783929	52	100	0.52	Vegetasi Sedang
16	102.519595	-3.783942	55	100	0.55	Vegetasi Rendah
17	102.519766	-3.785607	58	100	0.58	Vegetasi Sedang
18	102.514291	-3.784087	54	100	0.54	Vegetasi Sedang
19	102.512069	-3.78455	52	100	0.52	Vegetasi Sedang
20	102.520754	-3.782645	54	100	0.54	Vegetasi Sedang
21	102.516278	-3.78721	694194	1048326	66.21928675	Vegetasi Cukup Tinggi
22	102.516318	-3.783941	688936	1100906	62.57900311	Vegetasi Cukup Tinggi
23	102.53036	-3.783668	697981	1010457	69.07577462	Vegetasi Cukup Tinggi
24	102.509643	-3.783784	689735	1092914	63.10972318	Vegetasi Cukup Tinggi
25	102.524586	-3.782872	690067	1089595	63.33243086	Vegetasi Cukup Tinggi
26	102.510693	-3.779396	693555	1054714	65.75763667	Vegetasi Cukup Tinggi
27	102.513142	-3.784323	687036	1119903	61.34781316	Vegetasi Cukup Tinggi
28	102.522398	-3.78166	34	100	0.34	vegetasi agak rendah
29	102.510096	-3.779829	702799	962281	73.03469569	Vegetasi Tinggi
30	102.516689	-3.780159	699927	990994	70.62878282	Vegetasi Tinggi
31	102.513825	-3.782949	712802	862247	82.66795941	Vegetasi Tinggi
32	102.534339	-3.785507	28	100	0.28	Vegetasi rendah
33	102.520428	-3.779694	700616	984105	71.19321617	Vegetasi Tinggi
34	102.511677	-3.783093	706133	928942	76.01475657	Vegetasi Tinggi
35	102.516277	-3.78634	702021	970062	72.36867334	Vegetasi Tinggi
36	102.522225	-3.784157	719459	795677	90.42098741	Vegetasi Sangat Tinggi
37	102.527617	-3.790199	718140	808863	88.78388553	Vegetasi Tinggi
38	102.524957	-3.78801	699902	991244	70.60844757	Vegetasi Tinggi
39	102.526954	-3.783601	707079	919479	76.89996183	Vegetasi Tinggi
40	102.523307	-3.778755	42	100	0.42	Vegetasi agak Rendah
41	102.511834	-3.781553	723452	755743	95.7272512	Vegetasi Sangat Tinggi
42	102.518488	-3.787412	724029	749979	96.53990312	Vegetasi Sangat Tinggi
43	102.514814	-3.788305	720263	787639	91.44582734	Vegetasi Sangat Tinggi
44	102.520394	-3.790143	721029	779981	92.44186717	Vegetasi Sangat Tinggi
45	102.527962	-3.787797	721126	779005	92.57013755	Vegetasi Sangat Tinggi
46	102.531507	-3.786522	723197	758294	95.37158411	Vegetasi Sangat Tinggi
47	102.517886	-3.77789	719140	798872	90.01942739	Vegetasi Sangat Tinggi
48	102.515126	-3.779202	720602	784245	91.88480641	Vegetasi Sangat Tinggi
49	102.51258	-3.785264	721467	775597	93.02086006	Vegetasi Sangat Tinggi
50	102.520944	-3.778071	41	100	0.41	Vegetasi Agak Rendah
51	102.525031	-3.784868	724155	748719	96.71919639	Vegetasi Sangat Tinggi
52	102.513526	-3.780769	724322	747049	96.95776315	Vegetasi Sangat Tinggi
53	102.524136	-3.783748	720341	786862	91.54603984	Vegetasi Sangat Tinggi
54	102.519533	-3.782551	723473	755542	95.75549738	Vegetasi Sangat Tinggi
55	102.516802	-3.784576	720407	786196	91.6319849	Vegetasi Sangat Tinggi

Dari total 55 titik sampel yang dianalisis, ditemukan sebaran kelas kerapatan yang beragam. Beberapa titik menunjukkan nilai nol persen tutupan kanopi, yang mencerminkan area tidak bervegetasi, berupa lahan kosong atau area perairan. Kelas vegetasi rendah memiliki nilai kerapatan sekitar 0.11–0.23%, menunjukkan area dengan semak-semak atau vegetasi jarang. Kategori vegetasi sedang hingga cukup tinggi mencerminkan area yang sudah mulai hijau dan menunjukkan

tutupan yang merata, sedangkan kategori tinggi dan sangat tinggi (dengan kerapatan di atas 70% hingga 96%) mencerminkan area yang ditumbuhi hutan sekunder hingga hutan primer yang sangat lebat.

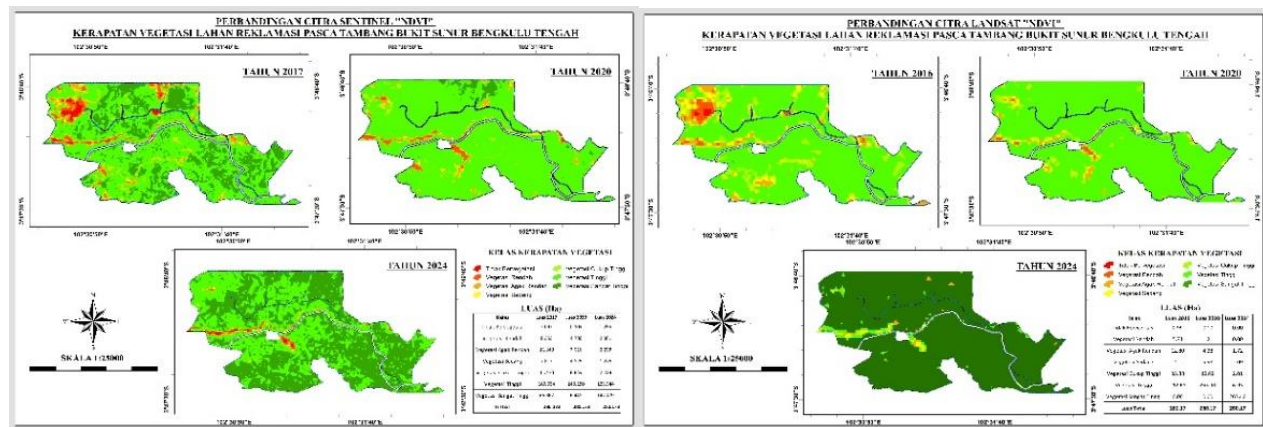
Luas Kerapatan NDVI

Perbandingan antara citra Sentinel dan Landsat menunjukkan pola perubahan vegetasi yang serupa. Baik dari data Sentinel maupun Landsat, terjadi penurunan luas pada kelas vegetasi rendah hingga tinggi, yang diiringi dengan peningkatan drastis pada kelas vegetasi sangat tinggi, khususnya pada tahun 2024.

Tabel 4. Luas Area Kelas Vegetasi

Kelas	Citra Sentinel 2A (Ha)			Citra Landsat 8 (Ha)		
	Luas 2017	Luas 2017	Luas 2020	Luas 2016	Luas 2020	Luas 2024
Tidak Bervegetasi	3,697	3,697	0,109	0.99	0.00	0.00
Vegetasi Rendah	9,353	9,353	4,786	5.71	1.21	0.00
Vegetasi Agak Rendah	11,340	11,340	7,016	12.80	4.38	1.72
Vegetasi Sedang	7,817	7,817	4,825	14.11	5.98	2.09
Vegetasi Cukup Tinggi	11,470	11,470	8,839	33.88	12.62	2.01
Vegetasi Tinggi	169,634	169,634	248,150	212.68	255.98	6.93
Vegetasi Sangat Tinggi	66,862	66,862	6,448	0.00	0.00	267.42
Total	280,173	280,173	280,173	280.17	280.17	280.17

Citra Sentinel-2A menunjukkan vegetasi sangat tinggi meningkat tajam dari 6,45 ha (2020) menjadi 147,41 ha (2024), sedangkan vegetasi tinggi mengalami penurunan dari 248,15 ha menjadi 123,34 ha. Perubahan ini menunjukkan adanya peningkatan kepadatan vegetasi di area yang sebelumnya tergolong vegetasi tinggi. Sedangkan pada Citra Landsat 8, tidak ada vegetasi sangat tinggi pada tahun 2016 dan 2020. Namun, pada 2024, kelas ini menjadi dominan dengan luasan 267,23 ha. Vegetasi tinggi turun drastis dari 255,98 ha (2020) menjadi hanya 7,39 ha (2024), menunjukkan transisi tajuk vegetasi menuju kelas kerapatan maksimum (Lihat Gambar 5 dan Gambar 6).



(a) citra sentinel

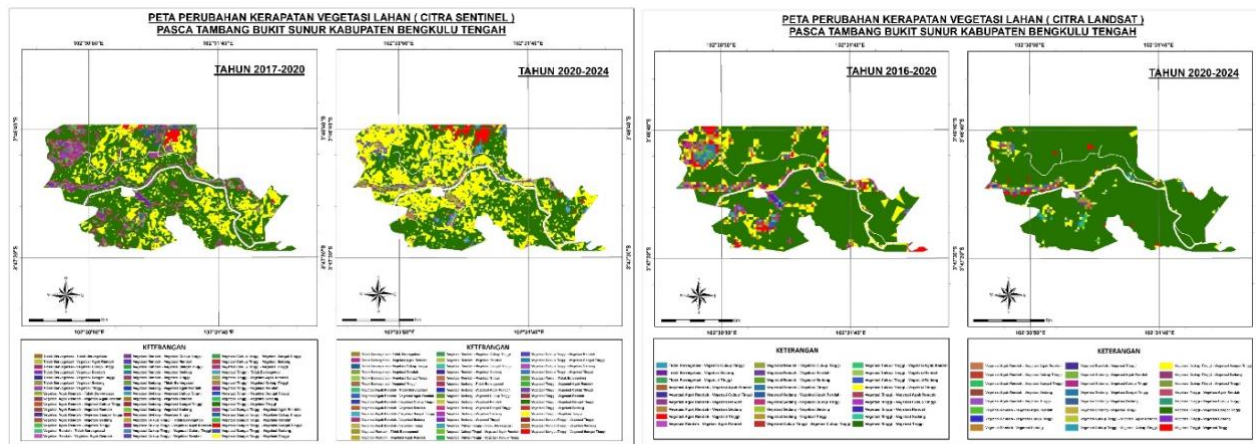
(b) citra landsat

Gambar 6. Perbandingan Citra Sentinel dan Citra Landsat Tahun 2017, 2020, 2024

Perubahan Luasan Kerapatan Vegetasi Tahun 2017, 2020, 2024

Tabel 5. Perubahan Temporal Antara Periode

Kelas	Luas (Ha) Perubahan Citra Sentinel		Luas (Ha) Perubahan Citra Sentinel	
	2017-2020	2020-2024	2016-2020	2020-2024
Tidak Bervegetasi	-3.59	1.19	-0.99	0
Vegetasi Rendah	-4.57	-2.40	-4.50	-1.21
Vegetasi Agak Rendah	-4.32	-4.78	-8.42	-2.59
Vegetasi Sedang	-2.99	-3.55	-8.13	-4.02
Vegetasi Cukup Tinggi	-2.63	-6.61	-21.26	-10.82
Vegetasi Tinggi	+78.52	-124.81	43.30	-248.59
Vegetasi Sangat Tinggi	-60.41	140.96	0.00	267.23
Total	0	0	0.00	0



Gambar 7. Peta Perubahan Temporal Antara Periode

Citra Sentinel periode 2017–2020 menunjukkan luas lahan vegetasi tinggi mengalami peningkatan terbesar (+78,52 ha), dengan pergeseran luas dari kelas vegetasi rendah–sedang. Sebaliknya, vegetasi sangat tinggi justru mengalami penurunan (-60,41 ha), yang sebagian besar berpindah ke kelas vegetasi tinggi. Kemudian tahun 2020–2024, vegetasi sangat tinggi mengalami pertambahan paling signifikan (+140,96 ha), didominasi oleh pergeseran dari kelas vegetasi tinggi. Penurunan luas juga terjadi pada kelas sedang, cukup tinggi, dan agak rendah. Sedangkan citra Landsat periode tahun 2016–2020 menunjukkan vegetasi tinggi naik 43,30 ha, berasal dari pergeseran vegetasi sedang dan cukup tinggi. Tidak ada vegetasi sangat tinggi di periode ini. Kemudian citra Landsat periode tahun 2020–2024 menunjukkan vegetasi sangat tinggi melonjak dari 0 menjadi 267,23 ha, sebagian besar berasal dari kelas vegetasi tinggi (251,49 ha). Tidak ada lagi area dalam kategori tidak bervegetasi atau vegetasi rendah.

Hasil analisis menunjukkan bahwa program reklamasi tambang di PT. Bukit Sunur memberikan hasil yang signifikan dalam peningkatan tutupan vegetasi. Perubahan dominan ke arah vegetasi sangat tinggi menunjukkan keberhasilan revegetasi dan pemulihan ekosistem lahan bekas tambang. Tren ini konsisten ditunjukkan baik oleh data Sentinel-2A maupun Landsat 8, meskipun Sentinel memperlihatkan fluktuasi yang lebih detail karena resolusi spasial yang lebih tinggi. Dengan tidak ditemukannya lagi area tidak bervegetasi pada tahun 2024 serta dominasi area vegetasi sangat tinggi, dapat disimpulkan bahwa lahan bekas tambang telah mengalami pemulihan yang optimal dalam hal tutupan vegetasi, baik melalui regenerasi alami maupun upaya reklamasi aktif.

KESIMPULAN

Pada citra sentinel menunjukkan adanya keberhasilan reklamasi pada lahan pasca tambang, pada periode tahun 2017-2020. Perubahan kerapatan vegetasi menunjukkan adanya keberhasilan reklamasi lahan bekas tambang. Pada citra sentinel periode 2017-2020 dan citra landsat periode 2016-2020, terjadi peningkatan signifikan pada kelas Vegetasi Tinggi akibat transisi dari kelas Vegetasi Cukup Tinggi dan kategori lainnya, yang menunjukkan pertumbuhan vegetasi yang progresif. Pada periode 2020-2024, sebagian besar Vegetasi Tinggi beralih ke Vegetasi Sangat Tinggi, pada citra landsat dengan luasannya meningkat drastis dari 0 ha (2020) menjadi 267 ha (2024). Tidak adanya kategori Tidak Bervegetasi dan Vegetasi Rendah pada tahun 2024 menunjukkan keberhasilan revegetasi yang hampir mencapai 100%, di mana seluruh area telah mengalami pertumbuhan vegetasi secara signifikan. Nilai Overall Akurasi (OA) sebesar 89% dan Akurasi Kappa (KA) Citra Sentinel menunjukkan nilai 88% yang masuk ke kategori Sangat Baik pada kesesuaian akurasi kappa yang menegaskan bahwa metode pemantauan menggunakan Citra Sentinel bernilai sangat akurat. Nilai Overall Akurasi (OA) sebesar 78% Akurasi Kappa (KA) Citra Sentinel menunjukkan nilai 77% yang masuk ke kategori Baik pada kesesuaian akurasi kappa yang menegaskan bahwa metode pemantauan menggunakan Citra Landsat mampu memberikan nilai akurat.

NDVI dari citra Landsat dan Sentinel menunjukkan tren peningkatan vegetasi yang konsisten di wilayah reklamasi. Pada 2016, sebagian besar area masih berada dalam kategori Vegetasi Rendah hingga Sedang, dengan NDVI yang lebih rendah. Pada 2020, NDVI meningkat dengan dominasi Vegetasi Tinggi, menunjukkan pemulihan vegetasi yang lebih baik. Pada 2024, NDVI menunjukkan transisi besar-besaran dari Vegetasi Tinggi ke Vegetasi Sangat Tinggi, menandakan bahwa kepadatan dan tutupan vegetasi mencapai puncaknya. Citra Sentinel cenderung memiliki resolusi spasial yang lebih tinggi dibandingkan Landsat, sehingga mampu mendeteksi perubahan vegetasi dengan lebih detail namun memperhatikan nilai Akurasi Kappa keduanya dapat digunakan secara efektif dalam pemantauan reklama.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, N.** 2020. Application of NDVI in Vegetation Monitoring Using GIS and Remote Sensing in Northern Ethiopian Highlands. *Abyssinia Journal of Science and Technology*, 1(1), 12–17.
- Alexiou, S., Deligiannakis, G., Pallikarakis, A., Papanikolaou, I., Psomiadis, E., & Reicherter, K.** 2021. Comparing High Accuracy t-LiDAR and UAV-SfM Derived Point Clouds for Geomorphological Change Detection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(6), 367–377. <https://doi.org/10.3390/ijgi10060367>
- Andini, S. W., Prasetyo, Y., & Sukmono, A.** 2018. Analisis Sebaran Vegetasi Dengan Citra Satelit Sentinel Menggunakan Metode Ndvi dan Segmentasi. *Jurnal Geodsi Undip*, 7(1), 14–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jgundip.2017.19295>
- Bostjančič, I., Gulam, V., Frangen, T., & Hečej, N.** 2023. Relation between relief and Badland spatial distribution in the Paleogene Pazin Basin, Croatia. *Journal of Maps*, 19(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2163196>
- BPS.** 2024. *Ekspor Batu Bara Menurut Negara Tujuan Utama, 2012-2023*. <https://www.bps.go.id/statistics-table/1/MTAzNCMx/ekspor-batu-bara-menurut-negara-tujuan-utama-2012-2022.html>
- Buta, M., Blaga, G., Paulette, L., Păcurar, I., Roșca, S., Borsai, O., Grecu, F., Sînziana, P. E., & Negrușier, C.** 2019. Soil Reclamation of Abandoned Mine Lands by Revegetation in Northwestern Part of Transylvania: A 40-Year Retrospective Study. *Sustainability*, 11(12), 339–345. <https://doi.org/10.3390/su11123393>
- ESDM.** (2024). *Minerba One Map Indonesia (MODI)*. Kementerian ESDM.
- Hu, J., Ye, B., Bai, Z., & Hui, J.** 2022. Comparison of the Vegetation Index of Reclamation Mining Areas Calculated by Multi-Source Remote Sensing Data. *Land*, 11(3), 325–330. <https://doi.org/10.3390/land11030325>
- Irawan, S., & Malau, A. O.** 2016. Analisis Persebaran Mangrove di Pulau Batam Menggunakan Teknologi Penginderaan Jauh. *Jurnal Integrasi*, 8(2), 80–87.
- Neugirg, F., Stark, M., Kaiser, A., Vlacilova, M., Della Seta, M., Vergari, F., Schmidt, J., Becht, M., & Haas, F.** 2016. Erosion processes in calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial LiDAR and UAV surveys. *Geomorphology*, 269(2), 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.027>
- Rafsenja, U., Jaya, L. M. G., Sawaludin, S., & Rahim, S.** 2020. Analisis Perbandingan Citra Landsat 8 dan Citra Sentinel 2-A untuk Mengidentifikasi Sebaran Mangrove. *Jurnal Geografi Aplikasi Dan Teknologi*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33772/jagat.v4i1.11901>
- Ridayat, R., & Suroso, S.** 2022. Analisis Kesehatan Mangrove Berbasis Algoritma NDVI Menggunakan Citra Sentinel 2A di Kecamatan Tugu Kota Semarang. *Geo-Image*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.15294/geoimage.v11i1.54461>
- Zhao, J., Li, J., Liu, Q., Wang, H., Chen, C., Xu, B., & Wu, S.** 2018. Comparative Analysis of Chinese HJ-1 CCD, GF-1 WFV and ZY-3 MUX Sensor Data for Leaf Area Index Estimations for Maize. *Remote Sensing*, 10(1), 68–75. <https://doi.org/10.3390/rs10010068>