Science and Education Journal
Vol 5 No 3 (2026)
E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Evaluasi Keberhasilan Reklamasi Hutan Pasca Tambang Batu Bara Di Kawasan Hutan Produksi Studi Kasus : PT Hamparan Mulya Di Kabupaten Barito Utara

Wahyu Ramadhan[1], Yustinus Sulistiyanto[2], Vera Amelia[3], Fengky F. Adji[4], Theresia Susi[5], Haiki Mart Yupi[6]
[1,2,3,4,5,6]Magister Sains Program Pascasarjana Universitas Palangka Raya, vamelia@agr.upr.ac.id

Abstract

This study aimed to determine the causal relationships and contributions among exogenous variables representing reclamation implementation, including land arrangement, erosion, sedimentation, and water pollution control, as well as revegetation, toward the endogenous variable of forest reclamation success based on vegetation density analysis using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) approach. The study was conducted in a 149.47 ha forest reclamation area of PT Hamparan Mulya, located in Hajak Village, Teweh Baru District, North Barito Regency, Central Kalimantan Province, from February to April 2026. The results showed that forest reclamation implementation obtained a score of 91 out of 100 based on the criteria of SE.1/MENLHK/SETJEN/KUM.1/2024, categorized as good and acceptable. The PLS-SEM analysis revealed that erosion, sedimentation, and water pollution control had a positive and significant effect on forest reclamation success (path coefficient = 0.307; t-statistics = 3.581; p-value = 0.000). Land arrangement did not have a direct significant effect on reclamation success (path coefficient = -0.056; t-statistics = 0.130; p-value = 0.897), but showed a very strong effect on revegetation (path coefficient = 0.972; t-statistics = 68.780), indicating its role as a fundamental factor in creating suitable site conditions for vegetation growth. Revegetation showed a positive but non-significant effect on reclamation success (path coefficient = 0.120; t-statistics = 0.261; p-value = 0.794), suggesting that ecological function recovery through vegetation requires longer periods and further ecosystem development processes.

Keywords: *forest reclamation, land arrangement, erosion and sedimentation control and water pollution control, revegetation, PLS-SEM.*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan kausal (kontribusi) antar variabel eksogen berupa variabel pelaksanaan reklamasi (penataan lahan; pengendalian erosi, sedimentasi, dan pencemaran air; serta revegetasi) terhadap variabel endogen berupa keberhasilan reklamasi hutan dari hasil analisis kerapatan vegetasi dengan NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) menggunakan PLS-SEM (*Partial Least Squares Structural Equation Modeling*). Penelitian dilaksanakan pada areal reklamasi hutan PT Hamparan Mulya seluas 149,47 ha yang berada di Desa Hajak, Kecamatan Teweh Baru, Kabupaten Barito Utara, Provinsi Kalimantan Tengah pada bulan Februari–April 2026. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelaksanaan reklamasi hutan memperoleh skor 91 dari 100 berdasarkan kriteria SE.1/MENLHK/SETJEN/KUM.1/2024, yang termasuk dalam kategori baik dan layak diterima. Analisis PLS-SEM mengungkapkan bahwa pengendalian erosi, sedimentasi, dan pencemaran air berpengaruh positif dan signifikan terhadap keberhasilan

reklamasi hutan (koefisien jalur = 0,307; t-statistics = 3,581; p-value = 0,000). Penataan lahan tidak memberikan pengaruh langsung yang signifikan terhadap keberhasilan reklamasi (koefisien jalur = −0,056; t-statistics = 0,130; p-value = 0,897), tetapi memiliki pengaruh sangat kuat terhadap revegetasi (koefisien jalur = 0,972; t-statistics = 68,780), sehingga berfungsi sebagai fondasi utama dalam mendukung pertumbuhan vegetasi. Revegetasi menunjukkan pengaruh positif namun tidak signifikan terhadap keberhasilan reklamasi (koefisien jalur = 0,120; t-statistics = 0,261; p-value = 0,794), yang mengindikasikan bahwa pemulihan fungsi ekologis oleh vegetasi memerlukan waktu dan proses perkembangan ekosistem yang lebih lanjut.

Kata Kunci: *Reklamasi hutan, penataan lahan, pengendalian erosi sedimentasi dan pencemaran air, revegetasi, PLS-SEM*.

PENDAHULUAN

Menurut Setiawati (2012), pertambangan termasuk kegiatan yang mampu meningkatkan perekonomian dengan output berupa produksi tambang dan diikuti dengan kerusakan lahan serta bentang alamnya yang sulit untuk dipulihkan seperti semula (*irreversible*). Aktivitas penambangan ini mengakibatkan hilangnya lapisan tanah, hilangnya vegetasi hutan, pencemaran air, dan penurunan keanekaragaman hayati. Areal pasca tambang tersebut dapat dipulihkan dengan melakukan reklamasi hutan. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 26 Tahun 2020 tentang Rehabilitasi dan Reklamasi Hutan, pada Pasal 1 angka 2 menjelaskan bahwa "Reklamasi hutan adalah sebagai usaha untuk memperbaiki atau memulihkan kembali Kawasan Hutan yang rusak sehingga berfungsi secara optimal sesuai dengan peruntukannya". Pada dasarnya reklamasi dan revegetasi adalah kegiatan untuk mengusahakan pemulihan lahan setelah dilakukan penambangan (Pujawati, 2009). Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan telah Surat Edaran Nomor : SE.1/MENLHK/SETJEN/KUM.1/1/2024 tentang Pedoman Reklamasi Hutan Akibat Penggunaan Kawasan Hutan. Surat Edaran tersebut bertujuan untuk memastikan kegiatan reklamasi hutan dilaksanakan sesuai dengan pola umum, standar, dan kriteria dalam rangka memulihkan hutan sehingga dapat berfungsi kembali secara optimal sesuai dengan peruntukannya.

Pemegang Persetujuan Penggunaan Kawasan Hutan (PPKH) wajib melakukan reklamasi hutan pada areal bekas penggunaan kawasan hutan. PT Hamparan Mulya merupakan PPKH yang telah melaksanakan seluruh komponen reklamasi hutan pasca tambang batu bara secara komprehensif, mencakup penataan lahan, pengendalian erosi dan sedimentasi, pengelolaan pencemaran air, serta revegetasi pada areal seluas 149,47 ha di Kabupaten Barito Utara sesuai dengan standar dan kriteria yang ditetapkan dalam SE.1/MENLHK/SETJEN/KUM.1/1/2024, sehingga menjadi kasus yang tepat untuk mengevaluasi sejauh mana pelaksanaan komponen-komponen tersebut secara empiris berkontribusi terhadap keberhasilan reklamasi hutan. Selain itu, PT Hamparan Mulya telah telah mengajukan permohonan penilaian keberhasilan reklamasi hutan. Oleh karean itu, penelitian ini bertujuan untuk menguji hubungan kausal (kontribusi) antar variabel pelaksanaan reklamasi (penataan lahan; pengendalian erosi, sedimentasi, dan pencemaran air; serta revegetasi) terhadap keberhasilan reklamasi hutan menggunakan PLS-SEM (*Partial Least Squares Structural Equation Modeling*).

BAHAN DAN METODE

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada areal pasca tambang pada PT Hamparan Mulya seluas 149,47 Ha. PT Hamparan Mulya tersebut berada di Desa Hajak, Kecamatan Teweh Baru, Kabupaten Barito Utara, Provinsi Kalimantan Tengah. Waktu pelaksanaan untuk pengambilan data primer berupa parameter cover crop dan semua parameter pada variabel revegetasi dilakukan pada bulan Februari - April 2026 sedangkan untuk data sekunder diperoleh dari data realisasi pelaksanaan reklamasi hutan dari tahun 2014 sampai dengan tahun 2019.

Bahan dan Alat

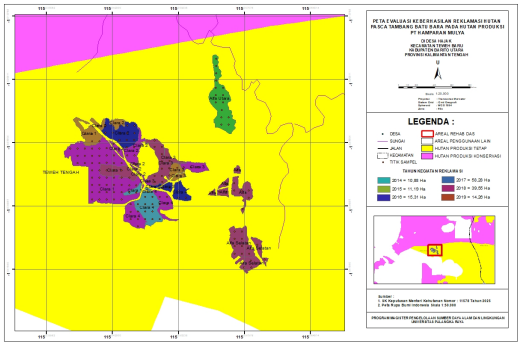
Alat dan bahan yang digunakan berupa alat tulis kantor (seperti tally sheet untuk pencatatan data), smartphone dengan perangkat lunak pemetaan (Avenza Maps dan ArcGIS) dan perangkat lunak untuk geotagging (Timestamp Camera), tali tambang, serta pita meter.

Desain Penelitian

Desain penelitian yang digunakan adalah evaluatif dengan pendekatan campuran (*mixed methods*) yang didominasi oleh metode kuantitatif dan diperkaya dengan analisis deskriptif kualitatif. Penelitian evaluatif ini didasarkan pada SE.1/MENLHK/SETJEN/KUM.1/2024. Analisis PLS-SEM (*Partial Least Squares Structural Equation Modeling*) digunakan untuk memperkuat analisis serta menguji hubungan antar tiga variabel pelaksanaan Reklamasi Hutan (variabel eksogen) secara bersama-sama (simultan) memengaruhi keberhasilan Reklamasi Hutan (variabel endogen) yang digambarkan dengan hasil analiasis NDVI.

Penarikan Sampel

Metode penarikan sampel untuk variabel penataan lahan dan revegetasi adalah *Systematic Sampling with Random Start*. Intensitas Sampling: 10,75% dari total luas areal (≥10%) dengan jumlah titik sampel: 161 Petak ukur. Petak ukur dibuat dengan ukuran 25×40 m (1.000 m²). Berikut adalah petanya:



Gambar 1. Peta Evaluasi Reklamasi Hutan

Metode penarikan sampel untuk pengendalian erosi dilakukan di PU dan bangunan konservasi tanah dan air sedangkan untuk sampel sedimentasi dan kualitas air dilakukan di dalam areal reklamasi : Sump pit, Settling Pond, Void, dan Sumur Pantau; dan luar areal reklamasi : sungai di dekat areal reklamasi dan mendapat limpasan airnya.

Analisis Data

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Analisis data dilakukan menggunakan metode skoring dengan rentang nilai 1-5 berdasarkan kriteria penilaian dalam SE.1/MENLHK/SETJEN/KUM.1/1/2024. Penilaian keberhasilan reklamasi hutan meliputi tiga variabel, yaitu penataan lahan (20%), pengendalian erosi, sedimentasi, dan pencemaran air (30%), serta revegetasi (50%). Skor setiap parameter dihitung berdasarkan realisasi kegiatan dan kondisi lapangan, kemudian diakumulasikan menjadi nilai total keberhasilan reklamasi. Kriteria keberhasilan dikategorikan baik apabila memperoleh nilai >80, sedang pada nilai 60–80, dan kurang apabila nilai <60. Selain itu, kerapatan vegetasi dianalisis menggunakan NDVI dari citra satelit untuk mengidentifikasi perubahan tutupan vegetasi tahun 2014 dan 2025. Analisis PLS-SEM dilakukan menggunakan aplikasi SmartPLS untuk menguji hubungan antar konstruk berdasarkan data empiris. Tahap pertama adalah evaluasi model pengukuran (*outer model*) melalui nilai outer loading, *Average Variance Extracted* (AVE), dan *Composite Reliability* (CR) untuk menilai validitas dan reliabilitas konstruk, dengan nilai outer loading umumnya ≥ 0,70 (Hair et al., 2019). Selanjutnya, validitas diskriminan diuji menggunakan *Heterotrait-Monotrait Ratio* (HTMT), dengan nilai di bawah 0,85–0,90 menunjukkan bahwa konstruk memiliki perbedaan yang memadai (Henseler et al., 2015). Tahap berikutnya adalah mengevaluasi koefisien determinasi (R^2) untuk mengetahui kemampuan variabel eksogen dalam menjelaskan variasi variabel endogen. Setelah model pengukuran memenuhi kriteria, analisis dilanjutkan dengan evaluasi model struktural melalui koefisien jalur (*path coefficient*) dan pengujian signifikansi untuk mengetahui arah, kekuatan, serta signifikansi pengaruh antarvariabel penelitian (Hair et al., 2014).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pelaksanaan reklamasi hutan oleh PT Hamparan Mulya dilakukan pada areal seluas 149,47 Ha yang terdiri dari 2 (dua) blok yaitu Blok Alfa dan Blok Clara. Waktu pelaksanaan dilakukan sejak tahun 2014-2019 dengan berbagai tahap kegiatan. Secara umum, kondisi aktual areal reklamasi menunjukkan bahwa lahan bekas tambang telah mengalami perubahan dari area terganggu menjadi kawasan yang mulai pulih fungsi ekologisnya. Kegiatan reklamasi yang telah dilaksanakan meliputi penataan lahan melalui penimbunan kembali bekas bukaan tambang, penataan areal bekas tambang, menstabilkan lereng, dan penempatan topsoil sebagai media tumbuh; pengendalian erosi, sedimentasi, dan pencemaran air melalui pembangunan bangunan konservasi tanah dan air, penanaman *cover crop*, pengendalian erosi dan sedimentasi, serta pengelolaan kualitas air limpasan; serta revegetasi melalui penanaman jenis cepat tumbuh dan jenis lokal pada setiap blok reklamasi.

Penataan Lahan

Penataan lahan merupakan tahap awal dalam reklamasi hutan pasca tambang. Hasil survei menunjukkan bahwa areal bekas penambangan seluas 149,47 ha telah sepenuhnya ditata dengan mengikuti prinsip

kestabilan geomorfik. Kegiatan penataan lahan di PT Hamparan Mulya mencakup penimbunan kembali lubang bekas tambang, penataan kemiringan lereng, dan penimbunan/penyebaran *topsoil*.

Tabel 1. Realisasi Penataan Lahan

Komponen Penataan Lahan	Target	Realisasi	Capaian (%)

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Komponen Penataan Lahan	Target	Realisasi	Capaian (%)
Penimbunan Kembali Lubang Tambang	11.494.653 m³	11.375.833 m³	98,97
Penataan Luas Areal	149,47	149,47	100
Stabilitas Lereng (Kemiringan 35°)	0	0	0
Penaburan/Penempatan Topsoil	710.905 m³	711.410 m³	100

Pada periode 2014–2019, rencana penimbunan kembali tercatat sebesar 11.494.653 m³ dan realisasinya sebesar 11.375.833 m³ atau 98,97%. Persentase tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar volume penimbunan yang direncanakan telah direalisasikan. Luas lahan yang direncanakan untuk ditata mencapai 149,47 ha dan seluruhnya dilaporkan terealisasi. Pada saat pengamatan, tidak ditemukan kejadian longsor di areal reklamasi. Sementara itu, volume topsoil yang direncanakan sebesar 710.905 m³ dan realisasi tercatat 711.410 m³ atau sekitar 100,07%. Berdasarkan volume realisasi dan luas areal, ketebalan topsoil rata-rata dihitung sekitar 47,60 cm. Bowen et al. (2005), menunjukkan bahwa kedalaman penempatan topsoil memengaruhi sifat tanah dan struktur vegetasi pada lahan pasca tambang. Kedalaman topsoil antara 40–60 cm memberikan kondisi yang lebih mendukung reklamasi jangka panjang, karena meningkatkan biomassa tanaman, kandungan karbon organik, nitrogen tanah, serta kemampuan infiltrasi air.

Pengendalian Erosi, sedimentasi, dan Pencemaran Air

Variabel pengendalian erosi, sedimentasi, dan pencemaran air dievaluasi melalui empat parameter saling terkait yaitu: volume fisik bangunan konservasi tanah dan air (BKTA), keberadaan cover crop, tingkat kejadian erosi dan sedimentasi, serta indikator pencemaran air.

Tabel 2. Pengendalian Erosi dan Sedimentasi

Parameter	Target	Realisasi	Capaian (%)
Bangunan konservasi tanah dan air	134 unit	19 unit	14
Tutupan *cover crop*	100%	79%	79
Beban sedimen	≤ 5 ton/ha/tahun	0,0002767 ton/ha/tahun	100

Berdasarkan tabel di atas, menunjukkan bahwa rencana pembuatan BKTA pada areal reklamasi PT Hamparan Mulya sebanyak 134 unit. Namun yang terealisasi hanya 19 unit dengan persentase realisasi hanya14,18%. Alasan rendahnya realisasi BKTA adalah perubahan kebutuhan teknis sejak perencanaan awal saat lahan masih terbuka

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

serta penyesuaian desain berdasarkan kondisi topografi aktual. Selain BKTA, terdapat juga tutupan *cover crop* pada areal reklamasi.

Menurut Pratiwi et al. (2021), *Cover crop* memiliki peran sebagai menutup permukaan tanah, memperbaiki sifat-sifat tanah, dan melindungi dari proses erosi. Pada tahap awal reklamasi, *cover crop* sangat penting karena tanah yang baru disebar masih rentan terhadap erosi, sementara tanaman utama hasil revegetasi belum cukup berkembang untuk menutup seluruh permukaan lahan. Jenis *legume cover crop (LCC)* yang digunakan meliputi *Centrosema pubescens (CP), Calopogonium mucunoides (CM), dan Pueraria javanica (PJ),* dengan dosis penanaman sebesar 75 kg/ha. Ketiga spesies tersebut merupakan legum merambat dengan pertumbuhan cepat yang efektif membentuk penutup tanah yang rapat. Rata-rata realisasi *cover crop* sebesar 79,29% sehingga berdasarkan parameter tergolong dalam kategori sedang. Menurut Pratiwi et al. (2021), semakain bertambahnya umur vegetasi maka tajuknya semakin rapat sehingga intensitas cahaya di permukaan turun dan dominasi tanaman penutup menurun. Oleh karena itu, penurunan tutupan cover crop tidak selalu menandakan kegagalan reklamasi, melainkan bisa merefleksikan pergeseran peran penutup tanah dari herbaceae ke kanopi pohon sejalan dengan proses suksesi vegetasi.

Tingkat sedimentasi 0,00027673 ton/ha/tahun tergolong sangat rendah. Pengendalian sedimentasi tidak semata-mata tergantung pada jumlah BKTA, melainkan juga dipengaruhi oleh beberapa faktor. Pertama, penataan lahan yang baik mengurangi aliran permukaan. Kedua, kestabilan lereng menekan potensi longsor dan erosi. Ketiga, vegetasi meningkatkan infiltrasi dan mengurangi pelepasan partikel tanah. Menurut Zhang et al. (2015), rekonstruksi vegetasi pada lahan reklamasi tambang batu bara terbuka efektif mengurangi limpasan dan erosi. Namun, rendahnya sedimentasi saat pengukuran tidak boleh menjadi alasan mengabaikan kebutuhan BKTA, karena sedimentasi bersifat dinamis dan dapat meningkat jika terjadi hujan ekstrem, kerusakan tutupan lahan, atau menurunnya fungsi drainase.

Tabel 3. Parameter Kualitas Air

Parameter	Satuan	Dalam Areal	Sumur Pantau	Luar Areal	Baku Mutu*
pH	-	7,07 - 8,11	7,06 - 7,11	7,11 - 8,15	6,5–8,5
TDS	mg/L	-	12 - 15	152 - 215	< 300
Fe	mg/L	< 0,060	0.060 - 0,080	<0.060	0,2
Mn	mg/L	< 0.020	< 0.020	<0.020	0,1

*Parameter terakreditasi KAN (ISO/IEC 17025)

Pencemaran air merupakan parameter penting dalam reklamasi tambang batu bara karena air limpasan dari areal tambang dapat membawa sedimen, logam terlarut, dan senyawa kimia yang berpotensi menurunkan kualitas lingkungan. Permasalahan yang sering terjadi pada tambang batu bara adalah potensi terbentuknya air asam tambang (*Acid Mine Drainage*/AMD). Air asam tambang diakibatkan adanya mineral sulfida yang teroksidasi oleh oksigen dan air. Proses ini menghasilkan asam sulfat yang bisa melarutkan mineral lain dan melepaskan logam berat seperti besi (Fe), aluminium (Al), dan mangan (Mn). Akibatnya, air menjadi sangat asam (pH rendah) dan mengandung konsentrasi logam beracun yang tinggi (Haris et al., 2024).

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Berdasarkan FAO (2009), tanah pada areal reklamasi ini termasuk dalam kelompok *Orthic Acrisols* (podsolik merah kuning). Tanah ini umumnya berkembang di wilayah perbukitan dengan bahan induk batuan. Selama pelapukan, mineral primer pada bahan induk mengalami alterasi dan melepaskan unsur seperti Fe dan Mn. Besi (Fe) selanjutnya teroksidasi membentuk mineral oksida/hidroksida (misalnya goethit dan hematit) yang memberi warna merah–kuning pada tanah dan membantu menahan Fe dalam profil. Sebaliknya, mangan (Mn) lebih dipengaruhi oleh pH dan kondisi oksidasi-reduksi, sehingga mobilitasnya relatif lebih tinggi. Meskipun telah mengalami pelapukan tropis yang kuat, bahan induk tetap memengaruhi geokimia tanah dan distribusi unsur, termasuk Fe dan Mn (Melo et al., 2022). Pengukuran kadar Fe dan Mn pada Orthic Acrisols penting untuk menetapkan kondisi geokimia alami tanah sebagai nilai dasar. Hal ini diperlukan agar dapat membedakan peningkatan konsentrasi unsur yang berasal dari aktivitas pertambangan seperti pembukaan lahan, penggalian, penimbunan overburden, perubahan drainase, dan erosi yang berpotensi membuka material induk kaya mineral Fe dan Mn serta meningkatkan mobilisasi kedua unsur tersebut ke sedimen dan badan air.

Hasil pengamatan air pada tabel 3 menunjukkan bahwa kualitas air di seluruh lokasiberada dalam rentang baku mutu yang dicantumkan. Titik pengamatan di dalam areal reklamasi meliputi Penataan Clara, Penataan HR01, Penataan SP HR01 Outfall, Sum Pit Alpha Utara, dan Sum Pit Alpha Selatan; nilai pH pada lokasi-lokasi tersebut berkisar 7,07–8,11, sedangkan konsentrasi Fe dan Mn masing-masing berada di bawah batas deteksi, yaitu <0,060 mg/L dan <0,020 mg/L. Pada sumur pantau HR01 serta Sumur Pantau 1 (*upstream*) dan Sumur Pantau 2 (*downstream*), pH tercatat 7,06–7,11 dan TDS 12–15 mg/L; Fe sebesar 0,060–0,080 mg/L dan Mn <0,020 mg/L. Sementara itu, titik pengamatan di luar areal reklamasi mencakup Sungai Teweh Hulu, Teweh Mid, Teweh Hilir, Sungai Sikui Hulu, Sikui Mid, Sikui Hilir, Kenangkang, Krehen, dan Wahai. Pada lokasi-lokasi tersebut, pH berkisar 7,11–8,15, TDS 152–215 mg/L, Fe <0,060 mg/L, dan Mn <0,020 mg/L. Seluruh nilai berada di bawah baku mutu yang tercantum pada tabel, yaitu pH 6,5–8,5, TDS <300 mg/L, Fe 0,2 mg/L, dan Mn 0,1 mg/L. Dengan demikian, parameter yang diamati belum menunjukkan indikasi pencemaran signifikan pada titik-titik tersebut; namun, TDS yang lebih tinggi di sungai luar areal dibandingkan sumur pantau tetap perlu dicermati melalui pemantauan berkala.

Revegetasi

Revegetasi merupakan aspek krusial dalam menilai keberhasilan reklamasi hutan pasca tambang karena terkait langsung dengan upaya mengembalikan fungsi lahan melalui penanaman vegetasi. Terdapat lima parameter pada variabel revegetasi, yaitu: luas area yang ditanam, persentase tanaman yang tumbuh, kepadatan tanaman per hektar, komposisi jenis, dan kondisi kesehatan tanaman. Kelima parameter ini dipakai untuk menilai keberhasilan kegiatan revegetasi pada areal reklamasi tahun tanam 2014–2019 di Blok Alfa dan Clara sesuai rencana reklamasi. Hasil dari kelima parameter tersebut dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4. Revegetasi

Parameter	Rencana	Realisasi
Luas Penanaman	149,47 Ha	149,47 Ha
Persentase Tumbuh	100%	154,48%

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Tanaman		
Kepadatan Tanaman per Ha	625 tanaman	972 tanaman
Komposisi Jenis Tanaman	40% tanaman lokal	257,7% tanaman lokal
Kesehatan Tanaman	100%	98,15%

Seluruh rencana tanam 2014–2019 seluas 149,47 ha terealisasi penuh (100%), dengan luasan terbesar pada 2017 di Clara (58,28 ha) dan terkecil pada 2014 (10,88 ha). Rencana tanam berpola 4x4 m adalah 625 tanaman/ha. Pengambilan data dilakukan pada 161 plot ukur (intensitas sampling 10,75%) dengan minimal 63 tanaman per plot, sehingga rencana tanaman tumbuh sebanyak 10.063 pohon, sedangkan realisasinya 15.645 pohon. Rata-rata persentase tumbuh mencapai 154,48% (tertinggi 2017: 166,32%; terendah 2018: 139,28%) karena jarak tanam realisasi lebih rapat dan penyulaman dilakukan ketika tanaman inti masih banyak yang hidup sehingga bibit ditanam di sela jalur. Kepadatan tanaman berkisar 870–1.040 tanaman/ha dengan rata-rata 972 tanaman/ha, melebihi rencana minimal 625 tanaman/ha sebanyak 347 tanaman/ha (55,52%), yang mendukung tutupan lahan, pengurangan erosi, dan suksesi vegetasi.

Penanaman memadukan tanaman *fast-growing* (pionir) untuk mempercepat tutupan awal dan tanaman lokal untuk pemulihan ekosistem yang sesuai karakter setempat. Dari 15.645 tanaman, 5.273 (33,70%) berupa *fast-growing* dengan sengon dominan (4.259 tanaman), dan 10.372 (66,30%) berupa tanaman lokal dari 29 jenis, terbanyak halaban (3.559), blangeran (2.223), meranti (1.346), dan mahoni (1.154). Realisasi tanaman lokal terhadap rencana rata-rata 257,69% (tertinggi 2016: 290%; terendah 2019: 189,07%). Menurut Wijayanti, et al., (2020), kesehatan tanaman dinilai dengan membandingkan jumlah pohon sehat terhadap total pohon hidup dalam plot serta pengamatan visual vigor (warna daun, bentuk batang, bentuk tajuk, gejala penyakit). Dari 15.645 tanaman, 15.356 sehat dan 289 tidak sehat, dengan rata-rata tanaman sehat 98,15% (kategori sangat baik, di atas 90%; tertinggi 2018: 98,51%; terendah 2015: 97,41%), yang menunjukkan tanaman mampu beradaptasi dengan kondisi lahan pascatambang berkat pemilihan jenis, pemeliharaan, dan penyesuaian tapak.

Tabel 5. Skoring Keberhasilan Reklamasi Hutan

No	Kriteria / Indikator	Parameter	Bobot	Nilai	Keterangan
1	Penataan Lahan	Pengisian kembali lubang bekas tambang	20	5	Terlaksana 98.87%
		Penataan Permukaan Tanah		5	Terlaksana 100%
		Kestabilan Lereng		5	Tidak ditemukan

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

					longsor
		Penaburan T*opsoil*		5	Terlaksana 100%
		Skor Pembobotan I		**20**	
2	Pengendalian Erosi, Sedimentasi, dan Pencemaran Air	Bangunan KTA	30	1	Terlaksana 14% (19 BKTA)
		Cover Crop		3	Terdapat 79%
		Erosi dan Sedimentasi (Muatan Sedimen)		5	Muatan sedimen per Ha = 0,62693 Ton/Ha/Tahun
		Pencemaran Air (BMAL)		5	Dibawah BMAL dalam amdal/pertek dan tertib laporan
		Skor Pembobotan II		**21**	
3	Revegetasi	Luas Areal Penanaman	20	5	Terlaksana 100%
		Persentase tumbuh		5	Persentase tumbuh 154.48%
		Jumlah Tanaman Per HA		5	972 Tanaman/HA
		Skor Pembobotan III		**20**	
		Komposisi Jenis Tanaman	30	5	Terdapat tanaman lokal 257.69%
		Kesehatan Tanaman		5	Tanaman sehat 98.15%
		Skor Pembobotan IV		**30**	
	Total Skor I+II+III+IV		**100**	**91**	Baik (diterima)

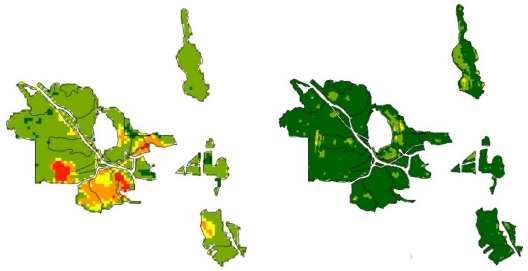
Total skor 91 menempatkan reklamasi pada kategori baik dan dapat diterima. Penataan lahan memperoleh skor 20; pengendalian erosi, sedimentasi, dan pencemaran air memperoleh skor 21 karena bangunan KTA baru 14% dan *cover crop* 79%; revegetasi memperoleh skor penuh pada luas tanam, persentase tumbuh, dan kerapatan memperoleh skor 20 serta komposisi jenis dan kesehatan tanaman memperoleh skor 30. Penilaian berdasarkan SE.1/MENLHK/SETJEN/KUM.1/2024 dapat dilakukan minimal 3 tahun setelah penanaman, dan PT Hamparan Mulya mengajukannya pada waktu tercepat tersebut. Standar ini menekankan implementasi teknis dan belum mencakup indikator ekologis jangka panjang seperti bahan organik tanah, mikroorganisme, keanekaragaman fauna, dan ketahanan ekosistem. Kondisi ekologis

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

kawasan masih tahap awal (*early intervention*) dan memerlukan puluhan tahun untuk mencapai kematangan ekosistem (*ecosystem maturity*), sehingga skor tinggi dimaknai sebagai keberhasilan tahap awal, bukan alasan menghentikan pemantauan dan pemeliharaan.

Kerapatan Vegetasi

Indeks vegetasi seperti NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) merupakan metode yang paling umum digunakan untuk mengevaluasi status vegetasi karena dapat menggambarkan tingkat kehijauan dan vigor tanaman secara kuantitatif (Huang et al., 2021). Analisis perubahan tutupan lahan dengan menggunakan indeks NDVI dilakukan untuk memantau perkembangan kerapatan vegetasi di areal reklamasi hutan PT Hamparan Mulya seluas 149,47 ha. Analisis NDVI membedakan kondisi tutupan lahan berdasarkan tingkat kehijauan dari non vegetasi, sangat rendah, rendah, sedang, hingga tinggi dengan perbandingan antara kondisi awal pada 2014 dan kondisi terkini pada 2025. Hasil analisis ini penting untuk menilai sejauh mana proses revegetasi dan pemulihan tutupan tanah berlangsung selama periode tersebut. Hasil dari analisis NDVI dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. Hasil Pengolahan NDVI tahun 2014 dan 2025

Tabel 6. Hasil Pengolahan NDVI tahun 2014 dan 2025

No.	Warna	Indeks NDVI	Klasifikasi	Luas (Ha)	
				2014	2025
1		NDVI≤0,11	Non Vegetasi	4,53	0,03
2		0,11<NDVI≤0,25	Tingkat Kehijauan Sangat Rendah	15,29	0,31
3		0,25<NDVI≤0,33	Tingkat Kehijauan Rendah	13,82	0,98
4		0,33<NDVI≤0,45	Tingkat Kehijauan Sedang	111,24	14,45
5		0,45<NDVI≤1	Tingkat Kehijauan Tinggi	4,59	133,7
Total				**149,47**	**149,47**

Secara keseluruhan, peta dan data NDVI mengindikasikan perbaikan nyata tutupan lahan akibat kegiatan reklamasi dan revegetasi, yang berkontribusi pada peningkatan kerapatan vegetasi dan pemulihan kondisi ekologis areal pascatambang.

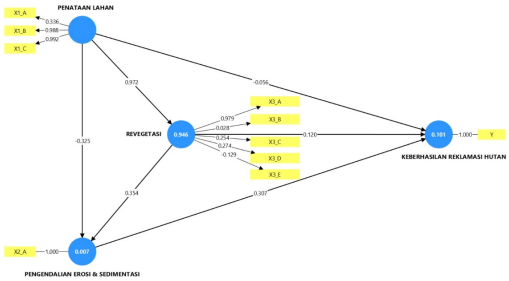
PLS-SEM

PLS-SEM digunakan untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat dan kontribusi relatif komponen reklamasi terhadap keberhasilan reklamasi hutan di lahan bekas tambang batu bara. Variabel eksogen adalah penataan lahan, pengendalian erosi, sedimentasi dan pencemaran air, serta revegetasi; variabel endogen adalah keberhasilan reklamasi hutan. Evaluasi dilakukan melalui model pengukuran (*outer model*) dan model struktural (*inner model*).

Evaluasi Model Pengukuran (*Outer Model*)

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Outer Loading



Gambar 3. Output Loading Factor Permodelan

Hasil analisis *Outer Loading* dan *Cross Loading* adalah sebagai berikut :

Tabel 7. *Outer Loading* dan *Cross Loading*

Indikator	Penataan Lahan	Pengendalian Erosi & Sedimentasi	Revegetasi	Keberhasilan Reklamasi Hutan
X1_A	**0,336**	0,140	0,248	0,142
X1_B	**0,988**	0,017	0,979	0,070
X1_C	**0,992**	-0,015	0,967	0,029
X2_A	0,019	**1,000**	0,038	0,310
X3_A	0,988	0,017	**0,979**	0,070
X3_B	-0,025	-0,075	**0,028**	-0,027
X3_C	0,125	0,002	**0,254**	0,054
X3_D	0,151	0,134	**0,274**	0,113
X3_E	-0,091	0,012	**-0,129**	0,194
Y	0,066	0,310	0,077	**1,000**

*cetak tebal = outer loading pada konstruk sendiri

Keterangan:
X1_A : Pengisian kembali lubang bekas tambang
X1_B : Penataan Permukaan Tanah
X1_C : Penaburan Topsoil
X2_A : Cover crop
X3_A : Luas Areal Penanaman
X3_B : Persentase tumbuh
X3_C : Jumlah Tanaman Per HA
X3_D : Komposisi Jenis Tanaman
X3_E : Kesehatan Tanaman
Y : Keberhasilan Reklamasi Hutan (NDVI)

Indikator memenuhi validitas konvergen jika *outer loading* ≥ 0,70. Indikator X1_B dan X1_C sangat baik menjelaskan penataan lahan, sedangkan X1_A lemah (0,336). X2_A sangat kuat mewakili pengendalian erosi dan sedimentasi. Pada revegetasi hanya X3_A yang tinggi (0,979), sedangkan X3_B hingga X3_E rendah. Hal ini kemungkinan karena keberhasilan revegetasi pascatambang bergantung pula pada umur tanaman dan konsistensi pemeliharaan.

Validitas dan Reliabilitas Konstruk

Validitas diskriminan terpenuhi apabila loading indikator pada konstruknya lebih tinggi daripada pada konstruk lain. Berdasarkan Tabel 7. *Outer Loading* dan *Cross Loading*, sebagian besar indikator memiliki loading tertinggi pada konstruknya,

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

termasuk X1_A, X1_B, X1_C, X2_A, dan Y. Namun indikator revegetasi X3_B, X3_C, X3_D, dan X3_E perlu dievaluasi karena loading rendah, bahkan X3_E negatif.

Tabel 8. Validitas, Reliabilitas Konstruk, dan R-square (R^2)

Variabel	Cronbach's alpha	CR (rho_a)	CR (rho_c)	AVE
Penataan Lahan	0,729	0,970	0,853	0,691
Revegetasi	0,253	0,801	0,337	0,223

Hasil uji reliabilitas menunjukkan bahwa konstruk penataan lahan memiliki nilai Cronbach's Alpha 0,729, *Composite Reliability* 0,853, dan *Average Variance Extracted* (AVE) 0,691. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa konstruk penataan lahan telah memenuhi kriteria reliabilitas dan validitas konvergen. Sebaliknya, konstruk revegetasi memiliki nilai Cronbach's Alpha 0,253, *Composite Reliability* 0,337, dan AVE 0,223. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa konstruk revegetasi belum memenuhi kriteria reliabilitas. Hal ini mencerminkan bahwa indikator-indikator pembentuk revegetasi masih memiliki variasi kontribusi yang tinggi. Dari perspektif ekologis, kondisi ini dapat dipahami karena revegetasi merupakan proses biologis yang memerlukan waktu lama. Keberhasilan revegetasi tidak hanya ditentukan oleh aktivitas penanaman, tetapi juga oleh kemampuan tanaman untuk beradaptasi dengan kondisi lahan pascatambang.

Evaluasi Model Struktural (*Inner Model*)

R-square

Tabel 9. R-square (R^2)

Variabel	R-square (R^2)
Keberhasilan Reklamasi Hutan	0,101
Pengendalian Erosi & Sedimentasi	0,007
Revegetasi	0,946

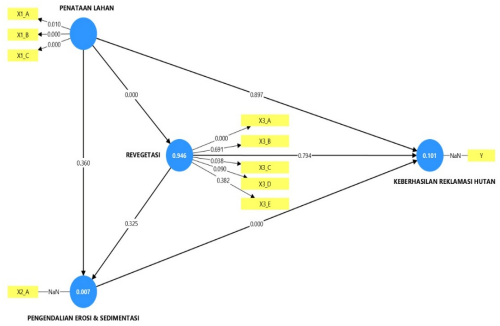
Nilai R^2 mencerminkan proporsi variasi pada variabel endogen yang dapat dijelaskan oleh variabel eksogen dalam suatu model. Semakin tinggi nilai R^2, semakin besar kontribusi variabel eksogen dalam menjelaskan perubahan pada variabel endogen. Berdasarkan hasil analisis, nilai R^2 untuk keberhasilan reklamasi hutan adalah 0,101. Artinya, variabel penataan lahan, pengendalian erosi, sedimentasi dan pencemaran air, serta revegetasi secara bersama-sama hanya menjelaskan 10,1% variasi keberhasilan reklamasi hutan. Besaran ini mengindikasikan bahwa daya jelaskan model terhadap keberhasilan reklamasi hutan masih rendah. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan reklamasi hutan pasca tambang merupakan proses ekologis yang kompleks dan tidak semata-mata ditentukan oleh aspek teknis reklamasi yang diukur dalam penelitian ini. Meskipun variabel yang digunakan telah mencakup komponen utama kegiatan reklamasi, pemulihan ekosistem hutan tetap dipengaruhi

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

oleh faktor lain, seperti karakteristik tanah, kondisi iklim, kesesuaian jenis tanaman, umur tanaman, intensitas pemeliharaan, serta dinamika suksesi vegetasi alami.

Variabel revegetasimenujukkan nilai R^2 sebesar 0,946. Nilai ini mengindikasikan bahwa model memiliki daya jelaskan yang sangat kuat terhadap variabel revegetasi. Hal tersebut mencerminkan bahwa indikator-indikator yang digunakan dalam penilaian revegetasi saling berkaitan erat dalam menggambarkan keberhasilan proses pemulihan vegetasi. Temuan ini sejalan dengan konsep reklamasi hutan, di mana revegetasi merupakan tahapan krusial dalam pemulihan lahan pasca tambang karena berperan dalam membentuk kembali tutupan vegetasi, meningkatkan stabilitas tanah, dan mendukung pemulihan fungsi ekologis kawasan.

Pengujian Hubungan Antar Konstruk



Gambar 4. Analisis Bootstrapping

Model struktural diuji menggunakan metode bootstrapping untuk menilai signifikansi hubungan antar variabel. Kriteria penerimaan hubungan antar konstruk adalah nilai t-statistics >1,96 dan p-value <0,05. Hasil pengujian ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 10. Hasil Uji Hubungan Struktural Antar Konstruk

Hubungan Antarvariabel	Original Sample (O)	Sample Mean (M)	STDEV	t-statistics	p-values	f²	Keterangan	Hipotesis
Penataan Lahan → Keberhasilan Reklamasi Hutan	-0,056	-0,066	0,434	0,13	0,897	0	Tidak berpengaruh signifikan	Ditolak
Penataan Lahan → Pengendalian Erosi & Sedimentasi	-0,325	-0,259	0,356	0,915	0,36	0,006	Tidak berpengaruh signifikan	Ditolak
Penataan Lahan → Revegetasi	0,972	0,965	0,014	68,78	0	17,362	Berpengaruh positif dan signifikan	Diterima
Pengendalian Erosi & Sedimentasi → Keberhasilan Reklamasi Hutan	0,307	0,302	0,086	3,581	0	0,104	Berpengaruh positif dan signifikan	Diterima
Revegetasi → Keberhasilan Reklamasi Hutan	0,12	0,127	0,458	0,261	0,794	0,001	Tidak berpengaruh signifikan	Ditolak
Revegetasi → Pengendalian Erosi & Sedimentasi	0,354	0,287	0,359	0,985	0,325	0,007	Tidak berpengaruh signifikan	Ditolak

Pengaruh Penataan Lahan terhadap Keberhasilan Reklamasi Hutan

Hasil analisis menunjukkan bahwa hubungan penataan lahan terhadap keberhasilan reklamasi hutan memiliki nilai f^2 sebesar 0,000. Nilai ini mengindikasikan bahwa penataan lahan tidak memberikan kontribusi langsung yang berarti terhadap peningkatan keberhasilan reklamasi hutan dalam model penelitian. Temuan ini konsisten dengan hasil pengujian hubungan struktural sebelumnya yang

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

menunjukkan bahwa pengaruh langsung penataan lahan terhadap keberhasilan reklamasi hutan tidak signifikan, dengan koefisien jalur -0,056 dan p-value 0,897.

Hasil ini mengisyaratkan bahwa meskipun penataan lahan merupakan tahapan awal yang penting dalam kegiatan reklamasi, pengaruhnya terhadap keberhasilan reklamasi akhir tidak terjadi secara langsung. Penataan lahan lebih berperan sebagai faktor dasar (*foundation factor*) yang menciptakan kondisi awal bagi berlangsungnya proses ekologis berikutnya. Feng et al. (2019) menjelaskan bahwa kondisi topografi memengaruhi aliran permukaan, infiltrasi air, erosi, dan produktivitas vegetasi. Namun, penataan lahan yang baik belum tentu secara langsung menunjukkan keberhasilan reklamasi karena pemulihan fungsi ekologis hutan membutuhkan proses lanjutan. Dengan demikian, penataan lahan lebih berperan sebagai fondasi fisik yang mendukung proses reklamasi, sedangkan keberhasilan reklamasi ditentukan oleh keterpaduan berbagai komponen pemulihan ekosistem.

Keputusan Hipotesis :
Penataan lahan berpengaruh terhadap keberhasilan reklamasi hutan → Ditolak

Pengaruh Penataan Lahan terhadap Pengendalian Erosi dan Sedimentasi

Nilai *effect size* hubungan penataan lahan terhadap pengendalian erosi dan sedimentasi sebesar 0,006, yang termasuk dalam kategori efek sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi penataan lahan belum memberikan pengaruh besar terhadap kemampuan lahan dalam mengendalikan erosi dan sedimentasi. Secara ekologis, kondisi ini dapat dipahami karena pengendalian erosi pada areal reklamasi tidak hanya bergantung pada bentuk lahan, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor lain seperti keberadaan vegetasi penutup tanah, efektivitas bangunan konservasi tanah dan air, kondisi curah hujan, karakteristik tanah, serta sistem pengelolaan air permukaan. Meskipun secara teoritis penataan lahan dapat mengurangi potensi erosi melalui pengaturan kemiringan dan stabilitas lereng, hasil penelitian menunjukkan bahwa kontribusinya dalam model ini relatif kecil.

Keputusan hipotesis:
Penataan lahan berpengaruh terhadap pengendalian erosi dan sedimentasi → Ditolak

Pengaruh Penataan Lahan terhadap Revegetasi

Hubungan penataan lahan terhadap revegetasi memiliki nilai *effect size* sebesar 17,362, yang menunjukkan efek sangat besar dibandingkan seluruh hubungan lainnya dalam model. Hasil ini menegaskan bahwa penataan lahan merupakan faktor yang sangat menentukan keberhasilan proses revegetasi pada areal reklamasi hutan. Nilai f^2 yang sangat tinggi ini diperkuat oleh hasil pengujian hubungan struktural yang menunjukkan koefisien jalur sebesar 0,972 dengan t-statistics 68,780 dan p-value 0,000. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin baik kondisi penataan lahan, maka semakin besar peluang keberhasilan revegetasi. Dengan demikian, penataan lahan merupakan komponen fundamental yang menentukan keberhasilan tahap biologis reklamasi.

Keputusan hipotesis:
Penataan lahan berpengaruh terhadap revegetasi → Diterima

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Pengaruh Pengendalian Erosi dan Sedimentasi terhadap Keberhasilan Reklamasi Hutan

Nilai *effect size* hubungan pengendalian erosi dan sedimentasi terhadap keberhasilan reklamasi hutan sebesar 0,1038, yang menunjukkan kontribusi kecil hingga mendekati sedang terhadap keberhasilan reklamasi hutan. Meskipun termasuk kategori kecil berdasarkan nilai f^2, variabel ini merupakan salah satu faktor yang memiliki pengaruh langsung dan signifikan terhadap keberhasilan reklamasi. Hal tersebut terlihat dari hasil bootstrapping dengan koefisien jalur 0,307, t-statistics 3,581, dan p-value 0,000. Artinya, peningkatan kualitas pengendalian erosi dan sedimentasi akan meningkatkan keberhasilan reklamasi hutan.

Dalam reklamasi hutan pascatambang, pengendalian erosi memiliki peranan penting karena kehilangan lapisan tanah atas (*top soil*) dapat menghambat pertumbuhan vegetasi. Selain itu, sedimentasi yang tidak terkendali dapat menyebabkan gangguan terhadap sistem hidrologi dan menurunkan kualitas lingkungan sekitar. Dengan demikian, pengendalian erosi dan sedimentasi merupakan faktor ekologis yang secara langsung mendukung keberhasilan pemulihan ekosistem.

Keputusan hipotesis:
Pengendalian erosi dan sedimentasi berpengaruh terhadap keberhasilan reklamasi hutan → Diterima

Pengaruh Revegetasi terhadap Keberhasilan Reklamasi Hutan

Hasil analisis menunjukkan bahwa hubungan revegetasi terhadap keberhasilan reklamasi hutan memiliki nilai f^2 sebesar 0,001, yang menunjukkan kontribusi sangat kecil terhadap perubahan keberhasilan reklamasi hutan dalam model penelitian. Hasil ini konsisten dengan pengujian jalur yang menunjukkan hubungan revegetasi terhadap keberhasilan reklamasi tidak signifikan, dengan koefisien jalur 0,120 dan p-value 0,794.

Kondisi tersebut tidak berarti bahwa revegetasi tidak penting dalam reklamasi hutan, tetapi menunjukkan bahwa indikator revegetasi yang digunakan dalam penelitian belum mampu menjelaskan variasi keberhasilan reklamasi secara optimal. Tanaman yang diamati pada areal reklamasi baru berusia 3 tahun sejak penyulaman tanaman yang mengalami kematian. Hal itu sesuai Surat Edaran No SE.1/MENLHK/SETJEN/KUM.1/1/2024, yang mana penilaian keberhasilan reklamasi hutan dilakukan paling cepat 3 (tiga) tahun setelah penanaman. Namun, penilaian keberhasilan reklamasi hutan pascatambang perlu mempertimbangkan waktu yang cukup agar perkembangan vegetasi dan pemulihan fungsi ekologis dapat diamati secara memadai. Harries et al. (2024) menjelaskan bahwa pemantauan restorasi tambang perlu dilakukan secara berkelanjutan untuk menilai arah perkembangan restorasi menuju kondisi ekosistem yang diharapkan, meskipun indikator keberhasilan tersebut belum tentu terlihat dalam jangka waktu penutupan tambang. Selain itu, pemulihan ekosistem sesuai kondisi awal dapat membutuhkan waktu puluhan hingga ratusan tahun. Dengan demikian, keberhasilan revegetasi membutuhkan waktu yang lebih panjang untuk memberikan dampak terhadap keberhasilan reklamasi secara keseluruhan.

Keputusan hipotesis:
Revegetasi berpengaruh terhadap keberhasilan reklamasi hutan → Ditolak

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Pengaruh Revegetasi terhadap Pengendalian Erosi dan Sedimentasi

Hubungan revegetasi terhadap pengendalian erosi dan sedimentasi memiliki nilai f^2 sebesar 0,007, yang menunjukkan kontribusi sangat kecil. Walaupun secara teoritis vegetasi memiliki fungsi dalam meningkatkan stabilitas tanah melalui sistem perakaran dan perlindungan permukaan tanah, pada lokasi penelitian pengaruh tersebut belum terlihat secara kuat. Hal ini dapat disebabkan karena vegetasi hasil reklamasi masih berada pada tahap perkembangan awal sehingga belum memiliki tutupan tajuk dan sistem perakaran yang cukup untuk memberikan efek konservasi tanah yang signifikan.

Keputusan hipotesis:
Revegetasi berpengaruh terhadap pengendalian erosi dan sedimentasi → Ditolak

KESIMPULAN

Analisis hubungan kausal dengan *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (PLS-SEM) menunjukkan bahwa setiap komponen pelaksanaan Reklamasi Hutan memberikan kontribusi yang berbeda terhadap keberhasilan reklamasi hutan pasca tambang batu bara di PT Hamparan Mulya. Hasil pengujian model struktural menunjukkan bahwa variabel pengendalian erosi, sedimentasi, dan pencemaran air berpengaruh positif dan signifikan terhadap keberhasilan reklamasi (koefisien jalur: 0,307; t-statistic: 3,581; p-value: 0,000), sehingga menjadi faktor pendorong langsung utama. Variabel penataan lahan tidak berpengaruh langsung secara signifikan terhadap keberhasilan reklamasi (koefisien jalur: -0,056; t-statistic: 0,130; p-value: 0,897), namun memiliki pengaruh sangat kuat terhadap revegetasi (koefisien jalur: 0,972; t-statistic: 68,780), yang mengindikasikan perannya sebagai fondasi yang menciptakan kondisi tapak yang mendukung pertumbuhan vegetasi. Variabel revegetasi menunjukkan arah pengaruh positif terhadap keberhasilan reklamasi, namun belum signifikan secara statistik (koefisien jalur: 0,120; t-statistic: 0,261; p-value: 0,794), yang dapat diartikan bahwa dampak vegetasi terhadap keberhasilan reklamasi masih dipengaruhi oleh dinamika ekologis lain dan memerlukan waktu untuk terlihat lebih jelas.

Hasil evaluasi kinerja reklamasi berdasarkan kriteria dari SE.1/MENLHK/SETJEN/KUM.1/2024 memperoleh skor total 91 dari skor maksimal 100 (kategori baik dan dapat diterima). Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar kriteria teknis reklamasi telah terpenuhi. Namun, skor tersebut belum sepenuhnya menggambarkan pemulihan fungsi ekologis hutan secara utuh karena penilaian dilakukan pada tahap awal pemulihan. Oleh karena itu, kawasan reklamasi PT Hamparan Mulya masih memerlukan kegiatan pemantauan dan pemeliharaan secara berkelanjutan untuk memastikan pemulihan fungsi ekologis dapat berlangsung optimal dalam jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada semua yang telah berkontribusi dalam penyelesaiannya artikel ini, khususnya kedua orang tua, istri, dosen, dan teman-teman yang telah membantu dukungan baik dari dalam maupun luar selama pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Bowen, C. K., Schuman, G. E., Olson, R. A., & Ingram, J. (2005). Influence of Topsoil Depth on Plant and Soil Attributes of 24-Year Old Reclaimed Mined Lands. Arid Land Research and Management, 19(3), 267-284. doi.org/10.1080/15324980590951441

FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, & JRC. (2009). Harmonized World Soil Database (version 1.1) [Kumpulan data spasial]. FAO & IIASA. fao.org

Feng, Y., Wang, J., Bai, Z., & Reading, L. (2019). Effects of Surface Coal Mining and Land Reclamation on Soil Properties: A review. Earth-Science Reviews, 191, 12–25. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.015

Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2021). A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) (3rd ed.).

Haris, A., Ifansyah, H., Hayati, A., Mahbub, M., Septiana, M., Mulyawan, R., Noor, I., & Saidy, A. R. (2024). The stability of pH and the concentrations of iron and manganese in acid mine drainage following coal fly ash and empty fruit bunch of oil palm treatments. Journal of Ecological Engineering, 25(4), 38–48. https://doi.org/10.12911/22998993/183650

Harries, K. L., Woinarski, J., Rumpff, L., Gardener, M., & Erskine, P. D. (2024). Characteristics and gaps in the assessment of progress in mine restoration: Insights from five decades of published literature relating to native ecosystem restoration after mining. Restoration Ecology, 32(1), e14016. https://doi.org/10.1111/rec.14016

Henseler, J., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. Journal of the Academy of Marketing Science, 43, 115–135. https://doi.org/10.1007/s11747-014-0403-8

Indeks vegetasi seperti NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) merupakan metode yang paling umum digunakan untuk mengevaluasi status vegetasi karena dapat menggambarkan tingkat kehijauan dan vigor tanaman secara kuantitatif (Huang et al., 2021).

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024). Surat Edaran Nomor : SE.1/MENLHK/SETJEN/KUM.1/1/2024 tentang Pedoman Reklamasi Hutan Akibat Penggunaan Kawasan Hutan.

Melo, V. F., et al. (2022). Quality reference values for trace metals in Podzols, Ferralsols, and Acrisols of Brazilian Atlantic rainforest. Catena, 210, 105879. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105879.

Pratiwi, Narendra, B. H., Siregar, C. A., Turjaman, M., Hidayat, A., Rachmat, H. H., Mulyanto, B., Suwardi, Iskandar, Maharani, R., Rayadin, Y., Prayudyaningsih, R., Yuwati, T. W., Prematuri, R., dan Susilowati, A. (2021). Managing and reforesting degraded post-mining landscape in Indonesia: A review. Land, 10(6), 658. https://doi.org/10.3390/land10060658

Presiden Republik Indonesia. (2020). Peraturan Pemerintah Nomor 26 Tahun 2020 tentang Rehabilitasi dan Reklamasi Hutan.

Setiawati, S. (2012). Valuasi ekonomi pertambangan selaras lingkungan lestari (studi kasus: pertambangan emas Pongkor). Jurnal Green Growth dan Manajemen Lingkungan, 1(1), 50–60. https://doi.org/10.21009/jgg.011.05

Wijayanti, M., Kapp, G., & Mansur, I. (2020). Evaluation of revegetation practices in post-mined areas of Indonesia. BIOTROPIA, 27(3), 189–198. https://doi.org/10.11598/btb.2020.27.3.1031

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Zhang, L., Wang, J., Bai, Z., & Lv, C. (2015). Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. CATENA, 128, 44–53. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.016