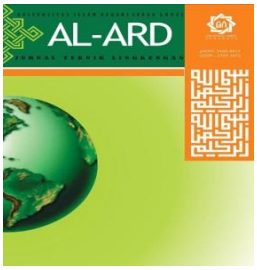


Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan
Vol.11 No.2 – Maret 2026 (hal. 82-93)
http://jurnalsaintek.uinsa.ac.id/index.php/alard/index

Al-Ard:
Jurnal
Teknik Lingkungan

Revegetasi Lahan Bekas Eksplorasi Tambang Emas Berbasis Agroforestri Tanaman Adaptif

M. Anshari Akbar[1*], Sri Wahyuni[2], Miranti Nur Wulandari[3], Sulaimansyah[4], Ilham Ramdani[5], Nazila Qurana[6]

[1,2,3,4,5,6] Teknik Pertambangan, Universitas Cordova, Sumbawa Barat, Indonesia
*m.anshariakbar@gmail.com

Abstract

Gold mining exploration causes extensive land degradation characterized by highly acidic pH (4.0–5.0), topsoil loss, and very low organic matter content, requiring sustainable revegetation strategies to restore ecosystem and land productivity. This research identifies local, adaptive plant species for the revegetation of former gold-mining exploration land in West Sumbawa, develops an integrated agroforestry-based revegetation system, evaluates revegetation success using a comprehensive scoring system, and designs optimal planting geometry based on topography. The method employs systematic sampling over 6.74 hectares, stratified by planting year (2021–2023), and primary data collection through vegetation inventory, plant growth measurement, health assessment, and analysis using descriptive statistics, ANOVA, Pearson correlation, and the Regulation of the Minister of Forestry P.60/2009 scoring system. Results demonstrate the gamal–mahogany agroforestry system achieved gamal survival rate of 96.3% and Mahogany 92.3%, height growth of gamal 2.5–3.0 m/year and Mahogany 3.1–3.5 m/year, increased C-organic by 105%, N-total by 167%, pH by 0.65, and P-available by 156%, with a success score of 21.8/25 in the "Highly Successful" category according to regulations.

Keywords: gamal–mahogany agroforestry, gold mining revegetation, plant survival rate, soil quality improvement, adaptive planting geometry.

Abstrak

Eksplorasi tambang emas menimbulkan degradasi lahan ekstensif dengan pH sangat asam (4,0 – 5,0), kehilangan *topsoil*, dan bahan organik sangat rendah, sehingga memerlukan strategi revegetasi berkelanjutan untuk pemulihan ekosistem dan produktivitas lahan. Penelitian ini mengidentifikasi tanaman lokal adaptif untuk revegetasi lahan bekas eksplorasi tambang emas di Sumbawa Barat, mengembangkan sistem revegetasi terintegrasi berbasis agroforestri, mengevaluasi keberhasilan revegetasi dengan sistem skoring komprehensif, dan merancang geometri penanaman optimal berbasis topografi. Metode menggunakan *systematic sampling* pada 6,74 hektar dengan stratifikasi tahun tanam (2021–2023), pengumpulan data primer melalui inventarisasi vegetasi, pengukuran pertumbuhan tanaman, penilaian kesehatan, dan analisis menggunakan statistik deskriptif, ANOVA, korelasi Pearson, serta sistem skoring Permenhut P.60/2009. Hasil menunjukkan sistem agroforestri gamal–mahoni mencapai *survival rate* gamal 96,3% dan mahoni 92,3%, pertumbuhan tinggi gamal 2,5 – 3,0 m/tahun dan mahoni 3,1 – 3,5 m/tahun, meningkatkan C-organik 105%, N-total 167%, pH 0,65, dan P-tersedia 156%, dengan skor keberhasilan 21,8/25 dalam kategori "Sangat Berhasil" sesuai regulasi.

Kata Kunci: agroforestri gamal–mahoni, revegetasi tambang emas, *survival rate* tanaman, perbaikan kualitas tanah, geometri penanaman adaptif.

1. PENDAHULUAN

Kegiatan eksplorasi dan penambangan emas merupakan aktivitas ekonomi yang penting, tetapi juga menyebabkan dampak lingkungan yang serius dan rumit. Eksplorasi tambang emas meliputi serangkaian kegiatan terencana seperti pengeboran, membuka akses lahan, dan pengambilan sampel tanah dan batuan. Semua aktivitas tersebut mengubah lingkungan yang sebelumnya stabil, sehingga menimbulkan gangguan pada ekosistem di sekitarnya (Romadhan dkk., 2022; Hasanah, 2022).

Dampak fisik dari eksplorasi tambang emas meliputi: (1) perubahan bentuk lahan dan lereng akibat lubang pengeboran, lubang uji,

serta jalan setapak; (2) hilangnya tumbuhan alami yang menyebabkan lahan gundul dan rusak; (3) gangguan aliran air sungai, muka air tanah, dan pola hidrologi; dan (4) tanah menjadi padat serta struktur berubah sehingga daya serap air menurun (Widjaja & Tjahyandari, 2024). Dampak-dampak tersebut saling bertumpuk sehingga menciptakan lahan yang sangat miskin dan tidak subur, dengan tanah didominasi oleh pasir/kerikil (50–70%), hilangnya lapisan tanah atas, pH sangat asam (4,0–5,0), bahan organik sangat rendah (<1%), serta kekurangan unsur hara makro dan mikro (Santi dkk., 2022).

Dampak kimia meliputi potensi pencemaran dari residu logam berat, khususnya merkuri (Hg) yang digunakan dalam proses pengolahan emas skala kecil dan menengah, serta perubahan keseimbangan kimiawi tanah (Khairunnisa dkk., 2024; Leka dkk., 2024). Penelitian menunjukkan konsentrasi Hg pada lahan bekas tambang emas dapat mencapai 10–100 mg/kg *dry soil*, jauh melampaui standar baku mutu (0,5 mg/kg) (Leka dkk., 2024). Dampak biologi berupa kehilangan total biodiversitas, terputusnya rantai makanan, hilangnya habitat alami flora dan fauna lokal, dan degradasi komunitas mikroorganisme tanah yang berperan penting dalam siklus hara dan pelapukan tanah (Sutono dkk., 2018).

Sektor pertambangan, termasuk emas, menyumbang 3–4% dari total Produk Domestik Bruto (PDB) Indonesia secara konsisten (Kementerian ESDM, 2022). Di tingkat daerah, pertambangan emas di Provinsi NTB dan Kabupaten Sumbawa Barat berperan besar terhadap Produk Domestik Regional Bruto (PDRB), lapangan kerja, serta pendapatan asli daerah. Kontribusi ini juga menghasilkan devisa ekspor mineral dan royalti untuk pemerintah pusat maupun daerah (Amman Mineral, 2025). Meski begitu, pertumbuhan ekonomi dari pertambangan tidak boleh mengorbankan kelestarian lingkungan dan kesejahteraan masyarakat dalam jangka panjang (Kementerian ESDM, 2018; Pemerintah RI, 2010).

Kerangka regulasi untuk reklamasi dan revegetasi lahan bekas tambang di Indonesia telah dikembangkan melalui berbagai instrumen hukum yang komprehensif. Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara menetapkan bahwa setiap perusahaan pertambangan wajib melaksanakan kegiatan reklamasi sesuai dengan rencana yang telah disetujui dalam tahap perizinan (Pemerintah RI, 2009). Peraturan Pemerintah Nomor 78 Tahun 2010 tentang Reklamasi dan Pascatambang memberikan pedoman teknis pelaksanaan reklamasi dan revegetasi dengan standar minimum yang harus dipenuhi (Pemerintah RI, 2010).

Lebih lanjut, Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 1827K/30/MEM/2018 menetapkan pedoman pelaksanaan kewajiban reklamasi dan pascatambang yang lebih detail, termasuk target area yang harus direklamasi, *timeline* implementasi, dan parameter keberhasilan yang harus dimonitor (Kementerian ESDM, 2018). Pada tingkat lingkungan, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) melalui Peraturan Menteri Kehutanan P.60/Menhut-II/2009 tentang Pedoman Penilaian Keberhasilan Reklamasi Hutan menetapkan sistem skoring untuk evaluasi keberhasilan revegetasi lahan bekas tambang (Kementerian Kehutanan, 2009).

Kriteria keberhasilan revegetasi menurut regulasi meliputi: (1) realisasi luas areal penanaman minimal 90% dari rencana; (2) persentase tumbuh (*survival rate*) tanaman minimal 85%; (3) jumlah tanaman per hektar minimal 625 pohon (jarak tanam 4 m × 4 m); (4) komposisi jenis tanaman dengan minimal 40% tanaman lokal; (5) kesehatan tanaman minimal 85% dalam kondisi sehat atau sedang; dan (6) ketiadaan erosi aktif pada area revegetasi (Kementerian Kehutanan, 2009; Keena, 2025).

Program reklamasi dan revegetasi di lahan bekas tambang memiliki banyak tujuan. Secara ekologis, tujuannya meliputi: (1) menstabilkan lahan agar tidak mudah erosi, longsor, atau menimbulkan sedimentasi yang merusak lingkungan sekitar; (2) memperbaiki kondisi fisik tanah seperti struktur, pori-pori, dan daya serap air; (3) memperbaiki kualitas kimia tanah dengan menaikkan pH, menambah bahan organik, dan unsur hara; dan (4) mengembalikan keberadaan mikroorganisme dan jamur tanah yang penting bagi siklus hara dan pembentukan tanah (Setyowati dkk., 2017; Sita dkk., 2024).

Secara ekosistem, tujuan revegetasi adalah: (1) mengembalikan tanaman asli dan meningkatkan keanekaragaman hayati; (2) membuat habitat baru untuk hewan lokal

kembali bermukim; (3) memulihkan siklus air dengan menambah resapan air ke tanah; (4) menghubungkan habitat dan membuat jalur gerak bagi hewan; dan (5) menyimpan karbon untuk mengurangi dampak perubahan iklim (Hendriani dkk., 2024; Sutono dkk., 2018).

Meskipun sudah ada aturan dan berbagai program revegetasi di lahan bekas tambang, tingkat keberhasilannya masih berbeda-beda dan sering belum mencapai standar terbaik. Studi menunjukkan persentase keberhasilan revegetasi di Indonesia sekitar 75–94%, dengan rata-rata 82–85%, yang sudah melewati batas minimum (85%) tapi belum optimal (Muslim dkk., 2025; Rahayu dkk., 2024; Maulidan dkk., 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menemukan jenis tanaman lokal dan yang mudah beradaptasi yang paling cocok untuk revegetasi lahan bekas eksplorasi tambang emas di Sumbawa Barat dengan mengevaluasi *survival rate*, pertumbuhan, dan kontribusi terhadap peningkatan kualitas tanah; (2) membuat sistem revegetasi terpadu yang menggabungkan tanaman pendukung jangka pendek yang bisa menjadi *nitrogen-fixer* dan *soil improver* dengan tanaman utama jangka panjang yang memiliki nilai ekonomi; (3) mengukur keberhasilan revegetasi dengan sistem penilaian yang menggabungkan aspek ekologis dan agronomis; dan (4) merancang geometri dan pola penanaman optimal yang disesuaikan dengan kondisi topografi, hidrologi, dan geomorfologi lahan bekas eksplorasi tambang emas.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

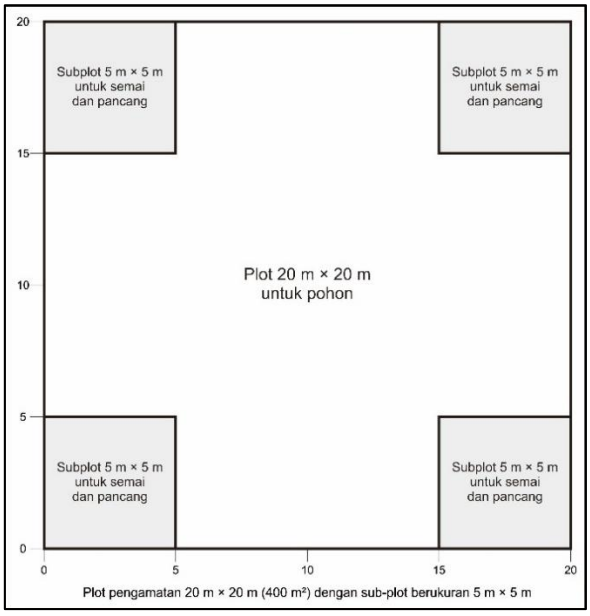
Penelitian dilakukan di area revegetasi lahan bekas eksplorasi tambang emas di Kabupaten Sumbawa Barat, Nusa Tenggara Barat, yang terletak pada koordinat geografi berkisar antara 08°08'–09°07' LS dan 116°42' –117°05' BT. Lokasi ini representatif untuk revegetasi karena memiliki lahan bekas eksplorasi tambang yang luas, data perusahaan lengkap sebagai informasi pendukung, serta area revegetasi dengan tanaman berumur 1–3 tahun.

Iklim lokasi penelitian termasuk tipe kering (Schmidt-Ferguson tipe D – E) dengan curah hujan rata-rata 1.200–1.500 mm/tahun, musim kemarau 6–8 bulan (April–Oktober), suhu udara rata-rata 26–32°C, dan kelembapan relatif 60–75%. Topografi bergelombang dengan kemiringan 0–45° didominasi oleh batuan granit dan kuarsa.

2.2 Metode *Sampling* dan Ukuran Sampel

Penelitian menggunakan *systematic sampling* dengan *random start* untuk pemilihan lokasi plot pengamatan. Prosedurnya meliputi: (1) pembagian area revegetasi total dalam blok berdasarkan stratifikasi tahun tanam (Blok A: 2021/3 tahun; Blok B: 2022/2 tahun; Blok C: 2023/1 tahun); (2) penentuan titik awal secara acak; (3) penentuan interval jarak antarplot yang ditentukan dari intensitas *sampling* 5%; dan (4) penempatan plot sistematis dengan pola *zigzag*, jarak spasi 50–100 m. Adapun untuk implementasinya, tanaman ditanam pada lahan berukuran 40 m × 40 m dengan densitas yang disesuaikan dengan karakteristik tanaman terpilih.

Ukuran plot pengamatan 20 m × 20 m (400 m^2) untuk inventarisasi pohon, dengan intensitas *sampling* yang menghasilkan 9 plot total (3 blok × 3 plot/blok = 1,2 ha dari 6,74 ha total area). Subplot 5 m × 5 m ditempatkan di empat sudut plot utama untuk pengamatan semai dan pancang. Ilustrasi rancangan plot dan subplot pengamatan ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Plot dan subplot pengamatan (20 m × 20 m untuk pohon; 5 m × 5 m untuk semai dan pancang)

2.3 Pengumpulan Data Primer dan Sekunder

Data primer dikumpulkan melalui inventarisasi vegetasi (identifikasi jenis, jumlah individu per plot, per kelas

pertumbuhan); pengukuran pertumbuhan tanaman (tinggi, diameter, *basal area*); penilaian kesehatan tanaman menggunakan kriteria visual; perhitungan *survival rate* ((jumlah tanaman hidup/ditanam) × 100%); dan perhitungan densitas tanaman ((jumlah individu/400 m^2) × 10.000 m^2).

Data sekunder diperoleh dari dokumen perusahaan (rencana teknis revegetasi, realisasi penanaman, peta area, data curah hujan); analisis sampel tanah laboratorium (pH, C-organik (karbon-organik), N-total (nitrogen-total), P-tersedia (fosfor-tersedia), Kapasitas Pertukaran Kation/KTK, tekstur); dan literatur penelitian terdahulu.

2.4 Analisis Data dan Sistem Skoring Keberhasilan

Data dianalisis dengan beberapa metode sederhana: (1) statistik deskriptif untuk pertumbuhan tanaman dan *survival rate*; (2) uji ANOVA (*Analysis of Variance*) satu arah untuk membandingkan umur tanam berbeda ($p<0,05$); (3) korelasi Pearson antara sifat tanah dan pertumbuhan tanaman; dan (4) sistem penilaian Permenhut P.60/2009 dengan rumus (bobot parameter/luas lahan), bobot masing-masing 5 poin (pembobotan, *survival rate*, densitas, komposisi spesies, kesehatan tanaman), total maksimal 25 poin. Kategori keberhasilannya meliputi: sangat berhasil (21–25), berhasil (16–20), cukup berhasil (11–15), kurang berhasil (6–10), tidak berhasil (<6).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Awal Lahan dan Strategi Pemilihan Tanaman

Analisis karakteristik lahan bekas eksplorasi tambang emas menunjukkan kondisi tanah yang sangat marginal: pH H_2O 4,98–5,12 (asam), C-organik 0,84–1,02% (sangat rendah), N-total 0,07–,09% (sangat rendah), P-tersedia 3,1–4,2 ppm (sangat rendah), tekstur didominasi pasir 58–62%, KTK 7,21–8,45 me/100 g (rendah), kejenuhan basa 24–29% (rendah). Kondisi ini mencerminkan degradasi ekstensif akibat kehilangan *topsoil*, pembalikan lapisan tanah, pemadatan, dan hilangnya bahan organik (Hendriani dkk., 2024; Santi dkk., 2022).

Dalam menghadapi kondisi lingkungan yang sulit, pemilihan tanaman untuk revegetasi mempertimbangkan beberapa hal penting: (1) kemampuan tanaman bertahan di tanah yang asam, kurang subur, berpasir, dan sangat kering; (2) kecepatan pertumbuhan tanaman agar lahan dapat tertutup dan tanah membaik dengan cepat; (3) kemampuan memperbaiki tanah melalui *nitrogen-fixation*, produksi serasah kaya organik, serta membantu proses pelapukan tanah; dan (4) kesesuaian dengan iklim dan kondisi lingkungan di Sumbawa Barat.

Hasil analisis menunjukkan bahwa tanaman pionir dan lokal yang biasa digunakan untuk revegetasi tambang di iklim tropis memiliki variasi *survival rate* dan pertumbuhan yang signifikan. Tanaman lokal Sumbawa Barat memiliki *survival rate* tertinggi (>90%) meski tumbuh lebih lambat, sedangkan tanaman cepat tumbuh mencapai pertumbuhan tahunan 2,81–2,98 m, tetapi tingkat hidupnya sedang (85–90%). Kondisi ini mendorong penggabungan kedua jenis tanaman dalam sistem yang saling melengkapi.

Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa tanaman pionir memiliki fungsi khusus: kemampuan *nitrogen-fixation* tinggi, produksi biomassa sedang (50–60 ton/ha dalam 3–5 tahun), dan siklus panen singkat (3–5 tahun) sehingga *intermediate products* bisa dimanfaatkan. Tanaman ini berperan sebagai "*stepping stone*" atau pendukung yang memperbaiki lingkungan agar tanaman utama bernilai ekonomi jangka panjang bisa tumbuh lebih baik. Kombinasi tanaman pendukung pengikat nitrogen dengan tanaman kayu premium yang tahan terhadap lahan sulit dapat menghasilkan sistem revegetasi yang optimal.

3.2 Penetapan Sistem Agroforestri Terpadu: Gamal-Mahoni

Berdasarkan kondisi lahan, kebutuhan perbaikan tanah, dan adaptasi tanaman, penelitian merekomendasikan sistem agroforestri yang menggabungkan tanaman pendukung jangka pendek (1–3 tahun), yaitu gamal (*Gliricidia sepium*). Gamal dipilih karena: (1) toleran terhadap pH asam (tumbuh di pH 4,0–5,0, optimal pH 5,5–7,0); (2) mampu melakukan fiksasi nitrogen hingga 96 kg N/ha/tahun; (3) menghasilkan biomassa tinggi (5–8 ton/ha/tahun) dengan daun kaya nitrogen (rasio C:N 25–35) yang cepat terdekomposisi; (4) memiliki akar serabut dan dalam yang memecah tanah keras; dan (5) memiliki berbagai manfaat,

seperti pakan ternak, kayu bakar, pupuk hijau, dan mulsa (Putra dkk., 2014).

Tanaman pokok jangka panjang (15–25 tahun) yang dipilih adalah mahoni (*Swietenia macrophylla*) karena beberapa alasan: (1) nilai kayu premium tinggi (Rp 3–5 juta/m^3 di pasar internasional); (2) produksi kayu 250–50 m^3/ha pada rotasi 20 tahun; (3) toleran terhadap pH asam dan media *tailing* emas dengan *survival rate* 75–95% pada tanah yang telah diperbaiki); (4) pertumbuhan moderat hingga cepat (2,8–3,5 m/tahun pada kondisi optimal); dan (5) mampu membentuk ekosistem berlapis dengan struktur tajuk yang mendukung keanekaragaman hayati (Wasis & Fikri, 2021; Permana dkk., 2023).

Sistem ini bekerja saling mendukung, yaitu di tahap awal gamal menghasilkan nitrogen, meningkatkan C-organik, dan menciptakan iklim mikro yang lebih baik (*partial shade* dan kelembapan tinggi). Seiring waktu, mahoni tumbuh lebih baik di bawah naungan gamal. Pada tahun 3–5, gamal bisa dipangkas untuk menghasilkan biomassa yang bisa dijual, sementara mahoni terus tumbuh sampai rotasi ekonomis (Damara, 2017). Karakteristik ekologis dan agronomis dari kedua jenis tanaman tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 1.

Penetapan gamal dan mahoni tidak hanya didasarkan pada karakteristik morfologi, tetapi juga menggunakan metode *species-site matching* (kesesuaian jenis dan tempat tumbuh) melalui studi pustaka, analisis kesesuaian ekologis lahan marginal, dan evaluasi lapangan pendahuluan (Dirjen PPKL, 2016). Sebagai pembanding, beberapa tanaman pionir dan lokal yang umum digunakan dalam revegetasi tambang di Indonesia meliputi akasia (*Acacia mangium*), sengon (*Paraserianthes falcataria*), dan trembesi (*Samanea saman*) (Rusdiyanto dkk., 2025; Setyowati dkk., 2017). Namun, spesies pembanding seperti akasia berpotensi menghasilkan eksudat akar yang bersifat alelopati sehingga dapat menghambat pertumbuhan spesies lain di sekitarnya (Izza dkk., 2022). Sementara itu, sengon cenderung memerlukan biaya pemeliharaan tinggi dan kurang toleran terhadap tanah sangat masam. Oleh karena itu, gamal dipilih sebagai tanaman pendukung karena toleransinya terhadap pH sangat masam (4,0–5,0) di lahan bekas tambang emas serta kemampuannya melakukan fiksasi nitrogen tanpa efek alelopati. Mahoni dipilih sebagai tanaman pokok lokal karena tingkat *survival rate*-nya yang terbukti mampu mencapai 88–95% di lahan bekas tambang (Kurniawan dkk., 2019).

Tabel 1. Karakteristik Tanaman Pendukung dan Tanaman Pokok dalam Sistem Agroforestri Gamal-Mahoni

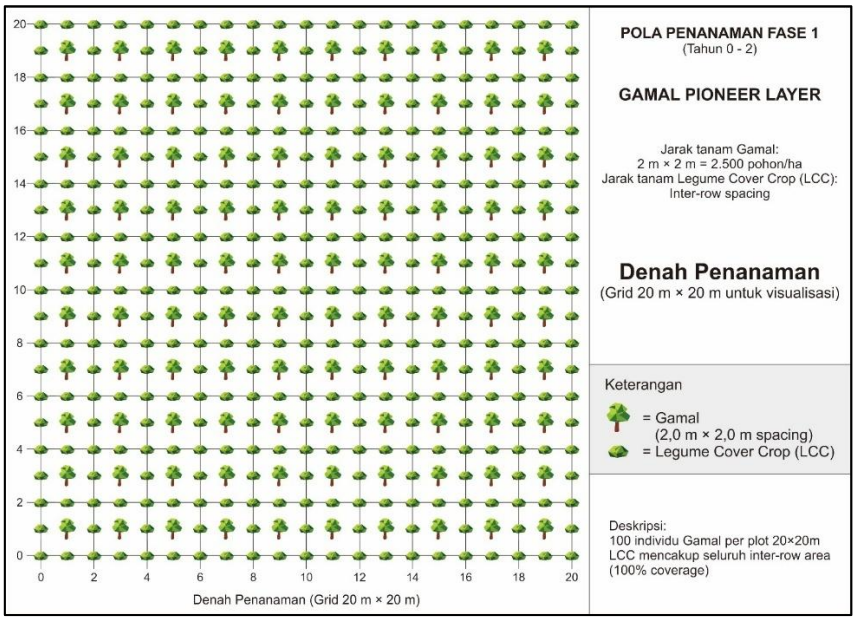
Karakteristik	**Gamal (*Gliricidia sepium*)**	**Mahoni (*Swietenia macrophylla*)**
Status dalam Sistem	Tanaman Pendukung (Pionir/*Support*)	Tanaman Pokok (*Main/Mainstay*)
Durasi Fungsi	1–5 tahun (pendek)	15–25+ tahun (panjang)
Toleransi pH	4,0–7,0 (optimal 5,5–7,0)	4,5–7,5 (optimal 6,0 – 7,0)
Nitrogen-Fixation	96 g N/ha/tahun	Tidak (*non-legume*)
Tumbuh Tinggi (m/tahun)	2,5–3,5	2,8–3,5
Biomassa/Serasah/Tahun	5–8 ton (*dry*)	2–4 ton (*steady-state*)
Survival Rate	>95% (pada pH ≥5,0)	75–5% (*tailing amended*)
Pemanfaatan *Intermediate*	Pakan ternak, biomassa, *green manure*	Tidak ada (*waiting for rotation*)
Nilai Ekonomis Rotasi	Rendah (kayu bakar ~Rp 2–3 juta/ha)	Tinggi (kayu premium ~Rp 420–700 juta/ha Yr 20)
Komponen Akar	*Fibrous* + *tap root* moderat	*Deep tap root* + *lateral extensive*
Peran dalam Sistem	*Soil builder*; *microclimate creator*; *N-provider*	*Long-term value*; *ecosystem structure*

3.3 Geometri Penanaman Agroforestri Gamal-Mahoni pada Lahan Bekas Eksplorasi Tambang Emas

Desain geometri penanaman agroforestri gamal-mahoni untuk lahan bekas eksplorasi tambang emas dirancang berdasarkan pertimbangan berikut: (1) kebutuhan perbaikan tanah secara intensif (memerlukan densitas gamal tinggi); (2) penyediaan ruang bagi mahoni untuk tumbuh dalam jangka panjang; (3) adaptasi terhadap variasi topografi lahan bekas tambang; (4) efisiensi pemeliharaan dan pemantauan; dan (5) potensi pemanfaatan *intermediate products*.

3.3.1 Pola Penanaman Fase 1 (Tahun 0 – 2): *Pioneer Layer* dengan Gamal

Fase pertama berfokus pada pembentukan *pioneer layer* secara intensif menggunakan gamal. Ilustrasi rancangan geometri penanaman pada fase pertama ini dapat dilihat pada Gambar 2.



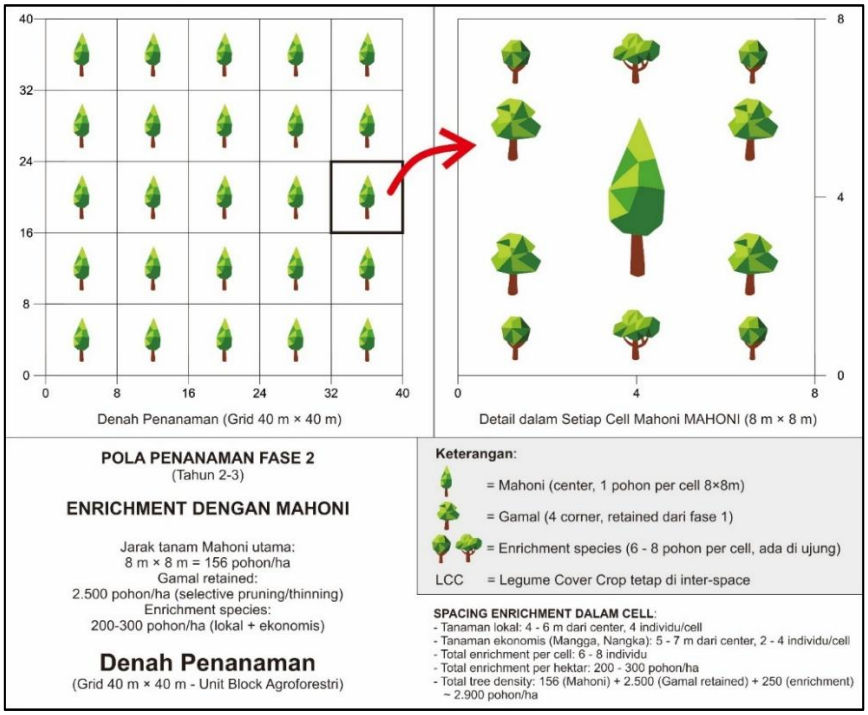
Gambar 2. Pola Penanaman Fase 1 (Tahun 0 – 2): *Pioneer Layer* dengan Gamal

Karakteristik fase 1:

1. Densitas gamal sebesar 2.500 pohon/ha (minimal untuk perbaikan tanah signifikan dalam 1–2 tahun).
2. Jarak tanam 2 m × 2 m (reguler, sistematis, memudahkan akses dan pemeliharaan).
3. Tanaman pendukung berupa *legume cover crop* (*Mucuna cochinchinensis* dan *Centrosema pubescens*) di seluruh area *inter-row*.
4. Tujuan: penutupan lahan 60–70%, peningkatan C-organik, perbaikan struktur tanah, penambahan nitrogen, *microclimate stabilization*.

3.3.2 Pola Penanaman Fase 2 (Tahun 2–3): *Enrichment Planting* dengan Mahoni

Fase kedua dimulai pada tahun kedua, ketika *pioneer layer* gamal telah tumbuh dan menciptakan kondisi yang lebih baik bagi tanaman pokok. Skema rekayasa penanaman pengayaan (*enrichment planting*) menggunakan mahoni pada fase ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pola Penanaman Fase 2 (Tahun 2-3): *Enrichment Planting* dengan Mahoni

Karakteristik fase 2:

1. Pola utama berupa grid reguler mahoni 8 m × 8 m dengan *cell-based enrichment*.
2. Densitas total sekitar 2.900 pohon/ha (mempertahankan densitas + mahoni utama + *enrichment*).
3. Manfaat geometri: memungkinkan akses pemeliharaan pada *inter-row* mahoni (8 m *spacing*); mencegah kompetisi langsung gamal-mahoni; memfasilitasi diversifikasi spesies lokal dan ekonomis; mempertahankan manfaat gamal (*N-fixation*, *microclimate*) bagi mahoni.
4. Tujuan: mendukung pertumbuhan optimal mahoni di bawah perlindungan gamal; mendorong diversifikasi ekosistem; serta meningkatkan potensi pendapatan masa depan.

3.3.3 Adaptasi Geometri terhadap Variasi Topografi Lahan Bekas Tambang

Lahan bekas eksplorasi tambang emas menunjukkan variasi topografi yang signifikan, dari datar (0–5°) hingga berlereng (30–45°). Geometri penanaman diadaptasi untuk topografi berbeda:

1. Pada lahan datar (0–5°):
   a. Pola reguler *grid* dapat diterapkan dengan tetap mempertahankan jarak tanam gamal 2 m × 2 m dan mahoni 8 m × 8 m.
   b. Pembersihan aliran air (*micro-drainage*) dengan pembuatan alur ringan di *inter-row* untuk pengendalian *waterlogging*.
   c. Tidak diperlukan terasering; sistem penanaman *straight-line*.
2. Pada lahan miring ringan (5–15°):
   a. Pola tetap mengikuti *grid* reguler, namun disesuaikan dengan kontur elevasi.
   b. Penanaman mengikuti garis kontur (*contour planting*) untuk meminimalkan erosi dan memaksimalkan retensi air.
   c. Pembuatan rorak/embung sederhana di titik-titik rendah untuk konservasi air.
   d. Jarak tanam dapat dikompensasi dengan *slight offset* mengikuti topografi.
3. Pada lahan miring curam (15 – 30°):
   a. Terasering sederhana dengan interval 2 – 3 m (tergantung *slope*).
   b. Pola penanaman *modified*: spasi gamal tetap 2 m × 2 m, namun diatur mengikuti *bench* terasering.
   c. Mahoni *spacing* dapat diperlebar menjadi 10 m × 8 m untuk mengurangi kebutuhan terasering ekstensif.
   d. Pembuatan *micro-check dam* di *inter-row* untuk perlambatan *runoff* dan infiltrasi.
4. Pada lahan sangat curam (>30°):
   a. Area-area ini diprioritaskan untuk *conservation revegetation* dengan tanaman *deep-rooted local*.
   b. Pola penanaman lebih renggang (4–6 m *spacing*) dengan fokus pada stabilisasi *slope*.
   c. Kombinasi dengan *physical structures* (*geotextile*, *coir logs*) untuk mencegah erosi awal.
   d. Gamal dapat ditanam di *gully* dan *flat areas* dalam unit blok; Mahoni di *slope* lebih stabil dengan *spacing wider*.

Rangkuman adaptasi rekayasa geometri penanaman terhadap variasi kelas topografi ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Adaptasi Geometri Penanaman terhadap Variasi Topografi

Kelas Topografi	***Slope***	**Gamal *Spacing***	**Mahoni *Spacing***	***Enrichment***	***Physical Measures***
Datar	0 – 5°	2×2 m (2.500/ha)	8×8 m (156/ha)	*Standard*	*Micro-drainage*
Ringan	5 – 15°	2×2 m, *contour*	8×8 m, *contour*	*Standard*	Rorak/embung
Sedang	15 – 30°	2×2 m, *bench*	10×8 m, *bench*	*Selective*	Terasering + *check dam*
Curam	>30°	4 – 6 m, *gully*	*Sparse/skip*	*Conservation*	*Geotextile*, *coir logs*

3.4 Performa Pertumbuhan dan *Survival Rate* dalam Sistem Agroforestri

Dari pengamatan menunjukkan bahwa sistem agroforestri gamal-mahoni menghasilkan performa yang melampaui target dan ekspektasi awal:

3.4.1 *Survival Rate* dan *Establishment* Gamal

Gamal sebagai tanaman pendukung memiliki *survival rate* yang sangat tinggi, yaitu sekitar 92,8% pada tahun pertama, 94,7% pada tahun kedua, dan 96,3% pada tahun ketiga. Hal ini disebabkan karena: (1) adaptabilitas intrinsik terhadap pH asam dan tanah marginal yang superior; (2) metode

penanaman stek (lebih cepat tumbuh dibandingkan dengan semai benih); dan (3) akar tanaman berkembang cepat dan mampu merespons kondisi tanah marginal (Damara, 2017).

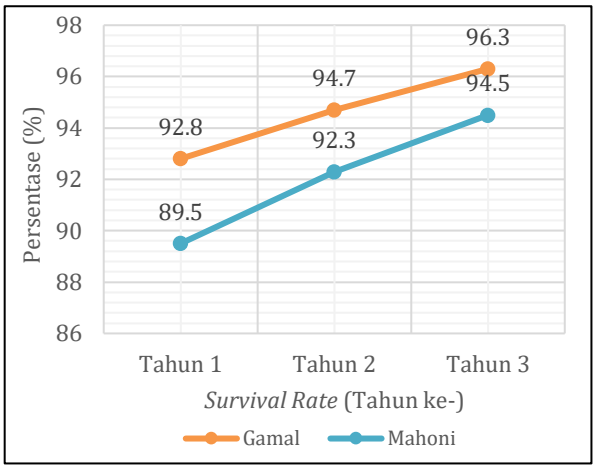
Pertumbuhan tinggi gamal mencapai rata-rata tahunan 2,5–3,0 m dari tahun pertama hingga ketiga, lebih baik daripada perkiraan untuk lahan marginal. Kombinasi perbaikan tanah awal (kapur 2 ton/ha, kompos 5–10 ton/ha) dan *nitrogen-fixation* dari simbiosis gamal-rhizobium mendorong pertumbuhan cepat. Diameter batang gamal rata-rata 4,5–5,5 cm (tahun 1), 8–10 cm (tahun 2), dan 12–15 cm (tahun 3).

3.4.2 *Survival Rate* dan Pertumbuhan Mahoni dalam Sistem

Mahoni ditanam pada tahun kedua dalam kondisi tanah yang sudah jauh lebih baik dibandingkan dengan jika ditanam langsung di lahan monokultur. Pada saat penanaman, pH tanah naik sekitar 0,5–0,8, C-organik meningkat 30–40%, N-total naik 50%, dan kelembapan tanah lebih stabil di bawah naungan gamal. Dalam kondisi ini, mahoni menunjukkan *survival rate* tinggi: 89,5% pada tahun pertama (Yr1) setelah tanam, 92,3% pada tahun kedua (Yr2), dan diproyeksikan mencapai sekitar 94,5% pada tahun ketiga (Yr3).

Pertumbuhan mahoni dalam sistem ini mencapai rata-rata tahunan 3,1–3,5 m, lebih tinggi dari rata-rata di lahan marginal (2,5–2,8 m) dan mendekati performa di lahan suboptimal (3,5–4,0 m). Diameter setinggi dada (*Diameter at Breast Height*/DBH) mencapai 6–8 cm pada umur 2 tahun setelah tanam, menunjukkan momentum pertumbuhan yang kuat. Analisis korelasi menunjukkan hubungan positif signifikan antara kandungan C-organik tanah dan pertumbuhan mahoni ($r = 0,72$, $p < 0,01$), yang mengonfirmasi peran penting perbaikan tanah oleh gamal (Kurniawan dkk., 2019).

Pemantauan rutin menunjukkan adanya tren positif pada adaptasi tanaman terhadap lingkungan lahan pascatambang. Performa pertumbuhan gamal dan mahoni secara lengkap yang mencakup persentase kelangsungan hidup (*survival rate*) ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Performa Pertumbuhan Gamal dan Mahoni dalam Sistem Agroforestri

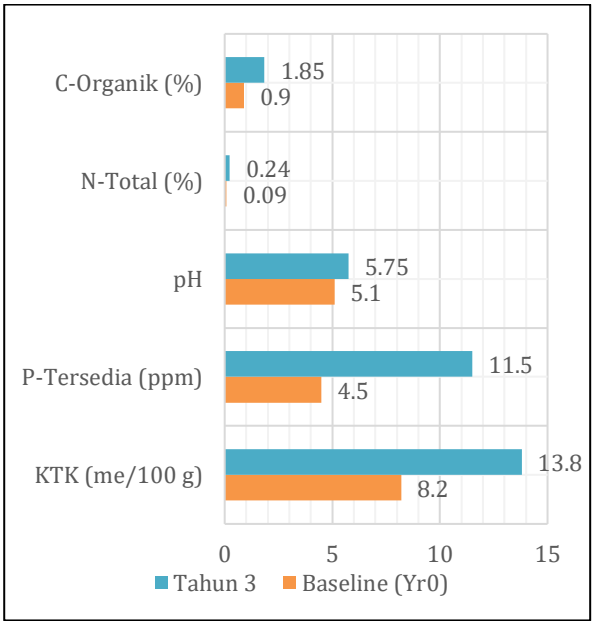
3.5 Perbaikan Kualitas Tanah dan Parameter Ekologis

Sistem agroforestri gamal-mahoni secara signifikan meningkatkan kualitas tanah dalam waktu 3 tahun:

1. C-Organik meningkat dari *baseline* 0,90% menjadi 1,85% pada tahun ke-3 (*improvement* +105%) dengan mekanisme yang meliputi: (1) produksi serasah gamal 5 – 6 ton/ha/tahun yang tinggi karbon; (2) *rapid decomposition* serasah di *microclimate* yang optimal (*partial shade* dan kelembapan tinggi); (3) akumulasi bahan organik dari *pioneer layer* + LCC biomass; dan (4) *reduced decomposition rate* di bawah tajuk gamal menciptakan "*buffer*" bahan organik (Damara, 2017).
2. N-Total meningkat dari 0,09% menjadi 0,24% (*improvement* +167%). Peningkatan ini luar biasa karena: (1) *nitrogen-fixation* gamal 96 kg/ha/tahun × 3 tahun = 288 kg N/ha; (2) nitrogen tersimpan dalam biomassa tanaman dan cadangan bahan organik di tanah; (3) *reduced leaching* N di bawah naungan gamal; dan (4) aktivitas mikroba yang meningkat memungkinkan siklus nitrogen lebih efektif (Hudaedi dkk., 2018).
3. pH meningkat dari 5,10 menjadi 5,75 (*improvement* +0,65). Peningkatan pH disebabkan oleh: (1) *ash content* dari serasah gamal; (2) *buffering capacity* dari bahan organik yang terakumulasi; (3) *microbial activity* yang menghasilkan asam organik namun juga meningkatkan kapasitas penyangga total secara paradoksal; dan (4) penurunan toksisitas Al^{3+} dari *partial complexation* dengan bahan organik (Ramadhana dkk., 2019).

4. P-Tersedia meningkat dari 4,5 ppm menjadi 11,5 ppm (*improvement* +156%). Peningkatan ini terkait dengan: (1) *eycorrhizal colonization* di bawah gamal; (2) *organic acids* dari penguraian bahan organik yang melarutkan fosfor; dan (3) *reduced P-fixation* pada lahan asam seiring peningkatan pH (Manullang dkk., 2021).
5. KTK naik dari 8,2 menjadi 13,8 me/100 g (+68%), sementara kejenuhan basa meningkat dari 29% menjadi 54% (+86%). Peningkatan ini disebabkan oleh akumulasi *cation-exchange capacity* dari bahan organik yang bertambah, serta peningkatan ketersediaan kation basa seiring perbaikan pH tanah (Santi, dkk., 2022).

Sistem agroforestri terbukti secara bertahap mampu memulihkan kesuburan lahan marginal. Detail perubahan parameter kualitas tanah sejak *baseline* hingga tahun ketiga disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbaikan Parameter Kualitas Tanah dalam Sistem Agroforestri Gamal-Mahoni (3 tahun)

Keberhasilan sistem agroforestri gamal-mahoni dalam penelitian ini seperti ditunjukkan pada Gambar 4 didukung oleh temuan dari berbagai penelitian sebelumnya. Pencapaian *survival rate* gamal sebesar 96,3% dan mahoni 92,3% sejalan dengan penelitian Hindratmo, dkk. (2019) dan Allo (2016) yang menyatakan bahwa mahoni adalah salah satu tanaman dengan tingkat kemampuan bertahan hidup tertinggi di lahan bekas tambang, yakni mencapai 88% hingga 95%. Lebih lanjut, peningkatan kualitas tanah (Gambar 5) seperti C-organik (105%) dan N-total (167%) dalam penelitian ini mengonfirmasi hasil studi Putra, dkk. (2014) di Sumedang yang membuktikan bahwa kemampuan *Gliricidia sepium* (gamal) dalam memproduksi serasah kaya nitrogen dengan rasio C:N rendah sangat efektif memulihkan sifat fisik dan kimia tanah terdegradasi akibat aktivitas tambang. Hal ini membuktikan bahwa kombinasi spesifik gamal-mahoni lebih efektif dibandingkan dengan penanaman monokultur jenis pionir konvensional seperti sengon atau akasia yang banyak dilaporkan pada lahan tambang batubara (Setyowati dkk., 2017), terutama dalam mempercepat perbaikan pH ekstrem pada *tailing* tambang emas (Wasis & Fikri, 2021).

3.6 Evaluasi Persentase Keberhasilan Revegetasi Sistem Agroforestri

Penilaian keberhasilan revegetasi menggunakan sistem skoring Permenhut P.60/2009 menghasilkan skor total 21,8 dari 25 dengan kategori "Sangat Berhasil", mencapai 87,2% dari maksimal 25.

1. Parameter dengan pencapaian "Optimal" (skor 5):
   a. Realisasi luas area: 100% (6,74 ha sesuai target); menunjukkan komitmen penuh perusahaan.
   b. Densitas tanaman: rata-rata 2.856 pohon/ha (456% dari standar minimum 625 pohon/ha), memberikan skor 5 (>110%).
   c. Kesehatan tanaman: 91,3% dalam kondisi sehat (>90%), memperoleh skor 5.
2. Parameter dengan pencapaian "Sangat Baik" (skor 4):
   a. Persentase tumbuh (*survival rate*): rata-rata 94,2% (di kategori "Sangat Baik" 90 –95%), skor 4.
   b. Komposisi tanaman: struktur agroforestri dengan diversifikasi tinggi, persentase tanaman lokal mencapai 35% (mendekati target 40%), skor 4 (*improvement* dari sistem sebelumnya).
3. Parameter dengan pencapaian "Baik" (skor 2-3):
   a. Komposisi tanaman lokal: 35% (dibandingkan target 40%), skor 3 dan masih perlu ditingkatkan sekitar 5%.

Pencapaian skor ini melampaui persyaratan minimum regulasi (85% *survival rate*) dan merepresentasikan sistem revegetasi

berkinerja tinggi pada lahan bekas eksplorasi tambang emas di iklim tropis.

3.7 Manajemen dan *Monitoring System*

Keberhasilan sistem agroforestri gamal-mahoni bergantung pada protokol manajemen dan pemantauan yang ketat. Praktik manajemen utama meliputi:

1. Tahun 1 (*pioneer layer establishment*): penyiangan intensif 2 minggu sekali (bulan 1–3), kemudian 4–6 minggu sekali. Penyiraman di musim kemarau 2x/minggu (gamal + LCC). Pemupukan susulan bulan 3, 6, 12. Pemantauan hama/penyakit secara bulanan. Target: mencapai >90% gamal *survival*, 60–70% *ground coverage*.
2. Tahun 2 (*enrichment planting* & *transition*): penyiangan *selective* (mengutamakan area mahoni). Pemupukan mahoni spesifik pada bulan 3, 6, dan 12 *post-planting*. Pemangkasan gamal untuk membentuk tanaman dan pengumpulan biomassa. Penyulaman pada tanaman yang mati. Pemantauan pertumbuhan awal mahoni. Target: mencapai >88% gamal *survival*, >85% mahoni *survival initial*, *soil quality improvement trajectory*.
3. Tahun 3–5 (*consolidation* & *Biomass Utilization*): *pruning* dan *coppicing* gamal untuk hijauan pakan dan biofuel. Penjarangan selektif gamal untuk membuka tajuk untuk mahoni. Perawatan minimal untuk *mature pioneer layer*. Pemantauan pertumbuhan mahoni dan *soil quality trajectory*. Target: stabilitas densitas pohon, optimalisasi ruang tumbuh mahoni, dan kelanjutan perbaikan tanah.
4. Pemantauan pada *key performance indicator* (KPI) mencakup: *survival rate tracking*, *growth measurements* (tinggi, diameter), *soil parameter monitoring* (*annual*), *gamal biomass quantification* (*weighing*), *pest/disease incidence*, *ecosystem indicators* (*fauna utilization*), *financial tracking* (*intermediate income*, *cost analysis*).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem agroforestri terpadu gamal (*Gliricidia sepium*) sebagai tanaman pendukung dan mahoni (*Swietenia macrophylla*) sebagai tanaman pokok merupakan solusi optimal untuk revegetasi lahan bekas eksplorasi tambang emas di Sumbawa Barat. Sistem ini berhasil mengidentifikasi spesies adaptif dengan *survival rate* 94,2%, meningkatkan kualitas tanah secara signifikan (C-organik naik 105%, N-total naik 167%, pH meningkat 0,65), serta mengembangkan geometri penanaman adaptif berbasis topografi, sehingga mencapai skor keberhasilan 21,8/25 dengan kategori "Sangat Berhasil" sesuai kriteria Permenhut P.60/2009.

5. DAFTAR PUSTAKA

Allo, M. K. (2016). Kondisi Sifat Fisik dan Kimia Tanah pada Bekas Tambang Nikkel serta Pengaruhnya terhadap Pertumbuhan Trengguli dan Mahoni. *Jurnal Hutan Tropis*, *4*(2), 207.

Amman Mineral. (2025). *Laporan Keberlanjutan 2024 PT Amman Mineral*.

Damara, V. (2017). *Pengaruh Aplikasi Bahan Organik Daun Gamal (Gliricidia sepium (Jacq.) Kunth ex Walp.) dan Bakteri Endofit Diazotrof Terhadap Serapan Nitrogen dan Pertumbuhan Tanaman Tebu (Saccharum officinarum L.)*. Skripsi. Universitas Brawijaya. http://repository.ub.ac.id/id/eprint/5823

Dirjen PPKL. (2016). *Petunjuk Teknis Pemulihan Kerusakan Lahan Akses Terbuka Akibat Kegiatan Pertambangan*. Direktorat Pemulihan Kerusakan Lahan Akses Terbuka – Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan, Kementerian LHK.

Hasanah, U. N. (2022). Analisis Dampak Kegiatan Pertambangan Emas Terhadap Lingkungan Fisik di Desa Paningkaban Kecamatan Gumelar Kabupaten Banyumas Tahun 2021. *Indonesian Journal of Environment and Disaster (IJED)*, *1*, 18–23.

Hendriani, A. S., Sunaryo, & Widodo, M. P. (2024). Revegetasi Pemulihan Lahan Bekas Tambang Pasir melalui Pengelolaan Lansekap dengan Teknologi “Soil Block” di Desa Candimulyo Wonosobo. *Jurnal Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat UNSIQ*, *11*(1), 82–88.

Hindratmo, B., Junaidi, E., Masitoh, S., Fauzi, R., Hidayat, M. Y., & Ramadhanu. (2019). Kemampuan 11 (Sebelas) Jenis Tanaman dalam Menjerap Logam Berat Timbel (Pb). *Ecolab*, *13*(1), 29–37. https://doi.org/10.20886/jklh.2019.13.1.29-38

Hudaedi, D., Hariyadi, & Anwar, S. (2018). Potensi Gamal (Gliricidia sepium) sebagai Bahan Baku Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa Studi Kasus: Kabupaten Manggarai Timur (NTT). *Journal of Env. Engineering & Waste Management*, *3*(1), 13–20.

Izza, R. F., Nurkhamim, & Gunawan, R. (2022). Overview Pemilihan Jenis Tanaman Revegetasi Untuk Perencanaan Reklamasi Lahan Bekas Tambang Berdasarkan Riwayat Penggunaan Lahan. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XVII Tahun 2022 (ReTII)*, 306–311. http://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII

Keena, A. Z. (2025). *Evaluasi Tingkat Keberhasilan Revegetasi Umur Lima Tahun pada Lahan Tambang Batubara di Waste Dump Sembilan PT Kideco Jaya Agung Kabupaten Paser, Kalimantan Timur*. Skripsi. Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta.

Kementerian ESDM. (2018). *Keputusan Menteri ESDM Republik Indonesia Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*. Kepala Biro Hukum Kementerian ESDM.

Kementerian ESDM. (2022). *Laporan Kinerja Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara Tahun 2022*.

Kementerian Kehutanan. (2009). *Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.60/Menhut-II/2009 tentang Pedoman Penilaian Keberhasilan Reklamasi Hutan*. Kepala Biro Hukum dan Organisasi Menkumham RI.

Khairunnisa, A., Sulastri, A., & Jumiati. (2024). Penerapan Metode Enhanced Phytoremediation pada Lahan Bekas Tambang Emas Desa Tirta Kencana Kecamatan Bengkayang. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, *12*(4), 951–960.

Kurniawan, B., Duryat, Riniarti, M., & Yuwono, S. B. (2019). Kemampuan Adaptasi Tanaman Mahoni (Swietenia macrophylla) terhadap Cemaran Merkuri pada Tailing Penambangan Emas Skala Kecil. *Jurnal Sylva Lestari*, *7*(3), 359–369.

Leka, E. S. K., Fitri, Y., Wahyuni, S., & Simamora, E. (2024). Overview Metode Fitoremediasi dalam Pengelolaan Tanah Tercemar Merkuri (Hg) pada Lahan Bekas Tambang. *CHEMVIRO: Jurnal Kimia Dan Ilmu Lingkungan*, *2*(1), 106–111.

Manullang, D. W. S., Gusmini, & Rezki, D. (2021). Karakteristik Sifat Kimia Tanah dan Kandungan Merkuri pada Lahan Bekas Tambang Emas dan Lahan Perkebunan Kelapa Sawit (Elaeis Guineensis Jacq.). *Jurnal Riset Perkebunan (JRP)*, *2*(1), 1–11.

Maulidan, A., Arifin, Y. F., & Pujawati, E. D. (2020). Studi Pertumbuhan Tanaman pada Areal Pasca Tambang Dataran Tinggi di Kalimantan Selatan. *Jurnal Sylva Scienteae*, *03*(6), 983–993.

Muslim, Kadir, S., & Badaruddin. (2025). Analisis Tingkat Keberhasilan Revegetasi Lahan Bekas Tambang Batubara PT Arutmin Indonesia di Desa Riam Adungan Kecamatan Kintap Kabupaten Tanah Laut Provinsi Kalimantan Selatan. *Jurnal HutanTropis*, *13*(2), 251–260.

Pemerintah RI. (2009). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara*. Sekretariat Negara RI.

Pemerintah RI. (2010). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 78 Tahun 2010 tentang Reklamasi dan Pascatambang*. Sekretariat Negara RI.

Permana, S. P., Budi, W., & Siregar, U. J. (2023). Pertumbuhan Mahoni (Swietenia macrophylla King) pada Media Tanah Pascatambang Pasir Silika dan Pot Organik di Persemaian. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, *20*(2), 131–145.

Putra, I. N., Ginanjar, D. R., & Sandrawati, A. (2014). Evaluasi Keberhasilan Reklamasi Lahan Bekas Tambang Pasir (Galian C) dengan Tanaman Gamal (Gliricidia sepium (Jacq.) Steud) (Studi Kasus di Desa Cibeurem Wetan, Cimalaka, Sumedang, Jawa Barat). *Soilrens*, *12*(1), 41–46.

Rahayu, R. N., Sarminah, S., & Hardwinarto, S. (2024). Pertumbuhan Tanaman dan Indikator Keberhasilan Revegetasi di Areal Pasca Tambang Batubara PT Kitadin Site Embalut Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Hutan Tropika*, *19*(1), 98–107. https://doi.org/10.36873/jht.v19i1.140338

Ramadhana, D. D., Donantho, D., & Rachel, R. (2019). Penilaian Status Kesuburan Tanah pada Lahan Pascatambang di Areal PT. Trubaindo Coal Mining Kabupaten Kutai

Barat. *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, *2*(1), 24–28.

Romadhan, P., Gusmini, & Hermansah. (2022). Perbaikan Sifat Kimia Lahan Bekas Tambang Emas Melalui Aplikasi Biochar Sekam Padi dan Pupuk Kandang Ayam. *Agrotrop: Journal on Agriculture Science*, *12*(1), 99–109. https://doi.org/10.24843/AJoAS.2022.v12.i01.p09

Rusdiyanto, E., Hamzah, A. H. P., Nurhasanah, N., & Lubis, A. (2025). Revegetasi untuk Rehabilitasi Lahan Pasca-Tambang Wilayah Operasi PT Pertamina Hulu Rokan, Riau. *BIOEDUSAINS: Jurnal Pendidikan Biologi Dan Sains*, *8*(2), 207–218. https://doi.org/10.31539/bioedusains.v8i2.14886

Santi, R. A., Rezki, D., & Adrinal. (2022). Kajian Sifat Fisika Tanah Lahan Bekas Tambang Emas, Lahan Kebun Kelapa Sawit (Elaeis guineensis Jacq.), dan Hutan pada Ultisol. *Jurnal Riset Perkebunan (JRP)*, *3*(2), 77–92.

Setyowati, R. D. N., Amala, N. A., & Aini, N. N. U. (2017). Studi Pemilihan Tanaman Revegetasi untuk Keberhasilan Reklamasi Lahan Bekas Tambang. *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, *3*(1), 14–20.

Sita, F., Noor, R. H., Nurhakim, & Syafi'i, A. A. (2024). Evaluasi Reklamasi dan Revegetasi di PT Binuang Mitra Bersama Blok Dua, Tapin, Kalimantan Selatan. *JURNAL HIMASAPTA*, *9*(01), 21–28.

Sutono, S., Haryati, U., & Agus, F. (2018). Karakteristik Tanah dan Strategi Rehabilitasi Lahan Bekas Tambang Timah di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, *12*(2), 99–116.

Wasis, B., & Fikri, M. (2021). Pertumbuhan Semai Mahoni (Swietenia macrophylla) pada Media Tailing dengan Penambahan Arang Tempurung Kelapa dan Pupuk Kompos. *Jurnal Silvikultur Tropika*, *12*(3), 109–117.

Widjaja, H., & Tjahyandari, D. S. (2024). Pengaruh Revegetasi Terhadap Sifat-sifat Tanah pada Lahan Bekas Tambang Tembaga di Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Pertambangan*, *1*(1), 1–11. https://doi.org/10.70191/jplp.v1i1.54415