

PENGARUH REKLAMASI TERHADAP KESUBURAN TANAH PADA LAHAN BEKAS TAMBANG EMAS DI MINAHASA UTARA

The Effect of Reclamation on Soil Fertility in Former Gold Mining Areas in North Minahasa

Hermanu Widjaja^{1,2*}, Dyah Tjahyandari Suryaningtyas^{1,2}, Aulya Putri¹

¹Pusat Studi Reklamasi Tambang, Lembaga Riset Internasional Bidang Lingkungan dan Perubahan Iklim, Kampus IPB Baranangsiang, 16143

²Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB University, Dramaga, Bogor 16680

*Korespondensi: hermanuwi@apps.ipb.ac.id

Received 05 Desember 2024, Revised 09 Desember 2024; Accepted 31 Januari 2025

Abstract

Gold mining activities play a significant role in Indonesia's economy but also present challenges such as land degradation and environmental pollution. Reclamation efforts are crucial to restore ecological function and soil productivity in former mining areas. This study analyzed the effects of reclamation and revegetation on soil fertility in former gold mining areas managed by PT Tambang Tondano Nusajaya (PT TTN) and PT Meares Sopotan Mining (PT MSM) in North Minahasa. Soil samples were collected from revegetated areas aged 2–10 years and compared with undisturbed forest soils. Physical properties (texture, bulk density, porosity) and chemical properties (pH, organic C, total N, total P, available P, cation exchange capacity (CEC), and base saturation) were analyzed. The results showed that the soils in revegetated areas had low to moderate bulk density and porosity values, and their chemical properties were characterized by very low to low organic C and total N, low to high CEC, and very high base saturation. Soil texture with dominant proportions of sand remained unchanged due to its permanent feature. Despite ongoing revegetation, the fertility of soils in reclaimed areas remained below undisturbed forest soils, with no significant improvements observed over the revegetation period. These findings emphasize the need for additional soil ameliorants to enhance soil quality and fertility in mine reclamation.

Keywords: Reclamation, Revegetation, Soil Fertility, Gold Mining.



PENDAHULUAN

Sektor pertambangan emas merupakan salah satu sumber utama pendapatan negara. Indonesia dikenal sebagai salah satu negara penghasil emas utama di dunia, dengan cadangan emas mencapai 2.600 metrik ton, menjadikannya negara dengan cadangan emas terbesar keenam setelah Australia, Rusia, Afrika Selatan, China, dan Amerika Serikat (USGS, 2024). Cadangan emas yang melimpah ini tidak hanya memberikan kontribusi besar terhadap perekonomian nasional, tetapi juga menciptakan lapangan pekerjaan di berbagai daerah penghasil emas. Namun, aktivitas pertambangan emas juga membawa tantangan serius, seperti degradasi lahan dan pencemaran lingkungan yang memerlukan perhatian khusus dalam pengelolaannya. Lahan bekas tambang emas seringkali kehilangan kesuburan akibat hilangnya lapisan tanah atas (*topsoil*) dan terkontaminasi oleh limbah tambang, seperti logam berat dan senyawa kimia berbahaya. Tanah bekas tambang emas menghadapi berbagai permasalahan kimiawi, seperti tingkat keasaman (pH) yang rendah, minimnya kandungan bahan organik, serta rendahnya unsur hara (Gusmini *et al.*, 2021). Penurunan kualitas tanah ini berdampak pada kemampuan lahan untuk mendukung vegetasi, yang pada akhirnya memengaruhi ekosistem dan kehidupan masyarakat di sekitarnya. Oleh karena itu, reklamasi lahan bekas tambang menjadi langkah krusial untuk mengembalikan fungsi ekologis dan produktivitas tanah.

Reklamasi lahan bekas tambang merupakan serangkaian upaya pemulihan yang bertujuan untuk mengurangi dampak negatif yang diakibatkan oleh aktivitas penambangan, sekaligus mengembalikan fungsi ekologis dan produktivitas lahan. Proses reklamasi mencakup persiapan lahan, pengendalian erosi dan sedimentasi, pengelolaan tanah pucuk, serta revegetasi. Pengelolaan tanah secara intensif, meliputi perbaikan struktur tanah dan aplikasi bahan amelioran juga menjadi langkah krusial dalam proses reklamasi. Lahan bekas tambang emas pada lokasi penelitian mengalami berbagai kerusakan seperti hilangnya vegetasi, rusaknya struktur tanah, dan rendahnya kesuburan tanah. Untuk mengatasi hal tersebut, PT Tambang Tondano Nusajaya (PT TTN) dan PT Meares Sopotan Mining (PT MSM), yang merupakan anak perusahaan PT Archi Indonesia di Kabupaten Minahasa Utara, Sulawesi Utara, telah melaksanakan berbagai upaya reklamasi dan revegetasi untuk memperbaiki kualitas lahan, iklim mikro dan pemulihan keanekaragaman hayati yang terganggu akibat kegiatan operasional penambangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh reklamasi dan revegetasi yang dilakukan oleh PT TTN dan PT MSM terhadap peningkatan kesuburan tanah di area bekas tambang emas di Kabupaten Minahasa Utara.

METODE PENELITIAN

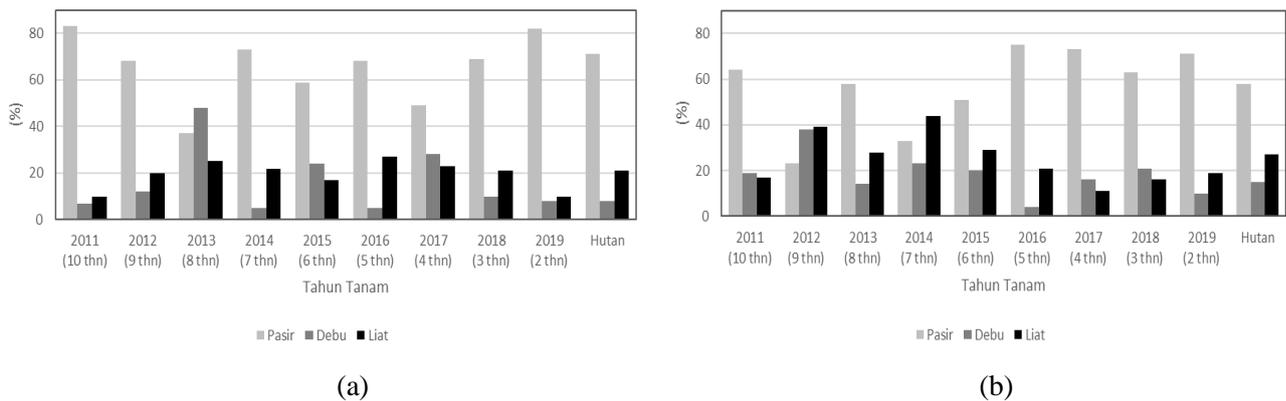
Penelitian dilaksanakan pada bulan November hingga Desember 2024 meliputi analisis dan interpretasi data serta studi pustaka. Bahan yang digunakan merupakan data laboratorium hasil pengamatan tanah kawasan revegetasi lahan bekas tambang PT Tambang Tondano Nusajaya (PT TTN) dan PT Meares Sopotan Mining (PT MSM) yang terletak di Pinenek, Likupang Timur, Kabupaten Minahasa Utara, Sulawesi Utara. Pengamatan dilakukan berdasarkan kelas umur tanaman revegetasi, mulai dari 1 tahun (tahun tanam 2019) hingga 9 tahun (tahun tanam 2011), serta data pengamatan tanah kawasan hutan sebagai pembanding. Parameter fisik tanah yang diamati meliputi kelas tekstur, bobot isi, dan porositas, serta parameter sifat kimia meliputi pH, C-organik, N-total, P-total, P-tersedia, kapasitas tukar kation (KTK), K-dd, Na-dd, Ca-dd, Mg-dd, dan kejenuhan basa (KB) pada tanah lapisan atas (0-30 cm) dan lapisan bawah (30-60 cm). Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel 2021.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat fisik tanah pada lahan bekas tambang

Tekstur tanah

Areal revegetasi PT TTN dan PT MSM secara umum memiliki komposisi tekstur tanah yang didominasi oleh kadar pasir yang cukup tinggi sebagaimana kondisi alami di kawasan hutan, diikuti oleh kadar liat dan debu yang menghasilkan tekstur Lempung berpasir (*Sandy loam*), Pasir berlempung (*Loamy sand*), Lempung (*Loam*) atau Lempung liat berpasir (*Sandy clay loam*) (Gambar 1). Tekstur tanah menentukan kemampuan tanah dalam menyimpan air dan nutrisi, tingkat aerasi, serta drainase. Tekstur tanah yang didominasi oleh pasir cenderung memiliki drainase yang baik tetapi rendah dalam kapasitas menahan air dan nutrisi.

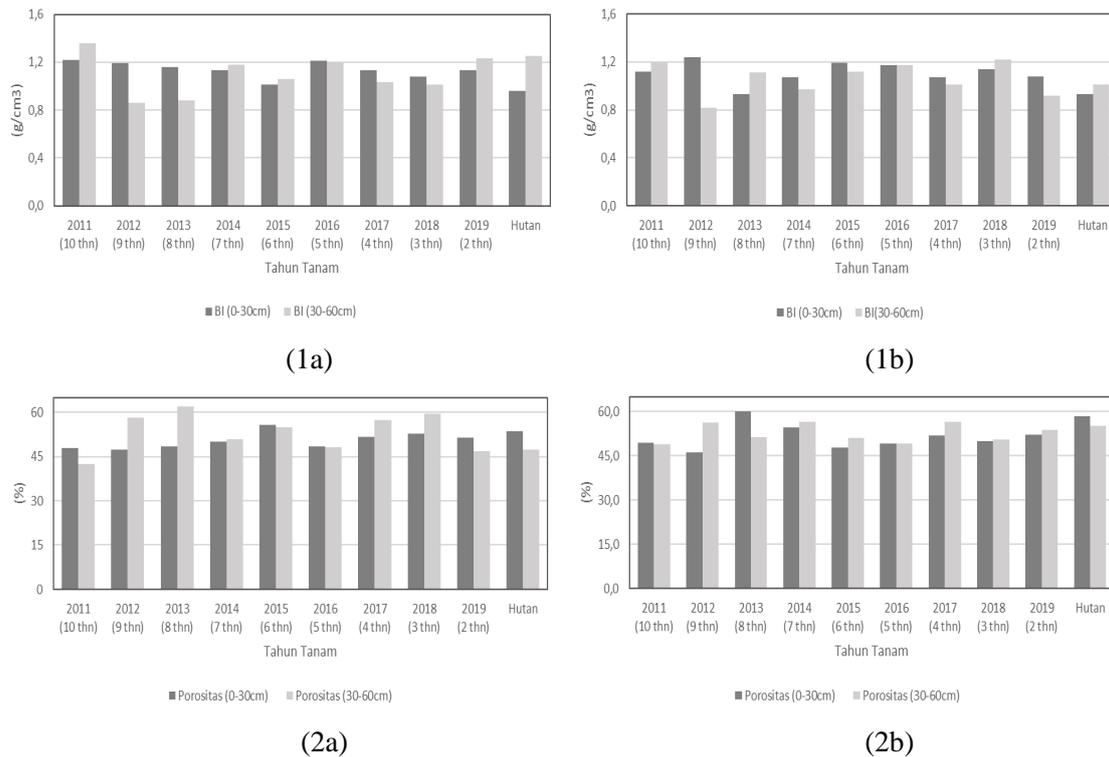


Gambar 1 Perbandingan tekstur pada kawasan revegetasi PT TTN (a) dan PT MSM (b)

Hasil analisis tanah pada kawasan revegetasi dengan umur 2-10 tahun tidak menunjukkan perubahan tekstur yang signifikan sebab tekstur tanah merupakan sifat tanah yang relatif permanen dan sukar untuk diperbaiki. Sebagaimana disebutkan oleh Moorberg & Crouse (2021) bahwa tekstur tanah merupakan sifat yang permanen pada tanah. Namun terdapat perbedaan pada kawasan revegetasi PT TTN tahun 2013 dengan tekstur debu yang lebih dominan dan PT MSM tahun 2012 dan 2014 dengan tekstur liat yang lebih dominan. Perbedaan tekstur tanah di beberapa kawasan dapat disebabkan oleh variasi komposisi tanah pucuk. Perusahaan tambang seringkali mencampur atau memindahkan tanah pucuk dari lokasi lain apabila kondisi tanah pucuk asli tidak memadai, seperti jumlah yang terbatas atau tercemar. Hal ini dilakukan untuk memastikan keberhasilan reklamasi lahan bekas tambang, sebab tanah pucuk berperan penting dalam meningkatkan infiltrasi, media perakaran tanaman, meningkatkan siklus nutrisi, dan produktivitas lahan (Bowen *et al.*, 2005).

Bobot isi dan porositas tanah

Bobot isi tanah (*bulk density*) adalah indikator kepadatan tanah, dimana semakin padat suatu tanah maka semakin tinggi bobot isinya. Sementara itu, porositas tanah mengacu pada ruang pori dalam tanah yang tidak terisi oleh bahan padat, melainkan oleh air dan udara. Porositas tanah berbanding terbalik dengan bobot isi tanah, semakin tinggi nilai porositas tanah maka semakin rendah nilai bobot isinya. Tanah dengan bobot isi tinggi dapat menghambat sirkulasi air dan udara serta menghambat perkembangan akar tanaman. Hasil analisis bobot isi tanah lapisan atas pada kawasan revegetasi PT TTN berkisar antara 1,01 – 1,22 g/cm³ dan lapisan bawah tanah berkisar antara 0,88 – 1,36 g/cm³ yang tergolong rendah hingga sedang. Porositas tanah berkisar antara 47,4–55,6% (lapisan atas) dan 42,5–61,8% (lapisan bawah) yang tergolong sedang. Kawasan revegetasi PT MSM memiliki bobot isi lapisan atas berkisar antara 0,93 – 1,24 g/cm³ dan lapisan bawah tanah berkisar antara 0,82 – 1,22 g/cm³ yang tergolong rendah hingga sedang. Porositas tanah berkisar antara 46,1–59,9% (lapisan atas) dan 48,9–56,5% (lapisan bawah) yang tergolong sedang.



Gambar 2 Nilai bobot isi tanah pada kawasan revegetasi PT TTN (1a) dan PT MSM (1b), nilai porositas tanah pada kawasan revegetasi PT TTN (2a) dan PT MSM (2b).

Hasil analisis menunjukkan bahwa kawasan revegetasi pada kedua perusahaan tersebut memiliki kategori yang sama pada bobot isi dan porositas tanah, tanpa adanya perubahan signifikan pada bobot isi maupun porositas tanah dengan semakin bertambahnya umur revegetasi (**Error! Reference source not found.**). Namun nilai bobot isi tanah lapisan atas pada kawasan revegetasi sedikit lebih tinggi dibandingkan pada kawasan hutan, hal ini disebabkan oleh terjadinya pemadatan tanah akibat penggunaan alat berat dalam proses reklamasi (Sofyan *et al.*, 2017). Syakur *et al.*, (2024) menyebutkan bahwa penurunan nilai porositas tanah pada lahan bekas tambang berkaitan erat dengan peningkatan bobot isi tanah yang menyebabkan pemadatan tanah. Selain itu kegiatan deforestasi pada kawasan tambang juga menyebabkan hilangnya sumber bahan organik yang berdampak pada pemadatan tanah dan peningkatan bobot isi tanah. Menurut penelitian Mgelwa *et al.*, (2025), deforestasi dapat menyebabkan peningkatan bobot isi tanah secara signifikan hingga 27%, yang berujung pada pemadatan tanah.

Sifat kimia tanah pada lahan bekas tambang

pH dan kejenuhan basa

Hasil analisis sifat kimia tanah pada kawasan revegetasi PT TTN menunjukkan pH berkisar agak masam hingga netral dan kejenuhan basa (KB) tanah tergolong sangat tinggi (>80%). Sementara itu pH tanah di kawasan revegetasi PT MSM bervariasi dari sangat masam hingga netral, dengan nilai kejenuhan basa (KB) tanah yang umumnya tergolong tinggi hingga sangat tinggi (>80%) (Tabel 1, Tabel 2). Nilai pH tanah pada kawasan revegetasi PT TTN dan PT MSM tidak menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara lapisan atas (0-30 cm) dan lapisan bawah (30-60 cm).

Tabel 1 Nilai pH tanah pada kawasan revegetasi PT TTN dan PT MSM

Tahun	pH PT TTN		pH PT MSM	
	(0-30 cm)	(30-60 cm)	(0-30 cm)	(30-60 cm)
2011 (10 thn)	6,8	6,8	6,0	5,2
2012 (9 thn)	6,7	6,6	5,5	5,6
2013 (8 thn)	6,9	7,4	7,1	6,8
2014 (7 thn)	6,7	6,8	4,3	3,5
2015 (6 thn)	6,4	6,6	6,5	6,4
2016 (5 thn)	6,5	6,6	6,3	6,2
2017 (4 thn)	6,7	6,5	6,5	4,3
2018 (3 thn)	6,7	7,3	5,0	7,3
2019 (2 thn)	6,9	7,1	6,8	6,7
Hutan	6,7	6,6	6,0	5,2

Kejenuhan basa (KB) adalah persentase jumlah kation basa (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan Na^+) terhadap total kation (kation asam dan basa) dalam kompleks jerapan tanah (Sembiring *et al.*, 2016). Dalam penelitian ini, peningkatan umur revegetasi mencerminkan peningkatan KB di beberapa kawasan revegetasi, namun tidak diikuti oleh peningkatan pH tanah. Hal ini dapat terjadi sebab tanah pada lahan reklamasi memiliki karakteristik yang sangat beragam baik secara lateral maupun vertikal akibat pencampuran tanah selama proses penambangan dan pengelolaan tanah pucuk.

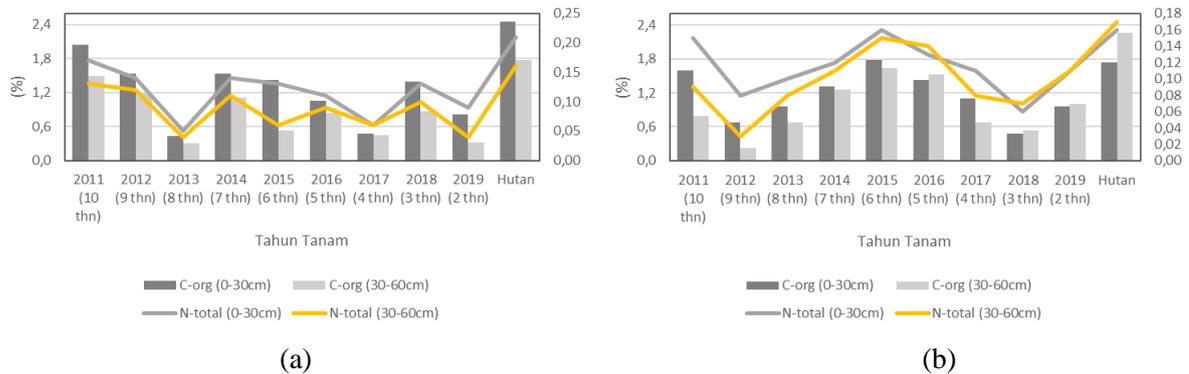
Tabel 2 Nilai KB pada kawasan revegetasi PT TTN dan PT MSM

Tahun	KB (%) PT TTN		KB (%) PT MSM	
	(0-30 cm)	(30-60 cm)	(0-30 cm)	(30-60 cm)
2011 (10 thn)	93	91	78	64
2012 (9 thn)	90	88	70	72
2013 (8 thn)	98	>100	>100	93
2014 (7 thn)	87	88	62	53
2015 (6 thn)	83	87	84	80
2016 (5 thn)	84	87	77	75
2017 (4 thn)	86	84	81	59
2018 (3 thn)	85	>100	62	>100
2019 (2 thn)	94	>100	91	87
Hutan	85	85	76	73

C-organik dan N-total

Menurut kriteria kesuburan tanah BPSI Tanah dan Pupuk (2023), hasil analisis menunjukkan bahwa kawasan revegetasi PT TTN memiliki kandungan C-organik dan N-total yang tergolong sangat rendah hingga rendah, baik pada lapisan atas maupun lapisan bawah. Sebagai perbandingan, hutan alami di area PT TTN memiliki kandungan C-organik yang lebih tinggi, berada dalam kategori sedang, sedangkan kandungan N-totalnya sedikit lebih baik tetapi tetap rendah. Sementara itu, kawasan revegetasi PT MSM juga menunjukkan pola serupa, dengan kandungan C-organik dan N-total pada lapisan atas dan bawah yang sebagian besar masuk dalam kategori sangat rendah hingga rendah. Hutan alami di area PT MSM memiliki kandungan C-organik yang lebih tinggi dibandingkan kawasan revegetasi, dengan nilai yang lebih stabil pada kedua lapisan tanah, meskipun kandungan N-totalnya tetap rendah. Perbedaan ini menunjukkan bahwa tanah di kawasan revegetasi cenderung memiliki

kualitas kimia yang lebih rendah dibandingkan tanah di hutan alami dapat dipengaruhi oleh tanah yang terdegradasi akibat aktivitas pertambangan.



Gambar 3 Nilai C-organik dan N-total pada kawasan revegetasi PT TTN (a) dan PT MSM (b).

Berdasarkan Gambar 3 diketahui tidak adanya kecenderungan peningkatan kadar C-organik dan N-total di areal revegetasi seiring dengan bertambahnya umur tanaman, sebab tren yang terbentuk cenderung beragam pada setiap umur revegetasi. Variasi komposisi tanah pucuk serta tingkat pemadatan tanah dapat mempengaruhi kecepatan pemulihan vegetasi yang berkontribusi terhadap pembentukan bahan organik tanah. Selain itu rendahnya kadar C-organik dalam tanah juga dapat disebabkan oleh kondisi lingkungan atau tingkat mineralisasi bahan organik. Sementara itu, rendahnya kadar N-total diakibatkan oleh sifat nitrogen yang sangat mobil di dalam tanah, sehingga mudah hilang melalui proses nitrifikasi, volatilisasi, serta pencucian yang terbawa oleh aliran air (Putri *et al.*, (2023). Secara umum, kandungan C-organik dan N-total di areal revegetasi masih lebih rendah dibandingkan dengan kondisi hutan alami.

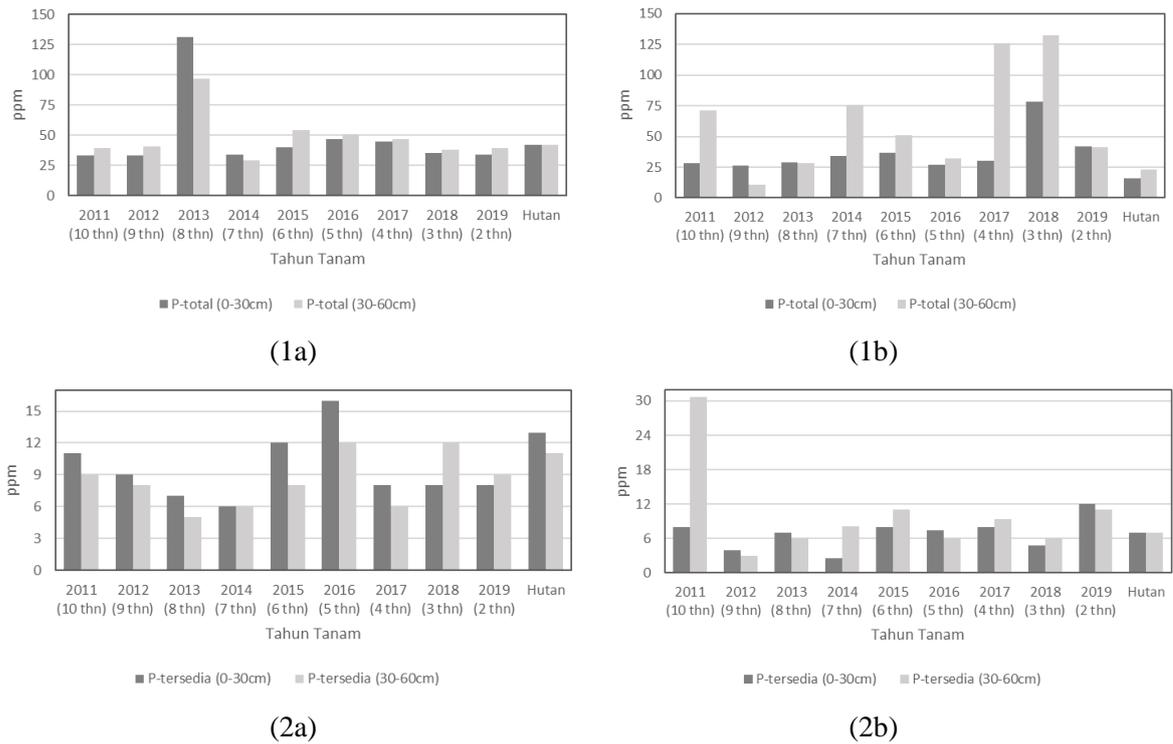
P-total dan P-tersedia

Hasil analisis di areal revegetasi PT TTN menunjukkan bahwa kandungan P₂O₅ total (ekstraksi HCl 25%) bervariasi dari kategori sedang hingga sangat tinggi, yaitu sebesar 33–131 mg P₂O₅/100 g. Sementara itu, kandungan P-tersedia sangat bervariasi, mulai dari kategori rendah hingga sangat tinggi, yaitu 5–16 ppm P₂O₅. Kemudian pada areal revegetasi PT MSM, analisis menunjukkan bahwa kandungan P₂O₅ total pada lapisan atas berkisar antara sedang hingga sangat tinggi, yaitu 26–78 mg P₂O₅/100 g, sedangkan pada lapisan bawah kandungannya bervariasi dari kategori rendah hingga sangat tinggi, yaitu 11–132 mg P₂O₅/100 g. Kandungan P-tersedia juga sangat bervariasi, mulai dari kategori sangat rendah hingga sangat tinggi, yaitu 3–30,7 ppm P₂O₅ ((2a)

(2b)

Gambar 4).

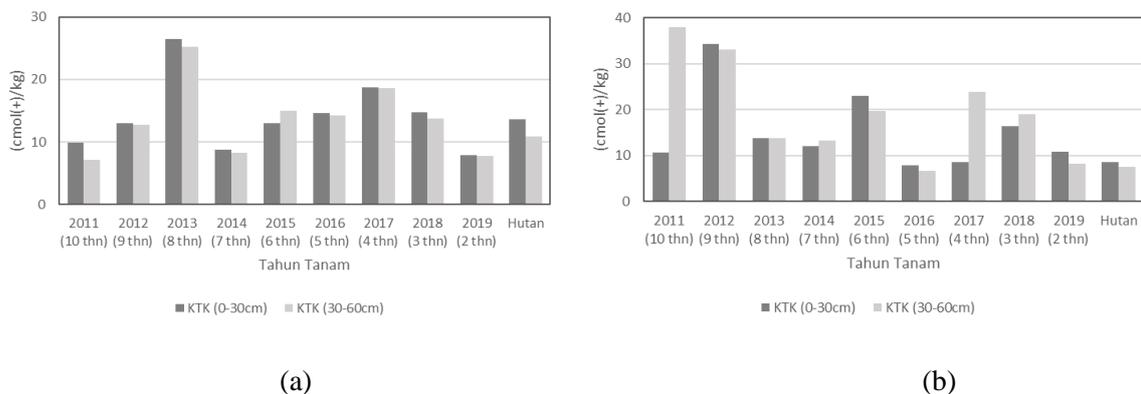
Ketersediaan P dalam tanah sangat dipengaruhi oleh tingkat keasaman tanah. Pada tanah yang masam, sebagian besar P akan terikat oleh aluminium (Al) dan besi (Fe), sehingga P menjadi tidak tersedia bagi tanaman (Ibrahim *et al.*, 2022). Secara umum, tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara kandungan P total di areal revegetasi dibandingkan dengan kondisi hutan, sehingga peningkatan umur revegetasi tidak dapat mencerminkan peningkatan P-tersedia tanah. Namun pada beberapa kawasan ditemukan kandungan P sangat tinggi, seperti P-tersedia di lapisan bawah kawasan PT MSM tahun 2011, serta kandungan P total di lapisan bawah kawasan PT MSM tahun 2017–2018 dan PT TTN tahun 2013 yang menunjukkan nilai sangat tinggi. Hal ini dapat terjadi sebab karakteristik tanah di kawasan reklamasi yang sangat beragam baik secara lateral maupun vertikal akibat pencampuran tanah selama proses penambangan dan pengelolaan tanah pucuk.



Gambar 4 Nilai P-total tanah pada kawasan revegetasi PT TTN (1a) dan PT MSM (1b), nilai P-tersedia tanah pada kawasan revegetasi PT TTN (2a) dan PT MSM (2b).

Kapasitas tukar kation

Kapasitas tukar kation (KTK) berhubungan linier dengan kesuburan tanah dan ketersediaan hara bagi tanaman. Semakin tinggi nilai KTK suatu tanah, semakin besar kemampuannya untuk menyerap, mempertahankan, dan mempertukarkan hara yang terkandung di dalamnya. Hasil analisis pada area revegetasi PT TTN menunjukkan bahwa KTK bervariasi antara 7,14–26,52 cmol(+)/kg, sementara pada area revegetasi PT MSM nilai KTK bervariasi antara 6,65–38,05 cmol(+)/kg (Gambar 5). Berdasarkan BPSI Tanah dan Pupuk (2023), KTK pada kedua area revegetasi tergolong rendah hingga tinggi.



Gambar 5 Nilai KTK pada kawasan revegetasi PT TTN (a) dan PT MSM (b)

Pada penelitian ini pengaruh peningkatan umur revegetasi terhadap KTK tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Terdapat variasi nilai KTK tanah pada kawasan revegetasi PT TTN dan PT MSM, dengan nilai KTK lapisan atas (0-30 cm) tertinggi terdapat pada tahun 2013 di PT TTN dan 2012 di PT MSM. Variasi nilai KTK tanah dapat terjadi akibat karakteristik tanah di kawasan reklamasi yang sangat beragam. Penelitian oleh Herman *et al.*, (2024), menyatakan bahwa KTK tanah bekas tambang

bervariasi tergantung pada umur revegetasi, di mana pengaruh revegetasi terhadap KTK terlihat jelas pada kawasan dengan umur revegetasi lebih dari 10 tahun. Seiring dengan bertambahnya umur revegetasi, akumulasi bahan organik dalam tanah meningkat dan menyumbang muatan negatif yang berperan dalam meningkatkan KTK tanah.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Secara umum, tingkat kesuburan tanah di area revegetasi PT TTN dan PT MSM tergolong rendah, ditandai oleh kandungan C-organik yang sangat rendah hingga rendah, N-total yang sangat rendah hingga rendah, serta KTK tanah yang rendah. Secara fisik, tanah di lokasi penelitian memiliki tekstur yang didominasi oleh pasir dengan bobot isi dan porositas sedang, yang berpengaruh terhadap kapasitas tanah menyimpan air dan nutrisi. Di sisi lain, beberapa karakteristik kimia tanah menunjukkan kondisi yang relatif lebih baik, yaitu pH yang berkisar antara agak masam hingga netral, kadar P-tersedia yang sangat bervariasi dari rendah hingga sangat tinggi, serta kejenuhan basa (KB) yang tergolong sangat tinggi (>80%). Namun, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan umur revegetasi belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perbaikan kesuburan tanah di area revegetasi PT TTN dan PT MSM.

Saran

Untuk mencapai pertumbuhan tanaman yang optimal kegiatan reklamasi dan revegetasi perlu diiringi dengan penambahan bahan pembenah tanah seperti pupuk organik (kompos, pupuk kandang dll) ataupun bahan amelioran lainnya yang dapat meningkatkan kualitas dan kesuburan tanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada PT Tambang Tondano Nusajaya (PT TTN) dan PT Meares Soputan Mining (PT MSM) anak perusahaan dari PT Archi Indonesia selaku mitra dalam penelitian

DAFTAR PUSTAKA

- Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk. (2023). *Petunjuk Teknis: Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk* (3rd ed.). Balai Penelitian Tanah.
- 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. <https://doi.org/10.1080/15324980590951441>
- Gusmini, Adrinal, Yaherwandi, Putri, E. L., & Panji, R. (2021). Improvement of nutrient status in ex-gold mining land with the application of rice terra preta biochar technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 741(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/741/1/012031>
- Herman, W., Iskandar, I., Budi, S. W., Pulunggono, H. B., Syaputra, A., & Kurniati, K. (2024). Variation in soil characteristics of ex-coal mining areas in Sawahlunto, West Sumatra. *BIO Web of Conferences*, 99, 05010. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249905010>
- Ibrahim, M., Iqbal, M., Tang, Y.-T., Khan, S., Guan, D.-X., & Li, G. (2022). Phosphorus Mobilization in Plant–Soil Environments and Inspired Strategies for Managing Phosphorus: A Review. *Agronomy*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102539>

- Mgelwa, A. S., Ngaba, M. J. Y., Hu, B., Gurmesa, G. A., Mwakaje, A. G., Nyemeck, M. P. B., Zhu, F., Qiu, Q., Song, L., Wang, Y., Fang, Y., & Rennenberg, H. (2025). Meta-analysis of 21st century studies shows that deforestation induces profound changes in soil characteristics, particularly soil organic carbon accumulation. *Forest Ecosystems*, *12*, 100257. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100257>
- Moorberg, C. J., & Crouse, D. A. (2021). *Soils Laboratory Manual*. New Prairie Press. <https://kstatelibraries.pressbooks.pub/soilslabmanual/>
- Putri, A., Iskandar, I., Oktariani, P., & Limin, A. (2023). Effect of Coal Ash Enriched Compost on Soil Chemical Properties of Ultisols. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1266*(1), 012076. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1266/1/012076>
- Sembiring, I. S., Wawan, & Khoiri, M. A. (2016). SIFAT KIMIA TANAH DYSTRUDEPTS DAN PERTUMBUHAN AKAR TANAMAN KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis* Jacq.) YANG DIAPLIKASI MULSA ORGANIK *Mucuna bracteata*. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Pertanian*, *2*(2), Article 2.
- Sofyan, R. H., Wahjunie, E. D., & Hidayat, Y. (2017). Karakterisasi Fisik Dan Kelembaban Tanah Pada Berbagai Umur Reklamasi Lahan Bekas Tambang. *Buletin Tanah Dan Lahan*, *1*(1), Article 1.
- Syakur, S., Zaitun, Z., Darusman, D., & Siagian, G. (2024). Improving the Physical Properties of Ex-Coal Mining Soil Planted with Sweet Corn (*Zea mays saccharata* L.) Using Pine Wood and Sawdust Biochar. *Media Konservasi*, *29*, 540. <https://doi.org/10.29244/medkon.29.4.540>
- USGS. (2024). *Mineral Commodity Summaries | Gold Statistics and Information*. U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/gold-statistics-and-information>