

KENDALA SIFAT-SIFAT KIMIA DAN FISIK TANAH TERHADAP PERTUMBUHAN TANAMAN REVEGETASI DI LAHAN BEKAS TAMBANG NIKEL

*Constraints of chemical and physical properties of soil on the growth of
revegetation plants on ex-nickel mining land*

**Iskandar^{1,3*}, D.P.T. Baskoro^{1,3}, S.W. Budi^{2,3}, I. Gozali³, Suwardi^{1,3}, H. Wijaya^{1,3}, A.A. Kurnia⁴,
Mustajir⁴**

¹Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB

²Departemen Silvikultur, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB

³Pusat Studi Reklamasi Tambang, Lembaga Riset Internasional Lingkungan dan Perubahan Iklim, IPB

⁴PT Gag Nickel Kabupaten Raja Ampat Provinsi Papua Barat Daya

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

Received 08 Mei 2024, Revised 08 July 2024; Accepted 31 July 2024

Abstract

The chemical and physical properties of top soil as a planting medium in ex-mining land reclamation areas play an important role in supporting successful revegetation. This study aims to study the physical and chemical properties of top soil in the reclamation area of a former nickel mine which is thought to be a factor inhibiting plant growth. Undisturbed and disturbed soil samples were taken at depths of 0-30 cm and 30-60 cm in the reclamation area and in the natural environment. Soil sample analysis includes: pH (H₂O and KCl 1N extract), organic-C, total-N, available-P and total-P potential, cation exchange capacity (CEC), base saturation, micro nutrients, texture, bulk density, permeability, and pF curve. Soil biological properties are represented by the number of mycorrhiza parameters. Several plant leaf samples were also taken for analysis of N P K Ca Mg S and micronutrient content. The results of the analysis of soil and plant leaves were compared with the results of analysis of soil and plant leaves taken outside the mining area where the soil developed from different parent materials. The results of the analysis showed that the soil in the reclamation area has several anomalous properties that cause the growth of revegetation plants to be hampered: the soil pH is classified as slightly acidic to neutral, but has a variable charge depending on pH with a positive net charge, very low soil CEC, very low exch.-K, exch.-Ca/Mg ratio less than 1, levels of elements that are potentially toxic to plants are quite high, and the distribution of soil particles is dominated by silt size. These properties are closely related to iron oxides in the soil as a result of chemical weathering of ferromagnesian minerals contained in ultramafic rocks which are the parent material of the soil.

Keywords: ultramafic rocks, mycorrhiza, variable charge, iron oxide, reclamation of ex-mining land



PENDAHULUAN

Berkembangnya industri kendaraan listrik yang dinilai lebih ramah lingkungan karena menggunakan betere sebagai sumber energi telah memicu meningkatnya industri pertambangan Ni di Indonesia yang memiliki cadangan sekitar 72 juta ton Ni atau 52% dari total cadangan dunia. Sebagian besar (90%) cadangan Ni di Indonesia menyebar di daerah Sulawesi Tengah, Sulawesi Selatan, Sulawesi Tenggara dan Maluku Utara (KESDM 2020). Keberadaan Ni di wilayah tersebut erat kaitannya dengan formasi-formasi geologi yang tersusun dari batuan beku ultramafik. Batuan beku ini tersusun terutama dari mineral-mineral mafik berwarna gelap atau ferromagnesian dengan kandungan Fe dan Mg yang tinggi (Wyllie 1969). Batuan utama ultramafik adalah dunit (mengandung terutama olivin), peridotit (olivin dan piroksen) dan piroksenit (piroksen). Mineral-mineral ferromagnesian mengkristal dalam lelehan magma pada suhu yang tinggi (Perkins 2022), yaitu ketika magma masih kaya dengan berbagai unsur, termasuk Ni, Cr, Co, dll. Olivin mengkristal pada suhu 1200-1300 °C (Leeman & Scheidegger 1977) dan piroksen pada 1100-1300°C (Bouquain et al. 2014). Konsekuensi dari suhu kristalisasi yang tinggi tersebut, maka ketika berada di atau dekat permukaan bumi mineral-mineral ferromagnesian akan sangat mudah mengalami pelapukan kimia (Perkins 2022). Khusus untuk daerah tropika basah proses pelapukan batuan ultramafik akan lebih dipercepat lagi karena curah hujan yang tinggi. Pada tahap awal proses pembentukan tanah dari batuan ultramafik mineral klei yang banyak ditemukan adalah khlorit primer, smektit dan khlorit sekunder (Alexander et al. 1985). Dengan berlanjutnya proses pelapukan dan pencucian yang semakin intensif ditemukan produk-produk degradasi berupa mineral sekunder dengan kristalisasi buruk smektit, kaolinit, haloisit, dan oksida-oksida besi goetit dan hematit (Huang 1989). Meskipun kadar Al dalam batuan ultramafik sedikit namun gipsit juga umum ditemukan pada tanah-tanah yang mengalami tingkat pencucian kuat. Pada kondisi tingkat pencucian ini kromium berakumulasi bersama-sama dengan Fe dan Al (Alexander et al. 1985).

Hasil pelapukan intensif dari batuan ultramafik diantaranya menghasilkan tanah ordo Oksisol. Tanah ordo ini dicirikan oleh keberadaan horison bawah oksik, yaitu horison yang memiliki sifat-sifat kimia dan mineralogi yang mencerminkan tingkat pelapukan lanjut dan kapasitas tukar kation (KTK) klei kurang dari 16 cmol(+)kg⁻¹ (Soil Survey Staff 2022). Buurman dan Soepraptohardjo (1980) mendiskusikan beberapa Oksisol yang dijumpai di Indonesia. Oksisol dari Peleihari, Kalimantan Selatan memiliki kadar klei yang sedikit yang terjadi karena tidak sempurnanya proses dispersi pada saat penetapan tekstur akibat agregasi partikel-partikel yang kuat oleh oksida-oksida besi. Oksisol Peleihari juga memiliki KTK sangat rendah dan muatan permanen mendekati nol pada horison B. Fraksi kleinya tersusun terutama dari goetit, hematit dan gipsit dengan sejumlah kecil kaolinit. Widiatmaka et al. (2010) menemukan Oksisol dan Alfisol yang memiliki cadangan kesuburan alami rendah di daerah sekitar tambang nikel Pomalaa.

Keunikan ekologi dan kesuburan tanah yang berkembang dari batuan ultramafik telah menarik perhatian sejumlah peneliti, diantaranya Whittaker (1954); Proctor and Woodell (1975); Brady et al. (2005); Chiarucci & Baker (2007), Konečná et al. (2020) dan lain-lain. Untuk Indonesia tumbuhan endemik yang tumbuh di tanah ultramafik di-review oleh Sudarmono (2007). Para penulis umumnya menjelaskan bahwa tumbuhan di lokasi-lokasi seperti ini tumbuh lebih kecil karena harus beradaptasi dengan kondisi tanah yang miskin hara, defisiensi Ca dan kelebihan Mg, Ni, Cr, dan lain-lain.

Kegiatan penambangan tidak terlepas dari kewajiban melakukan reklamasi di area-area yang kegiatan penambangannya telah dinyatakan selesai. Setelah dilakukan penataan pada lahan bekas tambang, maka pada bagian permukaannya ditaburkan "tanah pucuk" yang berperan sebagai media tanam untuk tanaman revegetasi (Iskandar et al. 2022a,b; Pratiwi et al. 2021). Oleh sebab itu sukses revegetasi sangat tergantung kepada bagaimana "tanah pucuk" dapat berperan sebagai media tanam dan menyediakan hara secara cukup dan berimbang untuk tumbuh dan berkembangnya tanaman revegetasi. "Tanah pucuk" adalah tanah yang dikupas pada saat awal kegiatan penambangan akan dimulai, dan dikumpulkan di suatu tempat aman untuk digunakan kembali pada kegiatan reklamasi. Menurut SNI 6621:2016 yang dimaksud dengan "tanah pucuk" dalam definisi ini adalah campuran bahan tanah yang berasal dari horison A, B dan bisa juga C bila horison C dianggap dapat berperan sebagai media tanam (Pratiwi et al. 2021). Karena horison B pada Oksisol merupakan horison oksik yang memiliki KTK sangat rendah dan muatan partikelnya mendekati nol, maka menjadi pertanyaan apakah "tanah pucuk" di lokasi tambang Nikel masih dapat mendukung pertumbuhan tanaman dengan baik? Padahal seperti dijelaskan di atas tumbuhan endemik di lokasi alami saja tumbuhnya merana karena kekurangan hara.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari sifat-sifat kimia-fisik “tanah pucuk” yang dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman revegetasi di area bekas tambang Nikel.

METODE

Kondisi Umum Lokasi Kajian

Kajian dilakukan di tambang nikel P. Gag yang berlokasi di wilayah Indonesia bagian timur. Berdasarkan data Kabupaten Raja Ampat dalam Angka 2019-2023 curah hujan (CH) rata-rata tahunan yang jatuh di lokasi ini sebesar 3.236 mm dengan jumlah hari hujan rata-rata tahunan sebanyak 225.4 hari (BPS Kabupaten Raja Ampat 2019-2023). Bulan basah (bulan dengan CH > 200 mm) berlangsung dari April hingga November dan sisanya merupakan bulan lembab (bulan dengan CH 100-200 mm). Pola curah hujan semacam ini digolongkan sebagai B1 menurut klasifikasi iklim Oldeman dan Af menurut klasifikasi iklim Köppen.

Menurut Supriatna et al. (1995) secara geologi lokasi kajian ini tersusun dari batuan ultramafik berupa harzburgit, dunit, piroksenit, diabas dan serpentinit. Formasi geologi ini menempati 2/3 dari bagian pulau. Sisanya di bagian utara pulau dijumpai anggota batuan gunungapi Formasi Rumai yang tersusun dari lava bantal, breksi, tuf, batu gamping dan andesit. Menurut Balitbangtan (2018) jenis tanah yang berkembang di lokasi kajian adalah Kambisol Eutrik (Typic Eutrudepts) dan Kambisol Distrik (Typic Dystrudepts).

Perbedaan susunan geologi pulau ini juga tercermin pada perbedaan tutupan vegetasi seperti terlihat pada citra Google Earth (diakses Februari 2024). Tutupan vegetasi di bagian utara pulau yang bersusunan batuan gunungapi terlihat lebih rapat dan hijau dibandingkan dengan vegetasi yang menempati tanah yang berkembang dari batuan ultramafik. Hal ini mengindikasikan tanah di bagian utara pulau lebih subur dibandingkan tanah di bagian selatan.

Tanaman revegetasi yang dijumpai di area reklamasi tambang nikel P. Gag berupa Bintangor, Cemara, Sengon Buto, Ketapang, Gamal, Pucuk Merah, Mahoni, Kasuari dan Kayubesi. Berdasarkan hasil pengamatan lapang melalui pemboran diketahui tanah pucuk yang ditanam di area reklamasi memiliki ketebalan bervariasi 30 hingga 120 cm.

Pengambilan Contoh serta Analisis Laboratorium Tanah dan Tanaman

Pengambilan contoh tanah dengan teknik purposif dilakukan di area reklamasi pada umur tanaman revegetasi berbeda, yaitu dari umur tanam 2018 hingga 2023. Contoh tanah terganggu diambil secara komposit menggunakan bor tanah mineral pada kedalaman 0-30 cm dan 30-60 cm. Contoh tanah terganggu ini digunakan untuk analisis sifat-sifat kimia tanah dan mikoriza. Parameter analisis tanah yaitu pH (dalam H₂O dan KCl *N* perbandingan 1:5), C-organik, N-total, P tersedia dan P cadangan potensial, kation-kation basa dapat ditukar, kapasitas tukar kation (KTK), dan kejenuhan basa (KB). Untuk contoh tanah yang memiliki pH < 5,5 pengukuran P tersedia menggunakan pengekstrak Bray 1, sedangkan untuk contoh tanah dengan pH > 5,5 menggunakan pengekstrak Olsen. Contoh tanah utuh untuk analisis sifat-sifat fisik tanah diambil dengan menggunakan ring sampler, juga pada kedalaman 0-30 cm dan 30-60 cm. Parameter analisis sifat fisik tanah yaitu tekstur, bobot isi, kurva pF dan permeabilitas. Contoh tanah dengan kode DJ-01 sampai DJ-09 merupakan contoh tanah dari area reklamasi, DJ-10 dan DJ-11 dari tanah original di area hutan sekitar tambang (bahan induk tanah ultramafik), dan DJ-12 diambil dari tanah original di kawasan hutan di bagian utara pulau (bahan induk tanah batuan gunungapi). Contoh daun tanaman revegetasi Bintangor dan Cemara juga diambil untuk analisis kadar hara N, P, K, Ca, Mg, S dan B, serta hara mikro Fe, Mn, Cu, Zn. Daun Bintangor dan Cemara diambil karena memiliki jumlah daun yang mencukupi untuk kebutuhan analisis. Sebagai pembandingan dilakukan juga pengambilan contoh tanah dan daun tanaman di bagian utara pulau. Contoh-tanah dan daun dianalisis di laboratorium untuk menentukan sifat-sifat tanah yang menjadi faktor penghambat dalam pertumbuhan tanaman revegetasi dan menentukan teknik ameliorasi atau perbaikan kualitas tanah yang diperlukan. Parameter dan metode analisis tanah dan daun mengikuti BPSI Tanah dan Pupuk (2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat-sifat kimia tanah

Hasil analisis sifat-sifat kimia tanah disajikan pada Tabel 1 Tanah di area reklamasi dan tanah original di sekitar area tambang Nikel umumnya memiliki pH (H₂O) yang tergolong agak masam hingga netral (pH 5,25-6,62). Berbeda dengan tanah-tanah umum lainnya pH (KCl) dari tanah-tanah ini lebih tinggi dibandingkan dengan pH (H₂O)-nya, yaitu sekitar pH 5,00-6,88. Hal ini menunjukkan bahwa kompleks jerapan tanah memiliki muatan variabel dengan netto positif (Uehara dan Gillman 1981). Tanah original di kawasan hutan bagian utara pulau memiliki pH (H₂O) tergolong masam (pH 5,25) di lapisan atas dan agak masam (pH 5,62) di lapisan bawah, namun pH (KCl)-nya lebih rendah (3,96-4,51) yang menunjukkan tanah memiliki muatan netto negatif.

Tanah juga menunjukkan kadar C-organik, N-total dan P-tersedia yang umumnya tergolong sangat rendah hingga rendah, yaitu berturut-turut 0,23-1,77%, 0,01-0,09% dan 1,84-10,10 ppm. Beberapa contoh tanah yang diekstrak dengan pereaksi Olsen menunjukkan kadar P-tersedia yang tergolong dalam jumlah sedang sampai tinggi. Seluruh contoh tanah mengandung kadar P-potensial yang sangat rendah (3,36-6,53 mg P₂O₅/100g).

Tabel 1 menunjukkan seluruh contoh tanah memiliki kapasitas tukar kation (KTK) yang tergolong sangat rendah hingga rendah (1,67-16,89 cmol(+)kg⁻¹), kecuali tanah di lokasi kawasan hutan bagian utara pulau yang tergolong rendah hingga sedang (16,9-23,0 cmol(+)kg⁻¹). Kompleks jerapan tanah diisi terutama oleh Mg²⁺ yang jumlahnya umumnya sedang hingga tinggi (1,10-5,02 cmol(+)kg⁻¹), disusul oleh Ca²⁺, K⁺ dan Na⁺ yang jumlahnya sangat rendah, berturut-turut 0,12-3,34 cmol(+)kg⁻¹, 0,01-0,20 cmol(+)kg⁻¹ dan 0,04-0,33 cmol(+)kg⁻¹. Terlihat bahwa hampir seluruh contoh tanah memiliki rasio Ca/Mg lebih kecil dari 1. Kondisi ini yang akan menimbulkan tanaman mengalami defisiensi Ca (Chiarucci and Baker 2007; Sudarmono 2007). Gaspar dan Laboski (2016) mengutip beberapa pendapat bahwa rasio Ca/Mg dalam kompleks jerapan tanah adalah 6,5:1 (Bear et al. 1945), 5,4:1 hingga 14,1:1 (Graham, 1959) dan 3,0:1 hingga 8,0:1 (Baker dan Amacher, 1981). Kejenuhan basa (KB) tanah umumnya tergolong sedang hingga sangat tinggi (43,7-100%), meskipun beberapa menunjukkan sangat rendah hingga rendah (7,8-33,8%).

Hasil analisis ketersediaan hara mikro hasil ekstraksi dengan HCl 0.05 N disajikan pada Tabel 2. Kadar hara tersedia Cu, Zn dan Mn umumnya tergolong rendah karena pH tanah yang tergolong agak masam hingga netral yang menyebabkan hara dalam kondisi stabil. Namun demikian beberapa lokasi menunjukkan kadar Fe tersedia yang sangat tinggi. Kondisi ini diduga berkaitan dengan jumlah oksida-oksida besi non-kristalin hasil lapukan batuan ultamafik (Huang 1989) yang mudah diekstrak oleh HCl 0.05 N.

Sifat-sifat fisik tanah

Tabel 1 menunjukkan bahwa tanah area reklamasi mempunyai distribusi ukuran butir tergolong sedang dengan kelas tekstur lom berdebu. Tingginya kadar debu ini diduga lebih disebabkan oleh metode analisis tanah yang tidak mampu mendispersikan partikel-partikel tanah secara sempurna akibat agregasi kuat oleh oksida-oksida besi. Hal seperti ini juga dijumpai oleh Buurman dan Soepraptohardjo (1980) pada Oksisol di Peleihari, Kalimantan Selatan. Tingginya kadar debu dan rendahnya klei menyebabkan tanah pada lahan reklamasi mempunyai kepekaan tanah terhadap erosi (erodibilitas) yang tinggi. Walaupun mempunyai kelas tekstur yang lebih halus, secara keseluruhan tanah di lahan reklamasi mempunyai kelas ukuran butir yang lebih kasar, dengan kandungan fraksi kasar (> 2 mm) yang jauh lebih tinggi.

Tanah cenderung padat dengan bobot isi yang tergolong agak tinggi hingga tinggi, berkisar 1,04-1,42 g/cm³ dan porositas total tanah berkisar antara 46,5-60,7 % (Tabel 3). Nilai bobot isi ini secara umum masih berada pada kisaran normal dan belum menjadi faktor pembatas serius bagi perkembangan akar tanaman tahunan. Ketahanan penetrasi tanah yang terukur pada kondisi lembab di lahan reklamasi cukup bervariasi dengan rentang antara 1,2-4,5 kg/cm². Nilai ideal ketahanan penetrasi tanah untuk pertumbuhan akar adalah berkisar 0-3 kg/cm² dan perkembangan akar tanaman mulai terhambat sedang jika ketahanan penetrasi tanah lebih dari 5 kg/cm². Pada umumnya pertumbuhan akar tanaman tinggal setengahnya jika ketahanan penetrasi akar lebih dari 20 kg/cm² (Horn dan Baumgartl 2000).

Tabel 1 Sifat-sifat kimia tanah dan tekstur dari lahan bekas tambang Nikel P. Gag

No.	Lokasi	Kedalaman (cm)	Rasio 1:5		W&B	Kjeldahl	Bray 1	P-tersedia	Olsen	HCl- 25%	P-pot	Ca	Mg	N NH ₄ OAc pH 7,0			KTK	Hitung	Pasir	Tekstur	Debu	Klei
			pH H ₂ O	pH KCl										C-org	N-total	P-pot						
1	DJ-01	0-30	5,81	6,11	0,48	0,03	-	12,8	26,6	0,27	0,99	0,02	0,04	2,30	57,4	13,6	70,0	16,4				
		30-60	5,92	6,18	0,63	0,03	-	20,2	23,8	0,37	1,10	0,03	0,06	3,56	43,7	12,9	69,0	18,0				
2	DJ-02	0-30	6,15	6,35	0,75	0,04	-	12,8	24,7	0,32	1,01	0,03	0,06	1,67	84,8	19,9	65,6	14,6				
3	DJ-03	0-30	6,24	6,29	0,76	0,04	-	14,8	24,0	0,28	1,77	0,03	0,04	1,69	100,0	14,3	67,8	17,9				
		30-60	6,20	6,22	0,71	0,04	-	14,7	22,0	0,29	1,29	0,03	0,05	2,30	71,9	12,3	70,9	16,8				
4	DJ-04	0-30	6,77	6,88	0,80	0,03	-	10,1	21,1	0,22	2,82	0,02	0,04	6,08	50,9	13,4	70,0	16,6				
		30-60	6,69	6,74	0,79	0,03	-	15,6	21,1	0,23	3,42	0,01	0,04	5,45	68,1	15,7	68,0	16,3				
5	DJ-05	0-30	6,31	6,41	0,24	tr	-	18,3	21,0	0,15	1,61	0,02	0,04	1,67	100,0	15,1	67,7	17,2				
		30-60	6,38	6,43	0,23	0,01	-	17,4	18,3	0,12	1,59	0,01	0,04	3,34	53,0	10,8	73,8	15,4				
6	DJ-06	0-30	6,28	6,32	1,41	0,09	-	17,5	27,6	0,64	0,98	0,04	0,04	5,03	33,8	13,5	68,7	17,8				
		30-60	6,20	6,41	1,57	0,07	-	5,5	28,5	0,55	1,30	0,03	0,04	5,88	32,6	9,7	78,2	12,1				
7	DJ-07	0-30	6,51	6,51	0,70	0,04	-	7,3	20,2	0,19	3,65	0,02	0,05	6,29	62,1	15,9	70,4	13,7				
8	DJ-08	0-30	6,47	6,43	0,68	0,03	-	10,1	16,5	0,29	4,53	0,02	0,05	5,45	89,7	22,8	63,3	13,9				
		30-60	6,57	6,54	0,81	tr	-	5,5	14,7	0,37	4,03	0,02	0,05	7,74	57,7	19,1	66,2	14,8				
9	DJ-09	0-30	6,62	6,50	1,77	0,09	-	13,9	14,8	0,75	3,71	0,20	0,06	6,96	67,8	21,1	65,5	13,5				
		30-60	5,25	5,15	3,64	0,21	-	22,1	22,1	0,67	0,37	0,10	0,15	10,32	12,4	13,6	66,9	19,5				
10	DJ-10	0-30	5,48	6,12	1,26	0,08	-	2,4	18,3	0,14	0,04	0,03	0,06	3,34	7,8	18,7	59,0	22,3				
		30-60	5,55	5,00	4,35	0,21	-	7,4	24,0	0,24	0,91	0,18	0,14	10,12	14,5	27,2	47,5	25,3				
11	DJ-11	0-30	5,65	5,72	2,71	0,13	-	1,8	17,5	0,21	0,41	0,09	0,09	6,52	12,3	25,6	55,4	19,0				
		30-60	5,25	4,51	3,10	0,16	-	5,8	29,2	3,19	5,02	0,12	0,18	16,89	50,4	52,5	29,6	17,9				
12	DJ-12	0-30	5,62	3,96	0,77	0,04	-	1,6	13,7	3,34	13,21	0,05	0,33	23,00	73,6	57,1	23,4	19,5				

Keterangan: sampel DJ-01 sampai DJ-09 dari area reklamasi, DJ-10 dan DJ-11 dari tanah original sekitar tambang (ultramafik), sampel DJ-12 tanah original kawasan hutan di bagian utara pulau (batuan gunungapi); W&B = Walkley and Black; P-pot = P-potensial; KTK = kapasitas tukar kation, KB = kejenuhan basa

Tabel 2 Ketersediaan hara mikro Fe, Cu, Zn dan Mn dalam tanah di lokasi kajian P. Gag

No,	Lokasi	Kedalaman (cm)	Ekstrak HCl 0,05 N			
			Fe	Cu	Zn	Mn
..... ppm						
1	DJ-01	0-30	1.027,3	1,60	2,80	48,7
		30-60	983,1	1,31	2,55	56,2
2	DJ-02	0-30	2,9	1,87	2,21	73,3
		30-60	1.580,6	1,13	2,09	56,5
3	DJ-03	0-30	2.337,9	1,43	2,64	58,5
		30-60	2,2	0,66	1,93	46,0
4	DJ-04	0-30	1,9	0,79	2,18	49,0
		30-60	4.188,4	1,90	4,07	30,7
5	DJ-05	0-30	2.755,8	1,40	3,06	25,9
		30-60	291,2	2,58	2,14	73,9
6	DJ-06	0-30	165,4	2,46	2,13	78,0
		30-60	5,0	0,94	2,89	43,0
7	DJ-07	0-30	4,1	0,92	2,67	32,8
		30-60	2,3	0,87	2,85	49,8
8	DJ-08	0-30	1,7	1,01	3,28	58,0
		30-60	2,5	2,32	1,84	84,1
9	DJ-09	0-30	516,7	3,43	1,74	48,5
		30-60	3,2	2,45	1,77	52,6
10	DJ-10	0-30	3,2	2,70	1,05	30,8
		30-60	2,3	1,19	1,82	78,9
11	DJ-11	0-30	1,4	1,23	1,29	25,4
		30-60				
12	DJ-12	0-30				
		30-60				

Aerasi tanah pada lahan reklamasi tergolong baik, dengan jumlah pori makro (pori drainase) sekitar 21,3-31,6% dari volume total tanah atau sekitar 44,9–57,1% dari total ruang pori (Tabel 3). Dengan pori drainase yang banyak tersebut, air mudah hilang dan hanya sedikit yang tertahan di dalam ruang pori. Kemampuan tanah menahan air di area reklamasi umumnya tergolong tinggi, namun mempunyai kapasitas air tersedia tanah tergolong sangat rendah hingga sedang berkisar dari 7,1–15,1 %-v, lebih rendah dari nilai kapasitas air tersedia tanah pada lahan originalnya. Nilai tersebut umumnya tidak mencapai 25% dari volume total pori tanahnya.

Tabel 3 Sifat-sifat fisik tanah dari lahan bekas tambang Nikel P. Gag

No	Lokasi	Kedalaman (cm)	Bobot isi	PT	PD	KL	KAT	PPD	PAT	K	KP
			(g/cm ³)								
1	DJ-01	0-30	1,16	56,1	27,3	28,8	13,9	48,7	24,7	0,44	1,5 - 2,5
		30-60	1,11	58,1	29,9	28,1	10,6	51,6	18,3	0,32	1,5 - 3,0
2	DJ-02	0-30	1,42	46,5	22,7	23,9	7,6	48,7	16,3	0,15	1,7 - 3,7
		30-60	1,08	59,1	28,5	30,6	15,1	48,2	25,6	2,65	1,5 - 2,2
3	DJ-03	0-30	1,37	48,3	21,3	27,0	8,6	44,0	17,8	0,41	1,2 - 3,2
		30-60	1,10	58,3	28,2	30,1	14,9	48,4	25,6	0,44	1,2 - 1,2
4	DJ-04	0-30	1,11	57,9	31,3	26,7	10,8	54,0	18,6	0,82	1,5 - 3,7
		30-60	1,16	56,4	25,4	31,0	11,6	45,0	20,7	0,99	1,7 - 2,5
5	DJ-05	0-30	1,10	58,5	30,9	27,6	12,1	52,8	20,7	0,60	2,2 - 4,5
		30-60	1,25	52,7	30,1	22,6	7,1	57,1	13,5	0,82	2,2 - 4,0
6	DJ-06	0-30	1,04	60,7	31,6	29,1	10,8	52,1	17,7	4,82	1,5 - 3,2
		30-60	1,19	55,3	24,8	30,5	12,8	44,9	23,2	0,38	1,5 - 3,0
7	DJ-07	0-30	1,09	58,8	29,3	29,5	14,6	49,9	24,9	1,24	1,5 - 3,0
		30-60	0,62	76,7	42,8	33,8	16,2	55,9	21,1	18,10	0,5 - 1,7
8	DJ-08	0-30	0,62	76,7	41,4	35,3	15,0	53,9	19,6	13,03	0,2 - 1,0
		30-60	0,88	66,6	34,5	32,1	13,9	51,8	20,8	16,68	0,5 - 1,7

Keterangan : BI = Bobot isi, PT = Pori total, KL= Kapasitas lapang, KAT = Kapasitas air tersedia, PD = Pori drainase,

PPD = Persen pori drainase terhadap pori total, PAT = persen pori air tersedia terhadap pori total,

K = Permeabilitas, KP = Ketahanan penetrasi

Kapasitas air tersedia tanah menentukan ketersediaan air tanah untuk tanaman. Tanaman yang ditanam pada tanah dengan kapasitas air tersedia rendah akan mudah mengalami cekaman air, sehingga pertumbuhan terhambat. Walaupun demikian, untuk tanaman kehutanan (tahunan) dengan perakaran yang dalam dan daerah dengan curah hujan cukup merata sepanjang tahun, kemampuan menahan air dengan nilai tersebut belum merupakan faktor penghambat serius bagi pertumbuhan tanaman.

Sifat biologi tanah

Sifat biologi tanah dalam kajian ini hanya dilakukan pada parameter jumlah mikoriza. Hasil analisis populasi spora fungi mikoriza arbuskula dari contoh-contoh tanah di lokasi studi disajikan pada Tabel 4. Spora mikoriza arbuskula hanya ditemukan di beberapa lokasi saja dengan jumlah yang sangat sedikit (1-2), sedangkan di hutan original sekitar area tambang ditemukan di area DJ-10, hanya 3 spora/20 gram tanah. Spora mikoriza arbuskula paling banyak ditemukan di kawasan hutan original di sisi utara pulau.

Tabel 4 Populasi spora mikoriza arbuskula di lahan bekas tambang Nikel P. Gag

No	Lokasi	Kedalaman (cm)	Morphospesies	Jumlah spora/20 g
1	DJ-01	0-30	Kosong	0
		30-60	Kosong	0
2	DJ-02	0-30	Kosong	0
		30-60	Kosong	0
3	DJ-03	0-30	Kosong	0
		30-60	Kosong	0
4	DJ-04	0-30	Kosong	0
		30-60	Gigaspora sp1.	1
5	DJ-05	0-30	Kosong	0
		30-60	Kosong	0
6	DJ-06	0-30	Scutellospora sp1.	2
		30-60	Kosong	0
7	DJ-07	0-30	Kosong	0
8	DJ-08	0-30	Kosong	0
		30-60	Scutellospora sp2.	1
9	DJ-09	0-30	Kosong	0
10	DJ-10	0-30	Glomus sp1.	3
11	DJ-11	0-30	Kosong	0
		30-60	Kosong	0
12	DJ-12	0-30	Glomus sp2.	26

Hal ini menunjukkan kondisi lingkungan area reklamasi dan hutan original sekitar tambang tidak kondusif untuk perkembangan Mikoriza, sehingga tidak dapat membantu tanaman dalam proses siklus hara yang diperlukan. Secara umum mikoriza akan berkembang baik pada kondisi tanah yang mengandung P cadangan potensial yang tinggi (Nouri et al. 2015; Rui et al. 2022), sedangkan di lokasi studi umumnya kandungan P cadangan potensialnya sangat rendah.

Kadar hara dalam daun tanaman

Hasil analisis daun Cemara dan Bintangor yang diambil dari area reklamasi, pantai dan sisi utara pulau disajikan pada Tabel 5. Berdasarkan contoh referensi, khususnya daun cemara (Kalra 1998), terlihat bahwa tanaman mengandung N yang tergolong rendah (0,42-1,54%) dan P tergolong sangat rendah (0,01-0,03%) serta mengakumulasi hara mikro, terutama Fe, secara berlebihan. Kondisi-kondisi kimia daun tanaman ini mengindikasikan bahwa serapan hara dari tanah terganggu. Fosfor merupakan hara makro esensial yang berperan sangat penting dalam pertumbuhan dan reproduksi tumbuhan. Semua aktivitas biokimia dalam sel hidup melibatkan P. Fosfor dalam tumbuhan terlibat dalam proses-proses fotosintesis, transfer dan penyimpanan energi, transfer informasi genetik, sintesis protein. Oleh sebab itu kekurangan P menyebabkan terganggunya perkembangan akar dan bagian atas tumbuhan (Foth 1990). Fosfor juga berperan penting dalam mengatur respon fisiologik dan meningkatkan toleransi tumbuhan terhadap cekaman abiotik, seperti panas, salinitas, kekeringan, drainase buruk, CO₂ tinggi dan keracunan logam berat (Khan et al. 2023).

Tabel 5 Hasil analisis kimia daun bintangor dan cemara di lahan bekas tambang Nikel P. Gag

No.	Daun	Lokasi	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
			%						ppm				
1	Bintangor	DJ-04	0,82	0,01	0,98	1,53	0,56	0,12	198,8	2,49	6,30	2.264,0	35,7
2		DJ-10	0,72	0,01	0,31	1,19	0,45	0,14	311,8	4,53	27,99	723,8	44,4
3		DJ-12	0,42	0,02	0,48	1,01	0,26	0,14	73,1	4,66	8,40	34,1	24,2
4	Utara	Utara	0,67	0,01	0,37	1,46	0,42	0,49	635,7	2,10	5,96	58,0	40,4
5		Pantai	0,86	0,02	0,56	0,75	0,38	0,27	98,1	1,71	5,25	36,9	27,0
6		Cemara	DJ-04	1,24	0,03	0,43	0,79	0,65	0,20	4.625,9	6,04	64,89	462,0
7	Cemara	DJ-07	0,97	0,02	0,34	1,06	0,34	0,19	2.708,4	3,81	26,09	353,7	28,4
8		DJ-05	1,44	0,03	0,83	1,42	0,28	0,22	1.571,2	3,68	24,43	190,0	35,9
9		Pantai	1,54	0,03	0,75	0,62	0,19	0,24	180,7	3,22	10,98	26,6	17,1

Pertumbuhan tanaman revegetasi

Area reklamasi DJ-04 ditanami Bintangor, Cemara, Sengon, Ketapang dan Gamal pada 2018 atau berumur 5 tahun saat pengamatan dilakukan. Kondisi pertumbuhan tanaman secara umum menunjukkan tanda-tanda kekurangan hara (Gambar 1a). Pada umur demikian Bintangor memiliki tinggi rata-rata 1,2 m dengan lebar tajuk rata-rata 0,53 m dan Cemara tinggi rata-rata 6,4 m dan lebar tajuk rata-rata 3,9 m. Dari kecepatan penutupan tajuk, terlihat cemara lebih cepat dibanding Bintangor.

Tanaman di area reklamasi DJ-06 juga ditanam pada 2018 dengan jenis Ketapang, Sengon Buto dan Cemara dengan jarak tanam 4 x 4 meter. Pada saat dilakukan evaluasi kondisi pertumbuhan tanaman terlihat merana, daun banyak yang rontok dan menunjukkan tanda-tanda kekurangan hara (Gambar 1b). Dari hasil pengukuran tinggi tanaman, rata-rata tinggi tanaman umur 5 tahun adalah 1,9 meter dengan kisaran antara 0,6-3,25 m.

a)



b)



Gambar 1 Kondisi tanaman umur 5 tahun di area reklamasi DJ-04 (a) dan DJ-06 (b)

Pembahasan Umum

Tanah-tanah yang berkembang dari batuan ultramafik umumnya memiliki anomali sifat-sifat kimia fisik dibandingkan dengan tanah-tanah umum lainnya. Anomali pertama yaitu tanah di area reklamasi tambang Nikel sebetulnya memiliki pH tinggi (agak masam hingga netral) dan KB yang sedang hingga sangat tinggi (Tabel 1). Namun tingginya nilai kedua parameter ini muncul karena sifat khas oksida besi yang mendominasi fraksi klei dalam tanah pucuk. Tabel 1 memperlihatkan bahwa tanah memiliki pH (H₂O) lebih kecil daripada pH (KCl). Kondisi ini menunjukkan bahwa tanah didominasi oleh muatan variabel, yaitu bermuatan positif atau negatif tergantung kepada konsentrasi H⁺ dan OH⁻ (Schwertmann dan Taylor 1989). Selisih kedua pH yang tergolong kecil pada tanah ini menunjukkan bahwa tanah memiliki muatan netto positif dengan nilai KTK juga kecil (Uehara dan Gillman 1981). Kombinasi KTK kecil dan jumlah Mg-dd (dapat dipertukarkan) yang sedang hingga tinggi menghasilkan KB tinggi.

Sesuai dengan namanya, komponen utama mineral ferromagnesian dalam batuan ultramafik adalah Fe dan Mg. Hasil lapukan kimia secara intensif di daerah tropika basah dan hangat dari mineral ferromagnesian utamanya adalah oksida-oksida besi (Huang 1989) dan melepaskan Mg²⁺. Ion ini dijerap dan mendominasi kompleks jerapan klei oksida besi dan sisanya tercuci keluar dari lingkungan tanah. Oleh sebab itu anomali sifat kimia tanah kedua pada tanah-tanah dari batuan ultramafik adalah rendahnya rasio Ca/Mg dalam kompleks jerapan (Chiarucci and Baker 2007; Sudarmono 2007; Konečná

et al. 2020). Rasio Ca/Mg dalam kompleks jerapan pada Tabel 1 umumnya berada pada kisaran 0,05-0,64. Kondisi ini tentu akan menyebabkan tanaman mengalami defisiensi Ca, padahal Ca berperan sebagai pusat pengatur pada hampir segala aspek pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Hepler 2005). Kalsium tidak hanya merupakan faktor penting untuk menjaga stabilitas dinding sel dan membran saja, tetapi juga berperan sebagai pembawa pesan pada berbagai proses fisiologi, termasuk respon tumbuhan terhadap kondisi cekaman biotik (Thor, 2019). Ketersediaan K dalam tanah ini juga sangat rendah. Kekurangan K dalam tumbuhan berpengaruh terhadap perkembangan morfologi, fisiologi, dan biokimia (Hafsi et al. 2014).

Tanaman juga memperlihatkan sangat kekurangan P (Tabel 5) yang disebabkan oleh sangat rendahnya kadar P-tersedia dalam tanah (Tabel 1). Muatan netto positif oksida-oksida besi menjadi penyebab ketidak-tersediaan P untuk tanaman karena P yang terdapat dalam larutan tanah dalam bentuk ion-ion fosfat akan diikat kuat oleh koloid oksida besi tersebut (Hidayat et al. 2002; Sei et al. 2002; Fink et al. 2016). Anomali sifat kimia tanah dari batuan ultramafik lainnya adalah tingginya kadar unsur-unsur yang dapat berpotensi toksik untuk tumbuhan, terutama Cr, Ni, Co (Marescotti et al. 2019). Tabel 5 memperlihatkan daun tanaman mengakumulasi Fe, Zn, Mn dalam jumlah sangat tinggi. Menurut Hu et al. (2023) konsentrasi tinggi logam-logam berat dalam tanah dapat membatasi pertumbuhan dan proses fotosintesis tumbuhan. Kombinasi kekurangan hara dan kelebihan logam-logam yang bersifat toksik dalam tanah menghasilkan pertumbuhan tanaman revegetasi seperti disajikan pada Gambar 1.

Anomali dari sisi sifat fisik tanah yaitu meskipun tanah ini memiliki pori drainase dan kemampuan menahan air yang umumnya tergolong tinggi, namun tanah memiliki kapasitas air tersedia yang tergolong sangat rendah hingga sedang (Tabel 3). Selain itu, karena partikel tanah memiliki muatan permukaan yang kecil, maka fraksi halus tanah mudah terdispersi pada saat hujan dan segera terflokulasi di permukaan tanah, terutama di daerah-daerah genangan, menghasilkan kerak atau lapisan tipis yang relatif kedap air (Gambar 2).

Agar tanaman revegetasi di lahan bekas tambang Nikel dapat tumbuh dan berkembang dengan baik, maka tanah pucuk sebagai media tanam perlu diperbaiki. Muatan netto positif tanah yang menyebabkan tanah memiliki KTK rendah, defisiensi Ca dan kekurangan beberapa hara lainnya, serta kapasitas air tersedia yang rendah perlu diatasi dengan penambahan bahan-bahan amelioran. Salah satu bahan amelioran yang dapat mengatasi hal-hal tersebut dan kemungkinan tersedia atau dapat disediakan di sekitar lokasi tambang adalah kompos. Penambahan kompos ke dalam tanah ini akan meningkatkan KTK, hara dan kemampuan tanah dalam menyerap dan menyediakan air (Brady 1984; Reeves 1997). Bila kompos matang yang diberikan diasumsikan memiliki KTK $60 \text{ cmol(c)kg}^{-1}$ (Sullivan and Miller 2001), lubang tanam berukuran $0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ m}$ dan bobot isi tanah 1 ton/m^3 , maka pemberian kompos sebesar 10%/lubang tanam baru akan menyumbangkan KTK teoritis sebesar sekitar $5,5 \text{ cmol(c)kg}^{-1}$. Kapur pertanian juga perlu ditambahkan untuk mengatasi defisiensi Ca yang jumlahnya tergantung kepada rasio Ca/Mg hasil analisis tanah.



Gambar 2 Lapisan tipis tanah kedap air di daerah cekungan

KESIMPULAN DAN SARAN

Koloid tanah di area reklamasi bekas tambang Nikel didominasi oleh oksida-oksida besi berbagai spesies. Kehadiran oksida besi ini dapat berdampak buruk terhadap sukses revegetasi karena tingkat pertumbuhan tanaman yang rendah. Oksida-oksida besi memiliki permukaan spesifik yang luas dengan muatan variabel tergantung pH. Dalam kondisi alamiah oksida besi bermuatan netto positif, sehingga memiliki KTK kecil dan jerapan terhadap hara fosfat yang tinggi. Selain disebabkan oleh kehadiran oksida besi, kehadiran Mg^{2+} yang berlebihan dari hasil pelapukan mineral-mineral ferromagnesian juga menyebabkan tanaman kekurangan Ca karena rendahnya rasio Ca/Mg dalam tanah. Hal lain yang perlu diatasi adalah kehadiran unsur-unsur yang berpotensi toksik terhadap tumbuhan dan jumlah K yang sangat rendah. Untuk mengatasi anomali sifat-sifat tanah ini sangat dianjurkan penggunaan bahan organik dalam bentuk kompos matang dan kapur pertanian dalam dosis yang cukup serta pupuk lain yang dapat memberikan hara dalam waktu segera.

UCAPAN TERIMAKASIH

Diucapkan terimakasih kepada manajemen PT. Gag Nikel yang telah melakukan kerjasama kajian ini dengan Pusat Studi Reklamasi Tambang, IPB dan telah mengizinkan sebagian datanya untuk dipublikasikan.

REFERENSI

- Alexander, E.B., W.E. Wildman dan W.C. Lynn. 1985. Ultramafic (Serpentinitic) Mineralogy Class. In J.A. Kittrick (ed.) Mineral Classification of Soils. SSSA Special Publication Number 16, SSSA. Madison, Wisconsin, USA
- [BPSI] Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk. 2023. Petunjuk Teknis Edisi 3: Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk. Balai Besar Pengujian Standar Instrumen Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Standardisasi Instrumen Pertanian, Kementerian Pertanian
- [Balitbangtan] Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. 2018. Peta Tanah Semidetil Kabupaten Raja Ampat Lembar 2715-52. Kementerian Pertanian.
- Bouquain, S., N.T. Arndt, F. Faure, and G. Libourel. 2014. An experimental study of pyroxene crystallization during rapid cooling in a thermal gradient: application to komatiites. *Solid Earth*, 5, 641–650
- Brady, N.C. 1984. *The Nature and Properties of Soils*. 9th Ed. MacMillan Publishing Company, New York
- Brady, K.U., A.R. Kruckeberg, and H.D. Bradshaw Jr. 2005. Evolutionary Ecology of Plant Adaptation to Serpentine Soils. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* Vol. 36:243-266. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105730>
- Buurman, P., and M. Soepraptohardjo. 1980. Oxisols and associated soils on ultramafic and felsic volcanic rocks in Indonesia. In P. Buurman (ed). *Red Soils in Indonesia*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen
- Chiarucci, A. and Baker, A.J.M. 2007. Advances in the ecology of serpentine soils. *Plant Soil* 293, 1-2. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9268-7>
- FAO. 1976. A framework for land evaluation. FAO Soil Bulletin No. 32, Roma
- Fink, J.R., A.V. Inda, T. Tiecher, V. Barrón. 2016. REVIEW: Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. *Ciência e Agrotecnologia* 40(4):369-379, <http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542016404023016>
- Foth, H.D. 1990. *Fundamental of Soil Science*. 8th ed. John Wiley and Sons. New York
- Gaspar, A.P. dan C.A.M. Laboski. 2016. Base Saturation: What is It? Should I be Concerned? Does It Affect my Fertility Program? Proc. of the 2016 Wisconsin Crop Management Conference, Vol. 55
- Hafsi, C., Debez, A. & Abdelly, C. Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades. *Acta Physiol Plant* 36, 1055–1070 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1491-2>
- Hepler, P.K. 2005. Calcium: a central regulator of plant growth and development. *Plant Cell*. 17(8):2142-55. doi: 10.1105/tpc.105.032508

- Hidayat, A., S. Hardjowigeno, M. Soekardi, S. Sabiham. 2022. Peranan oksida besi terhadap sifat tanah berpelapukan lanjut. *Jurnal Tanah dan Iklim* 20:47-55
- Horn, R. and T. Baumgartl. 2000. Dynamic Properties of Soils. In M. E. Summer (ed.). *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton London New York Washington D.C. p. A19 – A51.
- Hu, Z., C. Zhao, Q. Li, Y. Feng, X. Zhang, Y. Lu, R. Ying, A. Yin, W. Ji. 2023. Heavy metals can affect plant morphology and limit plant growth and photosynthesis processes. *Agronomy* 2023, 13, 2601. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102601>
- Huang, P.M. 1989. Feldspars, Olivines, Pyroxenes, and Amphiboles. In J.B. Dixon and S.B. Weed (eds) *Minerals in Soil Environments*. 2nd. SSSA. Madison, Wisconsin, USA
- Iskandar, I., Suryaningtyas, DT., Baskoro, DPT., Budi, SW., Gozali, I, Suryanto, A., Kirmi, H., Dultz, S. 2022. Revegetation as a driver of chemical and physical soil property changes in a post-mining landscape of East Kalimantan: A chronosequence study. *Catena* 215:106355
- Iskandar, I., Suryaningtyas, DT., Baskoro, DPT., Budi, SW., Gozali, I, Saridi, S., Masyhuri, M., Dultz, S. 2022. The regulatory role of mine soil properties in the growth of revegetation plants in the post-mine landscape of East Kalimantan. *Ecol. Indic.* 139:108877
- Khan, F., A.B. Siddique, S. Shabala, M. Zhou, C. Zhao. 2023. Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. *Plants* 2023, 12,2861. <https://doi.org/10.3390/plants12152861>
- Kalra, Y.P. 1998. *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. CRC Press. Boca Raton, Boston, London, New York, Washington DC
- [KESDM] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2020. Peluang Investasi Nikel Indonesia. <https://www.esdm.go.id/assets/booklet/tambang-2020/Booklet-Nikel-FA.pdf>
- Konečná, V., L. Yant and F. Kolár. 2020. The Evolutionary Genomics of Serpentine Adaptation. *Front. Plant Sci.* 11:574616. doi: 10.3389/fpls.2020.574616
- Leeman, W.P. and K.F. Scheidegger. 1977. Olivine/liquid distribution coefficients and a test for crystal-liquid equilibrium. *Earth and Planetary Science Letters* 35 (2): 247-257. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(77\)90128-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90128-5).
- Marescotti, P., P. Comodi, L. Crispini, L. Gigli, A. Zucchini, S. Fornasaro. 2019. Potentially Toxic Elements in Ultramafic Soils: A Study from Metamorphic Ophiolites of the Voltri Massif (Western Alps, Italy). *Minerals* 9(8): 502. <https://doi.org/10.3390/min9080502>
- Nouri E, Breuillin-Sessoms F, Feller U, Reinhardt D. 2015. Correction: Phosphorus and Nitrogen Regulate Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in *Petunia hybrida*. *PLoS ONE* 10(4): e0127472. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127472>
- Perkins, D. 2022. Mineralogy. University of North Dakota. <https://opengeology.org/Mineralogy/>
- 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., Susilowati, A. 2021. Managing and Reforesting Degraded Post-Mining Landscape in Indonesia: A Review. *Land* 10 (6), 658
- Proctor, J. and Stanley R.J. Woodell. 1975. The Ecology of Serpentine Soils. In A. MacFadyen (Eds). *Advances in Ecological Research*. Academic Press Vol. 9:255-366. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60291-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60291-3)
- Reeves, D.W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research* 43(1-2):131-167. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00038-X)
- Rui, W.; Mao, Z.; Li, Z. 2022. The Roles of Phosphorus and Nitrogen Nutrient Transporters in the Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis. *Int. J. Mol. Sci.*, 23, 11027. <https://doi.org/10.3390/ijms231911027>
- Schwertmann, U. dan R.M. Taylor. 1989. Iron Oxides. In J.B. Dixon and S.B. Weed (eds) *Minerals in Soil Environments*. 2nd. SSSA. Madison, Wisconsin, USA
- Sei, J., J.C. Jumas, J. Olivier-Fourcade. 2002. Role of iron oxides in the phosphate adsorption properties of kaolinites from the Ivory Coast. *Clays Clay Miner.* 50, 217–222. <https://doi.org/10.1346/000986002760832810>
- Soil Survey Staff. 2022. *Keys to Soil Taxonomy*, 13th edition. USDA Natural Resources Conservation Service.

- Sullivan, D.M. and R.O. Miller. 2001. Compost quality attributes, measurements and variability. p. 95-120. In: P.J. Stofella and B.A. Kahn (eds.). Compost utilization in horticultural cropping systems. CRC Press. Boca Raton, FL. ISBN 9780367397593.
- Supriatna, S., A.S. Hakim dan T. Apandi. 1995. Peta Geologi Lembar Waigeo, Irian Jaya, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Thor, K. 2019. Calcium - Nutrient and Messenger. *Front. Plant Sci.* 10:440. doi: 10.3389/fpls.2019.00440
- Uehara, G. and G. Gillman. 1981. The Mineralogy, Chemistry and Physics of Tropical Soils with Variable Charge Clays. Westview Press, Boulder, Colorado
- Whittaker, R.H. 1954. The Ecology of Serpentine Soils. *Ecology*, 35(2), 258–288. <https://doi.org/10.2307/1931126>
- Widiatmaka, Suwarno, N. Kusmaryandi. 2010. Karakteristik pedologi dan pengelolaan revegetasi lahan bekas tambang nikel: Studi kasus lahan bekas tambang nikel Pomalaa, Sulawesi Tenggara. *J. Tanah Lingk.* 12(2):1-10
- Wyllie, P.J. 1969. The origin of ultramafic and ultrabasic rocks. *Tectonophysics* 7 (5-6): 437-455. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(69\)90015-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(69)90015-8)