Mineralogi dan Properti Keteknikan Endapan Nikel Laterit Daerah Tobimeita-Langgikima, Kabupaten Konawe Utara, Sulawesi Tenggara

Mineralogy and Engineering Properties of Nickel Laterite Deposits in Tobimeita-Langgikima, North Konawe Regency, Southeast Sulawesi

Masri*[1], Marwan Zam Mili[2], Waode Rizky Awaliah Nafiu[3], Laode Jonas Tugo[4], La Ode Ahmad Rifai[5]
[1,5]Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Universitas Halu Oleo
[2-4] Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Universitas Halu Oleo
Corr Author: *[1]masri@uho.ac.id, [2]marwanzm@uho.ac.id, [3]wdkiki.awaliah@uho.ac.id, [4]laodejonastugo@gmail.com, [5]ahmadrifaig08@gmail.com

ABSTRAK

Pembentukan profil nikel laterit merupakan fungsi pelapukan batuan ultramafik yang dapat menyebabkan perubahan nilai properti keteknikan pada setiap zona profil. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan korelasi mineralogi, sifat fisik, dan sifat mekanik terhadap derajat pelapukan pada setiap zona laterit. Penyusunan profil laterit ditentukan melalui deskripsi singkapan dan analisis kimia unsur menggunakan XRF. Batuan dasar diidentifikasi menggunakan analisis petrografi sayatan tipis. Analisis X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk menentukan komposisi mineral penyusun profil laterit. Pengujian properti keteknikan mencakup uji indeks plastisitas, bobot isi, uji kuat tekan, dan uji kuat geser. Hubungan antara derajat pelapukan dan properti keteknikan dianalisis menggunakan fungsi regresi dan koefisien determinasi (R^2). Daerah penelitian tersusun oleh dunit terserpentinisasi dan werlit terserpentinisasi. Profil nikel laterit berupa zona limonit, zona saprolit, dan batuan dasar. Zona limonit dan saprolit tersusun oleh lanau inorganik dengan plastisitas sedang hingga tinggi. Peningkatan derajat pelapukan berkorelasi positif dengan nilai indeks plastisitas, diikuti penurunan nilai bobot isi, kohesi, dan sudut geser dalam yang dinyatakan dalam fungsi regresi linear.

Kata-kata kunci*:* derajat pelapukan, indeks plastisitas, kuat geser, nikel laterit, regresi linear, ESO

ABSTRACT

The formation of nickel laterite profile zones is a function of weathering of ultramafic rocks, which can cause changes in engineering property values in each zone. This study aims to determine the correlation of mineralogy, physical, and mechanical properties to the degree of weathering in each laterite zone. The laterite profile was determined through outcrop description and chemical analysis using X-Ray Fluorescence (XRF). Bedrock was identified using thin-section petrographic. X-Ray Diffraction (XRD) analysis is used to determine the mineral composition of the laterite profile. Engineering properties include plasticity index, unit weight, uniaxial compressive strength, and shear strength. The relationship between the degree of weathering and engineering properties was analyzed using the regression function and correlation coefficient (R2). The study area is composed of serpentinized dunite and wherlite. Nickel laterite profiles consist of the limonite zone, saprolite zone, and bedrock. The limonite and saprolite zones are composed of inorganic silts with moderate to high plasticity. The increase in the degree of weathering positively correlates with the plasticity index value, followed by a decrease in the values for unit weight, cohesion, and internal shear angle expressed in the linear regression function.

Keywords: degree of weathering, plasticity index, shear strength, nickel laterite, linear regression, ESO

Submitted: 26-11-2022; Revised: 03-10-2023; Accepted: 03-10-2023; Available Online: 04-10-2023
Published by: Mining Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Lambung Mangkurat
This is an open access article under the CCBYND license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
©2023, Geosapta

PENDAHULUAN

Nikel laterit merupakan hasil pelapukan batuan ultramafik yang tersingkap di permukaan. Proses ini dikontrol oleh dekomposisi mineral primer batuan ultramafik menjadi mineral sekunder oleh proses hidrolisis maupun oksidasi. Proses ini berlangsung selama jutaan tahun dimulai ketika batuan ultramafik tersingkap di permukaan bumi [1]. Proses lateritisasi dikontrol pelapukan kimiawi yang mengakibatkan pengayaan sekunder pada unsur-unsur tertentu dan menghasilkan endapan yang bernilai ekonomis, seperti endapan nikel laterit. Endapan nikel laterit berkembang sangat intensif di daerah tropis pada batuan dasar yang mengandung banyak olivine seperti peridotit [2]. Daerah Tobimeita terletak pada Kecamatan Langgikima Kabupaten Konawe Utara, Sulawesi Tenggara. Daerah ini terletak di Lengan Timur Sulawesi dan berasosiasi dengan Kompleks Ofiolit Sulawesi Timur [3; 4; 5]. Daerah Tobimeita termaksud dalam peta geologi lembar Lasusua-Kendari [6] yang tersusun atas piroksenit, lerzolit, dan olivin websterit [7]. Profil nikel laterit berkembang dengan baik dan beberapa perusahaan tambang beroperasi pada area tersebut.

Pembentukan horison tanah dan laterisasi pada nikel laterit dipengaruhi oleh beberapa faktor: tipe batuan induk, iklim, vegetasi, reagen kimia, topografi, struktur geologi, dan waktu [2]. Dalam prosesnya, terjadi pengayaan residual oleh unsur *immobile* dan pencucian oleh unsur *mobile* yang terakumulasi pada zona jenuh. Proses ini menghasilkan zonasi profil nikel laterit dengan karakteristik tekstur butir, komposisi kimiawi, dan mineralogi yang berbeda-beda [8; 9]. Secara umum, profil nikel laterit tersusun atas zona limonit yang kaya akan

http://dx.doi.org/10.20527/jg.v9i2.14860

mineral oksida, zona saprolite yang kaya akan mineral hidrosilikat, dan zona batuan dasar yang menyerupai komposisi batuan ultramafik. Nikel dapat terkayakan baik pada zona limonit maupun zona saprolite dan hadir dalam profil yang lebih kompleks [10] maupun tertutupi oleh alluvium dan molasa Sulawesi.

Fungsi derajat pelapukan batuan pada properti keteknikan telah banyak dilakukan. Kehadiran mineral serpentin dan mineral sekunder lain pada ultramafik tidak hanya mempengaruhi kuat tekan batuan, namun juga mempengaruhi sifat fisik dan dinamik batuan [11; 12]. Proses ubahan yang mengubah tekstur dan komposisi batuan kristalin dan batuan sedimen juga menunjukkan hasil yang serupa. Hubungan parameter petrografi, derajat pelapukan terhadap sfat fisik dan mekanik juga dinyatakan dalam fungsi regresi [13; 14]. Pada breksi vulkanik, derajat pelapukan diikuti penigkatan kadar air dan porositas diikuti penurunan bobot isi [15]. Fungsi porositas, berat jenis, dan angka pori endapan nikel laterit terhadap senyawa mayor FeO, MgO, dan SiO_2 juga menunjukkan korelasi negatif dalam regresi linear [16].

Pada penambangan terbuka nikel laterit, lereng bukaan tersusun oleh material produk pelapukan berdasarkan zona profil laterit yang berbeda. Gradasi pelapukan pada bukaan lereng tambang memungkinkan hadirnya berbagai jenis gerakan tanah. Tidak hanya pada lereng tambang, lereng profil nikel laterit di sepanjang jalan raya juga memiliki potensi yang sama. Pada lereng dengan derajat pelapukan tinggi dimana batuan telah sepenuhnya terdekomposisi, umumnya dapat terbentuk tipe longsoran busur dan aliran bahan rombakan. Semakin rendah derajat pelapukan, persentase fragmen batuan dasar semakin besar, longsoran dikontrol oleh kombinasi rekahan dan bahan rombakan dalam bentuk *debris slides*, *rockfall*, maupun tipe longsoran batuan lainnya [17]

Penelitian ini berupa penentuan profil endapan nikel laterit berdasarkan kandungan mineral dan kandungan senyawa mayor yang juga dikorelasikan dalam fungsi derajat pelapukan [18]. Derajat pelapukan dikorelasikan dengan berbagai properti keteknikan yang mencakup properti fisis (indeks plastisitas dan bobot isi) sdan properti mekanis (kuat tekan batuan dasar dan kuat geser profil laterit) dalam fungsi regresi linear. Penentuan sifat fisik dan mekanik batuan sangat diperlukan pada pembuatan model lereng tambang. Ketepatan parameter ini dapat mengurangi terjadinya runtuhan dan dapat menentukan kemiringan optimal pada lereng tambang sehingga mengurangi resiko penambangan dan meningkatkan efisiensi produksi [19].

METODOLOGI

Metode yang digunakan adalah perpaduan metode observasi lapangan dan metode kuantitatif eksperimental. Tahapan penelitian mencakup deskripsi singkapan profil nikel laterit, pengambilan sampel batuan dasar dan bahan rombakannya yang representatif mewakili perbedaan zona profil.

Pada tahapan analisis, sampel batuan dasar dibuat dalam bentuk sayatan tipis. Pengamatan komposisi mineral primer dan sekunder serta klasifikasi batuan ultramafik [20] menggunakan mikroskop polarisasi tipe E-200. Penentuan komposisi mineralogi profil laterit menggunakan XRD tipe PANalytical PW3040. Senyawa mayor (Fe, MgO, SiO_2, Al_2O_3, dan Cr_2O_3) dan senyawa minor (Ni, Co, CaO, dan TiO_2) diperoleh dari analisis *corebox* menggunakan XRF Niton XL-2 *portable*.

Pengujian sifat fisik dan sifat mekanis berupa indeks plastisitas, bobot isi, dan kuat geser dilakukan pada sampel laterit di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Halu Oleo, sedangkan pengujian nilai kuat tekan dan kuat geser batuan dasar dilakukan di UPT Laboratorium Kontruksi Dinas Sumber Daya Air dan Bina Marga. Korelasi nilai sifat fisis dan mekanis menggunakan fungsi regresi ditunjukkan dengan nilai koefisien determinasi (R^2). Koefisien deteminasi (R^2) dapat menunjukkan seberapa kuat pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Nilai R^2 mendekati 1 menunjukkan pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat semakin kuat, baik dalam fungsi positif maupun negatif [21].

HASIL DAN DISKUSI

Tipe Batuan Dasar

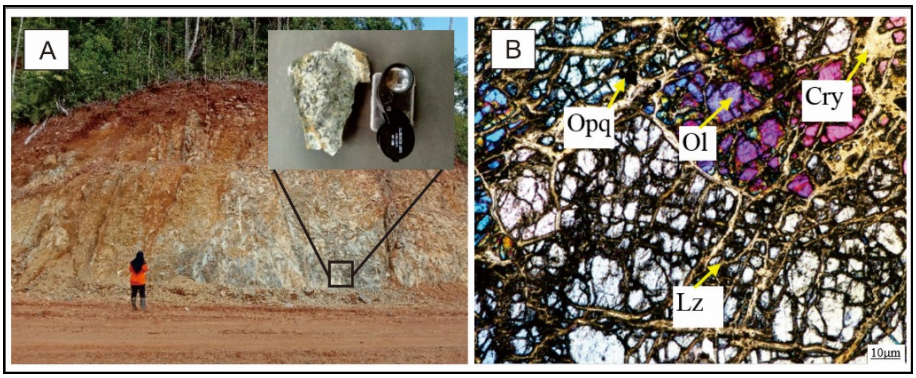
Sebanyak empat sampel sayatan tipis diambil dari singkapan batuan dasar bukaan tambang yang merepresentasikan variasi batuan dasar pada daerah penelitian. Berdasarkan analisis petrografi pada keempat sampel tersebut, batuan dasar penyusun profil nikel laterit pada daerah penelitian terbagi menjadi satuan dunit terserpentinisasi dan werlit terserpentinisasi.

Satuan dunit terserpentinisasi tersebar luas dan berasosiasi dengan daerah perbukitan dengan kemiringan hingga 50°. Secara megaskopik batuan ini berwarna abu-abu gelap kecokelatan dengan kesan terang yang menunjukkan hadirnya mineral serpentin sebagai mineral sekunder. Ukuran kristal mineral terlihat lebih halus dan setempatan dijumpai urat serpentin memotong tubuh batuan. Kesan kecokelatan menunjukkan hadirnya mineral oksida. Dunit hadir dengan tekstur hipokristalin, faneritik, mineral berbentuk subhedral-anhedral, relasi equigranular. Hadir mineral utama seperti olivin, piroksen, diikuti mineral sekunder berupa serpentin, magnetit, dan talk.

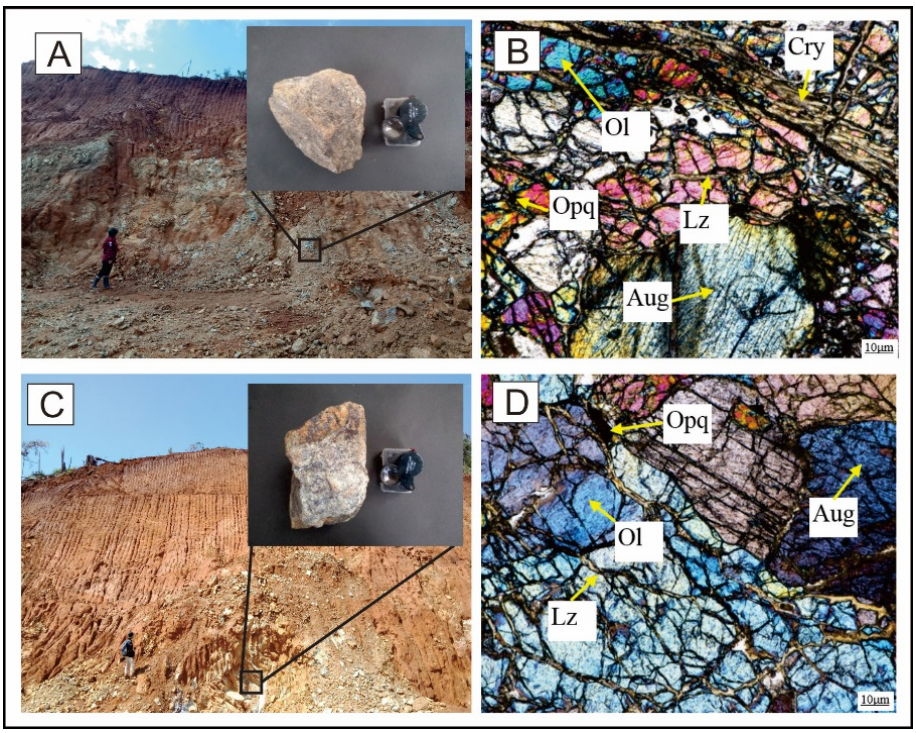
Pada pengamatan dengan mikroskop polarisasi, komposisi mineral pada dunit terserpentinisasi hadir dengan warna absorbsi *colourless* dan abu-abu, warna interferensi kuning, putih, coklat, dan abu-abu, bertekstur holokristalin, faneritik, relasi equigranular, bentuk eubhedral-anhedral, terdiri dari mineral olivine (Ol), serpentin dengan jenis krisotil (Cry) dan lizardit (Lz), serta mineral opak (Opq), dengan ukuran mineral 0,03-0,4 mm. Batuan ini dicirikan oleh kelimpahan olivin (67%) dengan ciri utama mineral olivin menunjukkan tekstur *fractured* oleh deformasi. Variasi kristal olivin berkisar 0,1-0,5 mm yang berasosiasi dengan rekahan (Gambar-1) yang telah terisi oleh mineral lizardit. Lizardit juga hadir dalam tekstur *mesh structure* mengganti mineral olivin secara perlahan. Mineral krisotil dalam bentuk urat juga terlihat memotong mineral olivin. Kedua mineral serpentin ini dibedakan oleh tekstur berserabut dan warna adsorbs yang lebih rendah pada krisotil [22]

Berbeda dengan dunit, satuan werlit terserpentinisasi berasosiasi dengan daerah perbukitan miring yang memanjang utara-selatan. Werlit berwarna abu-abu terang kekuningan. Ukuran kristal mineral terlihat lebih halus dibanding dunit dan setempatan dijumpai urat serpentin dan krisopras memotong tubuh batuan. Kesan kekuningan menunjukkan hadirnya mineral oksida-hidroksida. Hadir mineral utama berupa piroksen augite (Aug) berbentuk subhedral-anhedral (Gambar-2).

http://dx.doi.org/10.20527/jg.v9i2.14860



Gambar-1. (A) Foto sampel handspecimen dari batuan dunit terserpentinisasi dan (B) fotomikrograf sayatan tipis nikol silang pada perbesaran 10 µm yang menunjukkan vein krisotil mengisi rekahan



Gambar-2. Foto sampel handspecimen dari batuan werlit terserpentinisasi, (B,D) fotomikrograf sayatan tipis nikol silang pada perbesaran 10 µm yang menunjukkan mineral lizardit dengan tekstur *mesh structure*

Mineralogi Endapan Nikel Laterit

Analisis geokimia pada sampel pellet nikel laterit menghasilkan persentase unsur/senyawa kimia pada sampel seperti kandungan unsur minor nikel (Ni), cobalt (Co), titanium oksida (TiO_2), kromit (Cr_2O_3), dan mangan oksida (MnO); dan kandungan senyawa mayor seperti besi (Fe), silika (SiO_2), magnesium (MgO), alumina (Al_2O_3), dan kalsium oksida (CaO). Komposisi profil nikel laterit dicirikan dengan kelimpahan besi, silika, dan magnesium. Ketiga senyawa ini membentuk berbagai mineral hidrosilikat dan oksida yang umum dijumpai pada lapisan limonit dan saprolit. Kandungan besi dan silika cenderung bervariasi dibanding ketiga senyawa mayor lainnya. Beberapa *outliners* data dijumpai pada senyawa mayor (Gambar-3). Pada senyawa minor, nikel terakumulasi dengan kadar rata-rata 1,1%. Kandungan nikel bersama senyawa CaO cukup bervariasi, dibandingkan kandungan Co dan TiO_2 yang relatif stabil.

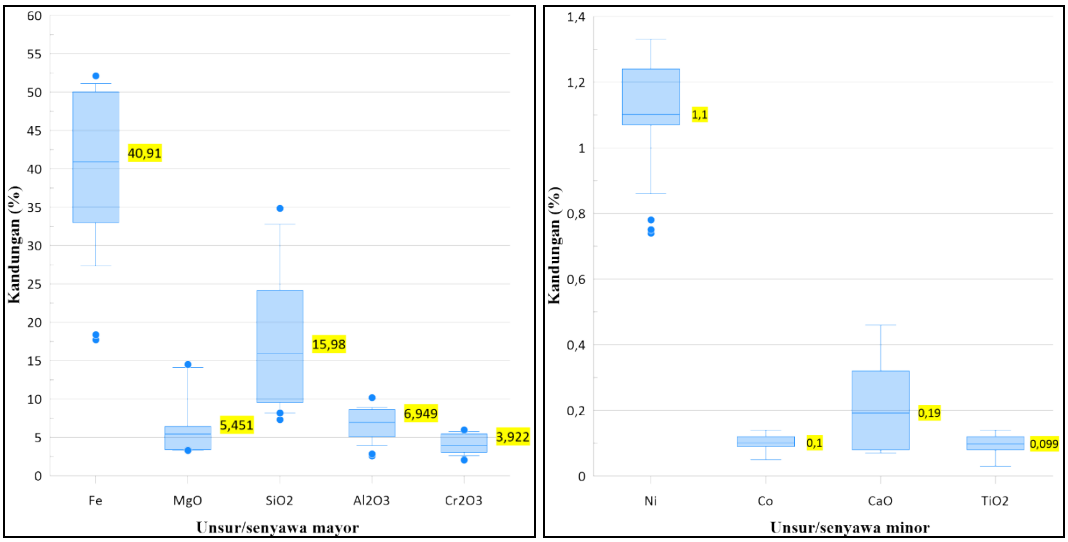
Pada pengujian mineralogi profil laterit, sebanyak empat sampel laterit penyusun zona limonit dan saprolit dipilih pada pengujian XRD. Sampel limonit dan saprolit dihaluskan dalam bentuk bubuk hingga lolos saringan #150. Sampel dianalisis selama 30 menit persampel. Data hasil analisis berupa diffractogram fungsi sudut difraksi (2θ) terhadap intensitas relatif yang menunjukkan intensitas berbagai unsur pada sampel (Gambar-4).

Analisis kuantitatif XRD terhadap zona limonit menunjukkan zona limonit didominasi oleh mineral hidroksida gutit, diikuti mineral lainnya berupa zeolit dan kuarsa, bersama hematit. Zona saprolit diominasi oleh kelompok mineral silikat berupa kuarsa, talk, dan hornblende; kelompok serpentin yaitu lizardit, dan mineral lempung saponit dari kelompok smektit (Tabel-1). Saponit adalah produk alterasi lanjutan pada mineral serpentin.

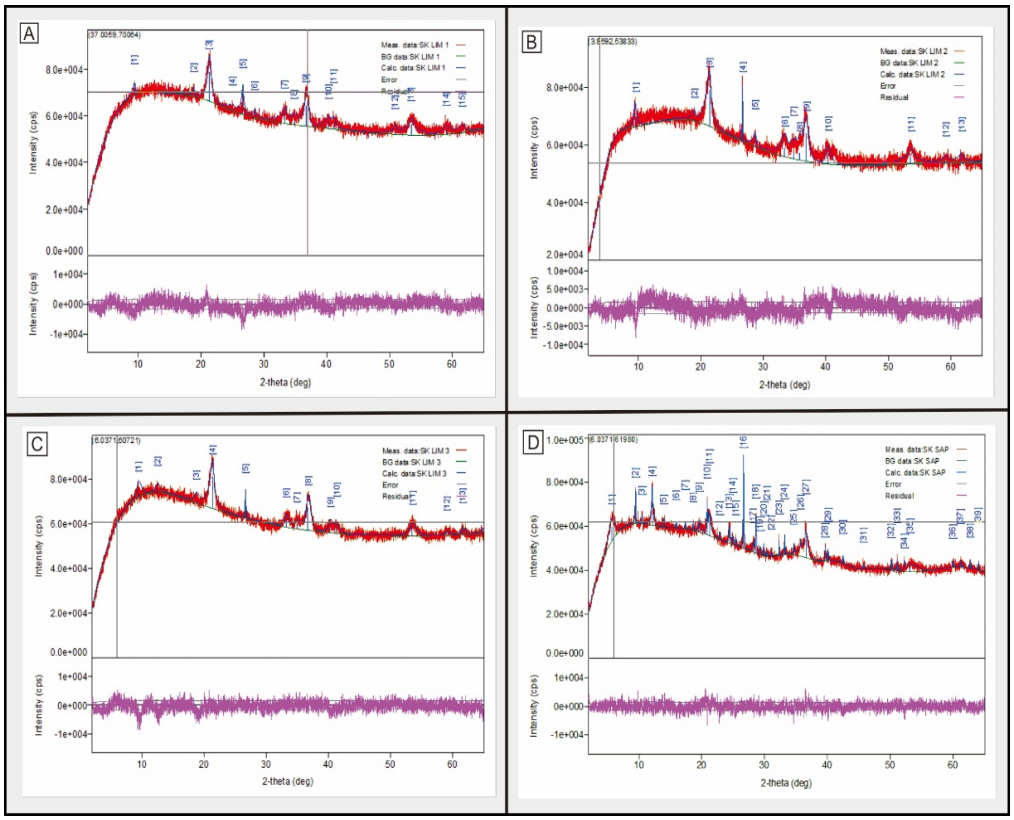
Profil Endapan Nikel Laterit

Endapan nikel laterit daerah penelitian dibagi menjadi zona limonit, zona saprolit, dan batuan dasar. Zona limonit dibagi menjadi zona *red limonite* dan zona *yellow limonite* berdasarkan perbedaan warna dan asosiasi mineral yang hadir. Zona saprolit tersusun atas lapisan saprolit lunak yang didominasi fragmen pasir halus hingga lanau dan saprolit kasar yang dicirikan dengan hadirnya fragmen batuan dasar. Batuan dasar berupa batuan peridotit terserpentinsasi.

http://dx.doi.org/10.20527/jg.v9i2.14860



Gambar-3. Grafik boxplot kandungan nilai senyawa mayor dan senyawa minor pada profil nikel laterit. Nilai rata-rata ditunjukkan berwarna kuning dan dijumpai beberapa data *outliner* di luar persentil 10 (P_{10}) dan persentil 90 (P_{90})



Gambar-4. Diffractogram sampel limonit LIM-1 (A), LIM-2 (B), LIM-3 (C), dan sampel saprolit SAP (D)

Tabel-1 Komposisi mineral pada sampel laterit yang didominasi oleh hematit, gutit, dan kelompok mineral silikat

Kode Sampel	Mineral (%)							
	Hematit	Kuarsa	Gutit	Zeolit	Lizardit	Talk	Hornblende	Saponite
LIM-1	42	17	31	10				
LIM-2	11	6,6	79	3,4				
LIM-3		5,5	86	8,6				
SAP		52	8,5		21	11,5	7	0,01

Zona limonit adalah tempat terakumulasinya konsentrasi unsur residual pada batas nilai maksimum selama laterisasi dan pencucian terjadi. Semua unsur yang mudah larut secara kimia (Ca, Mg, dan Si) larut meninggalkan zona limonit selama pencucian dan terakumulasi pada zona saprolite. Lapisan limonit menyisakan kelompok unsur (Fe, Al, Mn, dan Cr). Pada lapisan ini pengayaan nikel dapat terikat pada struktur mineral gutit bersama sejumlah unsur seperti alumunium, mangan dan kromium. Pada zona limonit, struktur, tektur,

http://dx.doi.org/10.20527/jg.v9i2.14860

dan kehadiran mineral primer tidak lagi terlihat dan sepenuhnya telah terdekomposisi menjadi tanah laterit. Zona limonit pada daerah penelitian dibagi menjadi zona *red limonite* dan zona *yellow limonite.*

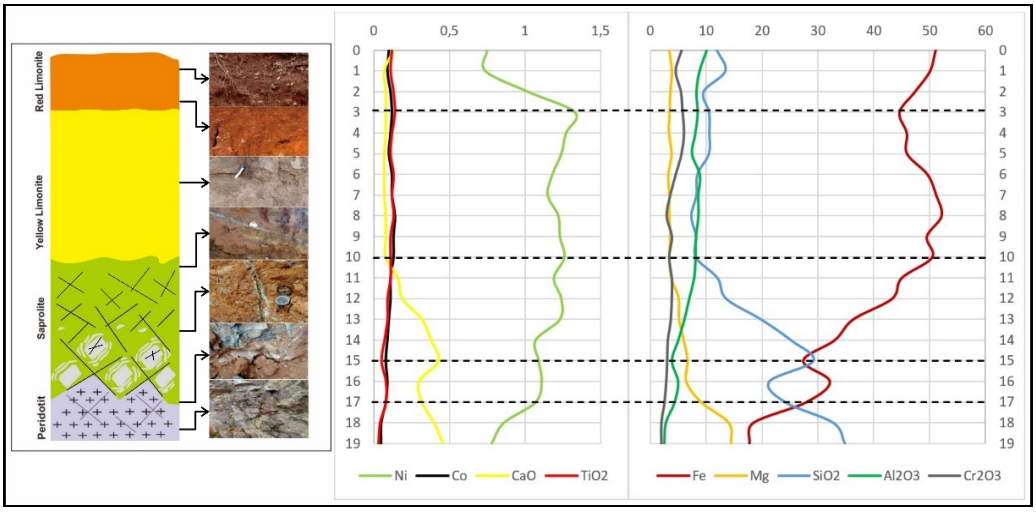
Zona *red limonite* hadir sebagai lapisan teratas profil nikel laterit menutupi lapisan *yellow limonite*. Zona ini hadir dengan ketebalan 3 meter berwarna coklat kemerahan, berbutir halus, batuan telah sepenuhnya terdekomposisi menjadi tanah residual oleh laterisasi dan disetarakan dengan derajat pelapukan tipe VI [18]. Berdasarkan kandungan mineralogi, zona ini dicirikan oleh kelimpahan mineral oksida berupa hematit dan mangan oksida, mineral hidroksida berupa gutit, dan sebagian kecil kuarsa (Tabel-2). Berdasarkan analisis geokimia XRF, lapisan ini dicirikan oleh gradasi pengayaan nikel (Ni) hingga pada kadar 1,35% diikuti penurunan nilai besi (Fe) hingga 44%. Kandungan SiO_2 turut menunjukkan penurunan dalam jumlah yang tidak signifikan (9,5%), sedangkan unsur/senyawa lain cenderung konstan (Gambar-5).

Zona *yellow limonite* merupakan lapisan dasar zona limonit. Zona ini hadir dengan ketebalan hingga 7 meter. Zona ini didominasi warna cokelat kekuningan, berbutir pasir halus hingga lempung, batuan belum sepenuhnya terdekomposisi menjadi tanah residu oleh laterisasi. Setempatan masih dijumpai fragmen batuan peridotit berukuran pasir. Zona ini disetarakan dengan derajat pelapukan tipe V (lapuk kuat). Berdasarkan kandungan mineralogi, zona ini dicirikan oleh kelimpahan mineral hidroksida berupa gutit, diikuti mineral silikat berupa kuarsa dan zeolite, dan sebagian kecil hematit (Tabel-2). Berdasarkan hasil analisis geokimia XRF, lapisan ini dicirikan oleh pengayaan nikel (Ni) secara konstan pada interval kadar 1,15% - 1,35%, diikuti peningkatan kembali kadar Fe hingga mencapai 52% (Gambar-5). Disisi lain unsur minor kromium (Cr) pada lapisan ini juga menunjukkan penurunan nilai kadar. Pola unsur tersebut, diinterpretasikan oleh kehadiran gutit yang dominan pada lapisan ini. Mineral gutit mengikat unsur nikel (Ni) dan besi (Fe), sedangkan berkurangnya hematit dicirikan dengan perubahan warna menjadi kekuningan dan berkurangnya unsur kromium (Cr) hingga mencapai 2,96%. Di sisi lain beberapa senyawa mayor dan minor relatif stabil.

Zona saprolit mengalami pelapukan kimia yang paling aktif. Zona ini disebut juga zona pencucian dengan berbagai akumulasi unsur yang mudah larut dalam air bergerak di bawah limonit hingga mencapai zona dengan pH netral. Zona saprolit umumnya dicirikan oleh kelimpahan mineral silikat dan tingginya kandungan magnesium (Mg), Silika (SiO_2), dan kalsium (Ca). Zona ini umumnya berada di bawah muka airtanah. Zona jenuh air membentuk lapisan dengan fragmen batuan dasar yang diselimuti oleh mineral sekunder. Tekstur, struktur, dan sebagian mineral primer batuan dasar masih dapat dikenali.

Bagian atas zona saprolit dengan ketebalan 3-4 m berupa lapisan berwarna kuning kecokelatan hingga kehijauan dengan dominasi fragmen pasiran dan lempung (*earthly saprolite*). Secara megaskopik, beberapa mineral sekunder turut hadir seperti serpentin dan talk. Relik mineral primer pada fragmen batuan masih dapat dikenali dengan menggunakan lup. Pada lapisan ini hadir mineral hidroksida gutit dan mineral lempung saponite (Tabel-2). Saponite merupakan kelompok mineral smektit oleh hasil pelapukan mineral serpentin. Berdasarkan hasil geokimia XRF, lapisan ini dicirikan oleh terdeplesinya berbagai senaywa mayor dan minor. Kandungan silika (SiO_2) meningkat dengan signifikan hingga 29%, diikuti peningkatan kalsium (CaO), dan magnesium (Mg) hingga 6,43% meskipun tidak signifikan. Peningkatan magnesium (Mg) juga diikuti penurunan nilai alumina (Al_2O_3) secara gradual pada batas bawah saprolit hingga mencapai 3,92% dan penurunan kandungan kobalt (Co). Pada senyawa mayor, lapisan ini juga dicirikan oleh deplesi kandungan besi (Fe) secara signifikan hingga turun menjadi 21% (Gambar-5).

Lapisan bawah zona saprolit memiliki karakteristik yang berbeda. Lapisan ini dicirikan dengan hadirnya fragmen batuan dasar berukuran kerikil hingga kerakal (*rocky saprolite*), meskipun fragmen dominan masih berupa pasiran. Lapisan ini berwarna abu-abu terang kehijauan yang dicirikan oleh kelimpahan mineral silikat dan serpentin. Mineral gutit masih dijumpai, sedangkan pada fragmen batuan didominasi mineral silika (kuarsa dan hornblende) dan mineral sekunder berupa serpentin lizardit. Fragmen batuan belum sepenuhnya terdekomposisi menjadi tanah residual oleh laterisasi. Hadirnya mineral primer dan sekunder pada fragmen menjadikan zona ini disetarakan dengan zona dengan derajat pelapukan tipe IV (lapuk sedang).



Gambar-5. Profil endapan nikel laterit pada daerah penelitian

http://dx.doi.org/10.20527/jg.v9i2.14860

Lapisan ini juga dicirikan dengan peningkatan nilai besi (Fe) dan magnesium (Mg), diikuti peurunan nilai silika dan kalsium. Perubahan ini diinterpretasi akibat tekstur dan komposisi zona saprolit bawah yang didominasi fragmen batuan dasar. Batas pembagian zona saprolit atas dan bawah tidak begitu tegas, pembagiannya didasari pada kontur pelapukan yang berkembang pada singkapan laterit daerah penelitian.

Batuan dasar penyusun profil laterit berupa batuan peridotit yang terdiri dari dunit dan werlit. Batuan ultramafik ini telah mengalami pelapukan derajat rendah dan terserpentinisasi, namun komposisi batuan tidak mengalami perubahan secara signifikan. Pada tubuh batuan dasar dijumpai banyak rekahan, didominasi oleh kekar dengan orientasi tidak beraturan. Sebagian kekar telah terisi mineral sekunder membentuk vein silika. Serpentinisasi pada batuan dasar juga dicirikan oleh penggantian mineral olivin oleh mineral serpentin tipe lizardit membentuk *mesh structure* dengan bentuk kristal olivin yang masih dapat dikenali pada sayatan tipis. Krisotil juga hadir mengisi rekahan pada batuan dasar. Pada singkapan, krisotil dicirikan dengan tekstur berserabut, mudah digores, dan berwarna terang. Sedangkan pada sayatan tipis, krisotil mengisi rekahan membentuk struktur vein yang memotong mineral primer dengan bukan <0,1 mm. Mineral ini dicirikan dengan warna interferensi kekuningan, belahan 1 arah, dan berserabut.

Batuan dasar disusun oleh mineral primer berupa olivin, ortopiroksen, dan mineral opak serta hadirnya mineral serpentin sebagai mineral sekunder (Tabel-2). Zona ini dicirikan oleh menurunnya kandungan Fe dengan signifikan hingga 17%, diikuti penurunan kandungan nikel (Ni) sebesar 0,78% dan alumina. Di sisi lain, zona batuan dasar ini dicirikan dengan peningkatan nilai silika hingga 35% diikuti kenaikan kandungan kaslium dan Mg hingga 14% (Gambar-5). Perubahan komposisi pada batuan dasar menunjukkan komposisi asal unsur penyusun batuan peridotit mengalami proses pengayaan dan deplesi selama laterisasi berlangsung.

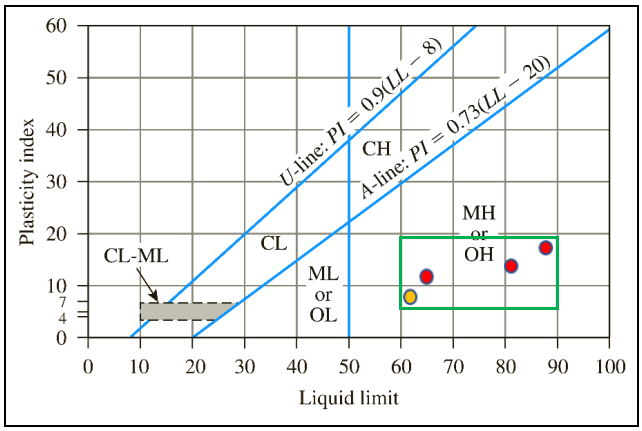
Tabel-2 Komposisi mineral penyusun profil nikel laterit yang menunjukkan kelimpahan mineral silikat dan serpentin pada batuan dasar dan saprolite diikuti kehadiran mineral oksida dan hidroksida pada limonit

Zona	Kelompok Mineral				
	Oksida	Hidroksida	Lempung	Silikat	Serpentin
Red Limonite	Hematite Fe_2O_3	-	-	Kuarsa SiO_2 Zeolite $Na_2Al_2Si_3O_{10}\cdot 2H_2O$	-
Yellow Limonite	Hematite Fe_2O_3	Gutit FeO(OH)	-	Kuarsa SiO_2 Zeolite $Na_2Al_2Si_3O_{10}\cdot 2H_2O$	-
Saprolite	-	Gutit FeO(OH)	Saponite (Ca,Mg)(Si,Al)4O10 (OH)2.4H2O	Kuarsa SiO_2 Talk $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ Hornblende (Na,Ca,Mg)Si8O22(OH)4	Lizardit $Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$
Bedrock	-	-	-	Olivin $(Fe,Mg)_2SiO_4$ Piroksen $(Ca,Na,Mg,Fe)Si_2O_6$	Lizardit $Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$

Sifat Fisis dan Mekanis Endapan Nikel Laterit

Tanah berbutir halus pada profil laterit dapat diklasikasikan sebagai kelompok MH yaitu kelompok lanau inorganik (M) dengan plastisitas sedang hingga tinggi (H) (Gambar-6). Pada lapisan limonit, fragmen penyusun berupa pasir berlanau (SM) dengan fraksi halus 27%-39%. Pada lapisan saprolit, fragmen penyusun berupa pasiran tersortasi baik (SW) dengan fraksi halus 7,99% dengan plastisitas sedang (PI<10).

Pengujian pada empat sampel menunjukkan peningkatan nilai indeks plastisitas pada profil laterit seiring peningkatan derajat pelapukan. Lapisan saprolit dengan derajat pelapukan kuat (IV) memiliki indeks plastisitas sedang dan cenderung meningkat hingga pada derajat pelapukan tanah residu pada top limonit. Peningkatan nilai plastisitas dapat dinyatakan dalam fungsi regresi linear dengan nilai R^2 sebesar 0,97 yang disimpulkan berkorelasi positif dengan kuat (Gambar-7). Peningkatan ini menunjukkan zona pengayaan residu pada endapan nikel laterit memiliki indeks plastisitas tinggi. Nilai ini berhubungan dengan aktivitas tanah yang tinggi dan kecenderungan tanah untuk mengembang (*swelling*) [23].

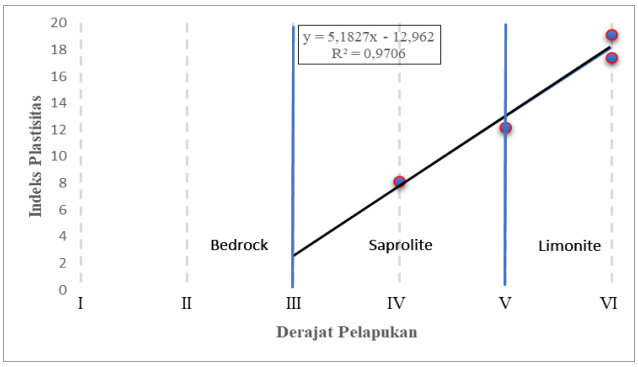


Gambar-6 Tipe tanah berbutir halus berdasarkan indeks plastisitas yang menunjukkan kategori indeks plastisitas sedang hingga tinggi

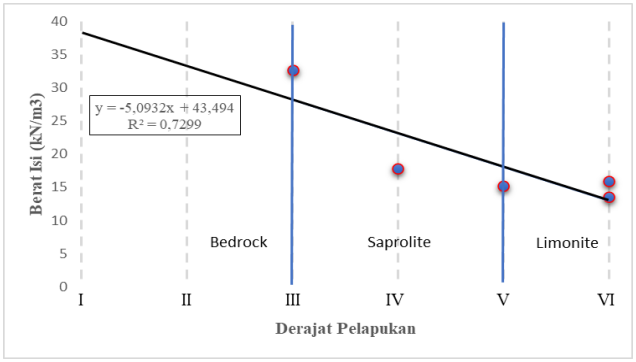
Hubungan antara bobot isi terhadap tingkat pelapukan memperlihatkan fungsi bobot isi yang secara umum mengalami penurunan nilai seiring meningkatnya derajat pelapukan (Gambar-8). Hasil analisis regresi linear menunjukkan bobot isi pada zona limonit dan saprolit mengikuti kurva geometrik terhadap perbedaan zona

http://dx.doi.org/10.20527/jg.v9i2.14860

pelapukan pada batuan dasar hingga zona limonit, dengan persamaan regresi bobot isi y=-6,007x+46,844; R^2=0,7847; dengan n=5. Penurunan fungsi bobot isi diakibatkan oleh proses disintegrasi dan dekomposisi yang mengubah batuan dasar menjadi lebih lunak dan mengandung lebih banyak pori. Perubahan nilai bobot isi juga diikuti dengan semakin banyaknya mineral oksida dan hidroksida pada profil dibanding mineral silikat.



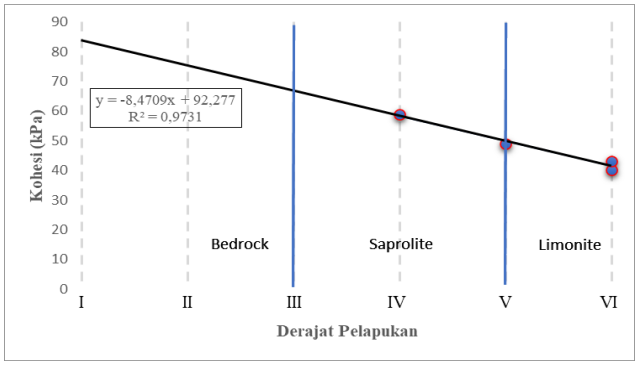
Gambar-7 Grafik perubahan indeks plastisitas terhadap derajat pelapukan dalam fungsi regresi linear



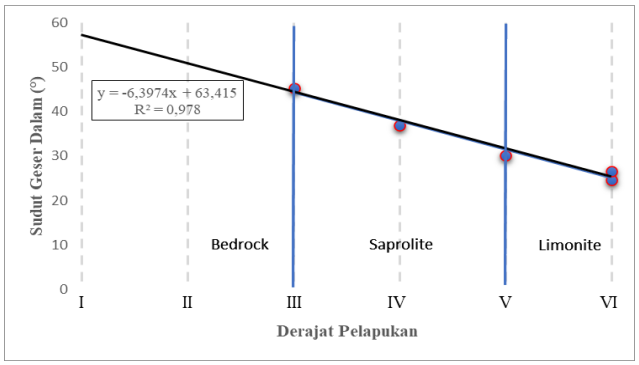
Gambar-8 Grafik perubahan nilai bobot isi terhadap derajat pelapukan sebagai korelasi negatif dalam fungsi regresi linear

Kuat geser profil laterit pada daerah penelitian ditunjukkan dengan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (°). Kohesi merupakan fungsi adesif oleh semen maupun kristalisasi mineral yang mengikat fragmen/kristal pada batuan, sedangkan sudut geser dalam adalah parameter analogi yang menunjukkan besar sudut yang diperlukan untuk melampaui friksi internal [24]. Kedua parameter ini menggambarkan kurva keruntuhan batuan dan sangat penting dalam analisis kestabilan lereng.

Kohesi dan sudut geser dalam menunjukkan penurunan nilai secara linear seiring peningkatan derajat pelapukan (Gambar-9). Fungsi penurunan ini disebabkan tekstur batuan tidak lagi pejal seiring dengan proses disintegrasi. Hadirnya mineral sekunder yang tidak terikat kuat pada batuan dasar juga menyebabkan nilai kohesi dan sudut geser dalam berubah secara gradual. Kohesi dan sudut geser dalam menunjukkan fungsi korelasi negatif dengan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,97 (Gambar-10). Secara umum bobot isi dan kuat geser menunjukkan fungsi korelasi negatif terhadap derajat pelapukan, sedangkan indeks plastisitas menunjukkan korelasi positif yang kuat (Tabel-4).



Gambar-9 Grafik perubahan nilai kohesi terhadap derajat pelapukan sebagai korelasi negatif dalam fungsi regresi linear



Gambar-10 Grafik perubahan sudut geser dalam terhadap derajat pelapukan sebagai korelasi negatif dalam fungsi regresi linear

Tabel-3 Rangkuman karakteristik profil endapan nikel laterit berdasarkan kandungan unsur/senyawa, komposisi mineral, klasifikasi tanah, dan properti keteknikan yang mencakup sifat fisik dan mekanik

Zona	Kandungan unsur/senyawa				Mineralogi	Klasifikasi	Properti Keteknikan
	Ni (%)	Fe (%)	Mg (%)	SiO_2 (%)			
Red limonite	0,75-1,15	44,5-51	3,2-3,3	11,9-13,4	hematit, kuarsa, zeolite	SM-MH Pelapukan (VI)	Tanah lanau inorganik berpasir plastisitas tinggi, berat isi 15,98kN/m^3. Kekuatan geser: kohesi 40,2kPa dengan sudut geser dalam 24,7°.
Yellow limonite	1,15-1,33	44,5-51	3,3-3,4	7,32-11,9	gutit, hematit, kuarsa, zeolite	SM-MH Pelapukan (VI)	Tanah lanau inorganik berpasir plastisitas tinggi, berat isi 13,53kN/m^3. Kekuatan geser: kohesi 43,15kPa dengan sudut geser dalam 26,56°.
Saprolite	0,86-1,33	27,3-44,5	3,4-9,12	11,9-29,2	gutit, saponite, kuarsa, talk, lizardit	*Earthly saprolite* SM-MH Pelapukan (V) *Rocky saprolite* SW-MH Pelapukan (IV)	Tanah lanau inorganik berpasir plastisitas tinggi, berat isi 15,2kN/m^3. Kekuatan geser: kohesi 49,03kPa dengan sudut geser dalam 30,11°. Tanah berpasir sortasi baik dengan lanau inorganik plastisitas sedang, berat isi 17,85kN/m^3. Kekuatan geser: kohesi 58,84kPa dengan sudut geser dalam 36,87°.
Bedrock	0,78-0,86	17,7-27,3	9,12-14,5	29,2-34,9	olivin, piroksen, lizardit, krisotil	Dunit, werlit Pelapukan (III-IV)	Peridotit terserpentinisasi dengan nilai kuat tekan (UCS) 13,85-49,45 MPa. Berat isi 32,67kN/m^3. Kuat geser: kohesi 281,3kPa dan sudut geser dalam 45,3°.

http://dx.doi.org/10.20527/jg.v9i2.14860

Tabel-4 Korelasi berbagai parameter sifat fisik dan mekanik (y) profil nikel laterit terhadap fungsi derajat pelapukan (x)

Parameter (Y)	R^2	Tipe Korelasi	Fungsi Regresi
Indeks Plastisitas (PI)	0,97	Positif	y=5,2x-12,96
Bobot Isi (γ)	0,73	Negatif	y=-5,1x+43,5
Sudut geser dalam (°)	0,98	Negatif	y=-6,4x+63,4
Kohesi (c)	0,97	Negatif	y=-8,5x+92,3

KESIMPULAN DAN SARAN

Profil nikel laterit pada daerah penelitian tersusun atas lapisan limonit, saprolit, dan batuan dasar. Ketiga lapisan ini dipisahkan dengan baik menggunakan deskripsi megaskopik, prilaku senyawa geokimia fungsi kedalaman, komposisi mineralogi, dan properti keteknikan. Senyawa mayor besi (Fe), MgO, SiO_2, dan nikel (Ni) menunjukkan perubahan nilai yang signifikan pada profil. Diikuti dengan fungsi regresi linear dengan korelasi kuat pada perubahan derajat pelapukan terhadap nilai indeks plastisitas (korelasi positif), bobot isi, kohesi, dan sudut geser dalam (korelasi negatif). Diperlukan variasi pengukuran lebih banyak agar dapat diketahui variasi perubahan properti keteknikan pada masing-masing zona dengan parameter yang lebih beragam, khususnya pengaruh perubahan kandungan senyawa mayor terhadap sifat fisis dan mekanis batuan ultramafik dan endapan lateritnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Halu Oleo atas bantuan dana penelitian dalam skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) internal.

DAFTAR ACUAN

[1] Arif, I. (2018). *Nikel Indonesia*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. 276 hal.

[2] Ahmad, W. (2006). *Fundamentals of Chemistry, Mineralogy, Weathering Processes and Laterite Formation*. Training Manual. ITSL INCO, Ltd. 97 hal.

[3] Kadarusman, A., Miyashita, S., Maruyama, S., Parkinson, C. D., & Ishikawa, A. (2004). Petrology, geochemistry and paleogeographic reconstruction of the East Sulawesi Ophiolite, Indonesia. *Tectonophysics*, **392**(*1-4*), hal. 55-83. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.04.008

[4] Parkinson, C. (1998). Emplacement of the East Sulawesi Ophiolite: evidence from subophiolite metamorphic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, **16**(*1*), hal. 13-28. https://doi.org/10.1016/s0743-9547(97)00039-1

[5] Surono, & Hartono, U. (2013). *Geologi Sulawesi* (1 ed.). LIPI Press. Jakarta. 352 hal.

[6] Rusmana, E., Sukido, Sukarna, D., Haryono, E., & Simandjuntak, T. O. (1993). *Peta Geologi Lembar Lasusua-Kendari, Sulawesi, skala 1 : 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung. hal.

[7] Irzon, R., & Abdullah, B. (2016). Geochemistry of Ophiolite Complex in North Konawe, Southeast Sulawesi. *Eksplorium*, **37**(*2*), hal. https://doi.org/10.17146/eksplorium.2016.37.2.2868

[8] Butt, C. R. M., & Cluzel, D. (2013). Nickel Laterite Ore Deposits: Weathered Serpentinites. *Elements*, **9**(*2*), hal. 123-128. https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.123

[9] Elias, M. (2002). Nickel laterite deposits – geological overview, resources and exploitation. *CODES Centre of Ore Deposit Research, Special Publication*, **4**(*CODES Special Publication 4*), hal. 205-220.

[10] Freyssinet, P. H., Butt, C. R. M., Morris, R. C., & Piantone, P. (2005). Ore-Forming Processes Related to Lateritic Weathering. dalam J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, & J. P. Richards (Eds.). Society of Economic Geologists. hal. 681-722. https://doi.org/10.5382/AV100.21

[11] Diamantis, K., Gartzos, E., & Migiros, G. (2009). Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: Test results and empirical relations. *Engineering Geology*, **108**(*3-4*), hal. 199-207. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.07.002

[12] Diamantis, K., Gartzos, E., & Migiros, G. (2014). Influence of petrographic characteristics on physico-mechanical properties of ultrabasic rocks from central Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **73**(*4*), hal. 1273-1292. https://doi.org/10.1007/s10064-014-0584-x

[13] Rocchi, I., Coop, M. R., & Maccarini, M. (2017). The effects of weathering on the physical and mechanical properties of igneous and metamorphic saprolites. *Engineering Geology*, **231**, hal. 56-67. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.10.003

[14] Jeng, F. S., Weng, M. C., Lin, M. L., & Huang, T. H. (2004). Influence of petrographic parameters on geotechnical properties of tertiary sandstones from Taiwan. *Engineering Geology*, **73**(*1-2*), hal. 71-91. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.12.001

[15] Rahman, A., Triantoro, A., & Mustofa, A. (2017). Pengaruh pelapukan terhadap sifat fisik batuan dan tanah residual breksi vulkanik. *Jurnal GEOSAPTA*, **3**(*2*), hal. 79-83. https://doi.org/10.20527/jg.v3i2.3900

[16] Nauli, T. (2019). *Karakterisasi Mineralogi, Sifat Fisik, Dan Sifat Mekanik Pada Zona Laterit Di Tambang Everest, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara*. Tesis, Institut Teknologi Bandung. Tidak dipublikasikan. 67 hal.

[17] Calcaterra, D., & Parise, M. (2010). Weathering as a predisposing factor to slope movements: an introduction. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, **23**(*1*), hal. 1-4. https://doi.org/10.1144/egsp23.1

[18] Anon. (1995). The description and classificatioin of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **28**(*3*), hal. 207-242. https://doi.org/10.1144/gsl.Qjegh.1995.028.P3.02

[19] Arif, I. (2016). *Geoteknik Tambang* (1 ed.). Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. 397 hal.

[20] Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, **12**(*1*), hal. 1-33. https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0

[21] Davis, J. C. (2003). *Statistics and Data Analysis in Geology* (3 ed.). John Wiley & Sons. New York. 631 hal.

[22] Mackenzie, W. S., Adams, A. E., & Brodie, K. H. (2017). *Rocks and minerals in thin section* (2 ed.). CRC Press. London. 243 hal. https://doi.org/10.1201/9781315116365

[23] Hidayat, M. A. S., Setiawan, B., & Djarwanti, N. (2018). Stabilisasi Tanah Ekspansif Dengan Kolom Kapur, Ditinjau Terhadap Potensi Mengembang Dan Nilai Indeks Plastisitas. *Matriks Teknik Sipil*, **6**(*1*), hal. 98-104. https://doi.org/10.20961/mateksi.v6i1.36601

[24] Price, D. G. (2009). *Engineering Geology* (M. H. de Freitas, Ed.). Springer. Berlin, Heidelberg. 450 hal. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68626-2