

**DERAJAT LATERITISASI DAN PENGAYAAN UNSUR FE-NI-CO
PADA BATUAN HARSBURGIT DI PULAU SEBUKU,
KALIMANTAN SELATAN**

**DEGREE OF LATERITIZATION AND ENRICHMENT OF FE-NI-CO ELEMENTS IN
HARSBURGITE ROCKS ON SEBUKU ISLAND,
SOUTH KALIMANTAN**

**Fasya Zahra Fauziyyah Ramdani¹, Ayumi Hana Putri Ramdhani¹, Andhi Cahyadi²,
Wahyu Widodo³, dan Ernowo³**

¹Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung

²PT. Sebuku Iron Lateritic Ores

³Badan Riset dan Inovasi Nasional

fasyazahrafr@gmail.com

ABSTRAK

Iklim tropis di Indonesia menyebabkan tingginya tingkat pelapukan kimiawi atau lateritisasi pada batuan ultrabasa menghasilkan pengayaan unsur-unsur ekonomis diantaranya Fe, Ni dan Co yang terakumulasi pada zona limonit maupun saprolit. Penelitian ini dilakukan di Pulau Sebuku yang didominasi oleh batuan ultrabasa diantaranya adalah harsburgit. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh derajat lateritisasi pada zona limonit, saprolit dan batuan asal terhadap pengayaan Fe, Ni dan Co. Sebanyak 95 sampel diambil dari 9 lubang bor dan dianalisis menggunakan XRF untuk mengetahui unsur utama dan unsur ekonomis. Derajat lateritisasi dihitung dari kandungan SiO₂ dibagi dengan akumulasi total SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₂O₃ atau S/SAF indeks menggambarkan intensitas dari reaksi kimia. Nilai terendah dari S/SAF indeks menunjukkan derajat lateritisasi yang lebih tinggi. Masing-masing zona limonit, saprolit dan batuan dasar memiliki nilai indeks S/SAF berkisar dari 0,16 s.d. 0,58 (lateritisasi kuat), 0,27 s.d. 0,85 (lateritisasi sedang-kaolinisasi) dan 0,77 s.d. 1,24 (batuan induk). Zona dengan derajat lateritisasi kuat mengandung kadar Fe antara 36% s.d. 51%, Ni 0,80% s.d. 1,38 % dan Co 0,07% s.d. 1,17%. Harsburgit mengandung kadar Fe 4,86% s.d. 7,99%, Ni 0,20% s.d. 1,76% dan Co 0,005% s.d. 0,015%. Derajat lateritisasi di zona limonit lebih tinggi dibandingkan dengan zona saprolit dan batuan dasar harsburgit disebabkan oleh dekomposisi dari mineral silika, pembentukan mineral sekunder pembawa besi dan aluminium oksida-hidroksida. Derajat lateritisasi memiliki hubungan positif dengan pengayaan Fe dan Co, tetapi tidak berkorelasi terhadap pengayaan Ni.

Kata Kunci: harsburgit, derajat lateritisasi, limonit, saprolit, Fe-Ni-Co

ABSTRACT

The tropical climate in Indonesia causes a high level of chemical weathering or lateritization of ultramafic rocks which results in the enrichment of economic elements such as Fe, Ni and Co. These elements accumulate in the limonite and saprolite zones. This research was conducted on Sebuku Island which composed of ultramafic rocks, especially harsburgite. This study aims to determine the effect of the degree of lateritization in the limonite, saprolite and bedrock zones on the enrichment of economic elements. A number of 95 samples collected from 9 drill holes and analyzed using XRF to determine the main elements and economic elements. The degree of lateritization is calculated from the SiO₂ content divided by the total accumulation of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ resulting the S/SAF index which describes the intensity of the chemical reaction. The lowest value of the S/SAF index indicates a higher degree of lateritization. Each limonite, saprolite and bedrock zone has S/SAF index values ranging from 0.16 to 58 (strong lateritization), 0.27 to 0.85 (medium lateritization-kaolinization) and 0.77 to 1.24 (mother rock).

The zone with a strong degree of lateritization contains Fe levels between 36% to 51%, Ni 0.80% to 1.38% and Co 0.07% to 1.17%. The bedrock contains 4.86% to 7.99% Fe, 0.20% to 1.76% Ni and 0.005% to 0.015% Co. The degree of lateritization in the limonite zone is higher than the saprolite and bedrock zones. This is caused by the decomposition of silica minerals to form the iron and aluminum oxide-hydroxide bearing minerals. The degree of lateritization has a positive correlation with the enrichment of Fe and Co. However, the distribution of high Ni not correlated with the index of lateritization.

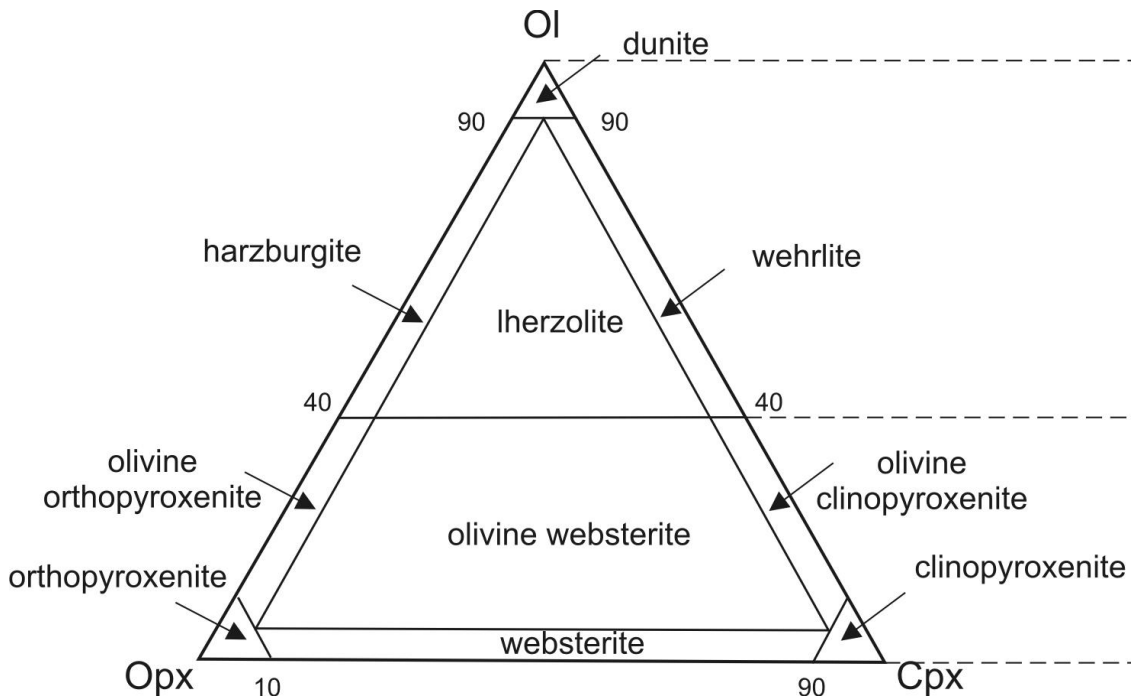
Keywords: harzburgite, degree of lateritization, limonite, saprolite, Fe-Ni-Co

PENDAHULUAN

Proses lateritisasi merupakan suatu proses pelapukan mekanis dan pelapukan kimiawi yang berjalan bersama secara pervasif pada batuan asal. Proses pelapukan tersebut terjadi dalam kondisi iklim tropis sampai sub-tropis yang lembab pada masa lampau ataupun saat ini (Marsh dkk, 2013; Butt & Cluzel, 2013; Robb, 2020). Proses rombakan, hidrasi, hidrolisis dan oksidasi menyebabkan ubahan pada komposisi batuan asal dan membentuk regolith yang cukup tebal dengan karakteristik tertentu (Robb, 2020). Proses lateritisasi terhadap batuan asal ultrabasa akan mengakibatkan

pengayaan beberapa unsur ekonomis seperti besi (Fe), nikel (Ni) dan kobal (Co).

Batuan ultrabasa merupakan bagian utama dari kerak samudera yang bila tersingkap di permukaan dikenal sebagai kompleks ofiolit. Batuan ini disusun oleh lebih dari 90% mineral-mineral mafik, yaitu mineral dengan komposisi unsur magnesium (Mg) dan besi (Fe) berupa olivin, ortopiroksin, klinopiroksin dan hornblende. **Gambar 1.** menunjukkan klasifikasi batuan ultrabasa berdasar komposisi olivin, ortopiroksin dan klinopiroksin (Streickeisen, 1973). Batuan ultrabasa yang mengalami metamorfosa akan membentuk batuan serpentin.



Gambar 1. Klasifikasi batuan ultrabasa dengan komposisi olivin dibawah 40% dikelompokkan sebagai piroksenit, dan yang diatas 40% dikelompokkan sebagai peridotit (Streickeisen, 1973). Ol : olivin, Opx: ortopiroksin, Cpx: klinopiroksin

Lateritisasi pada batuan ultrabasa umumnya menghasilkan profil bijih dari bagian bawah setelah batuan dasar berupa saprolit dan limonit yang pada bagian atasnya ditutupi *ferricrete* (Marsh dkk., 2013; Robb 2020).

Lokasi penelitian berada di Pulau Sebuku merupakan kompleks ofiolit yang mengandung batuan ultrabasa sebagai salah satu batuan penyusunnya (**Gambar 2**). Secara administratif berada di dalam wilayah Kecamatan Pulau Sebuku, Kabupaten Kotabaru, Provinsi Kalimantan Selatan dan masuk dalam area Izin Usaha Pertambangan PT. Sebuku Iron Lateritic Ores (PT. SILO). Berdasarkan hasil inventarisasi Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Badan Geologi, pada tahun 2021, sumber daya bijih besi Pulau Sebuku berjumlah 239.659.703 wmt (2,7% dari total sumber daya nasional) dan cadangan bijihnya mencapai 90.411.391 wmt (4,97% dari total cadangan nasional) (PSDMBP, 2021) dan ditambang sebagai komoditas utama.

Tujuan Penelitian

Dengan mengetahui derajat lateritisasi, maka selanjutnya dapat mengetahui kandungan besi yang terkandung pada zona limonit, karena semakin tinggi derajat lateritisasi artinya proses pencucian atau pemisahan antara mineral *mobile* dan *immobile* akan semakin baik. Sehingga dalam proses penambangan dan pengolahan akan meningkatkan produktivitas secara signifikan, hal ini disebabkan karena endapan laterit tersebut telah melalui proses pelapukan yang terjadi secara terus-menerus.

Geologi Daerah Penelitian

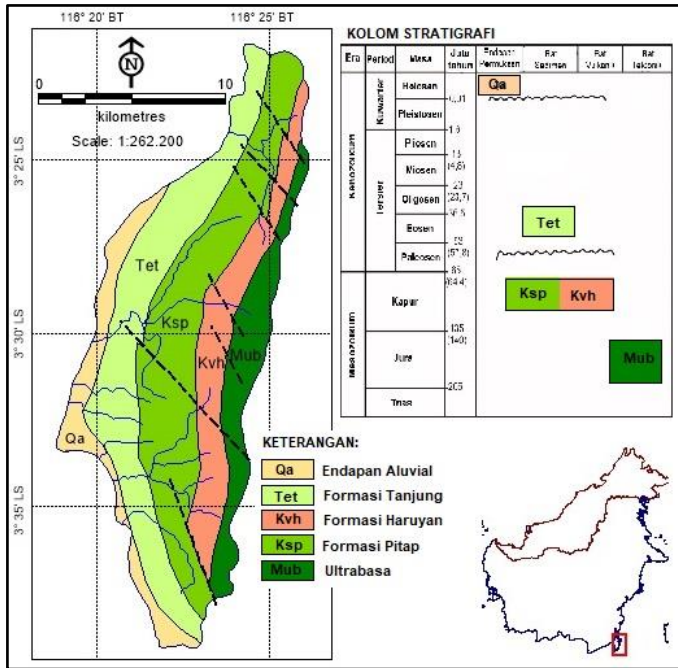
Berdasarkan peta geologi regional lembar Kotabaru (Rustandi, dkk, 1995), Pulau Sebuku tersusun oleh empat satuan/formasi batuan dengan urutan stratigrafi dari tua ke muda adalah satuan batuan ultrabasa, Formasi Pitab, Formasi Haruyan dan Formasi Tanjung serta endapan alluvial (**Gambar 2**).

Satuan batuan ultrabasa (Mub) merupakan batuan dasar berumur Jura yang diperkirakan bagian dari kerak samudra yang terdiri dari lertzolit, harsburgit, dunit, gabro, dan basal yang umumnya telah terserpentinisasi. Formasi Pitap (Ksp) berumur Kapur yang terdiri dari perselingan batupasir, batulanau, konglomerat dengan sisipan batugamping, breksi aneka bahan,

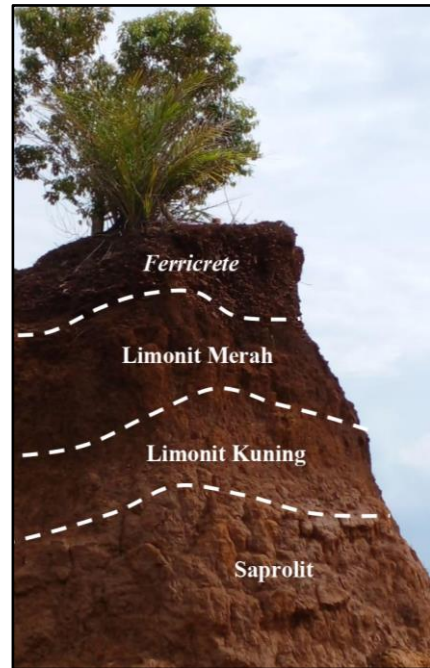
Formasi Haruyan (Kvh) terdiri dari lava basal, breksi gunungapi dan tufa, formasi ini yang secara horizontal menjemari dengan Formasi Pitap. Formasi Tanjung (Tet), berumur Eosen merupakan perselingan antara konglomerat, batupasir, batulanau dengan sisipan serpih dan batubara dan batugamping, secara tidak selaras menutup Formasi Pitap.

Endapan aluvial (Qa) terdiri dari aluvial sungai, endapan rawa, dan endapan pantai yang merupakan endapan permukaan yang menempati dataran pantai dan sepanjang sungai berupa endapan pasir dan lumpur. Struktur geologi yang berkembang di daerah ini adalah sesar dengan arah umum barat laut – tenggara.

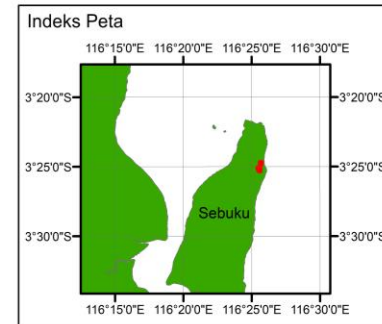
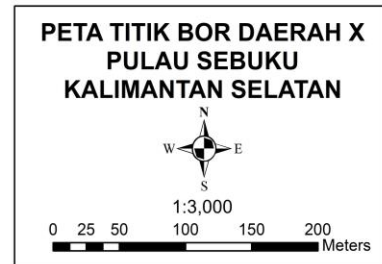
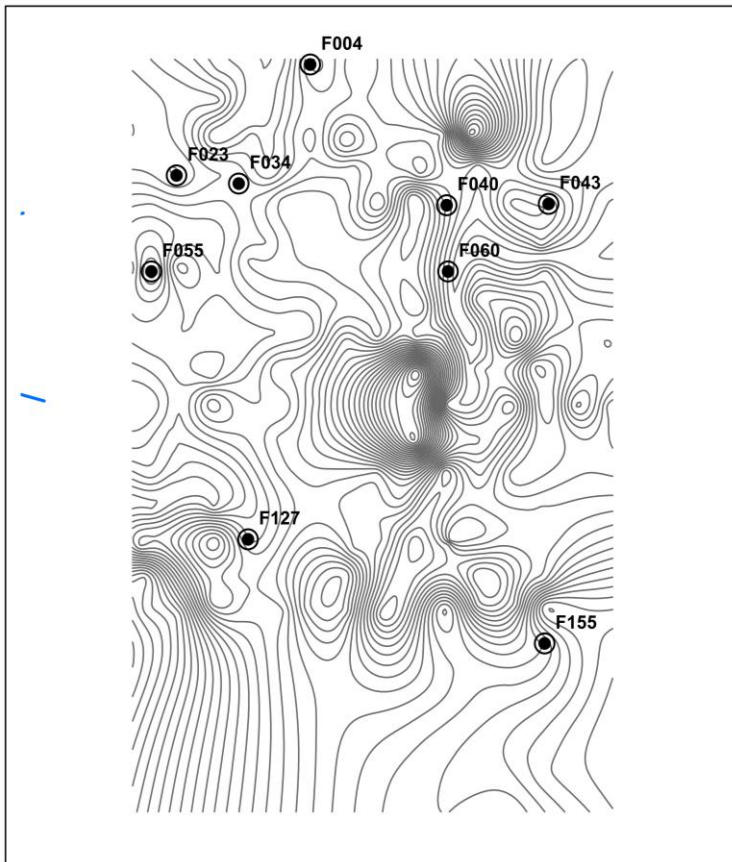
Seperti halnya endapan laterit pada umumnya, profil laterit di daerah penelitian dibagi menjadi 3 zona utama yaitu saprolit, limonit dan *ferricrete* (**Gambar 3**). Zona limonit bisa dibagi menjadi 2 yaitu limonit kuning dan limonit merah.



Gambar 2. Peta Lokasi dan Geologi Regional Daerah Penelitian (Rustandi dkk., 1995)



Gambar 3. Profil Laterit di Daerah Penelitian



Gambar 4. Peta Lokasi Pengeboran Daerah Penelitian

METODOLOGI

Pengeboran dilakukan pada 9 titik dengan variasi kedalaman antara 5 meter s.d. 10 meter. (Gambar 4). Sebanyak 95 sampel inti bor diambil dari batuan dasar, zona saprolit dan zona limonit masing-masing sebanyak 35, 33 dan 27 sampel. Analisis geokimia dengan metode X-Ray Fluorescence (XRF) dilakukan menggunakan alat S8 Tiger Bruker di Laboratorium PT. SILO, Sebuku. Satu sampel batuan dasar dilakukan analisis petrografi menggunakan Stereomikroskop Binokuler Carl Zeiss V-20 di Laboratorium Politeknik Energi dan Pertambangan, Bandung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

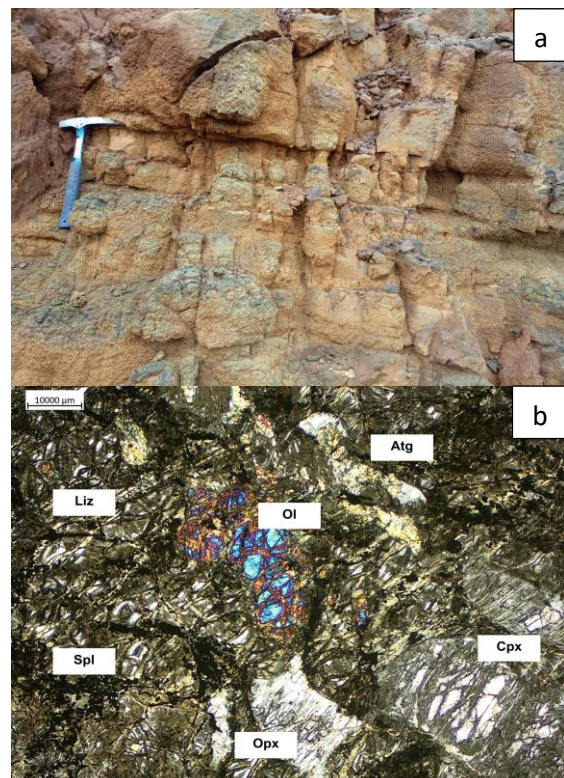
Petrografi

Nop Singkapan batuan dasar ultrabasa secara intensif terpotong oleh sesar dan rekahan sehingga mempercepat proses pelapukan karena resapan air dan oksidasi (**Gambar 5.a**). Analisis petrografi batuan asal dari inti pengeboran F060 menunjukkan jenis batuan harsburgit yang sudah mengalami serpentinisasi kuat (**Gambar 5.b**). Batuan memiliki tekstur holokristalin, porfiritik dengan bentuk butir anhedral – sub hedral. Mineral penyusun batuan adalah olivin, klinopiroksen, ortopiroksen, serpentine (antigorite, lizardit, krisotil), dan mineral opak.

Kandungan unsur-unsur mayor dari hasil analisis X-ray Fluorescence diantaranya berupa SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ dan MgO (**Tabel 1**). Pelapukan kimia pada batuan ultrabasa salah satunya dipengaruhi oleh adanya iklim tropis. Kondisi iklim yang terjadi di Indonesia menyebabkan curah hujan yang tinggi dan mengalami pergantian musim panas yang sangat cepat. Pergantian cuaca itulah yang menyebabkan terjadinya proses pelapukan. Selama terjadinya proses pelapukan, air meteorik yang bersifat asam akan berinteraksi dengan batuan ultrabasa, sehingga rasio MgO/SiO₂ akan mengalami penambahan H₂O. Penambahan tersebut akan menyebabkan unsur *mobile* seperti

MgO+CaO+SiO akan lepas sehingga dapat mempengaruhi terjadinya perubahan mineral primer menjadi mineral sekunder dalam bentuk oksihidroksida, misalnya hematit (Rollinson, 2014).

Akibat dari proses oksidasi yang tinggi, terjadi pula proses disolusi yang melarutkan mineral-mineral lain yang bersifat *mobile* dari unsur-unsur yang larut seperti Ni. Kisaran rasio MgO/SiO₂ pada limonit, saprolit dan batuan dasar masing-masing adalah 0,16 s.d. 0,58, 0,27 s.d. 0,85 dan 0,77 s.d. 1,24. Kadar MgO dan SiO₂ yang merupakan komposisi unsur penyusun mineral dalam batuan asal harsburgit semakin berkurang pada zona laterit akibat proses pelapukan dan pelarutan (**Gambar 6**). Rasio MgO/SiO₂ yang tinggi pada batuan dasar tersebut menunjukkan bahwa harsburgit sudah mengalami serpentinisasi yang kuat (Aquino dkk., 2021).



Gambar 5. a Singkapan Harsburgit di Lokasi Penelitian. **B** Foto Mikrografi Harsburgit F060 , sayatan X nikol (ol: olivine, opx: ortopiroksen, cpx: klinopiroksen, liz: lizardit, atg: antigorite, spl: spinel)

Tabel 1. Hasil Analisis XRF Unsur-Unsur Utama (dalam %) dan Perhitungan Derajat Lateritisasi

Titik Bor	Zona	Kedalaman (m)	FeO	NiO	AL ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₂	Fe ₂ O ₃	Fe	Ni	Co	SAF	S/SAF	MgO/SiO ₂
CB005	Limonit	0-1	63.55	1.06	7.56	0.11	4.11	0.85	3.09	0.71	0.01	0.01	0.01	0.20	0.01	72.12	49.39	0.83	0.07	83.79	0.05	0.21
		1-2.0	62.10	1.28	3.99	0.09	5.41	1.76	3.12	1.03	0.04	0.01	0.01	0.19	0.01	70.48	48.27	1.01	0.10	79.89	0.07	0.32
		2-2.4	30.39	1.03	4.83	0.03	27.51	20.70	1.62	0.51	0.16	0.04	0.01	0.06	0.01	59.67	23.62	0.81	0.05	92.00	0.30	0.75
CB016	Harsburgit	2.4-3.5	8.17	0.48	0.53	0.01	38.62	37.41	0.40	0.12	0.39	0.23	0.01	0.01	0.01	8.58	6.35	0.38	0.01	47.73	0.81	0.97
		0-1	64.93	1.25	6.03	0.12	3.90	0.88	3.37	0.88	0.01	0.01	0.01	0.16	0.01	73.69	50.47	0.98	0.10	83.63	0.05	0.22
		1-1.5	64.75	1.49	6.31	0.09	4.08	1.07	2.30	0.99	0.01	0.01	0.01	0.16	0.01	73.49	50.33	1.17	0.11	83.87	0.05	0.26
CB089	Limonit	1.5-2	11.70	1.58	0.87	0.01	39.04	32.37	0.63	0.18	0.27	0.17	0.01	0.01	0.01	13.28	9.10	1.24	0.02	53.19	0.73	0.83
		2-2.4	9.98	1.14	1.23	0.01	40.60	32.35	0.54	0.15	0.45	0.18	0.01	0.01	0.01	9.11	7.76	0.89	0.01	50.94	0.80	0.80
		2.4-3	7.95	0.37	0.74	0.01	38.87	36.62	0.39	0.12	0.64	0.19	0.01	0.01	0.01	7.25	6.18	0.29	0.01	46.87	0.83	0.94
CB105	Limonit	0-1	64.33	1.40	5.87	0.12	4.28	0.96	3.83	1.05	0.00	0.01	0.01	0.14	0.01	73.02	50.00	1.10	0.12	83.16	0.05	0.22
		1-1.6	65.12	1.76	5.40	0.09	4.69	1.18	3.70	1.14	0.00	0.01	0.01	0.13	0.01	73.91	50.62	1.38	0.12	84.00	0.06	0.25
		1.6-2.6	9.15	0.92	0.60	0.01	38.69	36.25	0.39	0.14	0.17	0.19	0.01	0.01	0.01	8.35	7.11	0.72	0.01	47.64	0.81	0.94
CB113	Harsburgit	2.6-3.2	7.64	0.30	0.75	0.01	37.36	38.76	0.39	0.11	0.37	0.20	0.01	0.01	0.01	6.97	5.94	0.23	0.01	45.09	0.83	1.04
		0-0.48	57.75	1.21	7.67	0.10	6.12	1.37	3.03	0.82	0.03	0.03	0.01	0.18	0.01	65.55	44.89	0.95	0.10	79.33	0.08	0.22
		0.48-1.25	61.70	1.31	8.15	0.08	4.73	0.80	3.09	1.07	0.00	0.01	0.01	0.18	0.01	70.02	47.96	1.03	0.13	82.91	0.06	0.17
CB105	Saprolit	1.25-2	60.87	1.68	7.08	0.05	5.90	2.43	3.28	1.00	0.00	0.01	0.02	0.14	0.01	69.09	47.32	1.32	0.11	82.07	0.07	0.41
		2-2.3	45.21	1.77	6.44	0.03	16.95	9.99	2.93	0.77	0.02	0.01	0.01	0.11	0.01	51.31	35.14	1.39	0.08	74.69	0.23	0.59
		2.3-2.6	54.71	1.67	6.73	0.04	10.06	5.88	3.22	0.90	0.00	0.01	0.01	0.13	0.01	62.10	42.53	1.31	0.09	78.89	0.13	0.58
CB105	Harsburgit	2.6-2.81	31.61	1.69	4.83	0.01	27.51	17.50	2.03	0.50	0.03	0.01	0.01	0.08	0.01	35.88	24.57	1.33	0.05	68.22	0.40	0.64
		2.81-3.2	17.84	1.48	3.38	0.01	35.73	26.92	1.12	0.27	0.11	0.11	0.01	0.05	0.01	20.24	13.86	1.16	0.03	59.36	0.60	0.75
		3.2-3.55	11.75	1.23	2.53	0.01	39.11	31.49	0.73	0.16	0.29	0.16	0.01	0.03	0.01	13.33	9.13	0.97	0.02	54.97	0.71	0.81
CB113	Harsburgit	3.55-3.85	15.52	1.26	2.78	0.01	38.10	28.34	0.89	0.21	0.26	0.14	0.01	0.03	0.01	17.62	12.06	0.99	0.02	58.49	0.65	0.74
		3.85-4.3	9.01	0.81	1.41	0.01	40.08	34.93	0.74	0.12	0.34	0.18	0.01	0.01	0.01	10.22	7.00	0.64	0.01	51.71	0.78	0.87
		4.3-5	6.58	0.29	0.57	0.01	40.80	37.44	0.53	0.09	0.80	0.22	0.01	0.01	0.01	7.46	5.11	0.23	0.01	48.83	0.84	0.92
CB105	Limonit	5-5.5	6.93	0.26	0.59	0.01	39.18	37.97	0.55	0.10	0.87	0.19	0.01	0.01	0.01	7.86	5.38	0.21	0.01	47.63	0.82	0.97
		0-1	65.21	1.23	5.77	0.12	3.91	0.80	5.64	1.01	0.06	0.01	0.01	0.14	0.01	74.01	50.68	0.97	0.12	83.69	0.05	0.21
		1-2.0	65.50	1.45	4.75	0.06	3.48	1.34	6.23	1.24	0.00	0.01	0.01	0.10	0.01	74.34	50.91	1.14	0.18	82.58	0.04	0.38
CB113	Saprolit	2-2.3	64.20	1.82	3.62	0.06	5.04	2.15	5.90	1.25	0.00	0.01	0.01	0.08	0.01	72.87	49.90	1.43	0.23	81.52	0.06	0.43
		2.3-3	24.01	2.44	0.90	0.01	31.79	24.07	2.46	0.38	0.00	0.06	0.01	0.01	0.01	27.25	18.66	1.91	0.06	59.95	0.53	0.76
		3-3.6	20.32	2.10	0.88	0.01	34.69	25.73	2.47	0.31	0.00	0.08	0.01	0.01	0.01	23.06	15.79	1.65	0.03	58.64	0.59	0.74
CB113	Harsburgit	3.6-4	9.49	0.65	0.38	0.01	39.18	35.60	0.65	0.13	0.00	0.18	0.01	0.01	0.01	8.66	7.38	0.51	0.01	48.21	0.81	0.91
		4-4.25	9.80	0.67	0.68	0.01	38.01	35.44	1.24	0.13	0.03	0.23	0.01	0.01	0.01	11.13	7.62	0.53	0.01	49.82	0.76	0.93
		4.25-4.8	9.66	0.38	0.29	0.01	36.86	37.05	0.27	0.14	0.03	0.17	0.01	0.01	0.01	10.96	7.51	0.30	0.02	48.11	0.77	1.00
CB113	Harsburgit	4.8-5	8.37	0.32	0.39	0.01	34.30	39.18	0.45	0.11	0.15	0.19	0.01	0.01	0.01	7.38	6.50	0.25	0.01	42.08	0.82	1.14
		5-6.0	8.38	0.30	0.64	0.01	32.53	40.46	0.80	0.11	0.26	0.19	0.01	0.01	0.01	9.51	6.51	0.23	0.01	42.67	0.76	1.24

Tabel 1. Hasil Analisis XRF Unsur-Unsur Utama (dalam %) dan Perhitungan Derajat Lateritisasi (lanjutan)

Titik Bor	Zona	Kedalaman (m)	FeO	NiO	AL ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₂	Fe ₂ O ₃	Fe	Ni	Co	SAF	S/SAF	MgO/SiO ₂	
Limonit		0-1	56.82	1.20	8.61	0.10	7.29	1.35	2.96	1.22	0.06	0.01	0.01	0.18	0.01	64.49	44.17	0.94	0.12	80.40	0.09	0.19	
		1-1.39	57.18	1.46	9.24	0.08	7.54	2.11	2.93	1.46	0.08	0.08	0.01	0.01	0.18	0.01	64.90	44.45	1.15	0.13	81.69	0.09	0.28
		1.89-2.35	43.97	2.22	5.52	0.03	21.79	7.79	2.33	0.75	0.23	0.23	0.01	0.01	0.10	0.01	49.90	34.18	1.74	0.07	77.21	0.28	0.36
		2.35-3	21.33	2.03	2.65	0.01	35.89	22.76	1.26	0.37	0.17	0.08	0.01	0.01	0.03	0.01	24.21	16.58	1.59	0.03	62.76	0.57	0.63
		3-3.44	12.96	1.50	1.62	0.01	39.72	29.90	0.78	0.21	0.50	0.18	0.01	0.01	0.01	0.01	14.71	10.07	1.18	0.02	56.05	0.71	0.75
		3.44-3.72	18.15	1.74	1.71	0.01	37.41	25.96	1.30	0.33	0.12	0.12	0.01	0.01	0.01	0.01	20.59	14.10	1.37	0.03	59.71	0.63	0.69
Saprolit		4-4.6	11.97	1.15	1.61	0.01	38.79	31.53	0.72	0.20	0.13	0.17	0.01	0.01	0.01	13.58	9.30	0.90	0.02	53.98	0.72	0.81	
		1.39-1.89	9.39	1.69	1.72	0.01	40.44	32.78	0.49	0.15	0.95	0.23	0.01	0.01	0.01	0.01	10.66	7.30	1.33	0.01	52.82	0.77	0.81
		3.72-4	9.13	1.13	0.76	0.01	39.76	34.92	0.49	0.14	0.08	0.23	0.01	0.01	0.01	0.01	10.36	7.10	0.89	0.01	50.89	0.78	0.88
		Harsburgit	4.6-5	8.50	0.80	1.07	0.01	39.39	35.48	0.46	0.13	0.16	0.19	0.01	0.01	0.01	9.64	6.61	0.63	0.01	50.11	0.79	0.90
		5.0-6.0	7.66	0.27	0.78	0.01	37.42	38.45	0.37	0.11	0.49	0.20	0.01	0.01	0.01	0.01	8.69	5.95	0.22	0.01	46.90	0.80	1.03
		0-0.5	60.60	1.12	8.35	0.10	4.61	1.25	3.54	0.72	0.02	0.02	0.01	0.01	0.16	0.01	68.78	47.11	0.88	0.08	81.75	0.06	0.27
Limonit		0.5-1	63.04	1.08	8.83	0.07	4.00	1.09	3.57	0.83	0.01	0.01	0.01	0.17	0.01	71.55	49.00	0.85	0.10	84.38	0.05	0.27	
		1-2.0	64.50	1.19	7.75	0.06	3.45	1.09	3.61	0.90	0.01	0.01	0.01	0.15	0.01	73.21	50.14	0.94	0.10	84.41	0.04	0.32	
		2-2.25	64.16	1.52	6.44	0.04	4.24	1.46	3.97	1.04	0.01	0.01	0.01	0.13	0.01	72.83	49.88	1.20	0.11	83.51	0.05	0.35	
		2.25-3	22.49	2.36	1.51	0.02	32.81	24.98	1.46	0.37	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	25.53	17.48	1.86	0.04	59.84	0.55	0.76	
		3-4.0	13.37	2.12	0.63	0.01	38.30	31.06	1.03	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	15.17	10.39	1.66	0.03	54.10	0.71	0.81
		4-4.5	12.31	2.26	0.54	0.01	37.87	32.27	1.02	0.20	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	13.97	9.57	1.78	0.02	52.39	0.72	0.85
Saprolit		4.5-5.0	11.10	1.73	0.44	0.01	38.99	33.33	0.81	0.15	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	12.60	8.63	1.36	0.02	52.03	0.75	0.85	
		5-5.41	9.40	1.48	0.32	0.01	40.58	34.39	0.64	0.13	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	10.66	7.30	1.17	0.02	51.57	0.79	0.85	
		5.41-6	10.40	1.12	0.40	0.01	39.89	34.12	0.81	0.13	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	11.81	8.09	0.88	0.02	52.09	0.77	0.86	
		6-6.35	11.23	1.04	0.37	0.01	39.64	33.51	0.84	0.14	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	12.75	8.73	0.82	0.02	52.75	0.75	0.85	
		6.35-7	6.62	0.41	0.24	0.01	38.23	39.60	0.49	0.09	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	7.52	5.15	0.32	0.01	45.99	0.83	1.04
		Harsburgit	7-8.0	6.26	0.42	0.18	0.01	35.03	41.00	0.48	0.09	0.14	0.01	0.01	0.01	0.01	7.11	4.87	0.33	0.01	42.31	0.83	1.17

Tabel 1. Hasil Analisis XRF Unsur-Unsur Utama (dalam %) dan Perhitungan Derajat Lateritisasi (lanjutan)

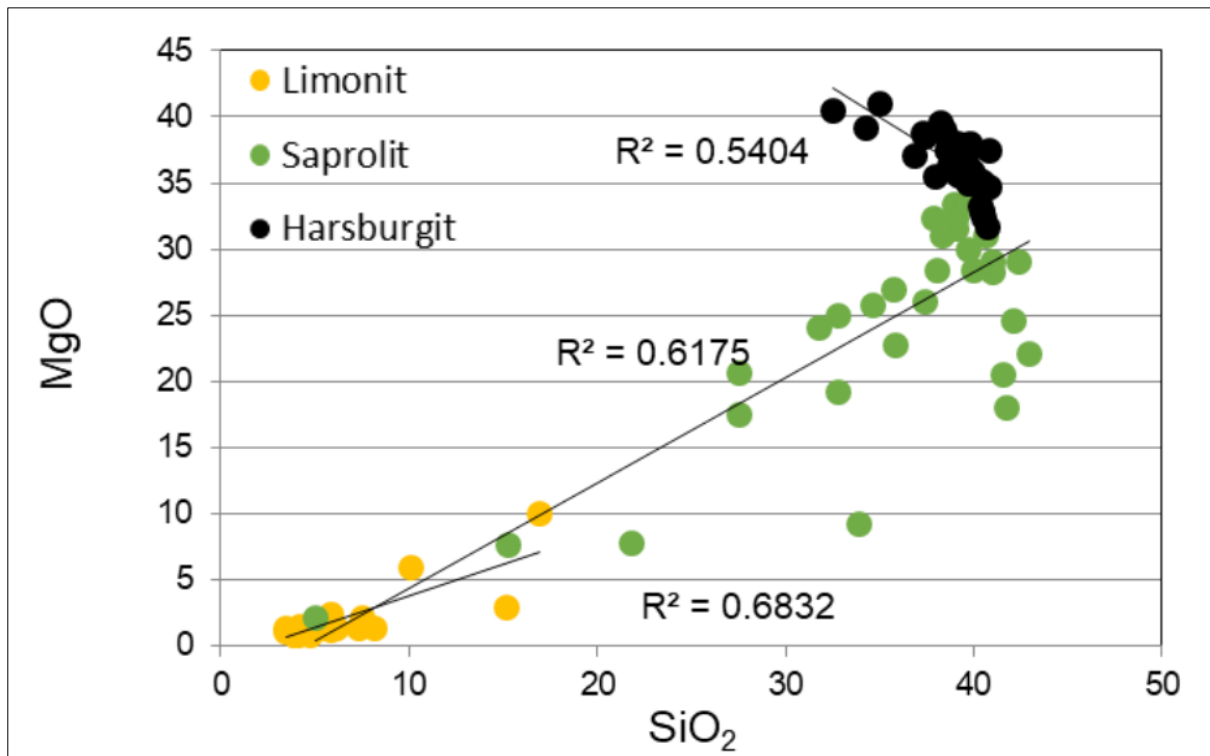
Titik Bor	Zona	Kedalaman (m)	FeO	NiO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₂	Fe ₂ O ₃	Fe	Ni	Co	SAF	S/SAF	MgO/SiO ₂		
Limonit	Saprolit	0-1	56.88	1.02	10.07	0.08	8.16	1.36	2.90	0.81	0.06	0.01	0.01	0.18	0.01	64.55	44.21	0.80	0.09	82.78	0.10	0.17		
		1-2.0	59.89	1.16	10.70	0.04	5.84	1.17	2.74	0.97	0.01	0.01	0.01	0.20	0.01	67.98	46.56	0.91	0.09	84.52	0.07	0.20		
		2-2.32	50.87	1.43	9.83	0.04	15.19	2.93	2.57	0.86	0.25	0.01	0.01	0.18	0.01	57.74	39.54	1.12	0.08	82.75	0.18	0.19		
		2.32-3	31.03	1.83	7.04	0.02	33.91	9.18	1.84	0.55	0.22	0.01	0.01	0.12	0.01	35.22	24.12	1.44	0.05	76.17	0.45	0.27		
		3-3.5	18.26	1.66	5.62	0.01	41.75	17.98	1.27	0.28	0.05	0.01	0.01	0.09	0.01	20.72	14.19	1.31	0.03	68.10	0.61	0.43		
		3.5-3.71	16.87	1.61	4.89	0.01	41.56	20.51	1.12	0.27	0.10	0.01	0.01	0.08	0.01	19.15	13.12	1.27	0.03	65.61	0.63	0.49		
		3.71-4	11.52	1.14	3.72	0.01	40.98	28.26	0.81	0.14	0.41	0.01	0.01	0.06	0.01	13.08	8.96	0.90	0.02	57.78	0.71	0.69		
		4-4.39	14.48	1.46	4.09	0.01	42.91	22.13	0.98	0.14	1.28	0.01	0.01	0.07	0.01	16.44	11.26	1.15	0.02	63.44	0.68	0.52		
		4.39-4.75	9.72	1.23	2.80	0.01	42.42	29.08	0.65	0.19	1.58	0.01	0.01	0.04	0.01	11.03	7.56	0.97	0.01	56.25	0.75	0.69		
		5-5.6	13.09	1.42	3.34	0.00	42.15	24.52	0.87	0.21	0.86	0.01	0.01	0.05	0.01	14.86	10.18	1.12	0.02	60.35	0.70	0.58		
		6-6.2	11.83	1.36	2.04	0.00	41.06	29.00	0.78	0.16	0.23	0.01	0.01	0.03	0.01	13.42	9.19	1.07	0.02	56.52	0.73	0.71		
		Harsburgit	Harsburgit	4.75-5	7.00	0.75	1.76	0.00	40.84	34.69	0.43	0.10	1.24	0.01	0.01	0.03	0.01	7.95	5.44	0.59	0.01	50.55	0.81	0.85
				5.6-6	8.48	1.10	2.31	0.00	40.45	32.73	0.53	0.12	0.79	0.01	0.01	0.04	0.01	9.63	6.59	0.87	0.01	52.39	0.77	0.81
				6.2-7	6.78	0.35	1.22	0.00	39.19	37.55	0.32	0.09	0.18	0.01	0.01	0.02	0.01	7.69	5.27	0.28	0.01	48.10	0.81	0.96
7-7.65	6.62			0.45	1.40	0.00	39.23	37.11	0.41	0.09	0.61	0.01	0.01	0.02	0.01	7.51	5.14	0.36	0.01	48.14	0.81	0.95		
7.65-8	10.29			0.95	1.67	0.08	40.73	31.67	0.67	0.14	1.12	0.01	0.01	0.03	0.01	11.68	8.00	0.74	0.02	54.09	0.75	0.78		
8-9.0	8.24			0.58	0.71	0.00	39.94	35.84	0.51	0.11	1.10	0.01	0.01	0.01	0.01	9.35	6.40	0.45	0.01	50.00	0.80	0.90		
9-10.0	7.97			0.60	1.04	0.00	39.90	35.86	0.49	0.11	1.10	0.01	0.01	0.02	0.01	9.05	6.20	0.47	0.01	49.99	0.80	0.90		
10-11.0	8.84			0.62	0.75	0.00	40.31	35.24	0.58	0.11	1.14	0.01	0.01	0.01	0.01	10.03	6.87	0.49	0.02	51.09	0.79	0.87		
11-12.0	7.11			0.40	0.28	0.00	39.87	37.93	0.43	0.10	1.16	0.01	0.01	0.01	0.01	8.06	5.52	0.31	0.01	48.21	0.83	0.95		
12-13.0	7.00			0.33	0.27	0.00	38.40	39.06	0.41	0.10	1.04	0.01	0.01	0.01	0.01	7.94	5.44	0.26	0.01	46.61	0.82	1.02		
13-14.0	6.79			0.31	0.79	0.00	38.56	38.57	0.40	0.10	1.23	0.01	0.01	0.01	0.01	7.70	5.28	0.24	0.01	47.06	0.82	1.00		
14-14.35	7.38			0.41	0.93	0.00	39.67	37.04	0.45	0.10	1.25	0.01	0.01	0.01	0.01	8.37	5.73	0.32	0.01	48.97	0.81	0.93		
Limonit	Saprolit			0-1	59.87	1.14	9.37	0.00	5.47	1.36	2.89	0.98	0.03	0.01	0.01	0.16	0.01	67.95	46.54	0.89	0.10	82.79	0.07	0.25
				1-2	62.62	1.23	8.65	0.00	4.35	1.15	2.91	1.09	1.09	0.01	0.01	0.14	0.01	71.07	48.67	0.97	0.11	84.07	0.05	0.26
		2-3	64.41	1.38	6.27	0.03	3.87	1.15	3.59	1.30	1.30	0.01	0.01	0.10	0.01	73.10	50.06	1.08	0.12	83.23	0.05	0.30		
		3-4	63.41	1.35	7.59	0.02	3.89	1.22	3.39	1.27	1.27	0.01	0.01	0.13	0.01	71.97	49.29	1.06	0.13	83.45	0.05	0.31		
		4-4.4	63.75	1.65	6.30	0.02	4.67	1.30	3.56	1.30	1.30	0.01	0.01	0.11	0.01	72.36	49.55	1.30	0.12	83.33	0.06	0.28		
		4.4-5	49.88	2.08	5.08	0.03	15.25	7.63	3.16	0.91	0.30	0.01	0.01	0.09	0.01	56.61	38.77	1.64	0.08	76.93	0.20	0.50		
		5-5.45	25.34	2.25	4.66	0.02	32.81	19.21	1.71	0.45	0.89	0.01	0.01	0.08	0.01	28.77	19.70	1.77	0.04	66.23	0.50	0.59		
		5.65-6.35	12.42	2.26	1.82	0.00	39.96	28.33	0.84	0.20	0.98	0.01	0.01	0.05	0.01	12.47	9.65	1.78	0.02	54.24	0.74	0.71		
		6.35-7	10.98	2.01	2.02	0.00	40.61	31.00	0.62	0.17	0.41	0.01	0.01	0.03	0.01	40.96	8.54	1.58	0.02	83.59	0.49	0.76		
		5.45-5.65	8.47	2.25	3.01	0.00	40.37	33.24	0.49	0.13	1.39	0.01	0.01	0.03	0.01	14.10	6.58	1.77	0.01	57.48	0.70	0.82		
		7.0-8.0	8.09	0.94	1.80	0.00	40.43	35.13	0.49	0.12	1.32	0.01	0.01	0.03	0.01	9.18	6.28	0.74	0.01	51.41	0.79	0.87		
		8.0-9.0	7.96	0.46	1.45	0.00	39.47	36.77	0.39	0.12	1.09	0.01	0.01	0.02	0.01	9.03	6.18	0.36	0.01	49.95	0.79	0.93		
		9.0-10	7.74	0.42	1.27	0.00	38.65	37.45	0.34	0.12	0.89	0.01	0.01	0.02	0.01	8.79	6.02	0.33	0.01	48.71	0.79	0.97		

Derajat Lateritisasi

Derajat lateritisasi adalah tingkatan terjadinya proses pembentukan tanah laterit atau proses lateritisasi akibat pelapukan dari batuan dasar (Taylor, 1964). Derajat lateritisasi merupakan nilai kebalikan dari indeks S/SAF, dimana nilai S/SAF dihitung dari $SiO_2 / (SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3)$. **Gambar 7** menunjukkan derajat lateritisasi dari 9 profil lubang bor di daerah penelitian. Secara umum, zona limonit memiliki indeks S/SAF berkisar antara 0,04 s.d. 0,22 (derajat lateritisasi kuat), saprolit 0,06 s.d. 0,78 (derajat lateritisasi sedang hingga kaolinisasi) dan batuan dasar antara 0,70 s.d. 0,83. Pengayaan kadar Fe-

Ni-Co pada zona laterit dengan derajat laterisasinya ditunjukkan pada Tabel 2.

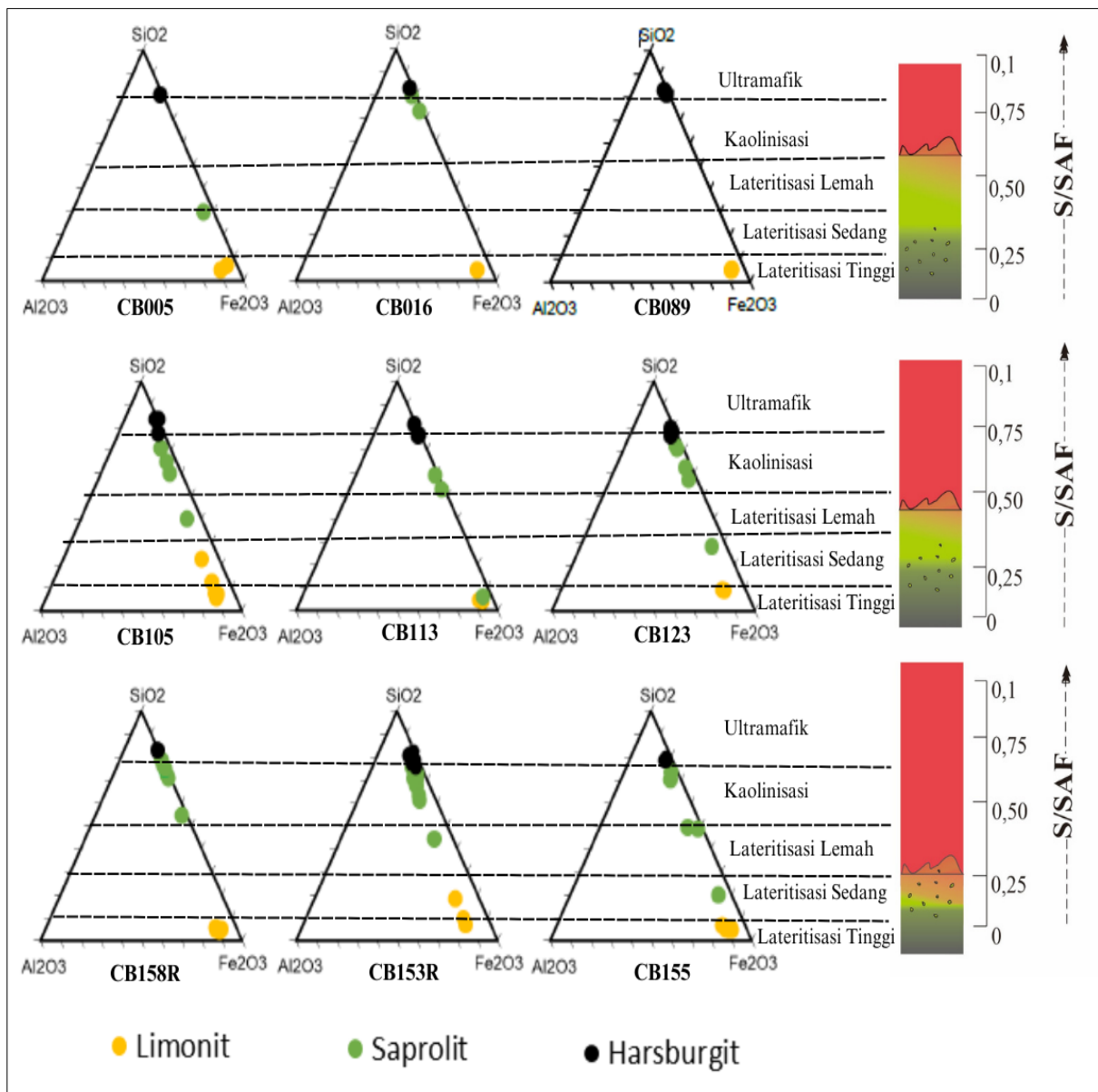
Proses pelapukan kimia mengubah mineral mafik plagioklas dan hornblende menjadi mineral oksida seperti hematit, goetit, dan maghemite (Rollinson, 2014). Adanya mineral mafik mengakumulasi Fe dengan kandungan minimal 47% dan Co berada pada zona limonit bagian atas. Tingkat lateritisasi yang tinggi menghasilkan tingkat disolusi yang lebih tinggi. Hal ini akan berdampak pada keberadaan Ni pada zona limonit karena akan larut dan terakumulasi pada zona saprolit dengan kadar minimal 1,5%.



Gambar 6. Perbandingan MgO vs SiO₂

Tabel 2. Tingkat Lateritisasi terhadap Pengayaan Kadar Fe-Ni-Co

Zona lateritisasi	Fe	Ni	Co
Lateritisasi kuat	36-51 %	0,8-1,4%	0,07-1,17%
Kaolinisasi Sedang	7,3-24%	0,8-1,9%	0,01-0,2%
Lateritisasi Lemah	4,9-7,9%	0,20-1,8%	0,005-0,015%

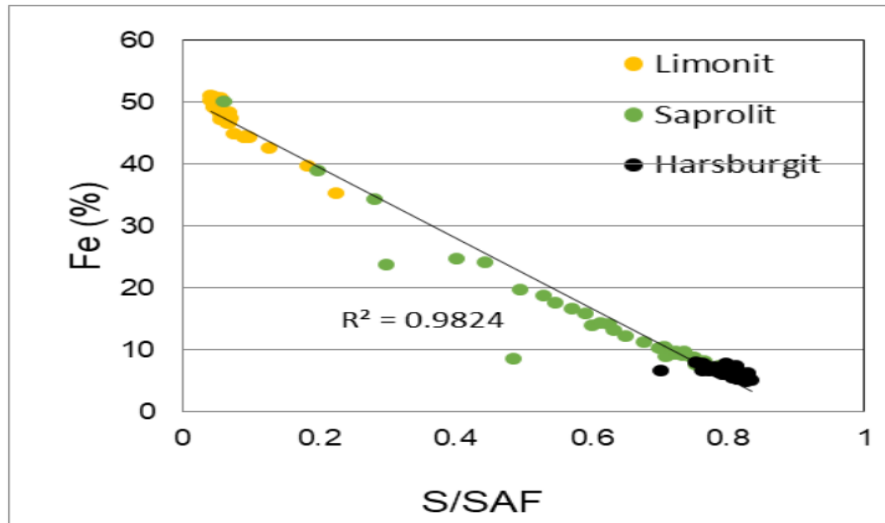


Gambar 7. Index of Lateritization (Taylor, 1964)

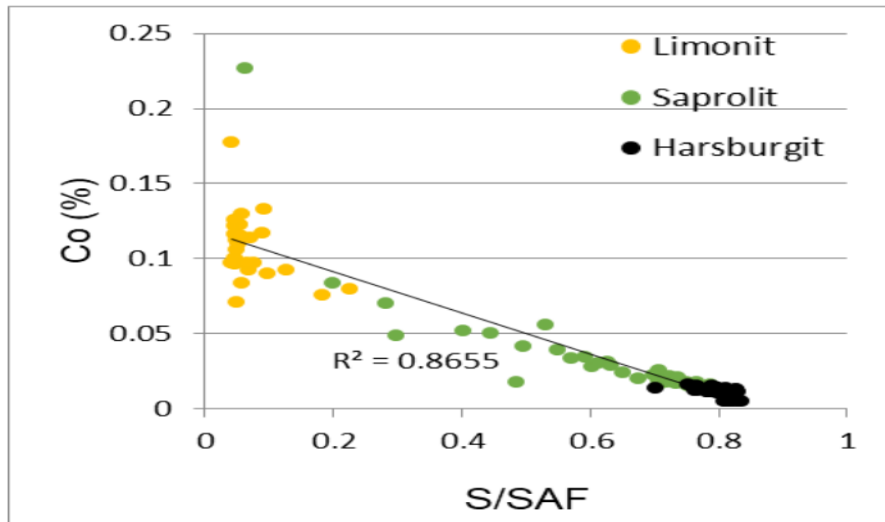
Korelasi antara Indeks S/SAF dengan Pengayaan Unsur Fe-Co-Ni

Peningkatan kandungan Fe berkorelasi negatif terhadap indeks S/SAF dan juga terakumulasi di permukaan atas, yaitu zona limonit. Hal ini disebabkan oleh sifat kebal terhadap air dan sifat *immobile* dari Fe (Gambar 8) sehingga Fe akan resisten selama proses pelapukan. Kandungan Co berkorelasi negatif terhadap indeks S/SAF dan juga terakumulasi di permukaan atas. Hal ini karena Co merupakan unsur kritis golongan VIII B yang berdekatan dengan unsur Fe, memiliki massa atom yang sama

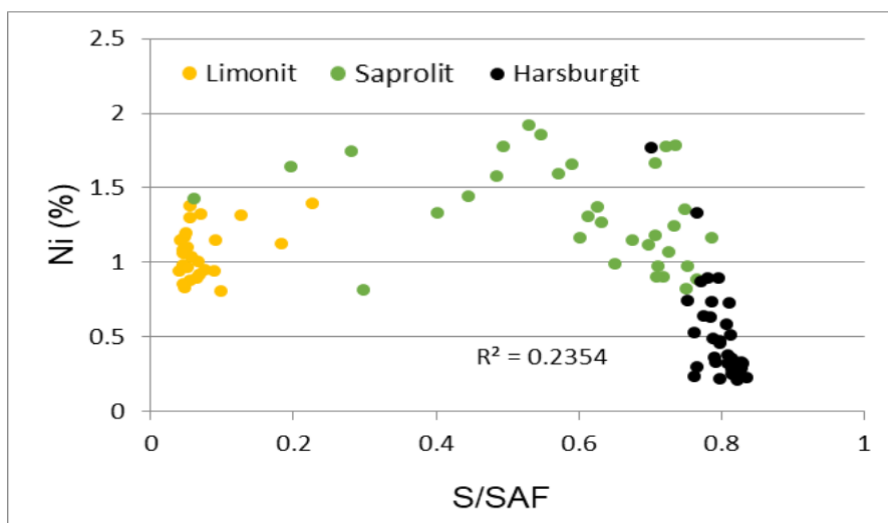
sehingga sifat yang dihasilkan sama, yaitu resisten terhadap pelapukan (Gambar 9). Pada Gambar 10 menjelaskan bahwa semakin banyak Ni yang terlarut dan terakumulasi dalam zona saprolit (Ogura, 1977). Hal ini disebabkan oleh adanya mineral olivin minor sebagai sumber pembentukan Ni dan sifat *semi-soluble* Ni. Zona limonit mengandung 0,8-1,3 % Ni yang berkorelasi dengan lateritisasi kuat, zona saprolit mengandung 0,8–1,85 % Ni dalam zona kaolinisasi sampai lateritisasi sedang dan batuan dasar mengandung 0,2 -1,3 % Ni.



Gambar 8. Korelasi antara Fe vs S/SAF



Gambar 9. Korelasi antara Co vs S/SAF



Gambar 10. Korelasi antara Ni vs S/SAF

KESIMPULAN

Endapan laterit yang mengandung unsur ekonomis Fe-Ni-Co di daerah penelitian terbentuk dari hasil pelapukan batuan asal harsburgit. Perbedaan utama produk pelapukan dikendalikan oleh derajat lateritisasi. Pengayaan antara Fe, Co dengan derajat lateritisasi selalu berkorelasi negatif. Tetapi derajat lateritisasi tidak dapat berkorelasi dengan pengayaan Ni, karena mobilitas unsur tersebut. Pada umumnya di zona limonit Ni akan tercuci oleh air meteorik. Semuanya disebabkan oleh perilaku unsur utama Fe, Ni, Co, topografi dan iklim juga penting untuk proses laterit yang rumit. Ada penurunan besar MgO dan peningkatan SiO₂ dan Fe₂O₃ dari batuan induk melalui lateritisasi yang terdekomposisi menjadi laterit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Sebuku Iron Lateritic Ores telah mengizinkan kami untuk menggunakan data, Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung sebagai tempat melakukan analisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Aquino, K., Arcilla, C., Schardt, C., & Tupaz, C. (2022). Linking Serpentinization and Weathering of Peridotite: A Study on the Mineralogical and Geochemical Evolution of the Sta. Cruz Nickel Laterite Deposit, Zambales, Philippines. *Minerals* 2022.
- Butt, C. R., & Cluzel, D. (2013). Nickel Laterite Ore Deposits: Weathered Serpentinites. *Elements Vol. 9*, 123-128.
- Marsh, E., Anderson, E., & Gray, F. (2013). Nickel-Cobalt Laterites—A Deposit Model. *Chapter H of Mineral Deposit Models for Resource Assessment: Scientific Investigations Report 2010-5070-H*.
- Neraca Sumber Daya dan Cadangan Mineral dan Batubara Indonesia Tahun 2022*. (2022). Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi, Badan Geologi.
- Ogura, Y. (1977). Mineralogical Studies on the Occurrence of Nickeliferous Laterite Deposits in the Southwestern Pacific Area. *Mining Geology*.
- Robb, L. (2020). *Introduction to Ore-forming Processes*. Oxford: John Wiley & Sons.
- Rollinson, H. R. (2014). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Routledge.
- Rustandi, E., Nila, E., Sanyoto, P., & Margono, U. (1995). *Peta Geologi Lembar Kotabaru, Kalimantan Selatan Skala 1:250.000*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Strekeisen, A. (1973). Plutonic Rocks: Classification and Nomenclature Recommended by the I.U.G.S. Sub-Commission on the Systematic of Igneous. *Rocks, Geo, Times*, 18, 26-30.
- Taylor, R. M., Mckenzie, R. M., & Norrish, K. (1964). The mineralogy and chemistry of manganese in some Australian soils. *Aust. Jour. Soil. Res.* 2, 235-248.

Diterima : 22 Juni 2023
Direvisi : 5 September 2023
Disetujui : 30 November 2023