



## **Asosiasi Skandium dan Potensi Keberadaan Unsur Tanah Jarang pada Profil Laterit Nikel pada Daerah Wasile, Halmahera Timur, Maluku Utara**

### ***Scandium Association and Occurrence Potential of Rare Earth Elements in Nickel Laterite Profiles in the Wasile Region, East Halmahera, North Maluku***

**Aditya Fadhlurrohan Putrananda<sup>1</sup>, Mega Fatimah Rosana<sup>1</sup>, Euis Tintin Yuningsih<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Jalan. Ir. Soekarno km. 21 Jatinangor, Kab. Sumedang 45363 Jawa Barat.

email: [adit.fadhlurrohan@gmail.com](mailto:adit.fadhlurrohan@gmail.com)

Naskah diterima: 25 Mei 2023, Revisi terakhir: 22 November 2024, Disetujui: 26 November 2024 Online: 26 November 2024

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v25i4.792>

**Abstrak**-Skandium dan Unsur Tanah Jarang merupakan sumber daya strategis yang berharga untuk berbagai aplikasi industri sehingga menjadi perhatian untuk eksplorasi sumber daya, ekstraksi berkelanjutan, dan aplikasi pada pengembangan teknologi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik profil laterit beserta kandungan unsur skandium dan potensi UTJ yang berkembang pada profil laterit nikel yang memiliki batuan dasar ultrabasa. Daerah penelitian berada pada Daerah Wasile, Halmahera Timur. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah analisis petrologi dan analisis geokimia, yaitu XRF, ICP-MS dan XRD. Hasil dari analisis petrologi menunjukkan bahwa profil laterit terdiri atas lapisan limonit, zona transisi, saprolit dan batuan dasar. Batuan dasar yang teramati merupakan jenis *lerzolite* dan *serpentinit*. Hasil analisis geokimia menunjukkan peningkatan komposisi unsur skandium dan UTJ pada zona saprolit. Kehadiran unsur-unsur ini menjadi potensi untuk korelasi terkait dengan genesis UTJ *Ion Adsorption Type* dan klasifikasi deposit lebih lanjut.

**Katakunci:** Halmahera, profil laterit, skandium, UTJ.

**Abstract**-*Scandium and Rare Earth Elements are valuable strategic resources with numerous industrial applications. Understanding of their worldwide occurrences is crucial for resource exploration, sustainable extraction, and the development of advanced technologies. This study aims to determine the characteristics of the laterite profile and the elemental content of scandium and other potential REEs that develop in nickel laterite profiles with ultramafic bedrock. The research area is in the Wasile Region, East Halmahera. In this study, the used method is petrological, XRF, ICP-MS, and XRD analysis. The results of the petrological analysis show that the laterite profile consists of layers of limonite, transition zone, saprolite and bedrock. The observed bedrock are *lerzolite* and *serpentinite*. The results of the geochemical analysis show an increase in the elemental composition of scandium and the presence of REEs in the saprolite zone. The presence of these elements has the potential to correlate with the genesis of *Ion Adsorption Type (IAT) REEs* and further deposit classification.*

**Keyword:** *Halmahera, laterite profile, REE, scandium.*

## PENDAHULUAN

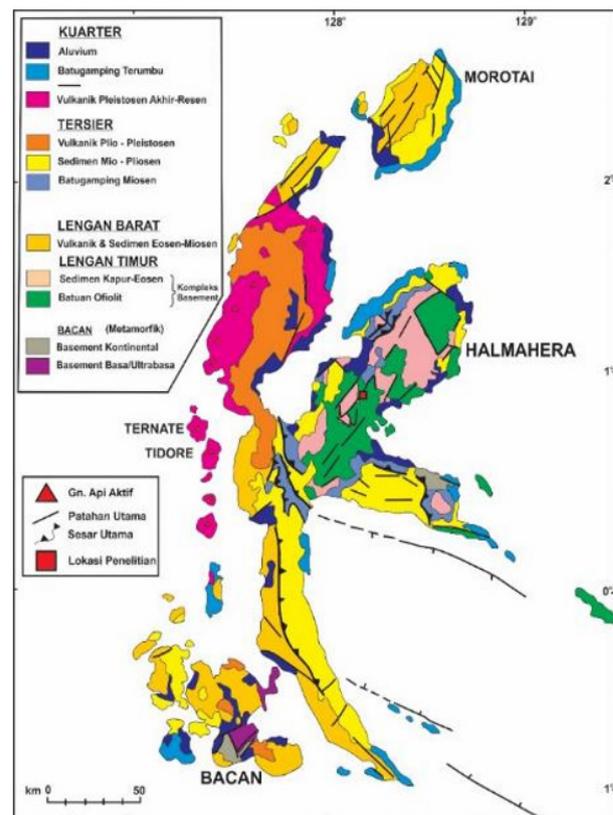
Aktivitas penelitian, pengembangan, dan eksplorasi awal mengenai Unsur Tanah Jarang (UTJ) di Indonesia mulai berkembang seiring dengan meningkatnya kebutuhan dan popularitas komoditas ini yang bermanfaat sebagai bahan dasar pada beberapa industri teknologi, otomotif, kesehatan, dan energi terbarukan. Selama periode 2020-2022, dunia telah melewati beberapa peristiwa penting, seperti pandemi Covid-19 dan konflik antara negara Rusia-Ukraina yang berdampak kepada ketidakpastian permintaan *supply chain* komoditas dan harga global bahan mentah (Konopka dkk, 2022). Pada *London Metal Exchange* harga nikel melampaui \$100.000 per ton sejak 14 Maret 2022. Meningkatnya biaya penambangan, pemrosesan, dan peleburan endapan sulfida serta embargo bahan mentah Rusia akan semakin memengaruhi pengembangan proyek penambangan baru (Konopka dkk, 2022).

Halmahera terdiri dari empat semenanjung memanjang ("lengan"), terhubung di tengah yang secara morfologis menyerupai Pulau Sulawesi dengan bentuk "K" yang tidak beraturan. Halmahera dipisahkan sejauh 250 km dari Sulawesi oleh Laut Maluku (Ballantyne, 1991). Pada sebagian wilayah Sulawesi dan Halmahera, batuan ultrabasa berasosiasi menjadi sabuk ofiolit sebagai batuan dasar pembawa mineral – mineral ekonomis. Endapan nikel banyak ditemukan terbentuk pada profil laterit yang tersebar di Pulau Halmahera, khususnya pada daerah Wasile. Endapan laterit dengan batuan dasar ultrabasa merupakan sumber utama material mentah untuk komoditas nikel dan kromit serta potensi kandungan skandium, *platinum group element* (PGE), dan unsur tanah jarang (UTJ). Beberapa peneliti sebelumnya menjelaskan mengenai profil laterit ultrabasa terkait dengan endapan nikel di daerah Teluk Weda, Halmahera Tengah (Farrokhpay dkk., 2019) dan Tanjung Buli, Halmahera Timur (Widiatmoko dkk., 2020; Konopka dkk., 2022) yang masih merupakan satu kompleks batuan yaitu sekuen ultrabasa (Ub) secara regional. Profil laterit di Teluk Weda berkembang pada batuan ultrabasa berjenis *peridotite* (*dunite* dan *harzburgite*) seperti dalam semua kasus lain di tempat lain di Indonesia, Kaledonia Baru, dan Australia, selama Kenozoikum di bawah iklim panas dan lembab yang memiliki ketebalan sekitar 10 m, dimana 8 m termineralisasi dengan kadar lebih dari 1% Ni (Farrokhpay dkk., 2019). Tujuan dari penelitian ini adalah mengidentifikasi kelimpahan UTJ melalui karakterisasi mineralogi dan geokimia pada profil laterit yang terbentuk di atas batuan dasar ultrabasa serta melihat potensi terhadap keterbentukan endapan UTJ pada lokasi penelitian.

## Geologi Regional

Fisiografi Pulau Halmahera dibagi menjadi 3 yang terdiri dari Mandala Halmahera Timur, Mandala Halmahera Barat dan Mandala Busur Kepulauan Gunung Api Kuarter (Apani & Sudana, 1980). Mandala Halmahera Timur meliputi lengan timur laut, lengan tenggara, dan beberapa pulau kecil di sebelah timur Pulau Halmahera. Morfologi Mandala ini terdiri dari pegunungan berlereng terjal dan torehan sungai yang dalam, serta sebagian mempunyai morfologi karst. Morfologi pegunungan berlereng terjal merupakan cerminan batuan keras. Jenis batuan penyusun pegunungan ini adalah batuan ultrabasa. Morfologi karst terdapat pada daerah batugamping dengan perbukitan yang relatif rendah dan lereng yang landai (Gambar 1).

Wilayah Halmahera bagian timur memiliki *basement* batuan ofiolitik yang terpotong dengan irisan sedimen Mesozoikum dan Eosen. Formasi ini kemudian ditindih oleh batuan sedimen berumur Oligosen Tengah-Akhir dan batuan vulkanik yang lebih muda secara tidak selaras (Hall, 1987).



sumber : dimodifikasi setelah Hall dan Nichols 1990 dalam Ballantyne 1991

Gambar 1. Peta geologi Halmahera

Kompleks *Basement* Halmahera dapat ditelusuri ke Mindanao bagian timur dan mungkin lebih jauh ke utara di Filipina bagian timur. Sebaliknya, bagian selatan Pulau Bacan di ujung barat daya gugus Halmahera memiliki *basement* berupa batuan metamorf kontinental derajat tinggi. *Basement* ini berasosiasi dengan kompleks ofiolitik yang mengalami deformasi dan metamorfosis serta genesanya berbeda dengan *basement* Halmahera bagian timur. Batuan metamorf tersebut diinterpretasikan sebagai bagian dari *basement* margin kontinen Australia bagian utara yang dipisahkan dari Kompleks *Basement* Halmahera oleh penyebaran sistem Sesar Sorong dan kompleks ofiolit yang terdeformasi dari Bacan serta dipisahkan untuk mewakili magmatisme di zona sesar. *Basement* Halmahera bagian barat sebagian besar ditutupi oleh batuan sedimen dan vulkanik Neogen-Recent, serta masih kurang dikenal (Hall, 1987). Stratigrafi wilayah penelitian dan sekitarnya dirangkum pada Tabel 1.

## METODOLOGI

### Bahan Penelitian

Lokasi penelitian secara administratif berada di Kecamatan Wasile, Kabupaten Halmahera Timur Provinsi Maluku Utara. Terdapat dua profil laterit yang diamati dalam penelitian ini yaitu AD-01 dan AM-01 (Tabel 2). AD-01 merupakan profil laterit yang teramati dari hasil pemboran inti batuan dengan kedalaman 19.8 meter. Metode pengambilan contoh sampel pada AD-01 menggunakan metode *channel sampling*. AM-01 merupakan hasil dari pemetaan

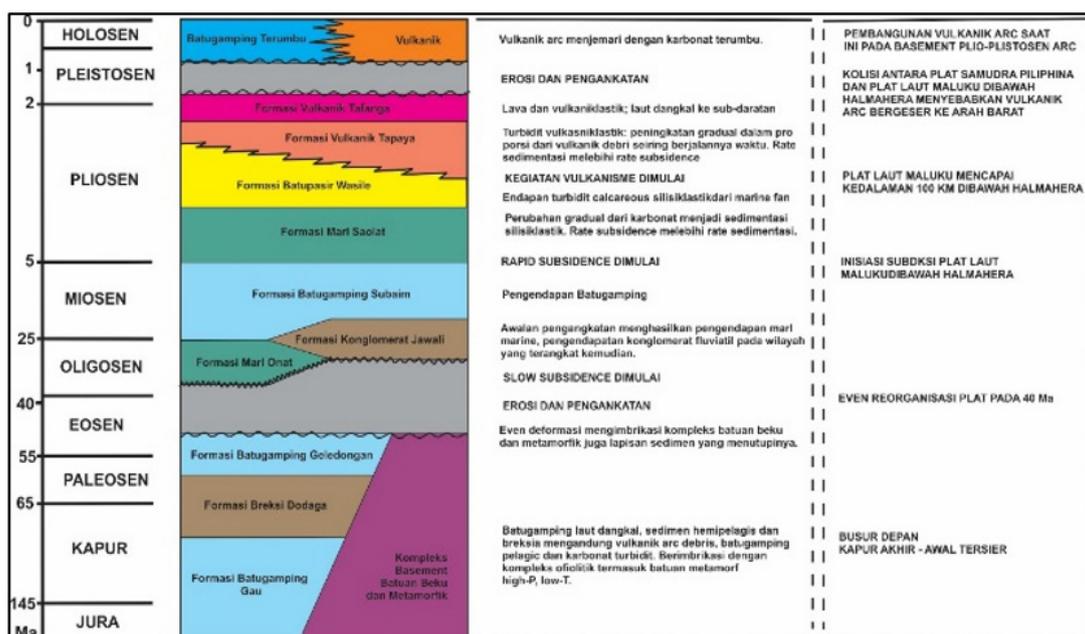
geologi permukaan yang menunjukkan keterbentukan profil laterit pada dinding tebing di tepi sungai dengan ketebalan 2,9 meter. Metode pengambilan contoh sampel pada AM-01 menggunakan metode *grab sampling*. Diperoleh 13 sampel pada AD-01 dan 8 sampel pada AM-01 dengan rentang berat 80 – 350 gram yang mewakili masing-masing karakteristik profil laterit. Pemerian kode sampel diambil berdasarkan zona laterit masing masing profil; yaitu "B" mewakili zona *bedrock*, "S" untuk zona saprolit dan "L" untuk zona limonit

### Analisis Geokimia

Penelitian ini menggunakan beberapa alat uji untuk keperluan analisis geokimia, diantaranya *X-Ray Diffraction (XRD)*, *X-ray Fluorescence (XRF)*, dan *Inductively Coupled*

*Plasma - Mass Spectrometry (ICP-MS)*. Analisis dengan menggunakan XRD memiliki tujuan untuk menentukan komposisi batuan/tanah dan jenis dari mineral lempung. XRF dan ICP-MS digunakan untuk menentukan komposisi elemen oksida *major*, *minor*, dan *trace* serta unsur tanah jarang yang terkandung dalam keseluruhan batuan/tanah. Analisis XRF dan XRD dilakukan di Laboratorium Geoservices, sedangkan untuk analisis ICP-MS dilakukan di Laboratorium Intertek. Seluruh sampel yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum dalam Tabel 3. Hasil analisis ICP-MS, XRF, XRD berturut-turut dirangkum dalam Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6A.

Tabel 1. Rangkuman stratigrafi Halmahera dengan waktu dan interpretasi peristiwa(Hall, 1987).





Tabel 5. Hasil analisis XRF

Sampel	Samp_ID	Ni	Co	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Zn	SUM	Sc
AD-01	AD-01-L3	0.36	0.1	16.08	0.03	3.07	0.01	42.7	0.07	2	0.87	<0.01	<0.01	0.03	23.15	0.19	0.03	99.41	49
	AD-01-S3	0.56	<0.01	27.22	0.1	0.18	0.02	6.76	0.04	6.24	0.19	<0.01	<0.01	0.16	45.06	0.07	0.01	100.04	51
	AD-01-S4	0.18	<0.01	30.05	0.15	0.12	0.01	7.27	<0.01	3.67	0.17	<0.01	<0.01	<0.01	44.36	0.13	<0.01	99.64	62
	AD-01-B1	0.25	0.01	3.01	0.34	0.67	<0.01	8.74	0.01	33.99	0.13	<0.01	<0.01	0.13	40.43	<0.01	<0.01	100.77	13
AM-01	AM-01-L2	0.32	0.01	6.03	2.72	0.56	<0.01	14.36	0.03	21.05	0.15	0.22	<0.01	0.1	44.49	0.14	<0.01	100.61	19
	AM-01-S2	0.11	<0.01	12.5	8.21	0.29	<0.01	11.15	0.04	13.34	0.14	0.52	<0.01	0.11	47.37	0.32	<0.01	100.71	29
	AM-01-S4	0.04	<0.01	14.11	15.2	0.12	<0.01	3.33	0.01	10.88	0.05	1.35	<0.01	<0.01	47.78	0.08	<0.01	99.34	31
	AM-01-B2	0.08	<0.01	19.32	10.47	0.05	<0.01	4.73	0.04	14.98	0.08	0.49	<0.01	0.1	42.66	<0.01	<0.01	99.92	14
Unit	-	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm

Tabel 6. A) Hasil analisis XRD B) Tabulasi hasil deskripsi megaskopis

MINERAL PHASE IDENTIFICATION- RIETVELD %						RIETVELD REFINEMENT (WT%)	
No	Abiv.	Mineral Phase Identification	Mineral Chemical Formula	Mineral Classification	Mineral Group	AD-01-S4	AM-01-S5
1	Act	Actinolite	Ca <sub>2</sub> (Mg,Fe) <sub>7</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	Silicates	Amphibole		37.6
2	An	Anorthite	CaAl <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Silicates	Plagioclase		1.8
3	Cal	Calcite	CaCO <sub>3</sub>	Carbonates	Calcite		1.5
4	Chl	Chlorite	(Mg,Fe) <sub>3</sub> (Al,Si) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	Silicates	Clay	2.8	1.5
5	Di	Diopside	CaMg(SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Silicates	Pyroxene		15.8
6	Gth	Goethite	FeO(OH)	Oxides/ Hydroxides	Diaspore		2.7
7	Hul	Heulandite	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>14</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Silicates	Zeolite		3.9
8	Kln	Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Silicates	Clay	36.7	
9	Lz	Lizardite	(Mg,Fe,Ca) <sub>3</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>4</sub>	Silicates	Serpentine	58.9	
10	Mes	Mesolite	Na <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>20</sub> ·8H <sub>2</sub> O	Silicates	Zeolite		6.5
11	Ntr	Natrolite	Na <sub>2</sub> [Al <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O]	Silicates	Zeolite		18.1
12	Prg	Pargasite	NaCa <sub>2</sub> (Mg,Fe) <sub>3</sub> Al(Si <sub>6</sub> Al) <sub>2</sub> O <sub>21</sub> (OH) <sub>2</sub>	Silicates	Amphibole		8.1
13	Pri	Phenocrphyllite	Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> (OH) <sub>2</sub>	Silicates	Clay		1.6
14	Sd	Siderite	FeCO <sub>3</sub>	Carbonates	Calcite		1
15	Vrm	Vermiculite	Mg <sub>3</sub> (S <sub>2</sub> Al) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	Silicates	Clay	1.7	
						Total	100

Kode Sample	Lithology	Crystals (%)								Total (%)		
		Ol	Sp	Hm	Gt	Cy	Px	Si	An		Ch	
1	AD-01-L1	Limonite	0	0	30	10	60	0	0	0	0	100
2	AD-01-L2	Limonite	0	0	30	12	58	0	0	0	0	100
3	AD-01-L3	Limonite	0	0	30	14	56	0	0	0	0	100
4	AD-01-L4	Limonite	0	0	20	25	55	0	0	0	0	100
5	AD-01-L5	Limonite	0	0	20	30	50	0	0	0	0	100
6	AD-01-S1	Saprolite	0	5	25	30	40	0	0	0	0	100
7	AD-01-S2	Saprolite	5	50	0	0	45	0	0	0	0	100
8	AD-01-S3	Saprolite	10	40	0	0	50	0	0	0	0	100
9	AD-01-S4	Saprolite	5	40	0	0	55	0	0	0	0	100
10	AD-01-S5	Saprolite	10	40	0	0	50	0	0	0	0	100
11	AD-01-B1	Serpentin	15	80	0	0	5	0	0	0	0	100
12	AD-01-B2	Serpentin	10	90	0	0	0	0	0	0	0	100
1	AM-01-L1	Limonite	0	0	40	20	40	0	0	0	0	100
2	AM-01-L2	Limonite	0	0	40	20	40	0	0	0	0	100
3	AM-01-S1	Saprolite	30	5	0	0	65	0	0	0	0	100
4	AM-01-S2	Saprolite	30	5	0	0	65	0	0	0	0	100
5	AM-01-S3	Saprolite	15	30	0	0	15	0	5	0	35	100
6	AM-01-S4	Saprolite	10	20	0	0	60	10	0	0	0	100
7	AM-01-B1	Peridotite	30	45	0	0	8	7	0	10	0	100
8	AM-01-B2	Peridotite	40	18	0	0	0	27	0	15	0	100

Abreviation:	Hm=Hematite, Gt=Goethite, Cy=Clay, Px=Pyroxene, Cb=Carbonate, Ol=Olivine, An=Anorthite, Sp=Serpentine, Si=Silica.
--------------	---

**Analisis Petrologi**

Analisis petrologi dilakukan untuk mengetahui karakteristik mineral yang berasosiasi pada batuan dan atau tanah pada profil laterit dengan pemerian melalui pengamatan megaskopis dan mikroskopis. Pengamatan megaskopis dilakukan di lapangan berdasarkan kenampakan serta sifat fisik batuan dan atau tanah. Pengamatan mikroskopis sayatan tipis sampel penelitian dilakukan dengan mikroskop polarisasi di Laboratorium Petrologi dan Mineralogi FTG UNPAD. Hasil analisis deskripsi megaskopis dirangkum dalam Tabel 6B, sedangkan hasil analisis petrografi dirangkum dalam Tabel 7.

**HASIL PENELITIAN**

**Geologi dan Karakteristik Profil Laterit Daerah Penelitian**

Morfologi daerah penelitian terdiri dari perbukitan memanjang agak curam hingga curam yang terbentuk di utara dan pedataran agak landai yang terbentuk di tengah dan selatan lokasi penelitian merupakan bagian puncak dari perbukitan. Terdapat daerah aliran

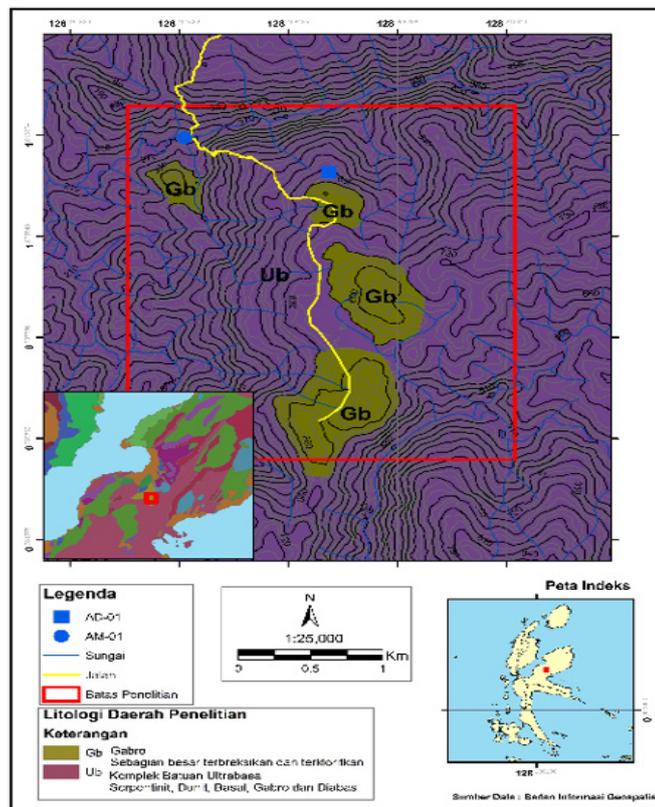
sungai yang berkembang diantara perbukitan yang mencirikan adanya indikasi struktur geologi. Struktur geologi yang berkembang adalah sesar mendatar dan sesar normal. Secara umum, litologi yang berasosiasi pada lokasi penelitian adalah batuan beku ultrabasa berjenis *peridotite* yang termasuk kedalam Formasi Ultrabasa (Ub) sekuen *peridotite* Halmahera Timur sebagai *basement*. Sekuen ini diduga berkaitan dengan kejadian tumbukan antar lempeng yang menyebabkan terjadinya pengangkatan kerak samudera membentuk sekuen ofiolitik. Secara megaskopis batuan *peridotite* yang diwakili oleh sampel AM-01-B2 memiliki warna hitam hingga hitam kecoklatan, tekstur fanerik, ekuigranular, terdiri atas mineral *pyroxene* (75%), *amphibole* (5%), *olivine* (15%) dan *plagioclase* (5%) sebagai mineral primer serta terserpentinisasi lemah pada bagian atas perlapisan. Sekuen *peridotite* terkekarkan kuat. Formasi batuan berkomposisi basa dan ultrabasa terbentuk pada zaman Kapur (Ballantyne, 1991). Pemetaan geologi permukaan (BSA, 2021) menunjukkan bahwa litologi didominasi oleh batuan *peridotite*. Singkapan batuan *gabbro* teramati dalam bentuk *float sample* (Gambar 2).

Tabel 7. Tabulasi hasil analisis petrografi

No	Kode Sample	Lithology		Phenocryst/Fragment (%)													Tot. Phen/Frag (%)	Tot. Mtx/Gr.mass (%)	Total (%)		
				Crystals (%)										Lithic (%)		Matrix/Gr. Mass					
				Oi	Fd	An	Di	Hy	Sp	Sid	Sq	Op	Alt	Cy Nod	Cly	Mic.Sp				Mic.Cal	
1	AD-01-L1	Limonite	Limonite	0	0	0	0	0	0	0	15	10	10	10	5	60	0	0	40	60	100
2	AD-01-S2	Saprolite	Saprolite	0	5	0	0	0	0	20	0	10	20	5	40	0	0	60	40	100	
3	AD-01-B2	Peridotite	Serpentinite	0	0	0	0	0	75	0	0	0	0	0	5	20	0	75	25	100	
1	AM-01-S3	Saprolite	Saprolite	0	0	0	0	0	30	15	0	5	20	5	15	0	10	75	25	100	
2	AM-01-S4	Saprolite	Saprolite	18	0	0	10	0	20	0	0	2	15	5	30	0	0	70	30	100	
3	AM-01-B1	Peridotite	Lherzolite	30	0	10	4	3	25	0	0	3	0	0	5	20	0	75	25	100	
4	AM-01-B2	Peridotite	Lherzolite	40	0	15	15	12	10	0	0	5	0	0	3	0	0	97	3	100	

Abreviation :	Oi=Olivine, Fd=Feldspar, An=Anorthite, Di=Diopside (Clino-Px), Hy=Hypersthene (Ortho-Px), Sp=Serpentine, Sid=Siderite, Sq=Secondary quartz, Op=Opaque Minerals, Alt=Altered rock, Cy Nod=Clay nodule, Cly=Clay minerals, Mic. Sp=Microcrystalline serpentine, Mic. Cal=Microcrystalline calcite.
---------------	--



Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian

Daerah penelitian memiliki beberapa kondisi yang mendukung pembentukan profil laterit. Profil laterit yang terdapat di lokasi penelitian berkembang pada kondisi iklim tropis yang mana memiliki cuaca panas dan curah hujan yang efektif mendukung perkembangannya. Profil ini terbentuk pada topografi perbukitan dengan punggung yang tidak terlalu curam dan puncakan yang relatif landai. Profil ini hadir di atas batuan *basement peridotite* kaya besi (Fe) dan magnesium (Mg) sebagai batuan sumber dari kondisi mineralogi pada profil pelapukan laterit di atasnya.

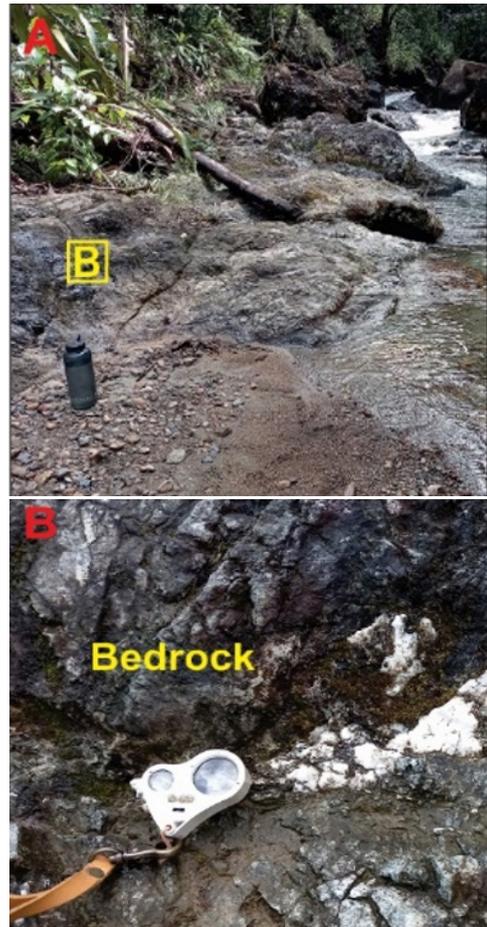
Profil laterit yang berkembang pada daerah penelitian terbagi menjadi beberapa lapisan/zona. Berdasarkan identifikasi analisis petrologi megaskopis dan

mikroskopis deskripsi batuan dan profil lapukan, zona batuan dasar teridentifikasi sebagai *lherzolite* yang termasuk kedalam kelompok batuan ultrabasa. Pada profil pengamatan AM-01 *lherzolite* tersingkap pada lantai sungai (Gambar 3). Pada profil pengamatan AD-01 *lherzolite* telah terubah secara intensif menjadi serpentin. *Lherzolite* berwarna hitam keabuan hingga kehijauan dengan struktur masif terkekarkan. Secara mikroskopis sampel sayatan tipis AM-01-B2 (Gambar 4) memiliki tekstur holokristalin, porfiritik-fanerik, inequigranular yang terdiri atas mineral primer *olivine* (40%), *anorthite* (15%), *diopside* (15%), *hypersthene* (12%) dan mineral opak (5%). Secara umum paragenesis mineral pada daerah penelitian dirangkum dalam Tabel 8.

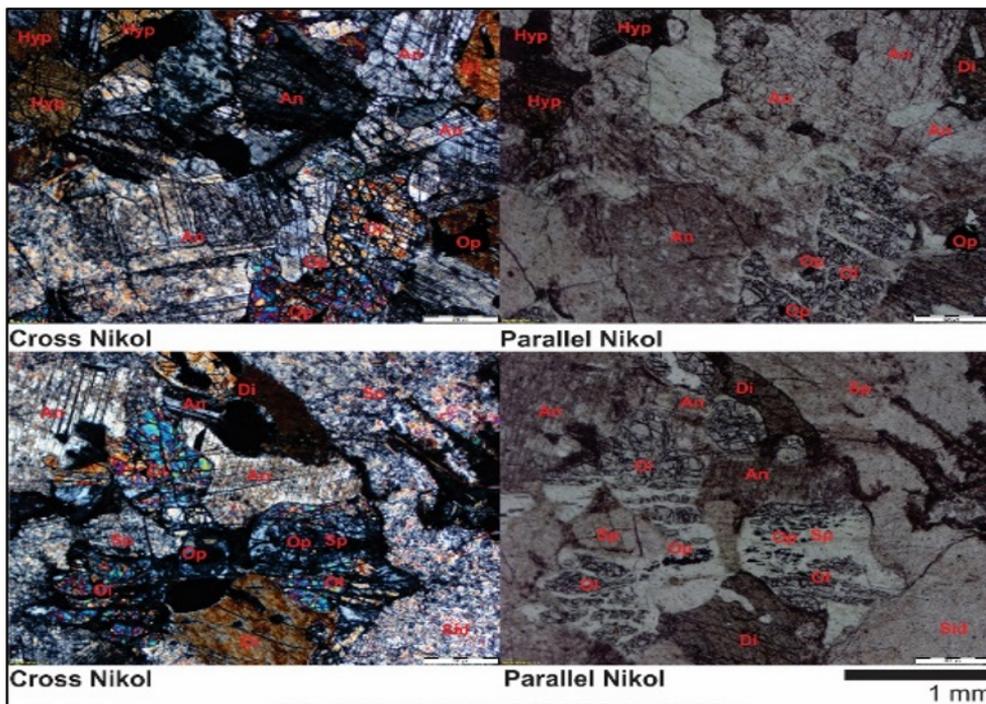
Tabel 8. Paragenesis mineral-mineral penyusun batuan pada daerah penelitian

Minerals	Stages		
	Primary	Lateritization	Enrichment
Olivine	██████████	-----	
Diopside	██████████	-----	
Hypersthene	██████████	-----	
Amphibole	██████████	-----	
Feldspar	██████████	-----	-----
Anorthite	██████████	-----	-----
Siderite		██████████	-----
Calcite		██████████	-----
Secondary Quartz		██████████	-----
Clay		-----	██████████
Serpentine	-----	██████████	-----
Opaque	██████████	-----	-----
Hematite		██████████	-----
Goethite		██████████	-----
Maghemite		██████████	-----
Magnetite	-----	██████████	-----

Abundant  
  Common  
  Trace



Gambar 3. Singkapan lherzolite sebagai batuan dasar profil laterit pada lokasi penelitian



Gambar 4. Pengamatan sayatan tipis lherzolite pada sampel AM-01-B2. An-anorthite; Di-diopside; Op-Mineral Opak; Hyp-Hypersthene; Ol-Olivine; Sid-Siderite

Zona saprolit terdiri atas lapisan saprolit keras (AM-01-S4, AD-01-S5) dan saprolit halus (AM-01-S2, AD-01-S2). Saprolit keras berwarna kuning kecokelatan hingga kehijauan yang memiliki ukuran butir kerikilan hingga sedang, tingkat pelapukan menengah, terserpentinisasi menengah hingga tinggi pada beberapa bagian, kandungan mineral terdiri dari *goethite*, *serpentine*, serta urat-urat *serpentine* dan kuarsa sekunder. *Calcite* dan *siderite* teramati melalui pengamatan mikroskopis pada kedua profil laterit sampel AD-01-S2 dan AM-01-S3.

Zona transisi saprolit -limonit (AM-01-S1, AD-01-S1) berwarna abu-abu kecokelatan, didominasi oleh mineral lempung dengan lapisan yang tebal dan masif, ukuran butir sedang - halus. Hasil analisis XRD pada sampel AD-01-S4 dan AM-01-S4 menunjukkan kehadiran mineral lempung berjenis *chlorite*, *kaolinite*, *phyrophyllite* dan *vermiculite*. Zona limonit berwarna merah hingga merah kecokelatan-kekuningan, ukuran butir sedang – sangat halus, didominasi oleh kelompok mineral oksida yaitu *hematite*, *goethite*, *maghemite*, dan *magnetite*. Terdapat *talc* dan silica pada beberapa bagian limonit dengan tingkat pelapukan yang sangat tinggi. (Gambar 5)



Gambar 5. (A) Profil laterit pada lokasi pengamatan AM-01 (B-C-D-E merupakan letak pengambilan gambar *zoom in*; L-Limonit; S-Saprolit).

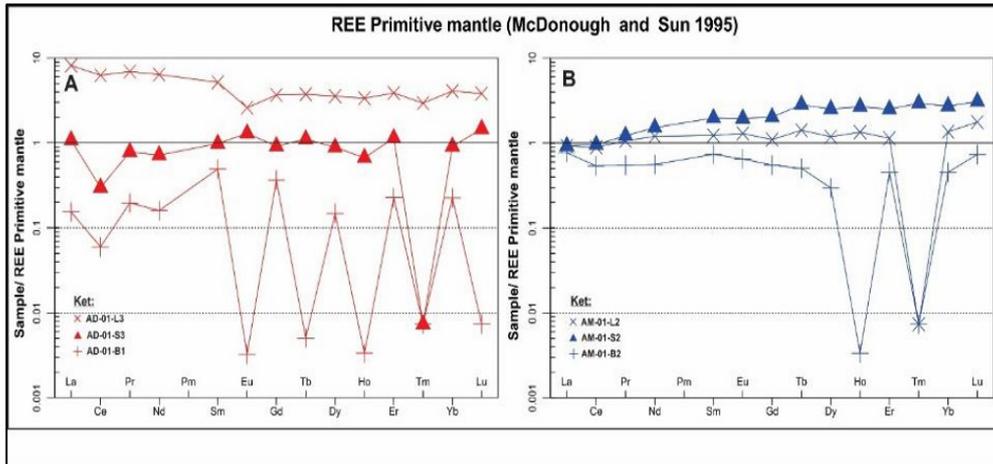
### Karakteristik Geokimia

Hasil analisis UTJ menggunakan ICP-MS yang ditampilkan dalam bentuk diagram jaring menunjukkan *trend* penambahan UTJ yang mengarah ke permukaan pada profil pengamatan AD-01 (Gambar 7a). Akan tetapi pada profil pengamatan AM-01, kandungan UTJ pada lapisan saprolit (AM-01-S2) lebih banyak dibandingkan dengan lapisan limonit yang terwakili oleh sampel AM-01-L2 (Gambar 7b).

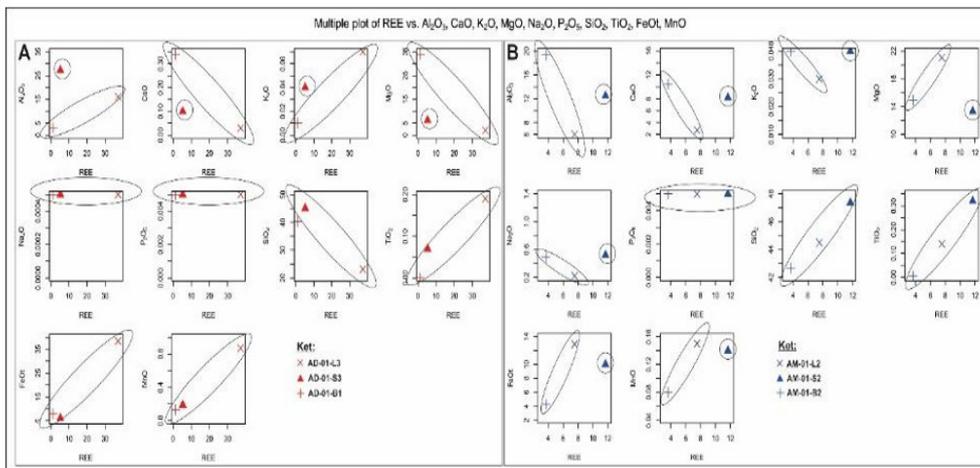
Hasil pengolahan data XRF pada profil AD-01 yang menggunakan diagram multiplot bivariat antara UTJ dengan elemen major menunjukkan asosiasi UTJ erat kaitannya dengan elemen  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $FeO(t)$ , dan  $MnO$  (Gambar 8A). Korelasi UTJ berbanding terbalik dengan unsur  $MgO$ ,  $SiO_2$  dan  $CaO$  (Gambar 8a). Profil AM-1 menunjukkan pola asosiasi UTJ sebanding dengan  $MgO$ ,  $SiO_2$ ,  $FeO(t)$ , dan  $MnO$  berbeda dengan profil AD-01. Selain itu UTJ pada AM-01 berbanding terbalik dengan elemen  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $K_2O$ , dan  $Na_2O$ . (Gambar 8b).

Hasil pengolahan data XRF menggunakan diagram multiplot bivariat antara unsur Sc dengan elemen *major* menunjukkan persebaran skandium pada profil AD-01 erat kaitannya dengan kehadiran elemen  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $FeO(t)$ ,  $MnO$  dan  $Na_2O$ . Korelasi skandium berbanding terbalik dengan unsur  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$  (Gambar 9a). Pada profil AM-01 teramati pola asosiasi skandium sebanding dengan kehadiran elemen  $MgO$ ,  $SiO_2$ ,  $FeO(t)$  dan  $MnO$ . Skandium pada profil ini berbanding terbalik dengan elemen  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $K_2O$  serta  $Na_2O$  (Gambar 9b). Terjadi pengayaan skandium pada lapisan saprolit, kedua profil pengamatan yang terwakili oleh sampel AD-01-S3, AD-01-S4, AM-01-S2 dan AM-01-S4.

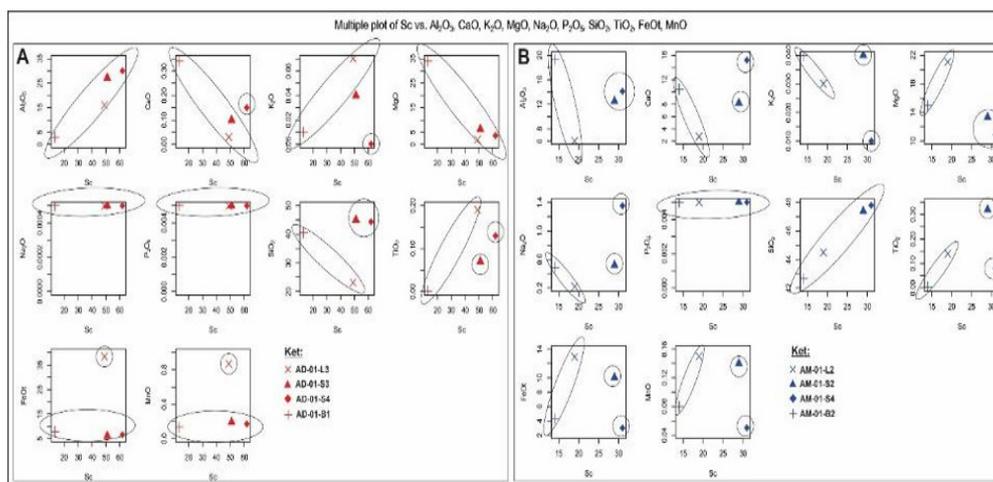
Hasil analisis XRD yang dilakukan pada sampel menunjukkan beberapa variasi kelompok mineral diantaranya *amphibole*, *plagioclase*, *calcite*, *pyroxene*, *diaspore*, *zeolite*, *serpentine* dan kelompok mineral lempung. Pada sampel AD-01-S4 komposisi mineral didominasi oleh mineral kelompok *serpentine* (58%) dan mineral lempung (42%). Mineral lempung dengan jenis *kaolinite* ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), *chlorite* ( $(Mg,Fe)_5(Al,Si)_5O_{10}(OH)_8$ ) dan *vermiculite* ( $Mg_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ ). Sampel AM-01-S5 tersusun atas komposisi mineral yang lebih bervariasi dengan beberapa kelompok mineral mafik yang masih hadir pada lapisan saprolit. Selain itu terdapat kelompok mineral lempung jenis *chlorite* dan *pyrophyllite* ( $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ ) dengan komposisi minor (3.1%).



Gambar 7. Diagram jaring pada sampel pengamatan profil laterit AM-01 dan AD-01



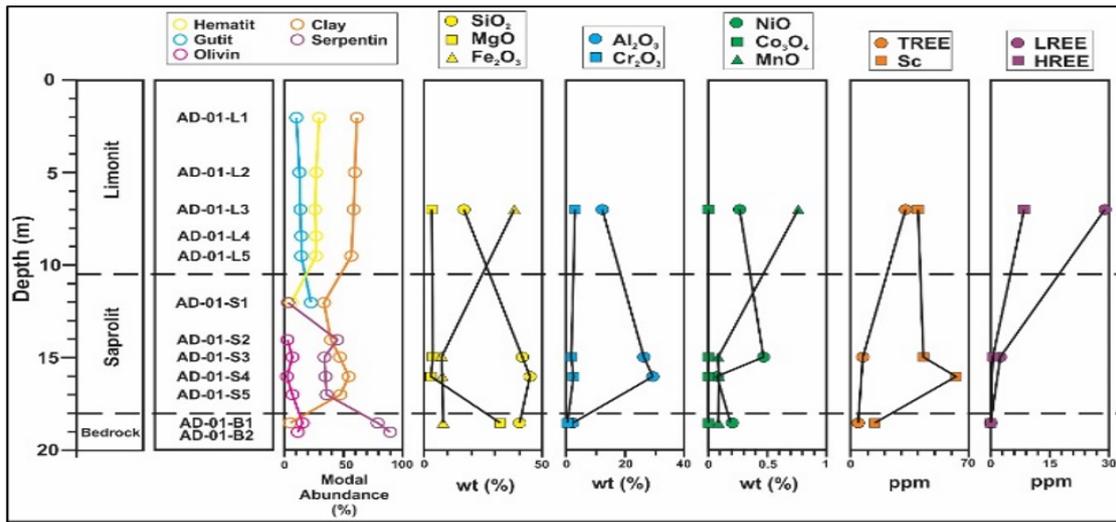
Gambar 8. Diagram bivariat Unsur Tanah Jarang vs elemen major



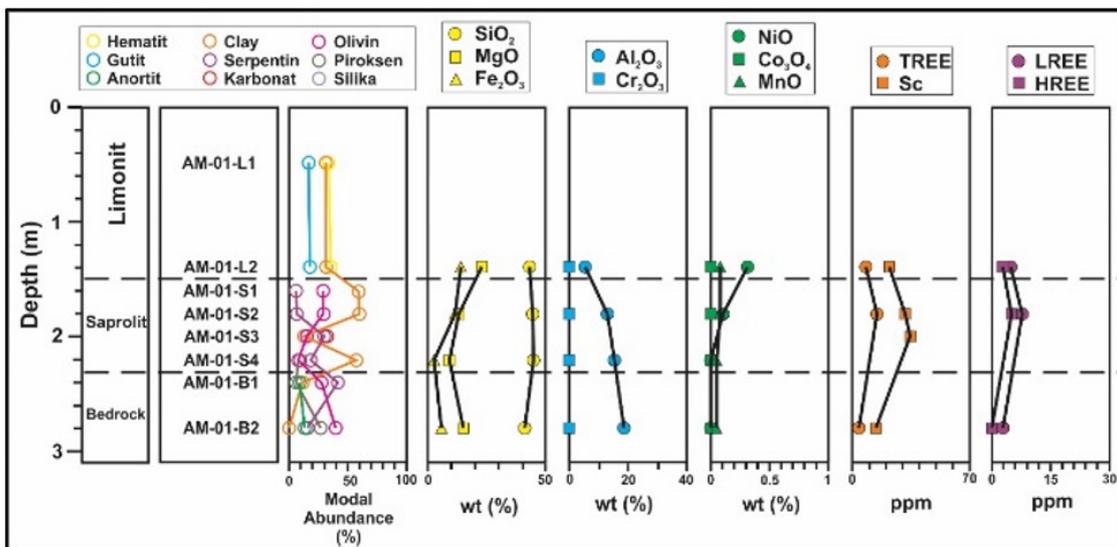
Gambar 9. Diagram bivariat Skandium vs elemen major

Data hasil analisis petrologi dan geokimia kemudian dirangkum pada diagram bivariat variasi vertikal untuk masing-masing profil pengamatan AD-01 (Gambar 10) dan AM-01 (Gambar 11). Diagram variasi profil AD-01 menunjukkan himpunan mineral yang terbentuk pada profil pengamatan. Mineral *olivine* dan *serpentine* mengalami penurunan komposisi hingga akhirnya tidak teramati pada sampel AD-01-S1. Kelompok mineral oksida seperti hematit dan *goethite* mulai muncul bersamaan pada sampel AD-01-L5. Mineral lempung semakin dominan menuju ke lapisan limonit. Terlihat *trend* penurunan komposisi dari elemen MgO dan peningkatan komposisi

$Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , dan  $Fe_2O_3$  semakin ke arah permukaan. Selain itu terlihat pola peningkatan UTJ bersamaan dengan unsur skandium. UTJ pada diagram tersebut ditampilkan sebagai Total REE (TREE = LREE + HREE). Unsur skandium mengalami pengayaan pada lapisan saprolit. Komposisi *Light Rare Earth Element (LREE)* lebih besar dibandingkan dengan *Heavy Rare Earth Element (HREE)*. Unsur - unsur lantanida berdasarkan struktur elektron terbagi menjadi elemen tanah jarang ringan (LREE; La-Gd), yang tidak memiliki pasangan 4f elektron, sedangkan HREE (Tb-Lu) memilikinya (Vieira dkk., 2019) .



Gambar 10. Diagram bivariat variasi vertikal profil pengamatan AD-01



Gambar 11. Diagram bivariat variasi vertikal profil pengamatan AM-01

Diagram variasi AM-01 menunjukkan himpunan mineral yang lebih bervariasi dibandingkan dengan profil AD-01. Beberapa mineral primer seperti *olivine*, *pyroxene* dan *anorthite* mengalami penurunan komposisi hingga akhirnya tidak teramati pada saprolit yang diwakili oleh sampel AM-01-S1. Kelompok mineral oksida seperti hematit dan *goethite* mulai muncul bersamaan pada sampel AM-01-L2. Terjadi pengayaan mineral lempung pada lapisan saprolit. Terlihat *trend* penurunan komposisi dari elemen  $Al_2O_3$  dan peningkatan komposisi  $Fe_2O_3$  dan  $SiO_2$  ke arah permukaan. Pola yang sama dengan profil AD-01 yaitu peningkatan asosiasi UTJ bersamaan dengan unsur skandium. Unsur skandium mengalami pengayaan pada lapisan saprolit.

## DISKUSI

### Batuan ultrabasa sebagai batuan dasar profil laterit

Batuan dasar yang teramati pada profil AM-01 merupakan *lherzolite* yang tersingkap pada lantai sungai dan relatif masih segar dibandingkan dengan *serpentinite* yang telah mengalami ubahan pada profil AD-01. Hal ini menyebabkan kandungan mineral primer batuan dasar profil AM-01 masih besar kandungannya dan menghasilkan variasi mineral yang lebih beragam. Meskipun dalam peta geologi regional terdapat satuan intrusi gabro akan tetapi kondisi faktual di lapangan menunjukkan batuan berjenis gabro jarang ditemui sebagai tubuh singkapan masif akan tetapi hanya ditemukan sebagai fragmen-fragmen dalam lapisan saprolit dan/atau limonit. Hal ini diduga bahwa intrusi *gabbro* telah mengalami erosi dan pelapukan oleh agen supergen pembentuk lapisan laterit. Sekuen Ultrabasa (Ub) terbentuk terlebih dahulu diikuti oleh sekuen Gabro (Gb) yang diinterpretasikan merupakan satu kesatuan dalam formasi ofiolit yang tersingkap di permukaan. Kompleks ofiolit ini termasuk ke dalam wilayah Halmahera-Waigeo Timur (Sukanto dkk., 1981 dalam Farrokhpay dkk., 2019) yang membentang dari Halmahera Tengah hingga Pulau Waigeo. Kompleks ofiolit terbentuk dalam setting zona supra-subduksi dan diduga berumur Kapur-Akhir (Ballantyne, 1991).

MgO umumnya berasosiasi dengan mineral - mineral mafik utama pembentuk batuan. Hasil analisis petrologi secara megaskopis dan mikroskopis menunjukkan bahwa batuan dasar penelitian merupakan batuan dengan komposisi ultrabasa yang memiliki komposisi mineral mafik lebih dari 60%. Pelapukan kimiawi batuan ultrabasa disertai dengan fraksinasi unsur-unsur yang terbagi menjadi jenis yang larut dalam air dan tidak larut dalam air. Unsur-unsur yang larut dalam air akhirnya tercuci keluar dari

sistem pelapukan, sementara unsur-unsur yang tidak larut dalam air tertinggal sebagai pengayaan residu. Sebagian besar stratifikasi dalam profil pelapukan laterit disebabkan oleh adanya air, baik karena pergerakannya ke bawah maupun melalui fluktuasi levelnya di dalam tanah (Ahmad, 2008). Berdasarkan penjelasan tersebut diinterpretasikan bahwa terjadi proses pelapukan yang menguraikan batuan dasar sehingga unsur MgO yang berada pada mineral mafik semakin berkurang menuju ke permukaan hingga akhirnya menghilang atau bereaksi dengan unsur lain menjadi unsur baru. Mineral mafik (*pyroxene*, *olivine*) rentan terhadap pelapukan kimia, yang mengakibatkan hilangnya Mg dari profil pelapukan. Ketika lingkungan alterasi mengoksidasi dan Fe dipertahankan, total Fe dianggap sebagai elemen tidak bergerak bersama dengan Al (Meunier dkk., 2013). Peningkatan komposisi elemen  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  dan  $Fe_2O_3$  pada lokasi penelitian menunjukkan bahwa keterbentukan profil laterit lokasi penelitian erat kaitannya dengan lingkungan yang teroksidasi.

### Pengayaan Sc dan Asosiasi UTJ pada profil laterit

Di alam, UTJ tidak terbentuk sebagai individu mineral logam seperti emas, tembaga dan perak karena reaktivitasnya, namun terjadi/terbentuk bersama-sama dalam banyak bijih / mineral aksesori baik sebagai minor atau konstituen utama (Balaram, 2019). Kelimpahan UTJ dan Sc pada lapisan saprolit AD-01 diduga merupakan akibat dari reaksi unsur-unsur tersebut dalam mineral yang mengandung ion yang dapat menyerap UTJ dan Sc seperti mineral lempung. Selain itu terjadi pengayaan kehadiran mineral lempung pada lapisan saprolit kedua profil pengamatan. Ketebalan tanah laterit berkaitan dengan proses laterisasi serta kontur permukaan tanah. AM-01 memiliki tingkat kontur permukaan yang lebih curam dibandingkan dengan AD-01. Proses laterisasi melibatkan peran run-off air meteorik sehingga pembentukan tanah laterit kurang maksimal pada AM-01 yang berpengaruh kepada tingkat ketebalan profil laterit. Hal ini ditunjukkan oleh tingkat ketebalan profil limonit yang lebih tebal pada AD-01 dibandingkan dengan AM-01. Akibatnya lapisan saprolit pada AM-01 menjadi tempat terjadinya proses reaksi kimiawi dalam hal ini pertukaran ion secara maksimal.

Mineral lempung memiliki struktur ikatan ion yang mampu mengikat UTJ. *Kaolinite* ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), *vermiculite* ( $Mg_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ ), *pyrophyllite* ( $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ ) dan klorit ( $(Mg,Fe)_5(Al,Si)_5O_{10}(OH)_8$ ) merupakan mineral lempung yang teridentifikasi pada lapisan saprolit berdasarkan hasil analisis XRD sampel AD-01-S4 dan AM-01-S4. Kaolinit adalah produk pelapukan umum

dari *plagioclase* dan mineral primer lainnya seperti *amphibole* (Grant, 1963; Garrels, 1967; Garreks dan Mackenzie, 1967; Nesbitt et al., 1980 dalam Nesbitt & Young, 1984). Untuk itu kehadiran UTJ dan skandium yang tinggi erat kaitannya dengan asosiasi dengan elemen  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$  dan  $FeO(t)$  serta  $SiO_2$  dimana elemen-elemen ini berperan sebagai komposisi penyusun mineral lempung.

Fraksinasi antara HREE dan LREE dapat dijelaskan melalui fenomena kimia dikenal sebagai kontraksi lantanida, yang terdiri dari penurunan jari-jari atom dan ionik UTJ dengan meningkatnya nomor atom (Vieira dkk., 2019). LREE<sup>3+</sup> memiliki sifat istimewa yaitu dapat teradsorpsi pada permukaan mineral dibandingkan dengan HREE<sup>3+</sup> yang lebih *mobile* (Vieira dkk., 2019). Hal ini telah dibuktikan dalam beberapa percobaan bahwa HREE cenderung lebih teradsorpsi pada kaolinit dibandingkan dengan LREE di bawah kekuatan ionik dan pH rendah dalam larutan (Vieira dkk., 2019)

Dalam lingkungan tertentu, UTJ dan logam langka lainnya menunjukkan mobilitas terbatas dan dengan demikian dapat diperkaya secara lokal melalui proses pelindian dan konsentrasi berturut-turut pada neoform silikat, oksida atau fosfat (Ulrich dkk., 2019). Deposit UTJ terbagi menjadi beberapa jenis diantaranya yaitu deposit UTJ *Ion Adsorption Type* (IAT). Adsorpsi ion dianggap sebagai penyebab utama pengayaan UTJ selama proses pelapukan. Tipe ini membentuk bijih laterit yang terkayakan oleh UTJ, yang merupakan salah satu jenis endapan UTJ utama yang, membentuk sekitar 9,7% dari sumber daya dan mewakili materi yang paling kaya HREE

dieksploitasi di Cina (Balaram, 2019). Jenis endapan ini dibentuk oleh pelapukan kimia dari batuan, dengan adsorpsi UTJ pada permukaan mineral lempung. Proses ini biasanya terjadi setelah hidrolisis *REE-bearing mineral* dalam kondisi hangat dan lembab (Balaram, 2019).

## KESIMPULAN

*Lherzolite* sebagai batuan dasar profil laterit di lokasi penelitian berperan sebagai sumber dari skandium dan UTJ. Kehadiran lapisan transisi antara zona saprolit dan limonit pada profil laterit di lokasi penelitian yang kaya akan mineral lempung diduga sebagai hasil pelapukan yang mengalami pengayaan skandium dan UTJ. Mineral lempung berperan sebagai media (*host mineral*) penyerap UTJ. Skandium dan UTJ bergerak dari batuan dasar akibat proses pelindian oleh media air tanah dan/atau meteorik yang kemudian teradsorpsi kedalam mineral lempung melalui proses pertukaran ion secara kimiawi. Perlu adanya penelitian lebih komprehensif mengenai skandium dan kelompok lantanida melalui pendekatan konsep *Ion Adsorption Type* untuk mengklasifikasikan nilai keekonomisan dan cadangan sumber daya di masa yang akan datang.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada PT. Bahana Selaras Alam dan PT. Indo Bumi Nikel yang telah membantu dalam proses akuisisi data dan operasional selama penelitian berlangsung. Tidak lupa juga rekan-rekan *geologist* yang selalu memberikan motivasi yang membangun kepada penulis dalam proses penelitian ini.

## REFERENSI

- Ahmad, W., 2008. Nickel Laterites: fundamentals of chemistry, mineralogy, weathering processes, formation, and exploration. VALE Inco-VITSL unpublished
- Apandi, T. dan Sudana, D., 1980, *Peta Geologi Lembar Ternate, Maluku Utara Skala 1 : 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, Direktorat Jendral Geologi dan Sumberdaya Mineral, Departemen Pertambangan dan Energi.
- Ballantyne, P., 1991. Petrological constraints upon the provenance and genesis of the East Halmahera ophiolite. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 6(3-4), pp.259-269.
- Balaram, V., 2019. *Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact*. Geoscience Frontiers, 10(4), pp.1285-1303.
- Farrokhpay, S., Cathelineau, M., Blancher, S. B., Laugier, O., & Filippov, L. (2019). Characterization of Weda Bay nickel laterite ore from Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 196, 270-281.
- Garreks & Mackenzie, 1967. *Origin of the chemical compositions of some springs and lakes*. In Equilibrium Concepts in Natural Water Systems (ed. R. F GOULD). Adv Chem. Series 07 222-242. Amer. Chem. Soc.
- Garrels, 1967. Genesis of some ground waters from Igneous rocks. *In Researches in Geochemists 2*. (ed. P H. ABELSON), p. 405-422. Wiley.
- Grant, 1963. *Weathering of Stone Mountain Granite*. In *Clays and Clay Minerals* (ed. E, INGERSOL.) p. 65-73. Pergamon Press.

- 
- Hall, R., 1987. Plate boundary evolution in the Halmahera region, Indonesia. *Tectonophysics*, 144(4), pp.337-352.
- Konopka, G., Szamalek, K., & Zglinicki, K. (2022). Ni-Co Bearing Laterites from Halmahera Island (Indonesia). *Applied Sciences*, 12(15), 7586.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et cosmochimica acta*, 48(7), pp.1523-1534.
- Ulrich, M., Cathelineau, M., Muñoz, M., Boiron, M.C., Teitler, Y. and Karpoff, A.M., 2019. The relative distribution of critical (Sc, REE) and transition metals (Ni, Co, Cr, Mn, V) in some Ni-laterite deposits of New Caledonia. *Journal of Geochemical Exploration*, 197, pp.93-113.
- Vieira, C.C., Botelho, N.F. and Garnier, J., 2019. Geochemical and mineralogical characteristics of REEY occurrences in the Mocambo Granitic Massif tin-bearing A-type granite, central Brazil, and its potential for ion-adsorption-type REEY mineralization. *Ore Geology Reviews*, 105, pp.467-486.
- Widiatmoko, H. C., Mirnanda, E., & Kurnio, H. (2020). Nickel in Buli Coastal Area, East Halmahera. *Bulletin of the Marine Geology*, 35(1).