

**TESIS**

**GEOKIMIA BATUAN DASAR DAN KELIMPahan REE,  
SCANDIUM PADA NIKEL LATERIT DI DAERAH WULU,  
KECAMATAN TALAGA RAYA, KABUPATEN BUTON  
TENGAH, PROVINSI SULAWESI TENGGARA**

***Geochemistry Of Bedrock And Abundance Of REE, Scandium In  
Nickel Laterite Within The Wulu Region, Talaga Raya District,  
Central Buton District, Southeast Sulawesi Province***

**FARIED ARDIAN PUTRANTO**

**D062222004**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK GEOLOGI  
DEPARTEMEN TEKNIK GEOLOGI  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**

## **TESIS**

**GEOKIMIA BATUAN DASAR DAN KELIMPAHAN REE,  
SCANDIUM PADA NIKEL LATERIT DI DAERAH WULU,  
KECAMATAN TALAGA RAYA, KABUPATEN BUTON TENGAH,  
PROVINSI SULAWESI TENGGARA**

***Geochemistry Of Bedrock And Abundance Of REE, Scandium In Nickel  
Laterite Within The Wulu Region, Talaga Raya District, Central Buton  
District, Southeast Sulawesi Province***

**FARIED ARDIAN PUTRANTO**

**D062222004**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK GEOLOGI  
DEPARTEMEN TEKNIK GEOLOGI  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**

## **PENGAJUAN TESIS**

### **GEOKIMIA BATUAN DASAR DAN KELIMPAHAN REE, SCANDIUM PADA NIKEL LATERIT DIDAERAH WULU, KECAMATAN TALAGA RAYA, KABUPATEN BUTON TENGAH, PROVINSI SULAWESI TENGGARA**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister  
Program Studi Ilmu Teknik Geologi

Disusun dan diajukan oleh



**FARIED ARDIAN PUTRANTO  
D062222004**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**

# TESIS

## GEOKIMIA BATUAN DASAR DAN KELIMPAHAN REE, SCANDIUM PADA NIKEL LATERIT DIDAERAH WULU, KECAMATAN TALAGA RAYA, KABUPATEN BUTON TENGAH, PROVINSI SULAWESI TENGGARA

**FARIED ARDIAN PUTRANTO**

D062222004

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Magister Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 12 November 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Adi Tonggiroh, S.T., M.T  
NIP. 19650928 200003 1 002

Pembimbing Pendamping,



Dr. Ir. Musri Ma'waleda, M.T  
NIP. 19611231 198903 1 019

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., ASEAN Eng  
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Geologi



Dr. Eng. Ir. Meutia Farida, S.T., M.T  
NIP. 19731003 200012 2 002

## **PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Faried Ardian Putranto  
Nomor mahasiswa : D062222004  
Program studi : Teknik Geologi

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Geokimia Batuan Dasar Dan Kelimpahan REE, Scandium Pada Nikel Laterit Didaerah Wulu, Kecamatan Talaga Raya, Kabupaten Buton Tengah, Provinsi Sulawesi Tenggara” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Adi Tonggiroh, S.T., M.T. dan Dr. Ir. Musri Mawaleda, M.T.). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Prosiding (*International Conference of Petroleum, Mining, Geology, Geoscience, Energy and Environmental Technology*) sebagai artikel dengan judul “*Geochemical Characterization Of Bedrock And Distribution Of Enrichment Of Rare Earth Elements And Scandium In Nickel Laterite Within The Wulu Area, Central Buton District, Southeast Sulawesi Province.*”

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 10 November 2024  
Yang menyatakan



Faried Ardian Putranto

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tesis ini dapat diselesaikan yang berjudul “Geokimia Batuan Dasar Dan Kelimpahan REE, *Scandium* Pada Nikel Laterit DiDaerah Wulu, Kecamatan Talaga Raya, Kabupaten Buton Tengah, Provinsi Sulawesi Tenggara”. Penulis berusaha menyajikan yang terbaik selama proses pengerjaan tesis dari pemerolehan data hingga pemrosesan data, namun penulis menyadari masih banyak kekurangan dan kelemahan dalam penyajiannya. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran serta kritik yang membangun dari berbagai pihak untuk menyempurnakan tesis ini. Semoga tesis ini dapat memberikan manfaat baik bagi penulis, perkembangan ilmu geologi maupun untuk dunia Pendidikan. Penulis juga menyampaikan ucapan terimakasih berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka tesis ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Adi Tonggiroh, S.T., M.T, sebagai pembimbing utama pada tesis ini, yang telah memberikan arahan, motivasi, nasihat, dedikasi dan kesabarannya kepada penulis.
2. Dr. Ir. Musri Mawaleda, M.T, sebagai pembimbing pendamping pada tesis ini, yang telah memberikan arahan, nasihat, dan saran dalam penyusunan tesis ini.
3. Dr. Eng. Meutia Farida, S.T., M.T, selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Geologi yang selalu memberikan motivasi, saran, kritik, dan nasihat dalam menyelesaikan tesis ini.
4. Dedi Apriadi, S.T, selaku Kepala Teknik Tambang PT. Arga Morini yang memberikan kesempatan kepada penulis untuk menempuh jenjang pendidikan Strata-2 di Universitas Hasanuddin serta telah memfasilitasi selama kegiatan penelitian dan penyusunan tesis ini.

5. Departemen Eksplorasi PT. Arga Morini yang telah memberikan motivasi serta dorongan dalam menyelesaikan penyusunan tesis.
6. Manajemen PT. Arga Morini yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menempuh jenjang pendidikan Strata-2 di Universitas Hasanuddin.
7. Rekan – rekan Magister Teknik Geologi angkatan 2022 atas kerjasama dan kekompakannya dalam proses menempuh pendidikan pasca sarjana.
8. Ir. Totok Suprawoto, M.M., M.T. dan Winarti, A.Md.Ak, selaku orang tua penulis yang tidak pernah berhenti memberikan dukungan, nasihat, arahan dan doa sehingga tesis ini dapat terselesaikan.
9. Raditya Arief Pratama, S. Kom., M.Eng, selaku kakak penulis yang sudah memberikan nasihat, dorongan, serta motivasi dalam penyusunan tesis ini.
10. Dyan Thyagita, A.Md.Ak. selaku istri penulis yang senantiasa memberikan dukungan dan mendoakan selama mengikuti jenjang pendidikan Strata-2 di Universitas Hasanuddin.
11. Alda Fadila Putra, Iqbal Mahendra selaku sahabat penulis yang sudah memberikan motivasi dan dukungan dalam menyelesaikan tesis ini.
12. Kepada semua pihak yang tidak dapat disampaikan satu persatu yang telah mendukung proses penulisan ini diucapkan terima kasih.

Penulis

Faried Ardian Putranto

## ABSTRAK

**FARIED ARDIAN PUTRANTO.** Geokimia Batuan Dasar Dan Kelimpahan REE, *Scandium* Pada Nikel Laterit DiDaerah Wulu, Kecamatan Talaga Raya, Kabupaten Buton Tengah, Provinsi Sulawesi Tenggara (Dibimbing oleh **Adi Tonggiroh dan Musri Mawaleda**)

Daerah Wulu memiliki kelimpahan sumberdaya mineral nikel laterit dan berdasarkan fluktuasi nilai kimia zonasi limonit saprolite ternyata memerlukan penelitian lanjut, utamanya pada keterdapatannya REE (Rare Earth Elements) dan Scandium pada limonit. Penelitian ini bertujuan mengkaji perubahan kimia batuan ultramafik dalam kondisi fresh hingga proses pengayaan unsur-unsur laterit dan hubungannya terhadap REE, utamanya scandium. Untuk memenuhi tujuan penelitian dianalisis menggunakan metode ED-XRF dan ICP-MS terhadap sejumlah sampel yang mewakili batuan dasar dan zonasi laterit pada 4 (empat) lokasi KBB\_1, KBB\_2, KBB\_3, dan Blok\_KBB\_4, untuk mempelajari dan menyelidiki distribusi REE dan Sc pada Ni laterit. Hasil penelitian diketahui source ultramafik berjenis wehrelite memiliki konsentrasi REE tertinggi sebesar 0.91 ppm dibandingkan batuan lherzolite dan harzburgite. Peningkatan konsentrasi REE dan Scandium terjadi secara signifikan pada laterisasi batuan wehrelite, konsentrasi REE dan Sc semakin kuat pada zona limonit konsentrasinya meningkat menjadi 42 ppm, dan konsentrasi scandium mencapai 10.63 ppm. Kehadiran batuan dasar yang terususun mineral olivine dan klinopiroksen komposisi dari wehrelite, akan menghasilkan kandungan REE dan Sc yang lebih tinggi pada hasil pelapukannya. Hal ini menunjukkan REE dan Sc termasuk kelompok lithopile yang berhubungan dengan hadirnya oksida besi pada laterisasi. Perbedaan konsetrasi REE dari jenis ultramafik adalah terdapat ketidakseimbangan tingkat laterisasi sehingga distribusi pengayaan REE adalah berbanding terbalik pada jenis ultramafik REE tinggi akan berpengaruh pada konsentrasi REE hasil laterisasi. Berdasarkan hasil penyelidikan REE dan Sc yang menunjukkan peningkatan kandungan paling signifikan ditunjukkan pada profil Ni laterit dari Blok KBB\_1, dimana pengayaan REE dan scandium juga berbanding lurus dengan peningkatan kandungan NiO pada *yellow limonite*, sehingga REE dan Sc bisa menjadi produk sampingan dari nikel laterit dan bisa dimanfaatkan kedepannya.

**Kata kunci:** Geokimia, REE, *Scandium*, Ultramafik, Nikel laterit, Kabaena, Sulawesi, Indonesia

## ABSTRACT

**FARIED.** Geochemistry Of Bedrock And Abundance Of REE, Scandium In Nickel Laterite Within The Wulu Region, Talaga Raya District, Central Buton District, Southeast Sulawesi Province (Supervised by **Adi Tonggiroh dan Musri Mawaleda**)

The Wulu area has an abundance of laterite nickel mineral resources, and based on fluctuations in the chemical value of saprolite limonite zonation, it is evident that further research is required, particularly regarding the presence of REE (Rare Earth Elements) and Scandium in limonite. This study aims to examine the chemical changes of ultramafic rocks under fresh conditions in relation to the enrichment process of laterite elements and their connection to REE, especially scandium. To achieve these objectives, the research was conducted using ED-XRF and ICP-MS methods on several samples representing bedrock and laterite zoning at four locations: KBB\_1, KBB\_2, KBB\_3, and KBB\_4, to study and investigate the distribution of REE and Sc in nickel laterite. The results indicated that the wehrlite-type ultramafic source found in Block KBB\_1 has the highest REE concentration at 0.91 ppm compared to lherzolite and harzburgite rocks. The increase in REE and scandium concentrations occurred significantly during the laterization of wehrlite rocks. REE and scandium concentrations were higher in the limonite zone, with concentrations increasing to 42 ppm for REE and reaching 10.63 ppm for scandium. The presence of bedrock composed of olivine and clinopyroxene minerals of wehrlite composition results in higher REE and scandium contents in the weathering products. This indicates that REE and scandium belong to the lithophile group associated with the presence of iron oxides in laterization. The difference in REE concentration of the ultramafic type is due to an imbalance in the level of laterization, such that the distribution of REE enrichment is inversely proportional; thus, high REE ultramafic types will affect the REE concentration of the laterization results. REE and scandium enrichment are directly proportional to the increase in NiO content in yellow limonite, suggesting that REE and scandium can be by-products of nickel laterite and may be utilized in the future.

**Keyword:** Geochemistry, REE, Scandium, Ultramafic, Nickel laterite, Kabaena, Sulawesi, Indonesia

## DAFTAR ISI

### Halaman

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>PENGAJUAN TESIS.....</b>	<b>ii</b>
<b>PERESETUJUAN TESIS.....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA ....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR SINGKATAN.....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>2</b>
I.1 Latar Belakang .....	2
I.2 Rumusan Masalah .....	4
I.3 Tujuan Penelitian .....	4
I.4 Batasan Masalah .....	4
I.5 Manfaat Penelitian .....	4
I.6 Ruang Lingkup Penelitian.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
II.1 Penelitian Terdahulu .....	6
II.1.1 Geologi daerah penelitian.....	6
II.1.2 Ofiolit daerah penelitian.....	8
II.2 Mineral Batuan Ultramafik .....	9
II.3 Endapan Nikel Laterit .....	12
II.4 Geokimia Batuan .....	15
II.5 Geokimia Nikel Laterit .....	21

II.6 <i>Rare earth element</i> dan <i>Scandium</i> .....	22
II.6.1 <i>Rare earth element</i> dan <i>scandium</i> pada nikel laterit .....	24
II.6.2 <i>Rare earth element</i> dan <i>scandium</i> pada batuan.....	26
II.7 Kegunaan <i>rare earth element</i> .....	29
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>30</b>
III.1 Lokasi dan Waktu Penelitian .....	30
III.2 Metode Penelitian .....	30
III.3 Tahapan Penelitian .....	31
III.2.1 Tahap persiapan .....	31
III.2.2 Tahap pemerolehan data dan analisis .....	31
III.2.3 Tahap pemerolehan integrasi dan interpretasi .....	34
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>36</b>
IV.1 Geologi Daerah Kabaena Selatan .....	36
IV.2 Analisis Petrografi .....	37
IV.3.1 Wehrlite .....	37
IV.3.2 Lherzolite .....	39
IV.3.3 Harzburgite .....	40
IV.3 Profil Nikel Laterit .....	42
IV.2.1 Profil nikel laterit KBB_1 .....	42
IV.2.2 Profil nikel laterit KBB_2.....	42
IV.2.3 Profil nikel laterit KBB_3.....	43
IV.2.4 Profil nikel laterit KBB_4.....	44
IV.4 Analisis Geokimia Batuan .....	45
IV.4.1 Tipe batuan .....	45
IV.4.2 Asal mantel pembentuk batuan.....	46
IV.4.3 Komposisi REE pada batuan .....	47
IV.5 Pengayaan REE dan <i>Scandium</i> Pada Nikel Laterit.....	48
IV.5.1 UMIA ( <i>Ultramafic Index Alteration</i> ) .....	48
IV.5.2 Normalisasi REE <i>chondrite</i> nikel laterit.....	51

IV.5.3 Distribusi vertikal <i>rare earth element</i> dan <i>scandium</i> pada nikel laterit .....	52
<b>BAB V KESIMPULAN .....</b>	<b>58</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>59</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>62</b>

## DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
<b>Tabel 1.</b> Tipe ofiolit dengan representatif afinitas geokimia dan mineral mayor yang terbentuk (Dilek & Furnes, 2014) .....	20
<b>Tabel 2.</b> Sifat dan kegunaan REE (Wall, 2021) .....	29
<b>Tabel 3.</b> Hasil analisis UMIA .....	49

## DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
<b>Gambar 1.</b> Peta litotektonik utama Sulawesi yang disederhanakan modifikasi dari .....	7
<b>Gambar 2.</b> Peta Geologi Lembar Kolaka, Sulawesi (Simandjuntak et al., 1993) ..	8
<b>Gambar 3.</b> (a) Kolom skema ESO di 9 lokasi berbeda yang didasari oleh investigasi lapangan (b) Bagian stratigrafi yang direkonstruksi dari ESO (Kadarusman et al., 2004) .....	9
<b>Gambar 4.</b> Klasifikasi batuan ultramafik (Streckeisen, 1976).....	12
<b>Gambar 5.</b> Tipe-tipe endapan nikel laterit (A) oksida; (B) sebagian oksida silikat; (C) silikat Mg hidroksida; (D) lempung silikat (Butt & Cluzel, 2013).....	13
<b>Gambar 6.</b> Skema profil laterit yang menunjukkan komposisi kimia indikatif (Mick Elias, 2002) .....	14
<b>Gambar 7.</b> Diagram <i>ternary</i> jenis batuan ultramafik (Pfeifer, 1979) .....	15
<b>Gambar 8.</b> Diagram klasifikasi batuan beku plutonik (Middlemost, 1994) .....	16
<b>Gambar 9.</b> $\text{FeO}^*/\text{MgO-SiO}_2$ (Miyashiro, 1974).....	17
<b>Gambar 10.</b> Diagram <i>ternary</i> $\text{FeO}^\text{T}-\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ (Pearce et al., 1977) .....	18
<b>Gambar 11.</b> Penampang yang menggambarkan struktur internal dan unit litologi dari berbagai jenis ophiolite (Dilek & Furnes, 2014) .....	21
<b>Gambar 12.</b> Diagram ternary profil laterit dan hubungan dengan indeks alterasi ultramafik (UMIA) (Aiglsperger et al., 2016) .....	22
<b>Gambar 13.</b> Klasifikasi unsur Goldscmidt's (Goldschmidt, 1937) .....	23
<b>Gambar 14.</b> Penggolongan endapan bijih tipe sekunder dari REE.....	24
<b>Gambar 15.</b> Distribusi vertikal REE, scandium, unsur mayor, dan unsur minor pada nikel laterit (Ulrich et al., 2019).....	26
<b>Gambar 16.</b> Diagram pola REE yang dinormalisasi dengan kondrit pada profil nikel laterit dan batuan dasar (Ulrich et al., 2019).....	26
<b>Gambar 17.</b> Pola normalisasi REE batuan ultramafik (C1-kondrit (Evensen. et al., 1978), <i>primitif mantle</i> McDonough & Sun (1995) dalam Lesnov, F.P (2010).....	28

<b>Gambar 18.</b> Lokasi penelitian.....	30
<b>Gambar 19.</b> Pengambilan sampel nikel laterit metode grab sampling .....	32
<b>Gambar 20.</b> <i>Energy Dispersive X-ray Fluorescence (ED-XRF)</i> .....	33
<b>Gambar 21.</b> <i>Inductively Coupled Plasma (ICP-MS)</i> .....	34
<b>Gambar 22.</b> Diagram alir penelitian .....	35
<b>Gambar 23.</b> Singkapan batuan daerah penelitian .....	36
<b>Gambar 24.</b> Geologi lokal daerah penelitian .....	37
<b>Gambar 25.</b> Fotomikrografi pada sampel KBB_1 (Olv: olivin, Cpx: klinopiroksen, Ser: serpentin, Opq: Opak, Hbl: Hornblend) .....	38
<b>Gambar 26.</b> Fotomikrografi pada sampel KBB_2 (Olv: olivin, Cpx: klinopiroksen, Ser: serpentin, Opq: Opak).....	39
<b>Gambar 27.</b> Fotomikrografi pada sampel KBB_3 (Cpx: klinopiroksen, Opx: orthopiroksen, Olv: olivine, Ser: serpentin, Opq: opak) .....	40
<b>Gambar 28.</b> Fotomikrografi pada sampel KBB_4 (Ser: serpentin, Olv: olivin, Opx: orthopiroksen, Opq: opak) .....	41
<b>Gambar 29.</b> Klasifikasi batuan ultramafik (Streckeisen, 1976).....	41
<b>Gambar 30.</b> Singkapan profil nikel laterit KBB_1 .....	42
<b>Gambar 31.</b> Singkapan profil nikel laterit KBB_2 .....	43
<b>Gambar 32.</b> Singkapan profil nikel laterit KBB_3 .....	44
<b>Gambar 33.</b> Singkapan profil nikel laterit KBB_4 .....	45
<b>Gambar 34.</b> Klasifikasi batuan peridotite menurut (Pfeifer, 1979) .....	46
<b>Gambar 35</b> Klasifikasi batuan TAS menurut (Middlemost, 1994) .....	46
<b>Gambar 36.</b> Normalisasi REE <i>primitive mantle</i> pada sampel batuan dasar (McDonough & Sun, 1995).....	47
<b>Gambar 37.</b> Distibusi REE dan scandium pada sampel batuan dasar .....	48
<b>Gambar 38.</b> Diagram <i>ternary A-SM-F</i> .....	50
<b>Gambar 39.</b> Diagram <i>ternary AF-SM-F</i> .....	51
<b>Gambar 40.</b> Normalisasi REE pada zona pelapukan ultramafik (bidang warna merah menunjukkan limonit, bidang berwarna hijau menunjukkan saprolite) (Anders & Grevesse, 1989).....	52

<b>Gambar 41.</b> Pola distribusi vertikal unsur mayor, REE, HREE, dan LREE pada KBB_1 .....	53
<b>Gambar 42.</b> Pola distribusi vertikal unsur mayor, REE, HREE, dan LREE pada KBB_2 .....	54
<b>Gambar 43.</b> Pola distribusi vertikal unsur mayor, REE, HREE, dan LREE pada KBB_3 .....	55
<b>Gambar 44.</b> Pola distribusi vertikal unsur mayor, REE, HREE, dan LREE pada KBB_4 .....	56
<b>Gambar 45.</b> Distribusi REE dan scandium pada zona limonite dan saprolite .....	57

## DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
<b>Lampiran 1.</b> Lembar Pengamatan Petrografi .....	63
<b>Lampiran 2.</b> Peta lokasi penelitian .....	71
<b>Lampiran 3.</b> Peta geologi lokal daerah penelitian .....	72
<b>Lampiran 4.</b> Hasil analisis laboratorium ED-XRF .....	73
<b>Lampiran 5.</b> Hasil analisis laboratorium ICP-MS .....	74
<b>Lampiran 6.</b> <i>Letter of Acceptance</i> .....	76

## DAFTAR SINGKATAN

Lambang/singkatan	=	Arti dan keterangan
<i>Bedrock</i>	=	batuan dasar penyusun profil nikel laterit yang paling bawah
<i>ED-XRF</i>	=	<i>energy dispersive x-ray fluorescence</i>
<i>ICP-MS</i>	=	<i>inductively coupled plasma</i>
PGE	=	<i>platinum group element</i>
PIT	=	tambang terbuka atau lubang penggalian yang menggunakan teknik tambang terbuka untuk mengambil bahan galian
REE	=	<i>rare earth element</i> (LREE = <i>light REE</i> , HREE = <i>heavy REE</i> )
Sc	=	<i>scandium</i>
UTJ	=	unsur tanah jarang
$\Sigma$	=	jumlah

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan sebuah negara yang kaya akan sumber daya alam, khususnya dalam bahan galian logamnya. Pulau Sulawesi merupakan salah satu pulau besar dari lima pulau besar di Indonesia yang kaya akan bahan galian logam, salah satunya yaitu endapan nikel laterit, sehingga menjadikan Indonesia termasuk ke dalam tiga negara yang mempunyai produksi bahan galian logam berupa nikel terbesar di dunia. *Rare Earth Element* (REE) atau disebut juga dengan logam tanah jarang (LTJ) merupakan unsur yang sangat langka atau keterdapatannya yang sangat sedikit. Keterdapatannya di alam berupa senyawa kompleks umumnya senyawa fosfat dan karbonat. Seiring perkembangan teknologi penggunaan material LTJ semakin dibutuhkan dan umumnya pada industri teknologi tinggi seperti kebutuhan elektronik, militer, penerbangan, ataupun industri baterai. REE merupakan kumpulan dari 17 (tujuh belas) unsur yaitu *scandium* (Sc), *lanthanum* (La), *cerium* (Ce), *praseodymium* (Pr), *neodymium* (Nd), *promethium* (Pm), *samarium* (Sm), *europium* (Eu), *gadolinium* (Gd), *terbium* (Tb), *dysprosium* (Dy), *holmium* (Ho), *erbium* (Er), *thulium* (Tm), *ytterbium* (Yb), *lutetium* (Lu) dan *yttrium* (Y). Ketujuh belas unsur tersebut dikelompokkan kedalam Lanatanida pada tabel periodik unsur dan dikelompokkan lagi menjadi LTJ berat (*heavy*) dan LTJ ringan (*light*).

Tonggiroh, A (2016) mengemukakan kehadiran REE pada nikel laterit merupakan hasil pelapukan dari mineral penyusun batuan ultramafik seperti mineral olivine, piroksen, dan serpentin menurut sehingga membentuk mineral goetit ( $\text{FeOOH}$ ). *Scandium* (Sc) cenderung mensubtitusi unsur Al, Mg, Mn, maupun Fe karena jari-jari kation yang serupa ke dalam kisi kristal berbagai mineral pada batuan ultramafik seperti klinopiroksen dan amfibol. Pembentukan *scandium* dan REE terkonsentrasi pada lapisan limonit dihasilkan dari proses substitusi  $\text{Fe}^{3+}$  dari mineral mafik (piroksen, amfibol, dll.) yang terjadi selama proses laterisasi (Maulana *et al.*, 2016). Penelitian yang telah dilakukan oleh Maulana *et al.*, (2016) batuan dasar ultramafik pembentuk endapan nikel laterit yang mengandung *scandium* di Soroako berasal dari harzburgite. *Scandium* yang terkonsentrasi pada

zona *red limonite* memiliki kandungan paling rendah 72 ppm dan paling tinggi 83 ppm, zona *yellow limonite* memiliki kandungan *scandium* paling rendah 40 ppm dan paling tinggi 85 ppm, zona saprolite rata-rata kandungan *scandium* sebesar 29 ppm, dan batuan dasar harzburgite memiliki rata-rata kandungan *scandium* sebesar 8.7 ppm. Faktor konsentrasi REE, *scandium* sekunder pada nikel laterit melibatkan pengayaan residu dengan pelapukan yang intens, proses mobilisasi unsur REE, *scandium* yang terjadi pada perubahan kondisi Eh dan pH berkaitan dengan curah hujan berikutnya pada zona geokimia yang menguntungkan, serta adanya interaksi antara biosfer dan limonit pada profil paling atas (zona kritis) dengan melibatkan proses neoformasi (Aiglsperger *et al.*, 2016). Penelitian Teitler *et al.*, (2019) yang dilakukan di New Calcedonia mengenai REE dan *scandium* pada endapan nikel laterit, diketahui bahwa batuan yang dapat menghasilkan kandungan *scandium* paling tinggi terdapat pada peridotite harzburgite, lapukan dari harzburgite menghasilkan *scandium* hingga 100 ppm lebih tinggi dibandingkan dengan hasil laterisasi pada batuan dunit yang hanya menghasilkan kadar *scandium* sebesar 60 ppm (Teitler *et al.*, 2019).

Daerah penelitian berada di Pulau Kabaena. yang secara administrasi terletak di Desa Wulu, Kecamatan Talaga Raya, Kabupaten Buton Tengah, Provinsi Sulawesi Tenggara. Berdasarkan peta geologi regional daerah penelitian termasuk kedalam peta geologi lembar Kolaka yang tersusun atas litologi hazburgit, dunit, wherlit, serpentinit, gabbro, basalt, dolerit, mafik meta, amphibolit, magnesit, dan setempat rodigit (Simandjuntak *et al.*, 1993). Daerah penelitian bearada diwilayah Izin Usaha Pertambangan (IUP) Operasi Produksi (OP) PT. Arga Morini Indah, yang menjadi komoditas utamanya adalah nikel laterit, sehingga peneliti tertarik untuk melakukan penelitian mengenai keberadaan REE dan *scandium* pada hasil lapukan batuan ultramafik. Peneliti menggunakan data *grab sampling* pada dinding bukaan PIT, sehingga bisa dilakukan pengambilan sampel perzona lapukan batauan ultramafik untuk mengetahui jenis batuan dan keterdapatannya REE dan *scandium* pada endapan nikel laterit hasil pelapukan batuan ultramafik.

## I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, peneliti merumuskan masalah yang dibahas meliputi:

1. Bagaimana mineral dan geokimia batuan ultramafik pada daerah penelitian?
2. Bagaimana genesa batuan ultramafik pada daerah penelitian?
3. Bagaimana kelimpahan REE dan *scandium* pada batuan dasar?
4. Bagaimana pengaruh batuan dasar terhadap kelimpahan REE dan *scandium* pada nikel laterit?

## I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini fokus pada mineralogi batuan dasar, geokimia batuan dan geokimia pada zona nikel laterit dan didapatkan beberapa tujuan penelitian yaitu:

1. Menganalisis mineral dan komposisi geokimia batuan ultramafik.
2. Menganalisis genesa batuan ultramafik pembentuk nikel laterit daerah penelitian.
3. Menganalisis kelimpahan REE dan *scandium* pada batuan ultramafik.
4. Menganalisis pengaruh batuan dasar terhadap kelimpahan REE dan *scandium* pada zona nikel laterit.

## I.4 Batasan Masalah

Penelitian ini terfokus pada geokimia dan petrografi batuan dasar, keterdapatannya REE dan *scandium* pada batuan dasar dan nikel laterit, pola kimia unsur REE dan *scandium* pada profil nikel laterit dengan menggunakan metode geokimia.

## I.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah dan tujuan penelitian di atas, maka manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan kontribusi, sebagai berikut:

- a. Bidang akademik: sebagai acuan bagi studi geologi *rare earth element* pada nikel laterit, studi geokimia, dan eksplorasi sumberdaya mineral dalam kaitannya pengembangan pemanfaatan *rare earth element*.
- b. Bidang Pertambangan: diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai potensi *rare earth element* sebagai produk sampingan endapan nikel laterit sehingga dapat dilakukan konservasi *rare earth element* hingga dapat ditambang.
- c. Bidang Pemerintah: memberikan informasi kepada pemerintah atau kementerian terkait dalam aspek potensi dan konservasi *rare earth element* pada nikel laterit.

## I.6 Ruang Lingkup Penelitian

Lingkup penelitian meliputi pengamatan, analisis data lapangan, menganalisis mineralogi dan geokimia batuan dasar, membuat distribusi vertikal REE dan Sc pada zona nikel laterit. Sampel diambil pada singkapan dinding PIT yang diambil berdasarkan zona nikel laterit dengan metode *grab sampling*.

Tahapan proses analisis dari analisis petrografi batuan dasar dan analisis laboratorium menggunakan metode ED-XRF dan ICP-MS.

Tahapan akhir pada penelitian adalah penamaan batuan berdasarkan geokimia dan petrografi, menganalisa asal magma, jenis magma, dan konsentrasi REE dan Sc pada batuan serta membuat distribusi vertikal REE dan Sc terhadap pengayaan REE dan Sc pada zona nikel laterit.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

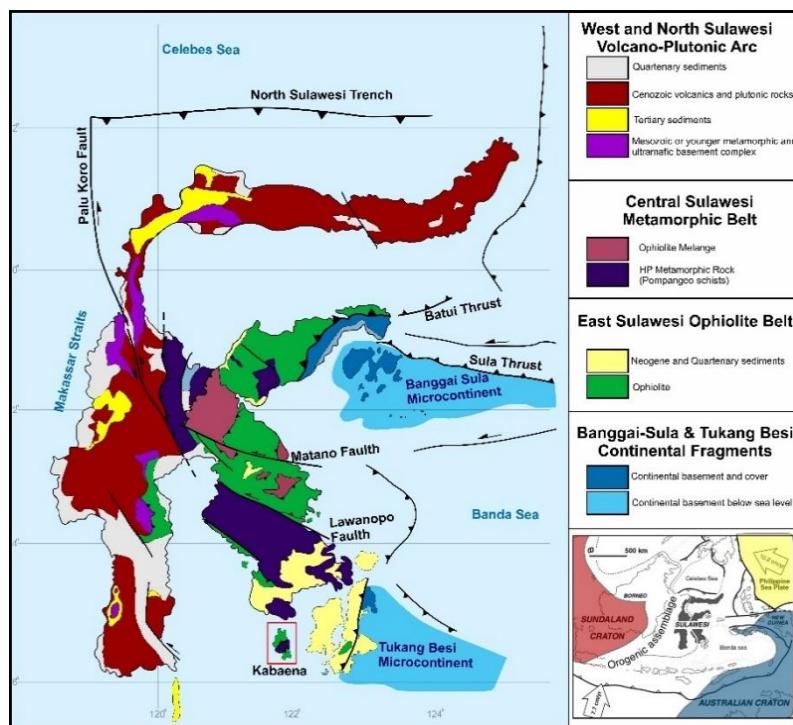
#### **II.1 Penelitian Terdahulu**

##### **II.1.1 Geologi daerah penelitian**

Tinjauan fisiografi pulau Sulawesi mengacu pada penelitian berdasarkan Hall dan Wilson (2000) yang secara umum membagi Pulau Sulawesi menjadi empat bagian berdasarkan litotektoniknya dapat dilihat pada gambar 1. Sulawesi bagian utara dan bagian barat dianggap sebagai sebuah unit stratigrafi-tektonik atau litotektonik yang disebut Busur Vulkano-Plutonik Sulawesi Barat, sedangkan Sulawesi Bagian Timur umumnya dibagi menjadi dua unit litotektonik yaitu Sabuk Metamorfik Sulawesi Tengah dan Sabuk Ofiolit Sulawesi bagian Timur dan Provinsi Banggai-Sula yang juga meliputi Tukang Besi dan Buton juga dikenal sebagai *allochthonous continental terannes* yang tidak diklasifikasikan sebagai sebuah stratigrafi-litotektonik.

- a. Busur Vulkano-Plutonik Sulawesi Barat merupakan material akresi prakapur yang kemudian berkembang menjadi busur vulkanik Neogen. Busur vulkanik terdiri atas kompleks batuan dasar mid-Mesozoik, busur vulkanik Kapur Akhir - Eosen Tengah, sekuen non-vulkanik batuan karbonat Eosen Akhir - Miosen Awal dan busur vulkanik Miosen – Kuarter.
- b. Sabuk Metamorfik Sulawesi Tengah merupakan sabuk batuan metamorfik yang berkembang di Sulawesi bagian tengah dan bagian lengan Tenggara. Sabuk metamorfik tersebut terdiri atas kumpulan fasies metamorfik sekis hijau dan sekis biru, dengan sekis biru meningkat kelimpahannya ke arah Barat. Tepi bagian Barat sabuk ini merupakan tempat kumpulan batuan tekanan tinggi terpisahkan dari batuan-batuan sekis temperatur-tinggi, gneiss dan granitik.
- c. Kompleks batuan ophiolit yang dikenal sebagai Ophiolit Sulawesi bagian Timur (OST) berkembang di lengan bagian Timur dan menerus hingga lengan bagian Tenggara Sulawesi. Kompleks tersebut didominasi oleh ophiolit bertubuh besar yang telah terganggu dan mengalami peristiwa tektonik. OST terpisahkan secara geografi ke segmen bagian utara dan selatan. Segmen bagian utara

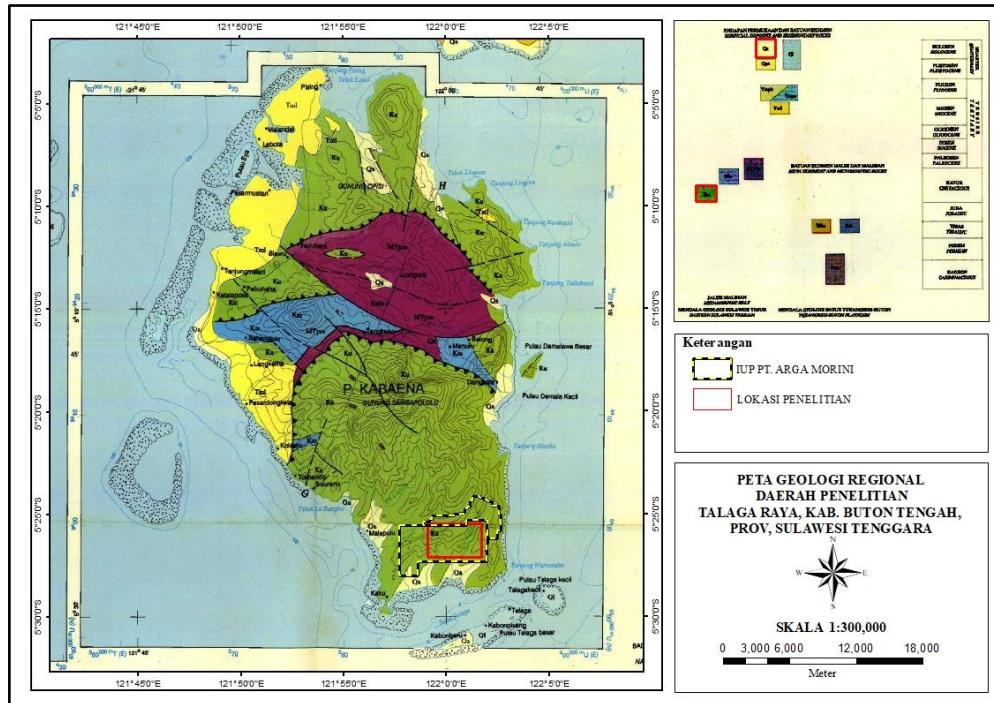
- d. muncul di lengan bagian timur Sulawesi dan mengandung ofiolit yang cukup lengkap meskipun telah mengalami peristiwa tektonik. Pada segmen bagian selatan hanya dijumpai pada kontak sesar dengan batuan kristalin utamanya terdiri atas harzburgit dan harzburgit terserpentinisasi.



**Gambar 1.** Peta litotektonik utama Sulawesi yang disederhanakan modifikasi dari (Hall & Wilson, 2000)

Singkapan batuan ultramafik pada kelompok lengan Timur dan Tenggara Sulawesi hadir dalam tiga bentuk menurut Van Leeuwen dan Pieters (2011) dalam Surono (2013), yaitu

- Sebagai sebuah tubuh besar dengan bentuk tidak beraturan yang mencapai ratusan kilometer, yang terbesar adalah daerah-daerah danau masif yang menutupi beberapa ratus kilometer persegi daerah ultramafik.
- Sebagai lapisan-lapisan terimbrikasi mengikuti pola-pola umum struktur zona melange subduksi.
- Berupa tubuh-tubuh kecil ultramafik tidak beraturan dan terisolir yang umumnya muncul secara terbatas yang memanjang mengikuti kemenerusan regional berarah timurlaut seperti di Sua-Sua, Pao-Pao dan Pomala.



**Gambar 2.** Peta Geologi Lembar Kolaka, Sulawesi (Simandjuntak *et al.*, 1993)

Daerah penelitian termasuk kedalam peta geologi lembar kolaka skala 1: 25.000 menurut Simandjuntak et al., (1993) (Gambar 2) yang terdiri atas 2 satuan batuan di urutkan dari yang termuda hingga tertua sebagai berikut:

### 1. Aluvium (Qa)

Terdiri atas lumpur, lempung, pasir kerikil, dan kerakal. Satuan ini merupakan endapan sungai, rawa, dan endapan pantai. Umur batuan ini adalah Holosen.

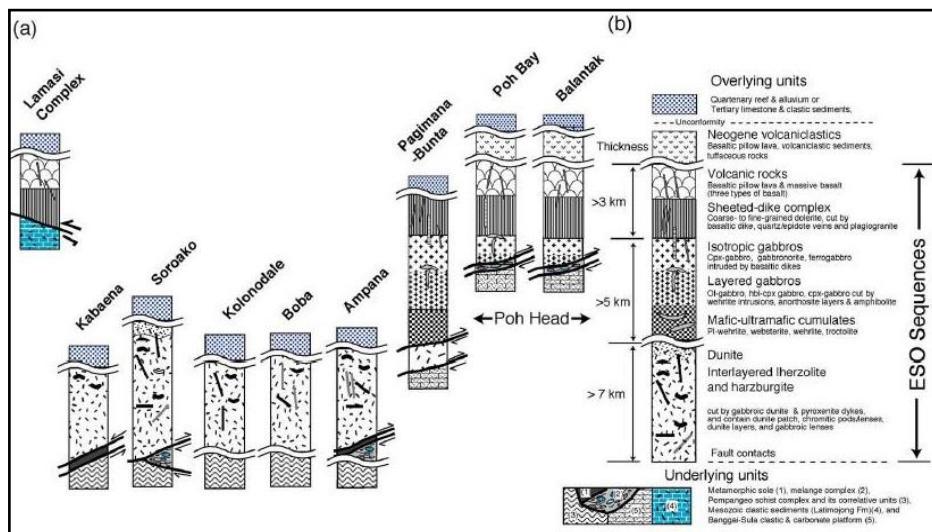
### 2. Kompleks Ultramafik (Ku)

Terdiri atas hazburgit, dunit, wherlit, serpentinit, gabbro, basalt, dolerit, mafik meta, amphibolit, magnesit, dan setempat rodigit. Satuan ini perkirakan berumur Kapur.

#### II.1.2 Ofiolit daerah penelitian

Penampang stratigrafi daerah telitian yang berada di Pulau Kabaena termasuk kedalam ESO (*East Sulawesi Ophiolite*) dengan *basement* berupa batuan metamorf yang merupakan kompleks sekis pompangeo, diatasnya terdapat satuan batuan peridotit dengan keterdapatannya batuan dunit pada bagian atas yang berlapis

dengan satuan peridotit. Diantara *basement* dan batuan peridotit dipisahkan oleh *metamorphic sole* yang terbentuk karena struktur sesar (Gambar 3). Satuan batuan yang termuda di Pulau Kabaena adalah endapan aluvial yang dibatasi dengan bidang erosional. Kompleks Ofiolit pada Pulau Kabaena secara litologi penyusun memiliki kesamaan dengan Kompleks Ofiolit Sorowako, Kompleks Ofiolit Kolonodale, Kompleks Ofiolit Boba dan Kompleks Ofiolit Ampana. Menurut Kadarusman *et al.*, (2004) Kompleks Ofiolit yang berada pada *East Sulawesi Ophiolite* (ESO) terbentuk pada lingkungan *Supra Subduction Zone* (SSZ), *Mid Oceanic Ridge* (MOR) dan *Oceanic Plateau*.



**Gambar 3.** (a) Kolom skema ESO di 9 lokasi berbeda yang didasari oleh investigasi lapangan (b) Bagian stratigrafi yang direkonstruksi dari ESO (Kadarusman *et al.*, 2004)

## II.2 Mineral Batuan Ultramafik

Batuhan ultrabasa hadir dalam bumi sebagai komponen utama penyusun mantel atas di bawah kerak benua atau kerak samudera. Batuan beku ultramafik merupakan batuan menyusun mantel bumi yang secara kimia mengandung kurang dari 45% SiO<sub>2</sub> dan didominasi oleh mineral-mineral *ferromagnesian* seperti olivin, piroksen dan amfibol dengan indeks warna lebih dari 70% dan umumnya tidak memiliki feldspar (Waheed Ahmad, 2008). Menurut McDonough dan Rudnick (1998) dalam batuan ultrabasa umumnya tersusun atas olivin, ortopiroksen, klinopiroksen, dan fase alumina baik plagioklas, spinel atau garnet tergantung

kesetimbangan suhu dan tekanannya. Batuan ultramafik merupakan batuan yang menjadi sumber bagi endapan nikel laterit dan nikel sulfida. Selain sebagai sumber nikel, batuan ultramafik juga dapat menjadi induk dari kromit, logam dasar, kelompok logam platinum (PGM), intan, dan bijih besi laterit (Kadarusman, 2009)

Keterdapatannya batuan ultramafik di alam sendiri dikelompokkan menjadi 3 tipe berdasarkan asalnya yaitu:

1. Batuan ultramafik yang berasosiasi dengan intrusi berlapis. Terdapat bukti yang jelas di beberapa bahwa ultramafik berasal dari *gravity settling* dari mineral mafik berat selama kristalisasi magma dasar atau basaltik.
2. Hasil dari diferensiasi magma yang relatif singkat pada magma basaltik yang nantinya akan membentuk batuan plutonik berupa tubuh-tubuh intrusi seperti *sill*, *dyke*, dan *stock*.
3. Batuan ultramafik sangat banyak ditemukan dalam kompleks ofiolit, subduksi melange, busur kepulauan bagian luar dan juga sabuk orogenik.

Streckeisen (1976) mengklasifikasikan penamaan batuan beku ultramafik berdasarkan kandungan mineraloginya dapat dilihat pada gambar 4. Klasifikasi ini mempunyai parameter dalam penentuan nama batuannya, yaitu dengan menggunakan persentase kandungan mineralnya, mineral yang digunakan sebagai parameter adalah olivin, piroksen (ortopiroksen dan klinopiroksen), dan hornblende, sebagai berikut:

### 1. Dunit

Dunit merupakan batuan beku ultramafik yang memiliki kandungan olivin >90% yang umumnya hadir bersama mineral piroksen dan spinel.

### 2. Piroksenit

Piroksenit merupakan batuan ultramafik monomineralic yang >90% komposisi batunya piroksen dan sisanya olivin atau hornblen. Piroksenit Hornblendit terbagi menjadi beberapa antara lain:

- Websterit, batuan dengan kandungan olivin 90% dan klinopiroksen 10% dan klinopiroksen olivin 10% dan clinopiroksen.
- Ortopiroksenit, batuan dengan kandungan olivin 90% dan klinopiroksen <10%.

- Klinopiroksenit, batuan dengan kandungan olivin <10% dan ortopiroksen >10% dan klinopiroksen > ortopiroksen.
- Olivin Klinopiroksenit, batuan dengan kandungan olivine <40% dan klinopiroksen > ortopiroksen.
- Olivin Ortopiroksenit, batuan dengan kandungan olivine <40% dan ortopiroksen > klinopiroksen.

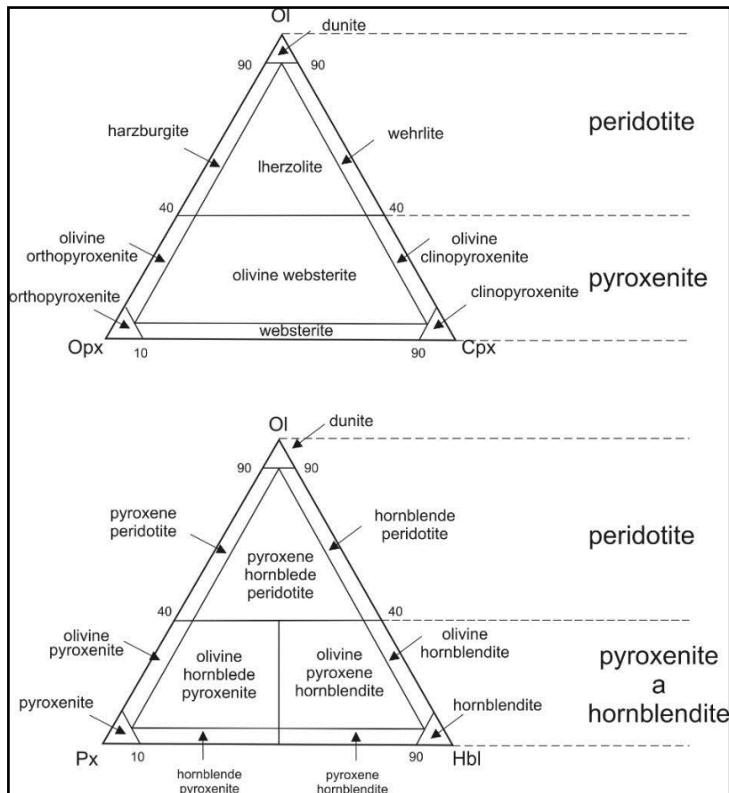
### 3. Serpentinit

Batuan monomineral yang seluruhnya terdiri dari mineral serpentinit. Batuan ini dapat terbentuk dari proses serpentinisasi dari dunit, piroksenit, hornblendit atau peridotit.

### 4. Peridotit

Piroksenit merupakan batuan ultramafik dengan komposisi mineral olivin berkisar 40%-90% dan mineral piroksen dengan mineral aksesoris meliputi magnetit, kromit, ilmenit dan spinel. Berdasarkan mineral-mineral mafik yang menyusunnya, maka batuan peridotit dapat diklasifikasikan sebagai piroksen peridotit, hornblend peridotit, dan mika peridotit. Lebih lanjut, piroksen peridotit dapat diklasifikasikan menjadi 3, yaitu:

- Harzburgit, tersusun oleh olivin dan ortopiroksen (*enstatite* atau *bronzite*)
- Wehrlit, tersusun oleh olivin dan klinopiroksen (*diopside* atau *diallage*)
- Lherzolit, tersusun oleh mineral olivin, ortopiroksen, dan klinopiroksen.



**Gambar 4.** Klasifikasi batuan ultramafik (Streckeisen, 1976)

### II.3 Endapan Nikel Laterit

Lateritisasi didefinisikan sebagai suatu pelapukan kimiawi yang terjadi pada iklim yang lembab dalam kurun waktu yang lama dalam kondisi tektonik yang relatif stabil sehingga hal ini dapat mendukung terjadinya pembentukan suatu regolith tebal yang mencirikan suatu kenampakan dan karakteristik tertentu (C.R.M. Butt. & H. Zeegers, 1992). Nikel laterit merupakan hasil dari proses lateritisasi dari batuan yang kaya akan Mg atau batuan ultramafik yang dari awalnya telah mengandung unsur Ni. Berdasarkan jenis mineralogi pembawa bijih dan proses pembentukannya, (Butt & Cluzel, 2013) membagi nikel laterit dibagi menjadi tiga tipe yaitu *oxide*, *hydrous Mg silicates*, dan *clay silicates*.

#### 1. *Oxide Deposits*

Endapan nikel laterit tipe *oxide* atau oksida berasosiasi erat dengan Fe-hidroksida, dengan mineral utama goetit. Endapan nikel tipe oksida sebagian besar terdiri dari Fe-hidroksida dan oksida di bagian atas profil kemudian dibawahnya berupa batuan dasar berjenis peridotit yang telah terubah. Pada

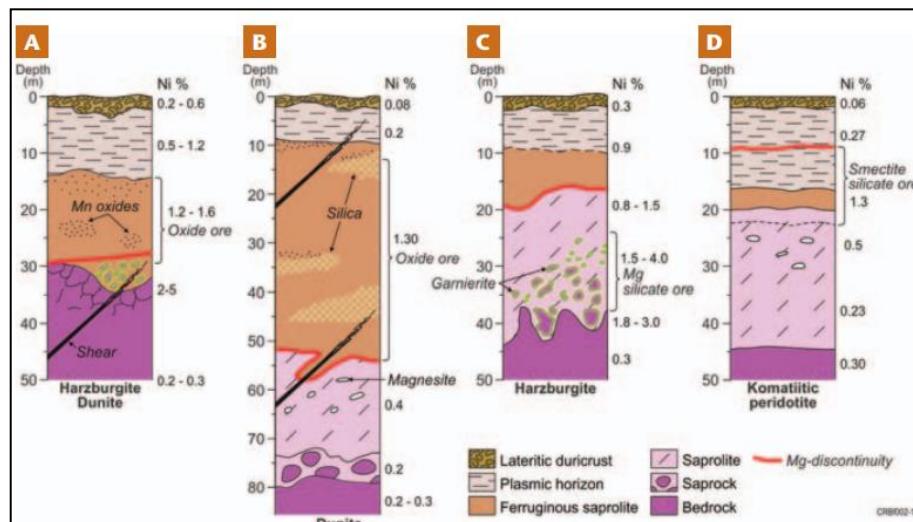
endapan nikel laterit tipe oksida, nikel terakumulasi pada zone *limonite* sampai *saprolite* atas (Gambar 5A).

### 2. *Hydrous Mg Silicates Deposits*

Endapan nikel tipe *hydrous Mg silicates* atau silikat Mg hidroksida, terbentuk pada zona *middle-lower saprolite*. Nikel terkonsentrasi dalam mineral serpentin, talk, klorit, dan sepiolite. Tipe endapan ini berkembang pada batuan dasar yang telah mengalami serpentinisasi (Gambar 5C).

### 3. *Clay Silicate Deposits*

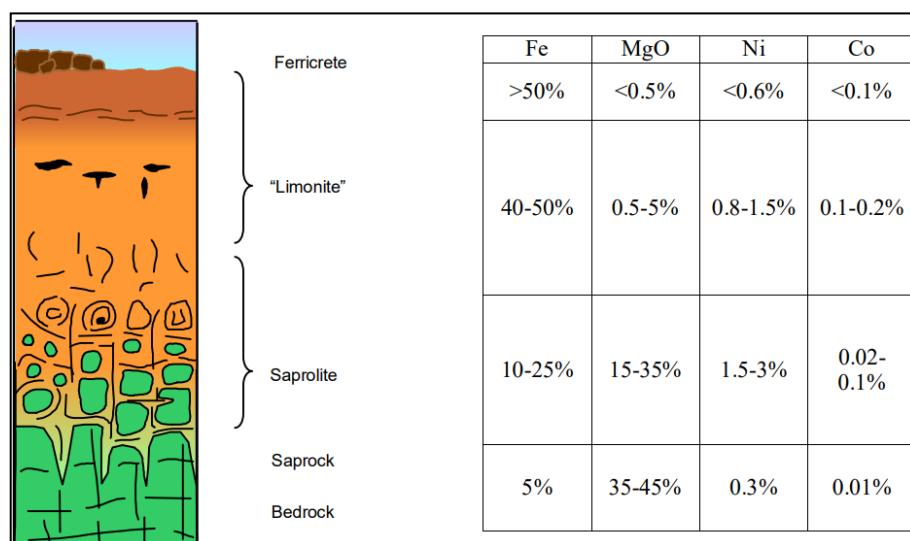
Endapan nikel tipe *clay silicate* atau lempung silikat terbentuk karena hanya sebagian silikon (Si) dari profil laterit yang terlarut oleh airtanah. Silikon yang tersisa bersama-sama dengan Fe, Ni, dan Al membentuk mineral lempung seperti nontronit pada bagian tengah sampai dengan bagian atas zona *saprolite* (Gambar 5D).



**Gambar 5.** Tipe-tipe endapan nikel laterit (A) oksida; (B) sebagian oksida silikat; (C) silikat Mg hidroksida; (D) lempung silikat (Butt & Cluzel, 2013)

Suatu endapan laterit umumnya terdiri dari beberapa bagian strata atau zona dari batuan bagian bawah hingga atas seperti *saprock*, *saprolit*, zona plasmik, zona berbintik, zona mengandung besi dan alumina, serta tanah (Butt & Cluzel, 2013). Adapun pembagian zona profil laterit menurut Waheed Ahmad (2008) sebagai berikut (Gambar 6):

1. Tanah Penutup, memiliki ciri berwarna coklat tua, tanah gembur, dan mengandung lapukan bahan organik seperti tumbuhan.
2. Limonit Merah, memiliki ciri berwarna merah kecoklatan, telah mengalami pelapukan intensif dengan ukuran butir lempung – lanau. Limonit merah memiliki komposisi utama unsur Fe, Cr, Mn, dan Co. Zona ini memiliki kadar Fe tinggi dengan komponen mineral utama hematit.
3. Limonit Kuning, memiliki ciri berwarna kuning kemerah-kuning kecoklatan, berupa material lepas dengan ukuran butir lempung-lanau. Zona ini mengandung oksida besi cukup tinggi dengan mineral utama goetit.
4. Transisi, zona ini berada di antara bagian bawah zona limonit dan bagian atas zona saprolit. Pada umumnya zona ini mengandung mineral lempung smektit (Nontronit) dan kuarsa kristalin.
5. Saprolit, dicirikan dengan terdapatnya fragmen batuan dasar. Pada umumnya zona ini berukuran kerikil – kerakal dengan kandungan Ni tinggi dengan kandungan berkisar 1,5 – 3%. Mineral utama saprolit ialah serpentin.
6. Batuan Dasar, zona terbawah dari profil laterit yang terdiri dari bongkahan batuan ultramafik berukuran besar dan sudah tidak mengandung mineral ekonomis.



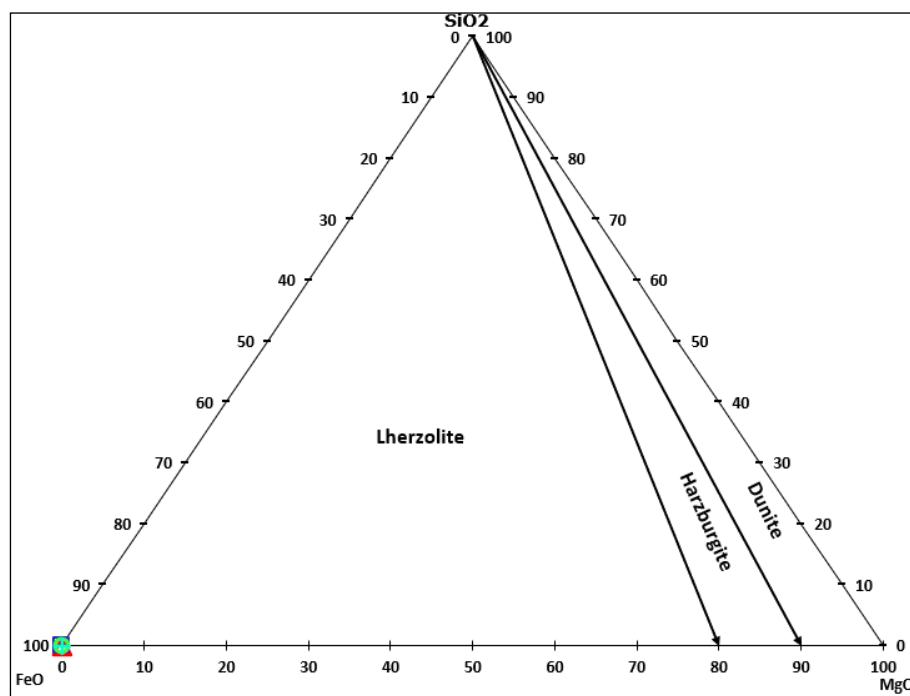
**Gambar 6.** Skema profil laterit yang menunjukkan komposisi kimia indikatif (Mick Elias, 2002)

## II.4 Geokimia Batuan

Analisa geokimia batuan pada nikel laterit bertujuan untuk mengetahui jenis dan asal magma batuan dasar. Analisis geokimia batuan dasar melibatkan parameter unsur-unsur Fe, SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O dan K<sub>2</sub>O. *Plotting* dan pengklasifikasian pengolahan data geokimia mengacu pada konsep penelitian terdahulu antara lain:

### A. Determinasi jenis batuan

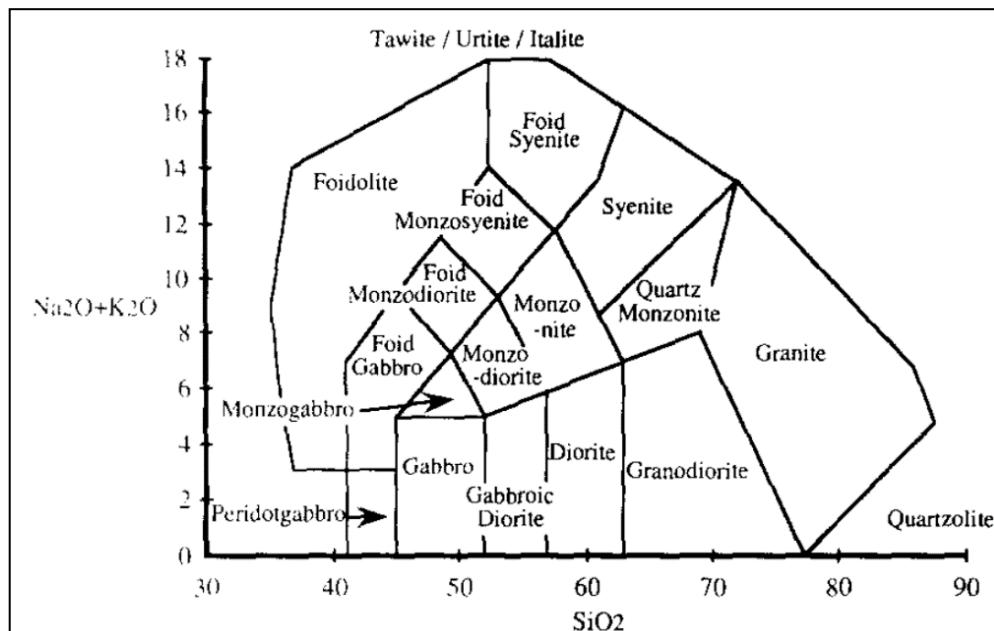
Penentuan jenis batuan dasar dengan *ternary* diagram jenis batuan ultramafik berdasarkan unsur SiO<sub>2</sub>-FeO-MgO (Pfeifer, 1979) (Gambar 7). Pengklasifikasian ini dikelompokan menjadi tiga jenis batuan berdasarkan komposisi kimianya, pada klasifikasi dunit memiliki nilai MgO >90% dan FeO <10%, pada batuan harzburgit memiliki nilai MgO 80% - 90% dengan FeO 20% - 10%, dan pada batuan lherzolit memiliki nilai MgO <80% dan FeO >30%. Pada pengklasifikasian ini nilai SiO<sub>2</sub> berbanding negatif dengan nilai MgO, semakin besar nilai SiO<sub>2</sub> maka nilai MgO akan semakin rendah, perbandingan nilai tersebut akan mempengaruhi pengklasifikasian jenis batuan ultramafik (Pfeifer, 1979).



Gambar 7. Diagram *ternary* jenis batuan ultramafik (Pfeifer, 1979)

Penentuan jenis batuan plutonik menggunakan klasifikasi Middlemost (1994) berdasarkan perbandingan Total Alkali ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) dan Silika ( $\text{SiO}_2$ ) (TAS) (Gambar 8). Penentuan klasifikasi batuan plutonik menggunakan klasifikasi TAS dibagi menjadi beberapa pengelompokan batuan, pada batuan andesit basaltik dikelompokkan menjadi diorit gabro karena terdapat kesamaan rentang nilai TAS. Pembagian batuan plutonik dari kelompok peridotit seperti harzburgit menempati kolom picrumbasalt, namun pada pembagian tersebut juga tumpang tindih dengan alkali rendah dari kolom basal seperti lherzolit, sedangkan untuk dunit tumpang tindih dengan kolom foidit.

Maka dari itu dilakukan pengelompokan kembali pada kelompok peridotit menjadi peridotit gabbro untuk batuan plutonik yang menempati bidang yang sama dengan picrumbasalt. Peridotit diasumsikan sebagai padanan plutonik dari picrite, sehingga dapat diklasifikasikan sebagai batuan peridotit gabbro atau gabbroic yang mengandung  $\text{MgO} > 18\%$  dan total alkali metal  $< 2\%$ . Pada batuan peridotit yang memiliki kandungan  $\text{MgO} > 18\%$  dan  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} > 2\%$  diklasifikasikan sebagai peridot alkali. Klasifikasi ini untuk mengetahui komposisi ultramafik yang sangat beragam, seperti kromit, dunit, lherzolit, hornblendit dan piroksenit.

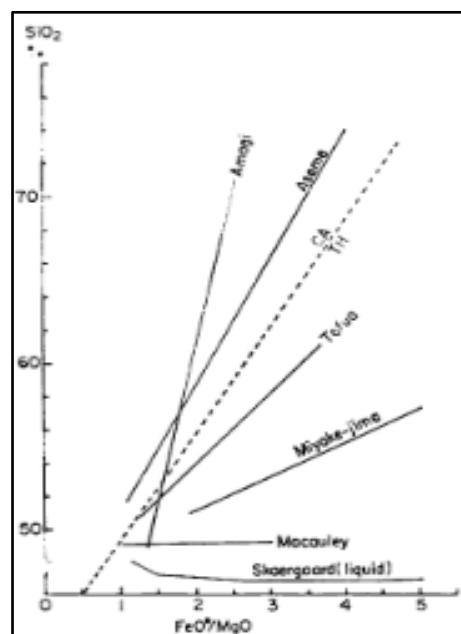


**Gambar 8.** Diagram klasifikasi batuan beku plutonik (Middlemost, 1994)

## B. Asal magma

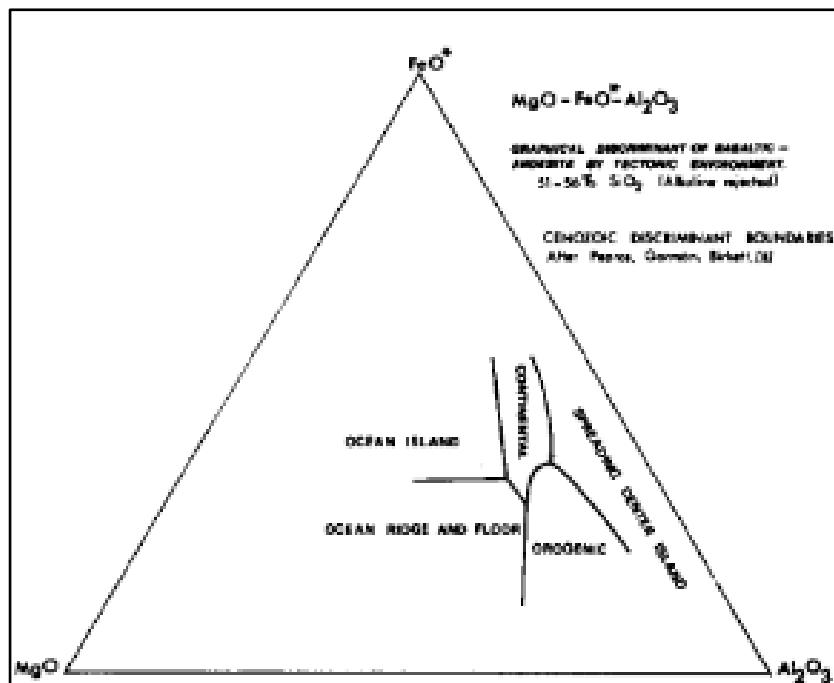
Penentuan seri magma asal menggunakan klasifikasi Miyashiro (1974) seperti pada gambar 9, klasifikasi ini digunakan untuk mengetahui asal magma. Batuan dalam seri magma *tholeiitic* dengan seri magma *calc-alkaline* dibedakan berdasarkan kondisi redoks dari magma yang mengkristal, magma *tholeiitic* cenderung akan tereduksi sedangkan magma calc-alkaline cenderung teroksidasi. Ketika magma induk dari basal mengkristal, akan membentuk mineral silikat olivin dan piroksen yang lebih kaya magnesium dan rendah akan besi, sehingga kandungan besi dari magma *tholeiitic* meningkat seiring dengan habisnya lelehan kristal yang rendah besi. Namun, magma calc-alkaline akan mengalami oksidasi untuk mengendapkan sejumlah besar magnetit oksida besi, menyebabkan kandungan besi magma tetap lebih stabil saat mendingin dibandingkan dengan magma *tholeiitic*.

Pada rasio Fe/Mg merupakan residual magma, yang akan meningkat setidaknya pada awal dan tengah proses kristalisasi fraksional di hampir seluruh batuan beku. Sehingga rasio atau parameter Fe/Mg dapat digunakan untuk mewakili tingkat kristalisasi fraksional yang berkorelasi dengan lingkungan terbentuknya magma, pada klasifikasi ini menggunakan parameter  $\text{FeO}^*/\text{MgO}$  di mana  $\text{FeO}^*$  mewakili total besi sebagai  $\text{FeO}$  ( $\text{FeO}^* = \text{FeO} + 0,9 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ ).



Gambar 9.  $\text{FeO}^*/\text{MgO}$ - $\text{SiO}_2$  (Miyashiro, 1974)

Penentuan lingkungan tektonik magma, dalam penelitian ini menggunakan klasifikasi menurut Pearce *et al.*, (1977) (Gambar 10) menggunakan parameter unsur MgO-FeO\*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Penggunaan parameter unsur oksida utama dianggap sebagai unsur yang tepat untuk membedakan lingkungan tektonik, dikarenakan unsur-unsur tersebut dianggap sensitif terhadap lingkungan tektonik yang berbeda. Perilaku ketiga oksida utama tersebut dianggap memiliki mobilitas yang relatif *immobile* selama terjadinya proses alterasi dibawah laut Pearce *et al.*, (1977). Unsur yang digunakan dalam diagram *ternary* MgO-FeO\*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> merupakan unsur fenokris yang terbentuk lebih awal dari fenokris dasar (olivin, piroksen, plagioklas), sehingga lebih sensitif terhadap efek fraksinasi kristal. Batuan yang kimiawinya tidak terpengaruh secara signifikan oleh proses fraksinasi magma akan menunjukkan efek primer.



Gambar 10. Diagram *ternary*  $\text{FeO}^T\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$  (Pearce *et al.*, 1977)

### C. Lingkungan Tektonik

Lingkungan tektoniknya batuan ultramafik pada kompleks ofiolit dan ciri geokimia ofiolit dipengaruhi oleh tingkat penyebaran dan geometri dalam lingkungan pembentukan batuan serta sifat pola peleburan mantel dan pola

diferensiasi magma. Terdapat dua jenis ofiolit sebagai pembentuk batuan ultramafik yaitu *subduction-unrelated* dan *subduction-related*. Menurut Dilek & Furnes (2014) pembagian lingkungan tektonik didasari oleh keterkaitan geokimia penyusun serta urutan kristalisasi mineral pada lingkungan tektonik tersebut. Pada jenis *subduction-unrelated* terbagi menjadi tiga tipe, yaitu tipe *continental margin*, tipe *mid-oceanic ridge* dan tipe *plume*. Sedangkan pada jenis *subduction-related* terbagi menjadi tipe *supra-subduction zone* dan tipe *volcanic arc* dapat dilihat pada tabel 1.

Ekstensional tektonik dan pemekaran akan memisahkan suatu lempeng menyebabkan pembentukan lempeng samudera baru. Kompleks ofiolit yang terbentuk tidak berkaitan dengan subduksi pada tipe *continental margin* memiliki afinitas geokimia N-MORB, E-MORB, P-MORB dan C-MORB lava, dengan kristalisasi mineral yang terbentuk olivin + plagioklas + klinopiroksen. Pada tipe *mid oceanic ridge* terbagi menjadi tiga sub-tipe berdasarkan posisinya yaitu *plume-distal* MOR yang memiliki afinitas geokimia N-MORB sampai E-MORB lava dengan kristalisasi mineral yang terbentuk olivin + plagioklas, selanjutnya *plume-proximal* MOR yang memiliki afinitas geokimia N-MORB dan P-MORB dengan kristalisasi mineral yang terbentuk olivin + plagioklas ± klinopiroksen, yang terakhir *trench-proximal* MOR memiliki afinitas geokimia N-MORB, E-MORB ± C-MORB lava dengan kristalisasi mineral olivin + plagioklas + klinopiroksen. Pada tipe *plume* memiliki afinitas geokimia P-MORB lava dengan kristalisasi mineral olivine + plagioklas + klinopiroksen ± ortopiroksen. Jenis kompleks ofiolit yang terbentuk tidak berkaitan dengan subduksi ini memiliki variasi yang beragam terlihat dari diagram diskriminasi Th/Yb vs Ta/Yb. Pola unsur Lu sampai Cs memperlihatkan derajat *partial melting* yang terjadi tiap lingkungan tektoniknya (Gambar 11).

**Tabel 1.** Tipe ofiolit dengan representatif afinitas geokimia dan mineral mayor yang terbentuk (Dilek & Furnes, 2014)

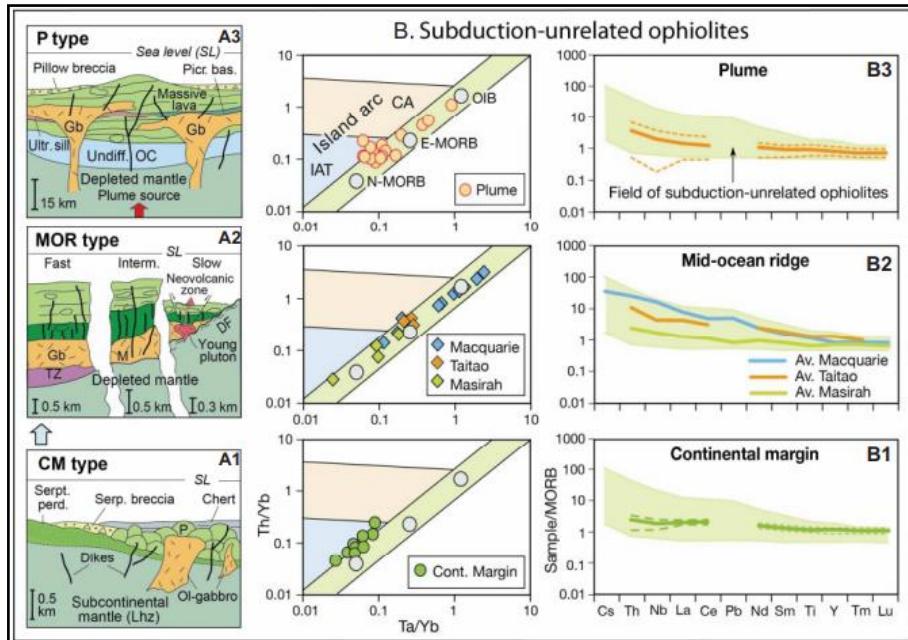
Ophiolite Types & Their Tectonic Settings		Ophiolite/Modern Examples	Geochemical Affinities	Crystallization Order of Minerals
Subduction-unrelated	Continental margin type	Ligurian and Western Alpine ophiolites; Jormua (Finland)	N-MORB, E-MORB, P-MORB & C-MORB lavas	Olivine + plag + cpx
	Mid-ocean ridge types	Plume-distal MOR	Macquarie Ridge; Masirah (Oman)	N-MORB (DMM) to E-MORB lavas
		Plume-proximal MOR	Iceland	N-MORB and P-MORB lavas
		Trench-proximal MOR	Taitao (Chile)	N-MORB, E-MORB ± C-MORB lavas
	Plume-type	Nicoya (Costa Rica); Bolívar (Colombia)	P-MORB lavas	Olivine + plag + cpx ± opx
Subduction-related	Suprasubduction zone types	Forearc	Troodos (Cyprus); Kizildag (Turkey); Semail (Oman); Betts Cove (Canada)	FAB (MORB-like), IAT to boninite lavas
		Backarc (continental & oceanic)	Rocas Verdes (Chile); Solund-Stavfjord (Norway)	BABB lavas
	Volcanic arc type	Smartville (California); Itogon (Philippines)	IAT to CA lavas; middle crust with tonalite, diorite	Olivine + plag + cpx and Olivine + cpx + plag

BABB = back-arc basin basalt; CA = calc-alkaline; C-MORB = contaminated MORB; DMM = depleted MORB mantle; E-MORB = enriched MORB; FAB = forearc basalt;

IAT = island-arc tholeiite; MORB = mid-ocean ridge basalt; N-MORB = normal MORB; P-MORB = plume-influenced MORB

Kompleks ofiolit yang terbentuk pada *supra-subduction zone* merepresentasikan kerak samudera yang terbentuk diatas zona subduksi, pada tipe ini terbagi menjadi dua sub-tipe berdasarkan posisi tektoniknya, pertama *forearc* yang memiliki afinitas geokimia *forearc basalt* (FAB), *island arc tholeiite* (IAT) sampai *boninite lava* dengan kristalisasi mineral olivin + plagioklas + klinopiroksen + ortopiroksen dan olivin + klinopiroksen + plagioklas. Kedua *back arc* (*continental* dan *oceanic*) dengan afinitas geokimia *backarc basin basalt lava* (BABB) dengan kristalisasi mineral olivin + plagioklas + klinopiroksen dan olivin + klinopiroksen + plagioklas. Pada tipe *volcanic arc* (VA) memiliki afinitas geokimia *island arc tholeiite* (IAT) sampai *calc-alkaline* (CA), tonalit dan diorit, dengan kristalisasi mineral olivin + plagioklas + klinopiroksen dan olivin + klinopiroksen + plagioklas.

Evolusi magmatik dan geokimia dari ofiolit yang terbentuk di SSZ dan VA dikontrol oleh *partial melting* pada zona subduksi dan dehidrasi unsur dari slab subduksi kedalam mantel. *Partial melting* menyebabkan terubahnya komposisi mantel, yang tadinya lherzolit yang relatif stabil berubah menjadi harzburgit yang lebih resisten terhadap peleburan, dan akibatnya unsur yang berasal dari mantel dan magma menjadi tidak kompatibel. dehidrasi lempeng samudera yang menunjam dan *partial melting* pada batuan sedimen menyebabkan penggabungan unsur LREE dan unsur Cs, Pb, Ba, Th dan U bergerak kedalam *mantle wedge*, sedangkan pada unsur Nb, Ti, Y dan REE tidak terpengaruh oleh proses ini.



**Gambar 11.** Penampang yang menggambarkan struktur internal dan unit litologi dari berbagai jenis ophiolite (Dilek & Furnes, 2014)

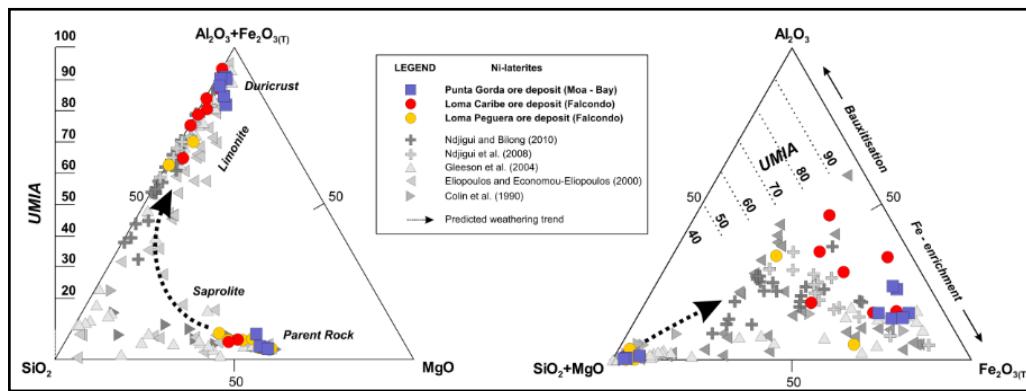
## II.5 Geokimia Nikel Laterit

Dalam menentukan dan memvisualisasikan perubahan geokimia pada nikel laterit, salah satunya perlu mempertimbangkan UMIA (*Ultramafic Index Alteration*). Perubahan geokimia dalam endapan nikel laterit dapat diukur menggunakan perhitungan UMIA (*Ultramafic Index of Alteration*) menurut Aiglsperger *et al.*, (2016). Nilai UMIA dapat dihitung menggunakan rumus berikut, yakni:

$$\text{UMIA} = 100 \times [(Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T)}) / (SiO_2 + MgO + Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T})] \quad (1)$$

UMIA dalam endapan nikel laterit berkaitan dengan intensitas pelapukan yang terjadi pada suatu batuan ultramafik. Terdapat korelasi antara nilai UMIA dengan tingkat laterisasi atau pelapukan pada setiap horison nikel laterit (Gambar 12). UMIA secara langsung dapat dikombinasikan dengan diagram *ternary* AF-S-M atau diagram *ternary*  $Al_2O_3 + Fe_2O_3 - SiO_2 - MgO$  yang digunakan untuk menentukan zona laterit dan tren pelapukannya. Analisis geokimia dilakukan dari hasil kadar XRF unsur  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ , dan  $MgO$  yang kemudian diplot pada diagram *ternary* AF-S-M menurut Aiglsperger *et al.*, (2016). Pada diagram *ternary*

dijelaskan hubungan antara Sc dengan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  yang dibagi menjadi dua kelompok berdasarkan kandungan  $\text{MgO}$  yakni zona *limonite* dan *duricrust* serta zona *saprolite* dan *bedrock*. *Scandium* membentuk korelasi positif terhadap  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pada zona *limonite* yang mengindikasikan mineral oksida besi sekunder seperti Fe merupakan pembawa utama Sc dalam endapan nikel laterit.



**Gambar 12.** Diagram ternary profil laterit dan hubungan dengan indeks alterasi ultramafik (UMIA) (Aiglsperger *et al.*, 2016)

## II.6 Rare earth element dan Scandium

REE merupakan kumpulan dari 17 (tujuh belas) unsur kimia pada tabel periodik, 15 diantaranya merupakan kelompok lanthanida yang terdiri atas *lanthanum* (La), *cerium* (Ce), *praseodymium* (Pr), *neodymium* (Nd), *promethium* (Pm), *samarium* (Sm), *europium* (Eu), *gadolinium* (Gd), *terbium* (Tb), *dysprosium* (Dy), *holmium* (Ho), *erbium* (Er), *thulium* (Tm), *ytterbium* (Yb), *lutetium* (Lu) dan *yttrium* (Y) dan *scandium* (Sc). Berdasarkan Goldschmidt (1937) scandium termasuk kedalam kelompok *lithopile* dapat dilihat pada gambar 13. Kelompok *lithopile* merupakan unsur yang menunjukkan afinitas silika dan banyak terkonsentrasi pada bagian bumi yang kaya akan silika seperti bagian kerak bumi dan mantel bumi. REE dikelompokkan menjadi dua golongan yang dibedakan berdasarkan konfigurasi elektron pada setiap unsurnya yaitu *light rare earth elements* (LREE) seperti La, Ce, Pr, Nd, Sm dan *heavy rare earth elements* (HREE) seperti Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. *Scandium* tidak dimasukkan kedalam kedua golongan tersebut dikarenakan konfigurasi electron yang berbeda meskipun *scandium* sering dijumpai berdasasasi dengan LREE dan HREE.

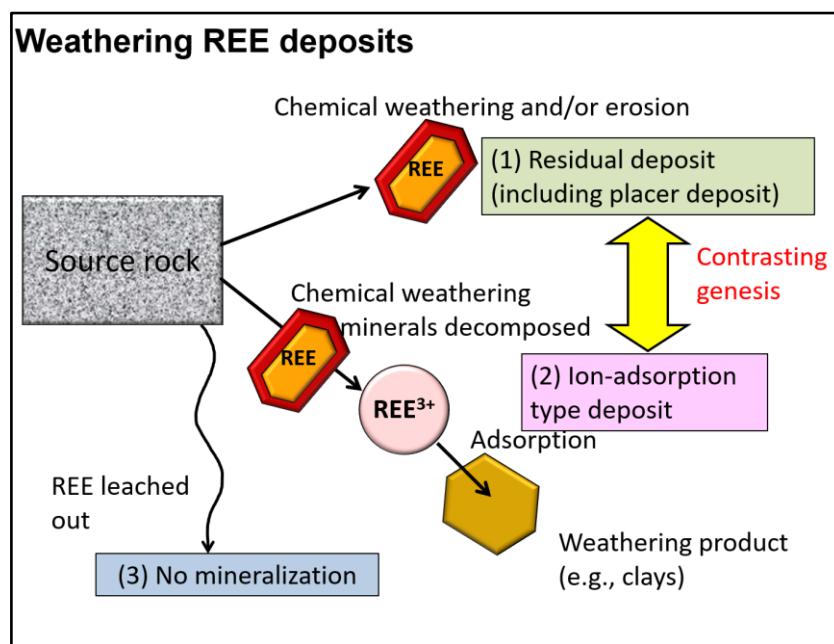
Goldschmidt's Classification																																																								
GROUP IA		VIIIA																																																						
1	H	IIA																He																																						
2	Li	Be																																																						
3	Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	—VIIIB—			IB	IIB	B	C	N	O	F	Ne																																						
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Al	Si	P	S	Cl	Ar																																						
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Kr																																						
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																																						
7	Fr	Ra	Ac																																																					
<table border="1"> <tr> <td>La</td><td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Ac</td><td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Nu</td><td>Pu</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>																			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					Ac	Th	Pa	U	Nu	Pu													
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																																										
Ac	Th	Pa	U	Nu	Pu																																																			
																																																								

Gambar 13. Klasifikasi unsur Goldscmidt's (Goldschmidt, 1937)

*International Union of Pure and Applied Chemistry* menganggap Sc sebagai bagian dari REE, akan tetapi jari-jari ionik dan konfigurasi elektron Sc cukup berbeda dengan yttrium dan lantanida sehingga pada beberapa penelitian Sc secara umum dapat dikecualikan dari REE. *Scandium* (Sc), unsur bernomor atom 21 dengan konfigurasi elektron [Ar] 4s<sup>2</sup> 3d<sup>1</sup> dan keterdapatannya di alam hanya dalam bentuk trivalent (S<sup>3+</sup>), hal ini tidak seperti logam transisi periode 4 lainnya. Jari-jari ionik dalam koordinasi enam dan delapan kali lipat adalah 74,5 dan 87 pm (Shannon, 1976) dan jari-jari kationnya sebesar 0,68 Å. Kation *Scandium* yang jauh lebih kecil daripada REE lainnya (0,848 Å hingga 1,061 Å) menyebabkan perilaku geokimia yang sangat berbeda di kerak bumi. *Scandium* (Sc) cenderung mensubtitusi unsur Al, Mg, Mn, maupun Fe karena jari-jari kation yang serupa ke dalam kisi kristal berbagai mineral pada batuan ultramafik seperti klinopiroksen dan amfibol. Di sisi lain, REE sering dikaitkan dengan mineral-mineral aksesoris pada batuan ultramafik. Studi geokimia yang telah dilakukan oleh Lesnov, F.P (2010) menunjukkan bahwa jenis mineral aksesoris yang sama pada batuan ultramafik dengan komposisi dan asal usul magma yang berbeda maka akan menunjukkan perbedaan tingkat akumulasi dan fraksinasi REE.

### II.6.1 Rare earth element dan scandium pada nikel laterit

Endapan bijih REE dapat dijumpai pada berbagai macam lingkungan geologi, secara umum para peneliti mengklasifikasikan endapan REE ke dalam dua kategori umum, yaitu *primary ore* dan *secondary ore*. *Primary ore* adalah bijih yang terkonsentrasi pada batuan beku yang mengandung REE dalam jumlah yang sangat besar yang dihasilkan dari proses *partial melting* dan atau *fractional crystallization* saat proses magmatisme berlangsung, atau konsentrasi REE dapat hadir yang disebabkan oleh proses hidrotermal. *Secondary ore* merupakan bijih yang terkonsentrasi akibat proses sedimentasi dan erosi (*placer*), proses *ion adsorption type* dan proses substitusi. Proses *ion adsorption type* dan substitusi merupakan proses yang terjadi pada endapan-endapan yang terbentuk akibat proses pelapukan seperti halnya endapan laterit. Pembagian endapan yang mengandung REE dibagi menjadi endapan placer dan endapan laterit dengan jenis *ion adsorption clay* yang berasal dari hasil pelapukan batuan granit seperti pada gambar 14 (Maulana *et al.*, 2016).



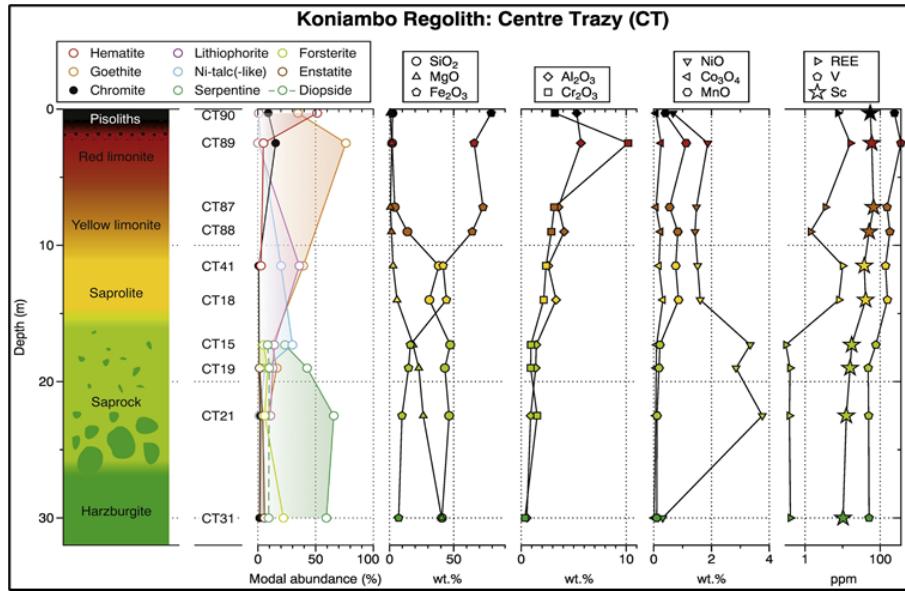
**Gambar 14.** Penggolongan endapan bijih tipe sekunder dari REE (Maulana *et al.*, 2016)

Faktor yang menyebabkan terjadinya konsentrasi Sc pada endapan laterit dapat dibagi menjadi tiga yaitu (a) batuan asal yang mengandung Sc dalam

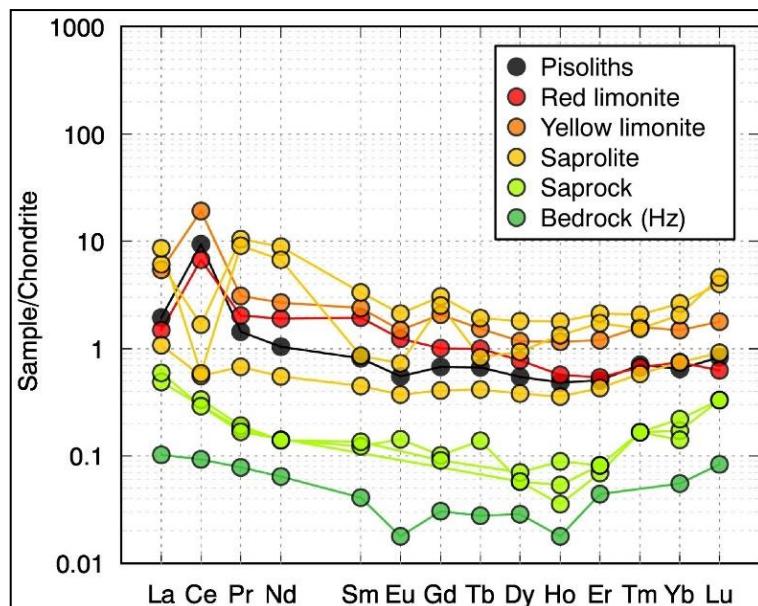
jumlah yang besar, (b) lama proses laterisasi berlangsung dalam kondisi lingkungan tektonik yang stabil dan (c) kondisi lateritisasi selama proses pelapukan dimana Sc akan mengganti oksida Fe. Proses pengayaan scandium pada beberapa profil laterit hasil pelapukan batuan ultramafik yang ada di Sulawesi (Maulana *et al.*, 2016).

Menurut McDonough & Sun (1995) batuan ultramafik umumnya tersusun atas mineral olivin, ortopiroksen, klinopiroksen, dan fase alumina baik plagioklas, spinel atau garnet tergantung kesetimbangan suhu dan tekanannya. Mineral-mineral ferromagnesian seperti olivin, piroksen, dan amfibol pada batuan ultramafik, dan mineral-mineral aksesorisnya berasosiasi erat dan menjadi sumber utama REE dan Sc. Kehadiran REE dan *scandium* pada endapan nikel laterit memiliki karakteristik yang berbeda, secara umum REE hadir sebagai unsur *mobile* sedangkan *scandium* hadir sebagai unsur *immobile*. Kandungan Sc ditentukan oleh proporsi perbandingan relatif antara mineral olivine dan piroksen. Pada tubuh batuan dunit mengandung Sc berkisar <5 ppm, sedangkan pada lherzolite berkisar hingga >10 ppm. *Scandium* dapat mengalami pengayaan hingga mencapai sepuluh kali lipat kadarnya dari yang terkandung di batuan beku akibat proses laterisasi yang membentuk beberapa horizon (Gambar 15).

*Scandium* (Sc) memiliki kecenderungan terkonsentrasi pada batuan dasar yang kaya akan mineral piroksen daripada dasar yang kaya akan olivin. Hasil laterisasi batuan dasar menunjukkan terdapat penurunan signifikan nilai SiO<sub>2</sub> dan MgO, serta terjadi kenaikan nilai Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang diikuti pengayaan Sc. Pada profil nikel laterit *scandium* terkayakan pada horizon limonit, terutama pada *yellow limonite*. Hal ini disebabkan *scandium* yang berasosiasi dengan pembentukan oksida besi produk ubahan mineral piroksen yang umumnya terkonsentrasi pada limonit. Pada peridotite *hazburgite* mempunyai konsentrasi *scandium* yang terkandung sebesar 9.8 ppm, sedangkan di *yellow limonite* dapat mencapai 100 ppm. Pada *bedrock peridotite* nilai *scandium* yang terkandung dapat mencapai 10 ppm. Namun, konsentrasi REE tetap rendah, pengayaan terbesar pada zona limonit hanya sebesar 16-77 ppm. Persebaran *scandium* (ppm) dan REE (ppm) dan beberapa elemen lain (%) dijelaskan dalam bentuk diagram profil nikel laterit menurut penelitian (Ulrich *et al.*, 2019) ditunjukkan pada gambar 16.



**Gambar 15.** Distribusi vertikal REE, scandium, unsur mayor, dan unsur minor pada nikel laterit (Ulrich *et al.*, 2019)



**Gambar 16.** Diagram pola REE yang dinormalisasi dengan kondrit pada profil nikel laterit dan batuan dasar (Ulrich *et al.*, 2019)

## II.6.2 Rare earth element dan scandium pada batuan

REE mulai digunakan sebagai indikator geokimia untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan batuan magmatik, metamorf, metasomatik serta mineralnya untuk rekonstruksi proses pembentukan batuan. Analisis geokimia dengan menggunakan parameter REE digunakan untuk mengetahui pola

pengayaan unsur REE sehingga dapat memberikan petunjuk proses geologi terutama tentang asal-usul batuan dan proses pembentukannya. Metode analisis melibatkan teknik spektrometri, seperti *Inductively Coupled Plasma-Mass* (ICP-MS). Menurut Lesnov, F.P (2010) perbedaan jenis batuan ultramafik sangat mempengaruhi tingkat konsentrasi atau pengayaan REE (Gambar 17). Hal ini disebabkan oleh perbedaan komposisi mineral-mineral penyusun batuannya yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

a) Dunit

Dunit memiliki kandungan REE yang sangat rendah dan juga mengandung komponen lain yang tidak kompatibel. Rata-rata total kandungan REE di dunit adalah sekitar 0,9 ppm. Tingkat akumulasi REE yang terisolasi pada dunit jauh lebih rendah dibandingkan dengan kondrit. Sifat geokimia dunit disebabkan oleh komposisi batuan ini mengandung sedikit mineral yang cocok untuk pengayaan REE. Selain itu, struktur olivin, mineral yang sangat dominan dalam dunit, sangat tidak mendukung substitusi atau pemasukan isomorfik unsur-unsur REE.

b) Harzburgit

Kandungan REE pada harzburgit sangat rendah, terakumulasi dalam jumlah kecil pada struktur olivin dan ortopiroksen sedangkan pada klinopiroksen ditemukan dalam jumlah besar. Perbedaan korelasi kuantitatif antara mineral-mineral ini menjelaskan heterogenitas komposisi REE harzburgit dari massa yang berbeda. Konsentrasi unsur tanah jarang dalam harzburgit biasanya lebih rendah dibandingkan kondrit, dengan konsentrasi total rata-rata sekitar 1,80 ppm.

c) Lherzolit

Lherzolit merupakan jenis batuan ultrabasa dengan kandungan unsur tanah jarang yang rendah. Rata-rata total kandungan REE kultivar spinel lherzolite adalah sekitar 2,45 ppm. Lherzolite mungkin mengandung amfibol sebagai mineral sekunder yang terbentuk selama proses epigenetik. Kehadiran amfibol berkontribusi terhadap peningkatan kandungan total REE varietas lherzolit tersebut, yang rata-rata sekitar 9 ppm.

Pada varietas spinel lherzolit, nilai (La/Yb) n bervariasi dari 0,02-0,73, sedangkan pada varietas lherzolitik, yang biasanya mengandung amfibol kaya unsur ringan, indeks ini meningkat dengan rentang 1-1,8.

#### d) Wehrlit

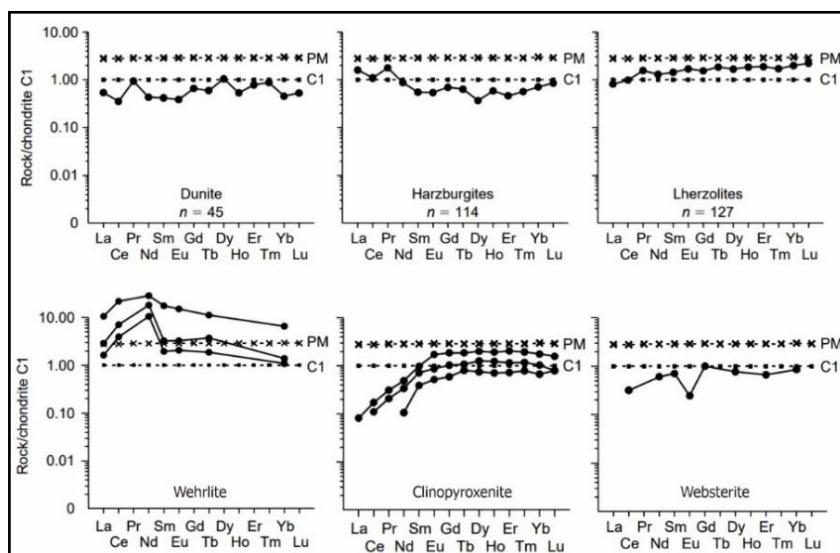
Total konten REE pada wehrlit seringkali berkisar antara 3 hingga 10 ppm, tetapi bisa lebih tinggi. Pengayaan unsur tanah jarang di wehrlit bervariasi tergantung pada korelasi kuantitatif antara olivin dan klinopiroksen. Beberapa jenis batuan yang kaya klinopiroksen memiliki konsentrasi unsur ringan yang relatif rendah.

#### e) Klinopiroksenit

Komposisi REE dari klinopiroksenit ditentukan terutama oleh tingkat pencampuran sisa ultrabasa yang miskin REE dengan lelehan basaltik yang kaya REE. Oleh karena itu, meskipun tingkat akumulasi REE pada klinopiroksenit agak heterogen, proporsi akumulasi REE ini biasanya lebih tinggi pada klinopiroksenit dibandingkan kondrit.

#### f) Websterite

Websterite mirip dengan klinopiroksenit dalam hal distribusi REE, tetapi pengayaan REE di websterite sedikit lebih rendah, yang konsisten dengan penurunan kandungan klinopiroksen.



**Gambar 17.** Pola normalisasi REE batuan ultramafik (C1-kondrit (Evensen. *et al.*, 1978), primitif mantle McDonough & Sun (1995) dalam Lesnov, F.P (2010)

## II.7 Kegunaan *rare earth element*

REE memiliki beragam aplikasi karena struktur elektroniknya yang kompleks serta sifat magnetik dan luminescentnya (Goodenough *et al.*, 2018). REE digunakan dalam berbagai aplikasi lain yang membutuhkan material dalam jumlah sangat sedikit, termasuk katalis, magnet, bubuk abrasif, baterai, metalurgi, kaca, keramik, fosfor, dan aplikasi medis dapat dilihat pada tabel 2. REE sering disebut sebagai “*enabler*” karena merupakan katalisator proses industri penting seperti produksi petrokimia dan merupakan komponen kecil namun penting dari banyak produk industri.

**Tabel 2.** Sifat dan kegunaan REE (Wall, 2021)

Element name	Chemical symbol	Atomic number	Radius of M3+ cation (Å)	Crustal abundance (ppm)	Examples of uses
<i>Scandium</i>	Sc	21	0.68	22	<i>Sc Al light weight alloys</i>
<i>Yttrium</i>	Y	39	0.88	22	<i>Alloys, lasers, glass</i>
<i>Lanthanum</i>	La	57	1.061	30	<i>catalysts</i>
<i>Cerium</i>	Ce	58	1.034	64	<i>catalysts</i>
<i>Praseodymium</i>	Pr	59	1.013	7.1	<i>magnets</i>
<i>Neodymium</i>	Nd	60	0.995	26	<i>magnets</i>
<i>Promethium</i>	Pm	61		(no stable isotope)	
<i>Samarium</i>	Sm	62	0.964	4.5	<i>Sm Co Magnets</i>
<i>Europium</i>	Eu	63	0.95	0.88	<i>Phosphors</i>
<i>Gadolinium</i>	Gd	64	0.938	3.8	<i>MRI, nuclear power</i>
<i>Terbium</i>	Tb	65	0.923	0.64	<i>magnets</i>
<i>Dysprosium</i>	Dy	66	0.908	3.5	<i>magnets</i>
<i>Holmium</i>	Ho	67	0.894	0.8	<i>neutron absorber</i>
<i>Erbium</i>	Er	68	0.881	2.3	<i>phosphor</i>
<i>Thulium</i>	Tm	69	0.869	0.33	<i>lasers</i>
<i>Ytterbium</i>	Yb	70	0.858	2.2	<i>catalyst, phosphor</i>
<i>Lutetium</i>	Lu	71	0.848	0.32	(catalyst)