

Mineralogi dan Pengayaan REE Tipe *Ion-Adsorption* pada Profil Lapukan Granitoid di Sulawesi Barat; Implikasi terhadap Eksplorasi

Mineralogy and Enrichment of Ion-Adsorption Type REE on Weathered Granitoid Profiles in West Sulawesi; Implications for Exploration

Andi Febby Alvionita^{*1}, Syafrizal², Andy Yahya Al Hakim³

¹ Program Studi Pascasarjana Rekayasa Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung

²⁻³ Kelompok Keahlian Eksplorasi Sumberdaya Bumi, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung

Corr Author: ^{*1}andifebbyam@gmail.com, ²syafrizal@mining.itb.ac.id, ³andyyahya@mining.itb.ac.id

ABSTRAK

Unsur Tanah Jarang (Rare Earth Elements-REE) merupakan 15 unsur yang berada digolongan lantanida dan 2 unsur digolongan IIIB (Y+Sc). REE digunakan terutama dalam hal pembuatan industri teknologi maju dan modern saat ini. Aktivitas eksplorasi REE meningkat seiring dengan peningkatan permintaan dipasar global, dengan alasan tersebut dilakukan penelitian sebagai bentuk eksplorasi awal yang bertujuan mengetahui karakteristik petrografi, geokimia dan pola pengayaan REE tipe ion adsorption yang ada di Sulawesi Barat menggunakan petrografi mineral optik, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), dan inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Telah ditemukan bahwa source rock yang ada di wilayah Polewali merupakan jenis kuarsa monsonit, sedangkan di wilayah Mamasa merupakan jenis granodiorit. Zirkon, apatit, alanit dan monasit adalah mineral pembawa REE yang terlihat pada petrografi mineral optik. Mineral lempung yang diindikasikan sebagai mineral yang menyerap REE pada zona lapukan berupa kaolinit, halloisit dan grup smektit. Pengayaan REE pada kedua profil lapukan menunjukkan bahwa persentase mineral lempung akan mempengaruhi jumlah Total REE, hal ini terbukti dari total persentase kandungan mineral lempung pada horizon A di wilayah Polewali berkisar 32,7% dan wilayah Mamasa 16%, lebih banyak dibanding pada horizon yang lainnya. Kedua profil lapukan kecuali horizon A di Mamasa merupakan zona pelindian dibuktikan dari anomali-Ce yang bernilai positif, terjadi pelepasan plagioklas pada saat proses diferensiasi magma ketika batuan terbentuk ditandai dengan anomali-Eu bernilai negatif, serta faktor yang mempengaruhi distribusi dan akumulasi REE pada kedua profil adalah jenis batuan induk dan tingkat pelapukan..

Kata-kata kunci: geokimia, granitoid, lapukan, mineralogi, unsur tanah jarang

ABSTRACT

The Rare Earth Elements (REE) are 15 elements in the lanthanide group and 2 elements in IIIB group (Y+Sc) group of elements which are currently needed in the industrial world and are raw materials for making advanced and modern technology. As the need for REE increases, REE exploration activities also increase, therefore this research was conducted as a preliminary study which aims to determine the characteristics of the REE adsorption type in West Sulawesi using optical mineral petrography, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Optical mineral observations show that the source rock at Polewali is quartz monzonite, while at Mamasa it is granodiorite. REE-bearing minerals seen on optical mineral petrography are zircon, apatite, alanite and monazite. Clay minerals that have been successfully detected as minerals that bind REE in the weathered zone are kaolinite, halloysite, montmorillonite and nontronite. REE enrichment in the A horizon on both profiles shows that the percentage of clay minerals also affects the amount of TREE, as evidenced by the total percentage of clay mineral content in the A horizon at Polewali around 32.7% and Mamasa 16%, more than in the other horizons. The positive Ce anomaly in the weathered samples indicates that both weathered profiles are leaching zones except for the A horizon in Mamasa. The negative Eu anomaly also indicates that plagioclase was released during the differentiation of magma process when rocks are formed. Factors that influence the distribution and accumulation of REE are the type of source rock and the degree of weathering.

Keywords: geochemistry, granitoid, mineralogy, rare earth elements, weathered

Submitted: 24-03-2023; Revised: 22-08-2023; Accepted: 05-09-2023; Available Online: 02-10-2023

Published by: Mining Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Lambung Mangkurat

This is an open access article under the CC BYND license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

©2023, Geosapta

PENDAHULUAN

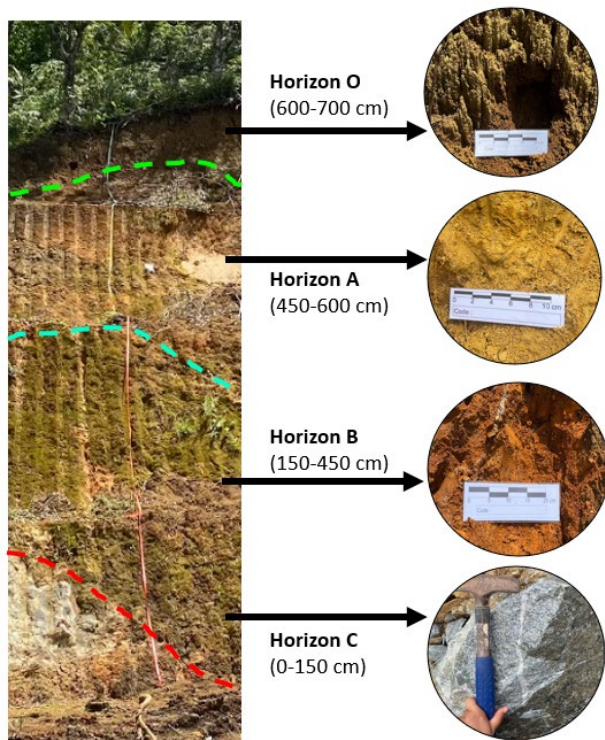
Istilah REE rare earth elements (REE) atau Unsur Tanah Jarang termasuk Critical Material Resources yang mengacu pada 17 unsur dalam tabel periodik unsur, yaitu 15 unsur lantanida dan 2 unsur golongan IIIB. Semua REE terdapat di alam kecuali promethium (Pm) yang sulit didapatkan sehingga biasanya dibuat di laboratorium.

Selama bertahun-tahun, unsur tanah jarang secara geokimia dianggap tidak bergerak (*immobile*) selama alterasi dan metamorfisme dan oleh karena itu sangat

berguna dalam interpretasi geologi [1]. Akan tetapi, beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa kelimpahan REE mengalami perubahan pada proses alterasi dan pelapukan [2,3]. Telah dilaporkan bahwa REE merupakan unsur *mobile* dan cenderung diperkaya selama pelapukan batuan granit di beberapa daerah subtropik [4].

Secara geokimia, kelimpahan unsur tanah jarang mengalami perubahan selama proses alterasi ataupun pelapukan dan akan membentuk REE tipe *ion adsorption*. Proses alterasi ataupun pelapukan menyebabkan

menghilangkan noise atau background yang tinggi dengan cara melakukan filtering agar grafik difaktogram yang ditampilkan lebih smooth. Data hasil pengolahan QualX diolah kembali secara manual dengan Microsoft Excel untuk menginterpretasi keberadaan mineral sesuai dengan kecocokan nilai difraksi dan intensitas tiap peak yang ada pada database Hanawalt Index [15] dan XRD mineralogy database (<http://webmineral.com>).



Gambar-2. Kenampakan profil pengambilan sampel di Lapangan

Analisis X-Ray Fluorescence (XRF)

Preparasi dan Analisis XRF dilakukan di Laboratorium PT Intertek Utama Services, Jakarta dengan total sampel sebanyak delapan sampel. Sampel batuan granit dan tanah lapukan granit dimasukan oven pada suhu 120°C selama satu jam agar kandungan airnya hilang dan dihaluskan dengan rod mill agar ukuran butir -200# mesh.

Analisis Induced Coupled Plasma–Mass Spectrometry (ICP-MS)

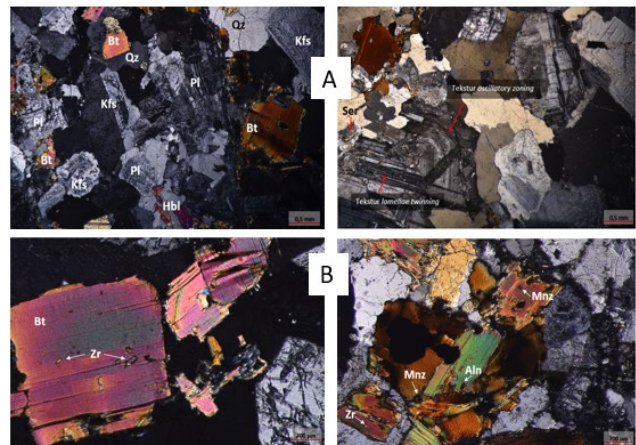
Sebanyak delapan sampel dianalisis menggunakan ICP-MS di Laboratorium PT Intertek Utama Services, masing-masing 4 sampel yang mewakili tiap horizon O, A, B dan C yang ada di Mamasa dan Polewali. Sampel batuan granit dan tanah lapukan granit dihaluskan terlebih dahulu hingga ukurannya <75µm dan dikeringkan pada suhu 105°C. Sampel yang sudah berbentuk powder akan dilarutkan oleh 4 larutan asam, yaitu HCl, HClO₄, HNO₃ dan HF.

HASIL DAN DISKUSI

Pengamatan Petrografi

Wilayah Polewali diwakili oleh sampel PLW-01 menunjukkan tekstur porfiritik dan mengandung K-felspar (35%), plagioklas (33%), kuarsa (10%), hornblenda (10%), biotit (8%), dengan mineral aksesoris titanit dan zirkon. K-felspar dan plagioklas hadir berupa fenokris, K-

felspar yang terdiri dari ortoklas berukuran 0,2-0,4 mm. Plagioklas yang hadir berupa oligoklas-albit dengan kembaran carlsbad-albit dengan ukuran 0,5-2 mm. Kuarsa memiliki pepadaman bergelombang, relief rendah dengan ukuran 0,1-0,5 mm. Hornblenda terlihat dengan belahan dua arah berbentuk granular dengan ukuran 0,3-0,7 mm. Biotit berbentuk prisma berwarna coklat gelap dan mengandung mineral inklusi seperti zirkon didalamnya dengan warna yang lebih gelap, biotit berukuran 0,1-1,5 mm (Gambar-3). Setelah diplot pada diagram QAP sampel Polewali diidentifikasi sebagai kuarsa monzonit (Gambar-4).



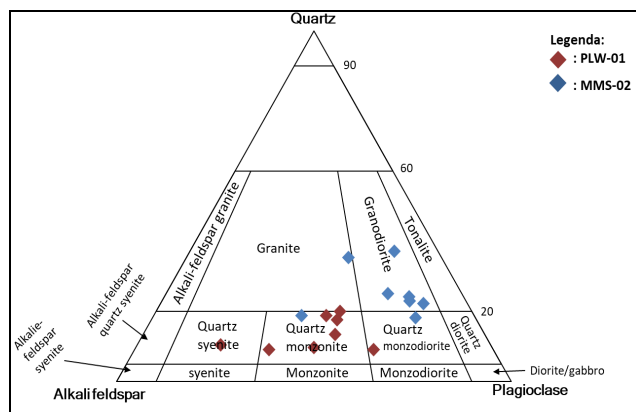
Gambar-3. Sayatan Petrografi Batuan (a) PLW-01 pada penampakan nikol silang menunjukkan mineral plagioklas, kuarsa, k-felspar, hornblenda (b) MMS-02 yang terdiri atas mineral monasit, alanit dan zirkon.

Tabel-1. hasil pengamatan %volume mineral kuarsa, alkali felspar dan plagioklas pada dua sampel batuan granit

No	Kode Sampel	Raw Data (%)			Total QAP (%)	Normalized data			Total
		Q	A	P		%Q	%A	%P	
1	PLW-01-1	15	30	35	80	18.8%	37.5%	43.8%	100%
2	PLW-01-2	8	50	30	88	9.1%	56.8%	34.1%	100%
3	PLW-01-3	12.5	35	45	92.5	13.5%	37.8%	48.6%	100%
4	PLW-01-4	7.5	25	50	82.5	9.1%	30.3%	60.6%	100%
5	PLW-01-5	7.5	15	20	42.5	17.6%	35.3%	47.1%	100%
6	PLW-01-6	10	65	20	95	10.5%	68.4%	21.1%	100%
7	PLW-01-7	15	25	35	75	20.0%	33.3%	46.7%	100%
8	PLW-01-8	7.5	35	35	77.5	9.7%	45.2%	45.2%	100%
9	MMS-02-1	17.5	10	45	72.5	24.1%	13.8%	62.1%	100%
10	MMS-02-2	15	12.5	55	82.5	18.2%	15.2%	66.7%	100%
11	MMS-02-3	20	10	60	90	22.2%	11.1%	66.7%	100%
12	MMS-02-4	15	35	30	80	18.8%	43.8%	37.5%	100%
13	MMS-02-5	20	15	45	80	25.0%	18.8%	56.3%	100%
14	MMS-02-6	25	7.5	35	67.5	37.0%	11.1%	51.9%	100%
15	MMS-02-7	20	12.5	55	87.5	22.9%	14.3%	62.9%	100%
16	MMS-02-8	30	20	35	85	35.3%	23.5%	41.2%	100%

Kode Sampel: Kode-Spot Pengamatan
Spot Pengamatan (n): 1,2,...,8
Q: Kuarsa
A: Alkali Felspar
P: Plagioklas

Wilayah Mamasa diwakili oleh sampel MMS-02 diidentifikasi sebagai granodiorit (Gambar 4), terdiri atas plagioklas (45%), kuarsa (20%), K-felspar (15%), hornblenda (10%), biotit (5%) dengan mineral aksesoris seperti titanit dan zirkon. Berdasarkan klasifikasi QAP diidentifikasi sebagai granodiorit.



Gambar-4. Hasil plot diagram QAP dari sampel sayatan tipis berdasarkan klasifikasi IUGS [14].

Major Elements

Batuan induk pada profil batuan di Polewali mengandung SiO_2 63,78%, Al_2O_3 15,46%, Na_2O 2,96%, K_2O 4,46%, CaO 4,43%, serta TiO_2 dan P_2O_5 kurang dari 1%. Sehubungan dengan ini profil pelapukan menunjukkan kandungan Al_2O_3 dan LOI yang tinggi dibanding oksida mayor lainnya. Namun kandungan total Fe_2O_3 pada lapukan lebih tinggi dibanding pada batuan induknya dan TiO_2 cenderung tidak bergerak. Sedangkan batuan induk pada profil batuan di Mamasa, secara keseluruhan kandungan MnO , MgO , CaO dan Na_2O semakin meningkat menuju horizon paling dalam hal ini dikarenakan unsur Mn, Mg, Ca dan Na merupakan unsur *mobile*.

Ketika diplot pada diagram Total Alkali Silika (TAS), sampel PLW-01 jatuh pada bidang kuarsa monzonit dan sampel MMS-02 jatuh pada bidang granodiorit. Nilai $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}) > 1.1$ dan nilai $\text{Al}_2\text{O}_3 > (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$, berdasarkan diagram dari [20] maka sampel yang ada di Polewali (PLW-01) dan Mamasa (MMS-02) merupakan granitoid tipe S dengan tingkat saturasi alumina masuk kedalam peralumina.

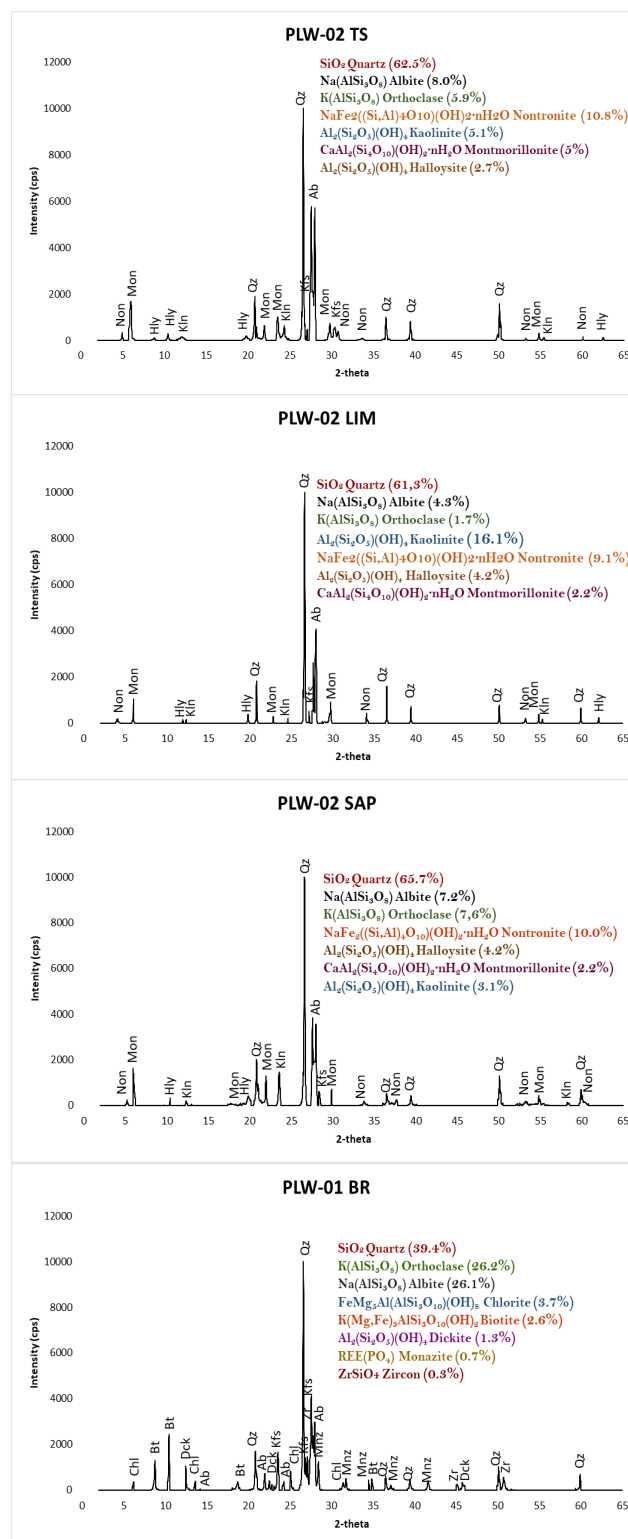
Mineralogi Lapukan Granitoid dan Implikasinya terhadap REE

Pelapukan granitoid yang terjadi di wilayah Polewali terdiri dari mineral kuarsa, haloisit, kaolinit, monmorillonit dan nonronit. Mineral kuarsa, haloisit, monmorillonit muncul disemua horizon, sedangkan mineral nonronit hanya muncul pada horizon B, terlihat juga intensitas kuarsa hampir sama disemua horizon, monmorillonit turun pada horizon A dan naik lagi pada horizon O, sedangkan intensitas kaolinit dan haloisit cenderung semakin menurun horizon O (Gambar-5).

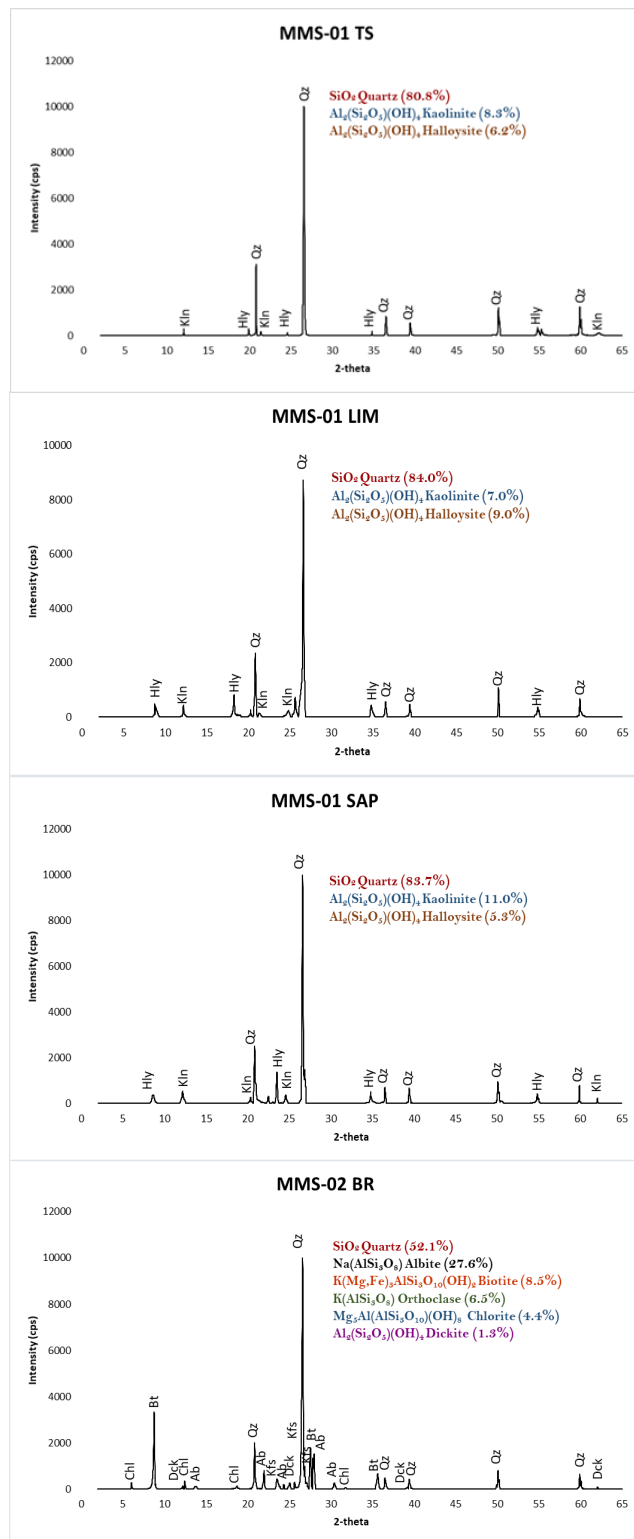
Lapukan granitoid wilayah Mamasa terdiri atas kuarsa, haloisit dan kaolinit yang ditemukan disemua horizon (Gambar-6). Intensitas kuarsa menurun pada horizon A dan naik kembali pada horizon O, sedangkan intensitas kaolinit dan haloisit berbanding terbalik dengan kuarsa yaitu meningkat pada horizon A dan kembali menurun pada horizon O.

Adanya perbedaan komponen produk lapukan granitoid antara granitoid yang ada di Polewali dan Mamasa disebabkan karena jenis granitoidnya yang berbeda. Berdasarkan hasil XRF dan pengamatan petrografi mineral optik, batuan yang terdapat di Polewali termasuk kedalam kuarsa monzonit, sedangkan di Mamasa

adalah granodiorit. Hal tersebut juga menyebabkan perbedaan intensitas dan ditemukannya mineral monmorillonit serta nontronit (grup smektit) di Polewali, sedangkan di Mamasa tidak ditemukan.



Gambar-5. Representasi pola XRD dari lapukan sampel Polewali. Qz. kuarsa; Ab. albit; Kfs. K-felspar; Zr. zirkon; Mnz. monasit; Dck. dickit; Chl. klorit; Hly. haloisit; Kln. kaolinit; Mon. monmorillonit.



Gambar-6. Representasi pola XRD dari profil lapukan sampel Mamasa. Qz. kuarsa; Ab. albit; Kfs. K-felspar; Dck. dickit; Chl. klorit; Hly. haloisit; Kln. kaolinit.

Pola Pengayaan REE pada Profil Lapukan

(La/Yb)_N, Ce/La dan Ce/REE cenderung konstan pada profil lapukan granitoid di Polewali (Gambar-9), sehingga tidak menunjukkan perubahan yang signifikan secara vertikal. LREE dan HREE meningkat dari batuan menuju horizon B hingga horizon O, kandungan LREE dan HREE pada zona lapukan nilainya hampir sama, namun yang tertinggi terdapat pada horizon A. Profil lapukan di Mamasa menunjukkan variasi vertikal dimana total REE meningkat dari batuan induknya menuju ke

horizon A dan menurun kembali pada horizon O. Pengayaan LREE pada horizon A juga didukung oleh peningkatan (La/Yb)_N dari batuan induk menuju ke horizon A dan berkurang kembali pada horizon O. Hal ini menunjukkan bahwa pengayaan REE terjadi pada horizon A. HREE menurun pada horizon B dan bertambah kembali pada horizon A kemudian berkurang lagi pada horizon O. Nilai Ce/La dan Ce/TREE juga konstan namun nilainya lebih rendah dibanding dengan profil di Polewali. Unsur Th dan U semakin juga meningkat seiring dengan meningkatnya TREE.

Adsorpsi REE pada lapukan batuan disebabkan tergantung sifat material yang diadsorpsi, pH dan radius ion [17]. Granitoid yang melapuk menghasilkan produk berbutir halus yang mampu melakukan pertukaran kation. Pengayaan REE yang cenderung terkayakan pada zona lapukan yang mengandung mineral lempung seperti kaolinit dan haloisit disebabkan karena kaolinit (atau haloisit) memiliki dua jenis pertukaran kation yang dihasilkan dari substitusi isomorf Al³⁺ untuk Si⁴⁺ (muatan permanen) dan permukaan basal (muatan variabel). Ion REE³⁺ kemungkinan besar teradsorpsi pada permukaan silika dan alumina dalam lempung sebagai REE(OH)²⁺ dalam larutan asam [17,18].

Jika diperhatikan pada semua sampel lapukan di Polewali (Gambar-5) terdapat mineral lempung seperti kaolinit, haloisit dan monmorillonit, akan tetapi ada perbedaan persentasi kandungan mineral tersebut pada tiap horizon, REE yang paling tinggi terdapat pada horizon A kemungkinan disebabkan karena kandungan kaolinit 13,3% dan haloisit 5,3% (lebih tinggi dibandingkan dengan horizon yang lainnya). Adanya perbedaan kadar REE antara profil di Polewali dan Mamasa (TREE lebih tinggi di Polewali) disebabkan karena di Polewali selain mineral kaolinit dan haloisit juga terdapat mineral monmorillonit dan nontronit yang merupakan bagian dari grup smektit. Hal ini disebabkan kapasitas pertukaran kation pada mineral lempung dengan tipe perbandingan layer 2:1, seperti ilit dan grup smektit, umumnya lebih tinggi daripada kaolinit dan haloisit [16].

Pada umumnya REE yang terserap oleh mineral lempung lebih dominan kaya akan unsur HREE dibanding unsur LREE [19], akan tetapi pola pengayaan REE pada tiap horizon penelitian ini apabila diperhatikan akan menunjukkan LREE/HREE yang tinggi atau jumlah LREE yang lebih banyak dibandingkan HREE. Beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya pengayaan LREE dibandingkan dengan HREE salah satunya disebabkan oleh mineral-mineral yang berhubungan dengan grup mika, dibuktikan dengan ditemukannya biotit melalui pengamatan petrografi dan analisis XRD. Adanya pengayaan LREE ini dapat berhubungan material slab yang terbentuk pada saat proses subduksi dan dibawa ke permukaan [20,22]. Selain itu pengayaan LREE dibandingkan HREE juga disebabkan oleh adanya pengaruh unsur Fe-Mn yang memiliki kemampuan substitusi dengan LREE dibandingkan HREE [21].

Granitoid pada wilayah Polewali dan Mamasa menunjukkan anomali negatif Eu (Eu/Eu* < 1). Pada proses pembentukannya, batuan yang mengalami pelepasan atau pengurangan plagioklas saat diferensiasi magma akan menghadirkan anomali negatif Eu, sebaliknya batuan yang terakumulasi plagioklas akan memiliki anomali positif Eu [22].

Tabel-2. kadar *major elements*, *trace elements* dan *rare earth elements* pada profil lapukan di granitoid di Polewali dan Mamasa

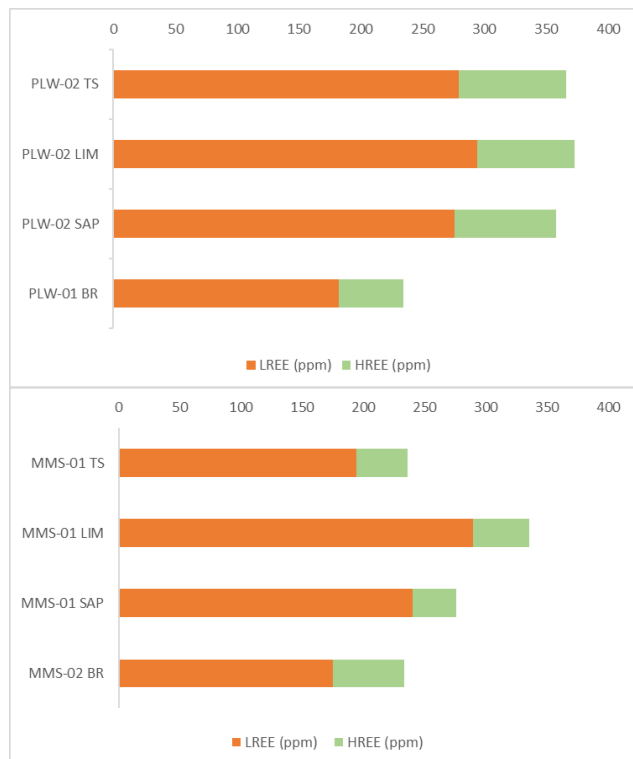
Sampel	Det Limit	PLW-02 TS	PLW-02 LIM	PLW-02 SAP	PLW-01 BR	MMS-01 TS	MMS-01 LIM	MMS-01 SAP	MMS-02 BR
<i>Major Elements (wt%)</i>									
SiO ₂	0.01	57.14	54.91	54.71	63.78	56.40	71.32	69.74	64.96
TiO ₂	0.01	0.64	0.58	0.63	0.57	0.68	0.16	0.21	0.57
Fe ₂ O ₃	0.01	5.67	5.73	5.66	4.97	5.10	1.32	1.59	4.61
Al ₂ O ₃	0.01	19.86	22.81	22.35	15.46	19.84	16.87	17.89	14.04
MnO	0.01	0.17	0.14	0.15	0.08	0.02	0.03	0.08	0.08
MgO	0.01	2.28	1.65	1.96	2.18	0.93	0.51	0.67	3.52
CaO	0.01	3.57	2.39	3.11	4.43	0.01	0.01	0.01	3.52
K ₂ O	0.01	3.07	2.85	2.49	4.46	1.95	4.97	5.59	4.14
Na ₂ O	0.01	2.84	2.45	2.51	2.95	0.13	0.24	0.28	2.23
P ₂ O ₅	0.002	0.444	0.413	0.478	0.238	0.065	0.020	0.014	0.177
Cr ₂ O ₃	0.01				0.03	0.02			0.05
Total		95.694	93.933	94.058	99.148	85.145	95.46	96.084	97.897
<i>Trace elements (ppm)</i>									
Al	50	103000	117000	115000	81000	107000	91600	88400	72800
Ca	50	23400	15200	20300	28700	160	470	230	22200
Cr	5	26	23	30	154	131	25	28	176
Cu	1	5	3	1	5	1			8
Fe%	0.01	3.8	3.75	3.78	3.31	3.52	0.85	0.97	3.02
K	20	24800	22700	20100	36000	16000	40300	41700	32800
Mg	20	12600	9100	10800	12100	5560	2990	3680	18800
Mn	1	1210	1000	1070	586	145	207	556	559
Na	20	20700	18000	18500	21500	1010	2000	2010	16400
Ni	1	9	12	12	9	38	17	19	36
P	50	1790	1640	1920	960	240	80	50	620
S	50	80			50	210			50
Sc	1	18	18	20	10	10	6	5	10
Ti	5	3230	2940	3240	3240	4010	989	1200	3250
V	1	90	99	104	71	47	5	9	56
Zn	1	61	51	54	47	48	49	47	61
Ag	0.1								
As	1	21	93	103	5	2	3	3	3
Ba	1	662	594	610	1380	249	522	539	610
Be	0.5	4.4	4.5	4.5	3.1	3.1	4.3	3.8	2.2
Bi	0.05	0.5	0.37	0.32	0.22	0.88	0.18	0.49	0.42
Cd	0.05	0.49		0.16	0.4	0.1		0.1	0.1
Co	1	15	15	14	10	8	18	8	12
Cs	0.1	17.4	16	9.5	6.3	5.2	9.1	15.6	7.4
Ga	0.1	33.3	34	32	22.6	31.1	29.9	29.4	20.5
Ge	0.1	3.7	2.2	2.8	1.2	2.6	4	3	1.6
Hf	0.1	0.9	0.8	0.7	2	0.1	0.2	1.5	0.5
In	0.05	0.14		0.05	0.06	0.11	0.07	0.06	0.11
Li	0.1	53.6	57.2	48.6	17.6	29.7	35	37	44.5

Sampel	Det Limit	PLW-02 TS	PLW-02 LIM	PLW-02 SAP	PLW-01 BR	MMS-01 TS	MMS-01 LIM	MMS-01 SAP	MMS-02 BR
Mo	0.1	1	1.8	1.2	0.6	0.2		0.1	8.4
Nb	0.1	17.6	16.3	17.8	16.4	22.2	22.6	20.7	14.8
Pb	1	49	44	66	45	30	49	48	24
Rb	0.1	176	159	138	197	107	311	350	190
Re	0.05								
Sb	0.1	1.1	2.2	2.4	0.2	0.3		0.1	0.3
Se	1	3	3	3	1	<1	1		
Sn	0.1	5.1	3.9	4	4.2	9.1	5.7	7.1	13.5
Sr	0.5	446	364	426	499	37.6	88.3	106	222
Ta	0.05	1.33	1.23	1.34	1.31	2.13	3.47	3.07	1.1
Te	0.1		0.4						
Th	0.05	65.9	62	65.5	39.8	39.9	67	52.6	20.3
Tl	0.02	1.43	1.5	1.5	1.02	0.57	1.22	1.61	0.85
U	0.05	5.5	5.56	6.77	7.78	5.34	14.4	10.2	3.23
W	0.1	6.5	5.7	10.1	3	2.9	2.3	1.9	2
Zr	0.5	10.7	7.1	7.9	9.7	30.1	44	38.2	10
La	0.1	65.2	67.1	62	45.3	49.5	79.8	55.1	40.8
Ce	0.1	133	146	135	88.1	94.4	131	134	82.6
Pr	0.05	13.1	13.6	13.4	8.44	9.06	14.1	9.6	8.71
Nd	0.1	56.1	54.8	53.5	32.7	35.6	54.6	35.9	34.9
Sm	0.1	9.8	10.5	10.6	6.3	5.3	9.1	4.9	6.8
Eu	0.1	2	1.9	1.6	1.7	0.7	1.1	0.9	1.2
Gd	0.1	10.9	10.9	10.1	6.7	5.8	8	6.2	6.9
Tb	0.05	1.13	1.24	1.08	0.8	0.7	0.9	0.55	0.81
Dy	0.1	7.9	6.9	7.3	4.8	3.7	4.8	3.4	5.1
Y	0.1	39.5	33.3	34.8	23.5	17.5	21.8	16	28.7
Ho	0.1	1.3	1.2	1.2	0.9	0.7	0.8	0.6	0.9
Er	0.1	3.6	3.6	3.2	2.1	1.5	2	1.7	3
Tm	0.1	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3
Yb	0.1	3.6	3.4	3.1	2.3	1.6	1.6	1.5	2.4
Lu	0.05	0.51	0.35	0.55	0.27	0.23	0.22	0.23	0.31
Sc	1	18	18	20	10	10	6	5	10
LREE		279.2	293.9	276.1	182.54	194.56	289.7	240.4	175.01
HREE		68.94	61.29	61.73	41.67	31.93	40.32	30.28	48.42
TREE		366.14	373.19	357.83	234.21	236.49	336.02	275.68	233.43
Ce/Ce*		1.1158	1.1850	1.1483	1.1047	1.0929	0.9575	1.4285	1.0743
Eu/Eu*		0.5916	0.5430	0.4727	0.8000	0.3860	0.3941	0.4992	0.5356

(-): not detected/ di bawah detection limit

Kelimpahan REE dan Implikasi terhadap Eksplorasi

Total REE+Y+Sc yang terdapat pada profil lapukan di Polewali (sampel PLW-01) hampir sama berkisar 357-373 ppm, sedangkan pada batuan induk adalah 234 ppm. Total LREE dari profil pelapukan hampir sama berkisar 276-294 ppm, sedangkan HREE juga hampir sama berkisar 61-68 ppm. Total REE+Y+Sc pada profil pelapukan di Mamasa (sampel MMS-02) berkisar 236-336 ppm, sedangkan pada batuan induk adalah 233 ppm. Total LREE 195-290 ppm, sedangkan HREE berkisar 30-40 ppm. Pengayaan REE terjadi terutama pada horizon A di Polewali dimana TREE (REE+Y+Sc) 373 ppm. Terlihat bahwa kadar TREE pada kedua horizon paling banyak terdapat pada horizon A. Hasil ini menunjukkan bahwa pengayaan REE terjadi di horizon B di kedua profil (Gambar-7). Kadar REE yang ada di Polewali dan Mamasa hanya mampu mencapai batas minimum kadar yang berhasil ditambang dari tambang REE yang di China sekitar 336-886 ppm (Longnan), 287-651 ppm (Dingnan) dan 311-990 ppm (Quannan) [19]. Namun apabila dibandingkan dengan kadar REE pada lapukan granitoid yang ada di Indonesia, misalnya REE ion adsorpsi yang ada di Pulau Bangka yang kadarnya berkisar 70-180 ppm [19]. kadar REE yang ada di Polewali dan Mamasa jumlahnya hampir 2 kali dari kadar yang ditemukan di Pulau Bangka (Gambar-8).



Gambar-7. Diagram batang kandungan LREE dan HREE pada sampel Polewali dan Mamasa.

Anomali-Ce

Unsur Ce berbeda dengan unsur REE lain yang bergerak ke bawah dalam profil lapukan, unsur Ce lebih sukar termobilisasi serta umumnya akan terbentuk dalam CeO_2 atau terbentuk bersama dengan Mn-oksida sebagai ion Ce^{4+} .

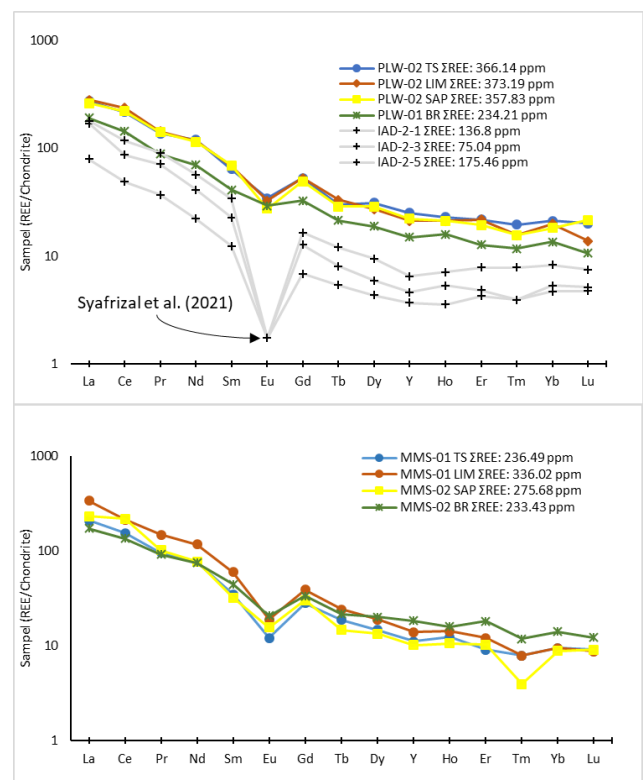
Anomali-Ce yang berbeda pada REE tipe ion adsorpsi digunakan untuk menentukan zona REE, antara

zona pelindian dan zona akumulasi. Zona pelindian REE menunjukkan anomali-Ce yang bernilai positif sedangkan zona akumulasi menunjukkan anomali-Ce yang bernilai negatif [19,20]. Zona akumulasi akan berada di bawah zona pelindian. Terjadinya anomali-Ce disebabkan apabila terjadi oksidasi di dekat bawah permukaan.

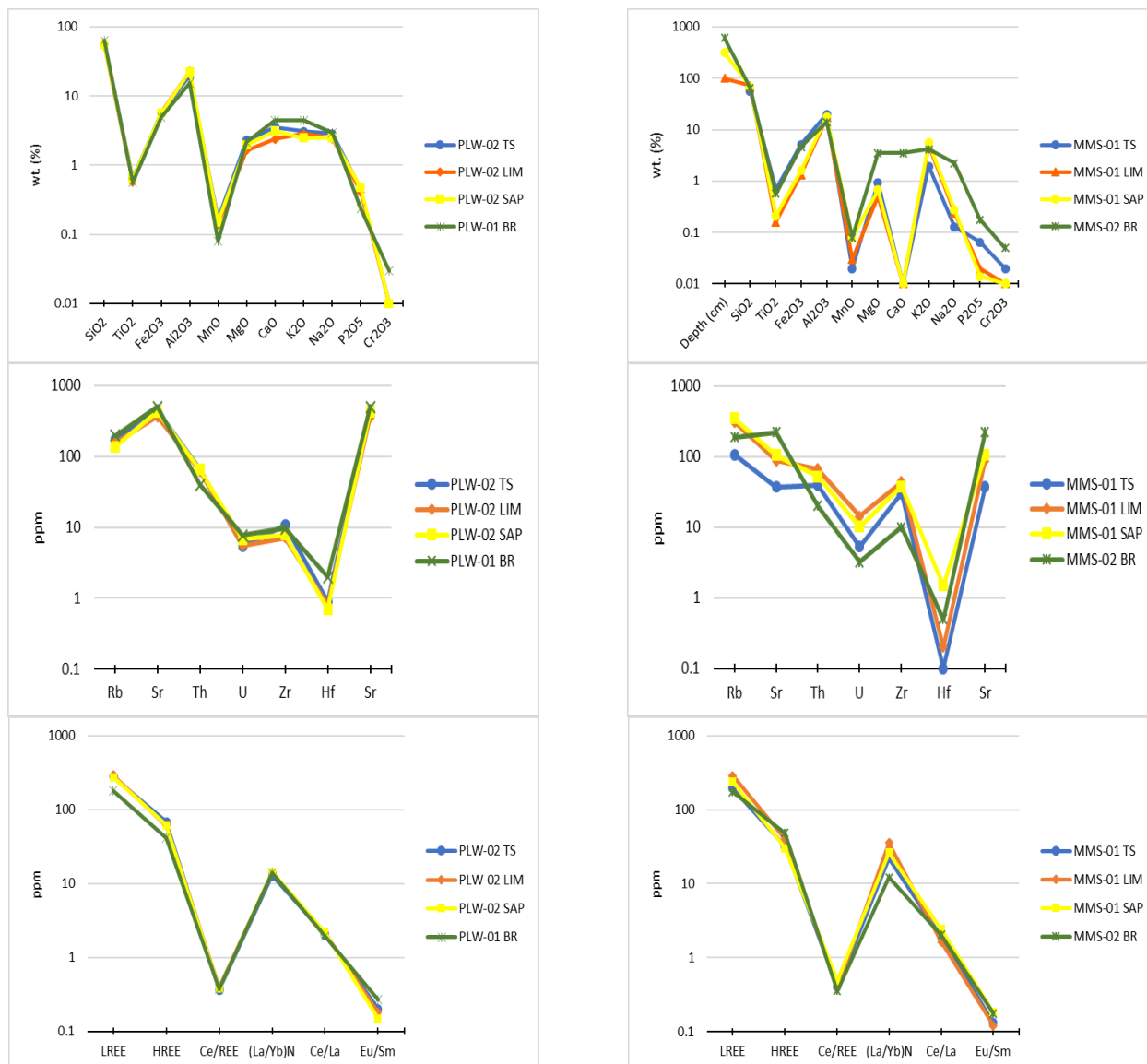
Kelimpahan unsur terhadap nomor atomnya memiliki pola seperti gergaji, hal ini dikarenakan unsur yang memiliki nomor ganjil lebih melimpah dibandingkan unsur yang bernomor genap, peristiwa ini disebut sebagai Efek Oddo Harkins. Oleh karena itu, untuk menghindari pola yang seperti gergaji tersebut, maka nilai-nilai setiap REE akan dinormalisasi terhadap *chondrite* atau batu meteor yang jatuh ke bumi [23], kemudian diplot kedalam diagram laba-laba REE.

Kadar REE pada masing-masing sampel memiliki kecenderungan condong ke kanan (**Gambar-8**). Gambar tersebut menunjukkan pada sampel Polewali (PLW-01) menunjukkan anomali positif Ce pada semua horizon pelapukan. Hal ini menandakan bahwa semua horizon pelapukan pada lokasi penelitian di Polewali menunjukkan zona pelindian. Konsentrasi REE paling banyak ada di horizon A, akan tetapi konsentrasi pada horizon O dan B sebenarnya juga tidak jauh beda (hampir sama) dengan horizon A.

Wilayah Mamasa, menunjukkan konsentrasi REE yang bernilai positif untuk anomali Ce pada horizon O dan B, sehingga disimpulkan bahwa horizon O dan B merupakan zona pelindian, sedangkan horizon A menunjukkan zona akumulasi yang ditandai dengan anomali negatif Ce. Konsentrasi REE paling tinggi juga terdapat pada horizon A dan paling rendah ada pada horizon O.



Gambar-8. Normalisasi REE terhadap UCC pada PLW-01 dan MMS-02



Gambar-9. Variasi trace elements dan REE PLW-02 dan MMS-01

KESIMPULAN DAN SARAN

Batuan PLW-01 memiliki tekstur granular yang dikategorikan sebagai kuarsa monsonit, sedangkan Batuan MMS-02 sebagai granodiorit.

Zona lapukan di Polewali dan Mamasa menunjukkan Total REE yang relatif lebih tinggi dibandingkan pada batuan induknya. Jumlah mineral lempung dan mineral lainnya yang terdapat pada profil lapukan disebabkan oleh adanya perbedaan *source rock* pada kedua lokasi. Hal tersebut akan mempengaruhi proses dekomposisi mineral yang membawa REE dan proses adsorpsi REE pada lempung. Hasil lapukan sampel PLW-01 berupa kuarsa, kaolinit, halloisit dan monmorillonit, sedangkan sampel MMS-02 berupa kuarsa, kaolinit dan halloisit.

Total persentase kandungan mineral lempung pada horizon A di Polewali berkisar 32,7% dan Mamasa 16%, lebih banyak dibanding pada horizon yang lainnya. Hal ini membuktikan bahwa pengayaan REE horizon A pada kedua profil lapukan mengindikasikan bahwa jumlah Total REE dipengaruhi oleh persentase mineral lempung.

Kedua profil lapukan menunjukkan zona pelindian kecuali horizon A di wilayah Mamasa, ditandai dengan anomali-Ce yang bernilai positif dan terjadi

pelepasan plagioklas pada saat proses deferensiasi magma ketika batuan terbentuk ditandai dengan anomali-Eu yang bernilai negatif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas pendanaan yang diberikan melalui skema PDUPT (Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi) Kemendikbud/Ristek Tahun 2021-2022 dan PPMI (Penelitian dan Pengabdian Masyarakat) ITB Tahun 2022.

DAFTAR ACUAN

- [1] Winchester, J.A.; Floyd, P. A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 1977, 20, 325-343.
- [2] Alderton, D.H.M.; Pearce, J.A.; Potts, P.J. Rare Earth Element Mobility during Granite Alteration: Evidence from Southwest England. *Earth and Planetary Science Letters* 1980, 49, 149-165.
- [3] Braun, J.J.; Pagel, M.; Muller, J.P.; dan Bilong, P.; Michard, A.; Guillet, B. Cerium anomalies in lateritic profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1990, 54, 781-795.

- [4] Bao, Z.; Zhao, Z. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China. *Ore Geology Reviews* 2008, 33, 519-535.
- [5] Henderson, P. Geochemistry and Petrogenesis of the Fiskenaeset Anorthosite Complex, Southern West Greenland; Nature of The Parent Magma. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1984, 48, 415-416.
- [6] Liu, Y.; Hou, Z. A Synthesis of Mineralization Styles with an Integrated Genetic Model of Carbonatite-Syenite-Hosted REE Deposits in The Cenozoic Mianning-Dechang REE Metallogenic Belt, The Eastern Tibetan Plateau, Southwestern China. *J. Asian Earth Sci* 2017, 137, 35-79.
- [7] Deng, M.; Xu, C.; Song, W.; Tang, H.; Liu, Y.; Zhang, Q.; Zhou, Y.; Feng, M.; Wei, C. REE Mineralization in the Bayan Obo deposit, China: Evidence from Mineral Paragenesis. *Ore Geology Reviews* 2017, 91, 100-109.
- [8] Sukanto, R. Geological map of Indonesia, Mamuju sheet-scale 1: 1,000,000. Geological Survey of Indonesia 1975.
- [9] Hakim, A.Y.A.; Anggayana, K.; Indriati, T.; Sulistijo, B.; Syafrizal, S.; Heriawan, M.N.; Widayat, A.H. Mineralogi dan Mobilitas Unsur pada Lithium dan Logam Tanah Jarang pada Lumpur Sidoarjo (Lusi), Indonesia. *Jurnal GEOSAPTA* 2022, 8, 99-107.
- [10] Maulana, A.; Watanabe, K.; Yonezu, K. Petrology and geochemistry of granitoid from South Sulawesi, Indonesia: Implication for rare earth element (REE) occurrences. *International Journal of Engineering and Science Applications* 2016, 3, 79-86.
- [11] Van Leeuwen, T.M. 25 Years of Mineral Exploration and Discovery in Indonesia, *Journal of Geochemical Exploration* 1994, 50, 13-90.
- [12] Djuri; Sudjarmiko. Geology map of the Majene and western part of the Palopo quarangles. 1: 250.000 in scale. Geology Research and Development Centre 1974, Bandung.
- [13] Maitre, R.; W. Le; Streckeisen, A.; Zanettin, B.; Bas, M.J.; Le Bonin, B.; Bateman, P.; Bellieni, G.; Dudek, A.; Efremova, S.; Keller, J.; Lameyre, J.; Sabine, P. A.; Schmid, R.; Sorensen, H.; Woolley, A.R. *Igneous Rocks a Classification and Glossary of Terms* (R. W. Le Maitre (Ed.); 2nd ed.). Cambridge University Press 2002.
- [14] Streckeisen, A. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews* 1976, 12, 1-33.
- [15] Bayliss, P. Mineral Powder Diffraction File, Search Manual: Chemical Name, Hanawalt Numerical, Fink Numerical, Mineral Name, International Centre for Diffraction Data 1980.
- [16] Laveuf, C.; Cornu, S. A review on the potentiality of rare earth elements to trace pedogenetic processes. *Geoderma* 2009, 154, 1-12.
- [17] Kosmulski, M. Standard enthalpies of adsorption of di- and trivalent cations on alumina. *Journal of Colloid Interface Science* 1997, 192, 215-227.
- [18] Piasecki, W.; Sverjensky, D.A. Speciation of adsorbed yttrium and rare earth elements on oxide surfaces. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2008, 72, 3964-3979.
- [19] Sanematsu, K. Characteristics and Genesis of Ion Adsorption-Type Rare Earth Element Deposits 2016, 55-79.
- [20] Kamber, B.S.; Ewart, A.; Collerson, K.D.; Bruce, M.C.; McDonald, G.D. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. *Contrib Miner Petrol* 2002, 144, 38-56.
- [21] Hakim, A.Y.A.; Melcher, F.; Prochaska, W.; Meisel, T. C. Magmatic and metamorphic evolution of the Latimojong Metamorphic Complex, Indonesia. *Journal of Asian earth sciences* 2022, 227, 105095.
- [22] Singh, L.G.; Vallinayagam, G. Petrological and Geochemical Constraints in the Origin and Associated Mineralization of A-Type Granite Suite of the Dhiran Area, Northwestern Peninsular India. *Geosciences* 2012, 2, 66-80.
- [23] McDonough, W.; Sun, S. S. The composition of the Earth. *Chemical Geol* 1995, 67, 1050- 1056.