



Aplikasi Unsur Tanah Jarang (UTJ) Dalam Ilmu Geologi: Studi Kasus Petrogenetik Gunung Api Kwarter di Jawa Barat

Johanes Hutabarat, Yoga Andriana Sendjaja, Agus Didit Haryanto,
Nisa Nurul Ilmi

Departemen Geologi Sains, Universitas Padjadjaran, Bandung
*E-mail: j.hutabarat@unpad.ac.id

Abstrak

Unsur tanah jarang (UTJ) adalah kelompok unsur dengan nomor atom antara 57 (La) dan 72 (Lu) dicirikan dengan jari-jari ion relatif besar, dan bervalensi 2 atau 3. UTJ terbukti sangat penting bagi interpretasi petrogenetik. Namun, unsur-unsur ini terdapat dalam konsentrasi yang sangat rendah di batuan beku, dan sulit untuk menganalisisnya. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengetahui kegunaan unsur tanah jarang dalam menentukan jenis batuan beku basalt gunung api Kwarter di Jawa Barat dan penafsiran petrogenetiknya. Berdasarkan analisis geokimia batuan unsur utama, lava dari enam gunung api Kwarter yang diteliti dalam makalah ini diklasifikasikan sebagai lava basalt berafinitas Kalk-alkalin (Gn. Galunggung, Gn. Guntur) dan lava andesit basaltik berafinitas Kalk-alkalin (Gn. Papandayan, Gn. Tangkuban Perahu, Gn. Cikurai dan Gn. Tampomas). Sedangkan berdasarkan geokimia batuan unsur tanah jarang (UTJ), pola UTJ dinormalkan kondrit untuk lava basalt berafinitas Kalk-alkalin Gn. Galunggung dan Gn. Guntur hampir datar disertai anomali Eu yang tidak signifikan. Lava basalt berafinitas Kalk-alkalin dari Gn. Papandayan, Gn. Tangkuban Perahu, Gn. Cikurai dan Gn. Tampomas mempunyai pola UTJ curam dengan dengan anomali Eu negatif yang tidak signifikan. Adanya perilaku yang berbeda kecenderungan pola UTJ merupakan indikasi yang kuat fraksionasi mineral tertentu selama diferensiasi magmanya.

Kata kunci: UTJ, Lava basalt, Gunung api Kwarter, Petrogenetik, dan Paleotektonik,

Abstract

Rare earth elements (REE) is a group of elements with atomic numbers between 57 (La) and 72 (Lu) characterized by relatively large ionic radii, and valences of either 2⁺ or 3⁺. They have proven to be very important for petrogenetic interpretations. However, these elements occur in very low concentrations in igneous rocks, and are difficult to analyze for. The main objective of this study was to determine the usefulness of rare earth elements in determining the type of basaltic igneous rock Quaternary volcanoes in West Java and petrogenetic interpretations. Based on geochemical analyzes of major elements, Lavas from six volcanoes in this study have been classified as basalt lava of Calc-alkaline affinity (Mt. Galunggung, and Mt. Guntur) and basaltic andesite lava of Calc-alkaline affinity (Mt. Papandayan, Mt. Tangkuban Perahu, Mt. Cikurai and Mt. Tampomas). While based on rock geochemistry of rare earth elements (REEs), the pattern of REEs normalized chondrite basalt lava Calc-alkaline affinity for Mt. Galunggung and Mt. Guntur almost flat with insignificant Eu anomalies. Basaltic andesite lava-Calc-alkaline affinity of Mt. Papandayan, Mt. Tangkuban Perahu, Mt. Cikurai and Mt. Tampomas has a pattern of REEs steep with negative Eu anomalies insignificant. Trends their different behavior patterns of REEs is a strong indication of certain mineral fractionation during differentiation magma.

Keywords: REE, Basalt lava, Basaltic andesite, Quaternary volcanoes, Fractionation.

1. Pendahuluan

Unsur tanah jarang (UTJ) adalah himpunan tujuh belas unsur kimia dalam tabel periodik, khususnya lima belas lantanida ditambah skandium dan itrium. Orang Jepang menyebutnya "Benih teknologi" (*"the seeds of technology."*), sementara Departemen Energi AS menyebutnya sebagai "teknologi logam" (*"technology metals"*) (U.S. Department of Energy, 2011). UTJ memungkinkan dunia teknologi tinggi manusia hidup saat ini - semuanya dari miniaturisasi elektronik, hingga memungkinkan teknologi energi hijau dan

medis, bahkan untuk mendukung segudang telekomunikasi penting dan sistem pertahanan (Long, 2010). UTJ adalah unsur yang telah menjadi tidak tergantikan untuk dunia teknologi manusia karena sifatnya yang magnetik unik, berpendar, dan katalitik. Jumlah unsur tanah jarang yang digunakan dalam peralatan berteknologi tinggi adalah nominal tapi hampir selalu penting untuk kinerja unit (U.S. Department of Energy, 2011).

Selain penggunaannya dalam teknologi modern telah secara dramatis meningkat selama beberapa tahun terakhir, analisis distribusi unsur



tanah jarang (UTJ) adalah salah satu alat yang paling ampuh dalam penyelidikan geologi khususnya geokimia (Rollinson, 1993; Ragland, 1989). Plot pola UTJ dinormalisasi kondrit (Masuda et al., 1973), jelas menunjukkan kesamaan dan variasi sistematis dari geokimia UTJ. Plot ini memungkinkan pemodelan kuantitatif evolusi geokimia Bumi.

Unsur tanah jarang (UTJ), juga hanya disebut tanah jarang (*Rare Earths*) atau logam tanah jarang (*Rare Earth Metals*), adalah kelompok 17 unsur-menurut *International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)*, yang terdiri dari unsur skandium (Sc), yttrium (Y) dan 15 unsur yang disebut lantanoid (Ln), yaitu unsur Lantanum (La), serium (Ce), praseodymium (Pr), neodimium (Nd), prometium (Pm), samarium (Sm), europium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), disprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), thulium (Th), Iterbium (Yb) dan lutetium (Lu). Seringkali nama lantanida digunakan sebagai pengganti lantanoid. Namun, Akhiran-*id* menunjukkan struktur kimia tertentu seperti sulfida sedangkan akhiran-*oid* berarti bahwa ada sesuatu yang serupa, terlihat atau berperilaku sejenisnya. Lantanida memiliki sifat kimia dan fisika yang serupa (semua, tapi Eu adalah trivalensi) dan jari-jari ionnya menurun dengan peningkatan dwivalensi atau trivalensi tergantung pada derajat oksidasi magma. Menurut aturan *Goldschmidt (1937)*, jika ion mempunyai muatan yang sama, ion yang lebih kecil lebih mengutamakan menyatu ke dalam kristal tumbuh.

Unsur tanah jarang (UTJ) termasuk unsur jejak paling sedikit larut dan relatif immobil selama proses pelapukan, metamorfisme derajat rendah, dan ubahan hidrotermal. Pada batuan beku, pola UTJ dikendalikan oleh komposisi UTJ sumber magmanya, derajat pelelehan sebagian dan oleh fraksionasi kristal selama evolusinya (Rollinson, 1993). Secara umum, UTJ menunjukkan perilaku kimia dan fisika yang sangat mirip, tetapi beberapa proses petrologi mengeksplorasi perbedaan-perbedaan kecil dalam ukuran ionnya, yang menyebabkan fraksionasi seri UTJ (Rollinson, 1993).

Kelimpahan unsur jejak, unsur tanah jarang (UTJ) dan isotop mencerminkan berbagai faktor termasuk sumber magma, persentase dari batuan sumber yang mengalami pelelehan, besarnya fraksionasi kristal, dan kontaminasi magma baik dari batuan yang berdekatan maupun magma sistem busur lainnya. Umumnya, pengkristalan awal mineral seperti olivin, plagioklas klino- dan orto-piroksen mengandung kelimpahan UTJ yang sangat rendah. Oleh karena itu, UTJ adalah unsur yang tidak kompatibel dan partisi ke dalam lelehan, sehingga menyebabkan total UTJ meningkat selama fraksionasi dari magma mafik

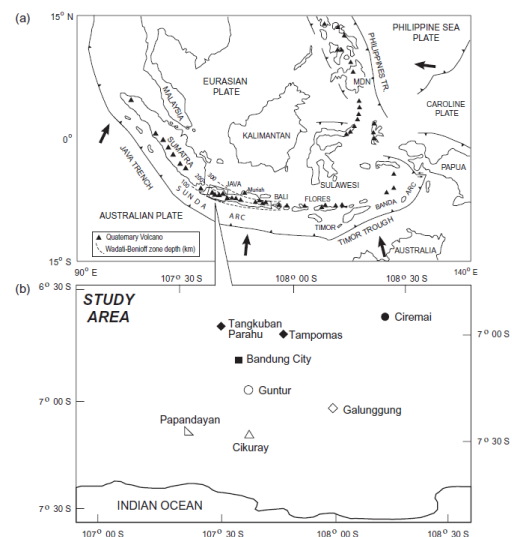
ke menengah. Karena magma mendingin, UTJ akhirnya menjadi terkonsentrasi dalam fase mineral aksesori seperti zirkon, rutil, ilmenit, titanite dan monazit.

Data unsur tanah jarang (UTJ) juga dapat memfasilitasi solusi untuk banyak masalah geologi. Kerabat toleiiit busur kepulauan kadang-kadang terkait erat dengan kerabat kalk-alkalin (McCulloch & Gamble, 1991). Proses evolusi untuk setiap kerabat magma dan/atau hubungan genetiknya antara dua kerabat adalah pertanyaan dasar dalam studi genesa magma. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengetahui kegunaan unsur tanah jarang (UTJ) dalam menentukan jenis batuan vulkanik di enam gunung api Kwartir di Jawa Barat dan penafsiran petrogentiknya.

2. Metode

2.1 Metode Pengumpulan Data

Sampel batuan diambil dari batuan vulkanik di enam gunung api berumur Kwartir di Jawa Barat, yaitu (Gn. Galunggung, Gn. Guntur, Gn. Papandayan, Gn. Tangkuban Perahu, Gn. Cikuray, dan Gn. Tampomas (Gambar 1).



Gambar 1. Lokasi Daerah Penelitian.

Berdasarkan studi mikroskop, 6 sampel batuan segar dan paling representatif yang diambil dari batuan vulkanik dipilih untuk analisis unsur utama meruah dan unsur tanah Jarang (UTJ). Komposisi kimia unsur utama dianalisis dengan metode XRF (*X-Ray Fluorescence*), (RIX 2000, Rigaku, Osaka, Japan) di *Department of Geoscience, Shimane University*, Jepang. Sedangkan komposisi unsur tanah jarang (UTJ) di analisis dengan metode ICP-MS (*inductively coupled plasma-mass spectrometry*); protokol analisis yang digunakan untuk analisis nya adalah metode penambahan standar (Kimura et al., 1995). Analisis ini dilakukan dengan menggunakan spektrometer massa Thermo Elemental VG PQ3 di

Departemen Geoscience, Shimane University, Jepang, yang beroperasi dalam cara *nebulizer* konsentris normal. Dalam melakukan analisis geokimia batuan, analisisnya dilakukan sendiri oleh Penulis ke 2 (Yoga Andriana Sendjaja) sewaktu masih mengambil studi doctoral (S3) di Jepang.

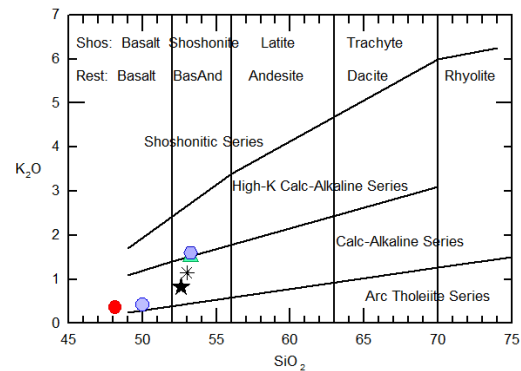
2.2 Metode Analisis Data

Kelimpahan unsur tanah jarang (UTJ) paling umum ditampilkan pada diagram di mana unsur-unsur lantanida disusun dari kiri ke kanan dengan peningkatan nomor atom (57-71, La hingga Lu, pada tabel periodik). Konsentrasi masing-masing REE dibagi dengan konsentrasi unsur di kondrit, yang dianggap mencerminkan komposisi Bumi awal. Hal ini menghasilkan pola-pola halus yang memfasilitasi perbandingan antara contoh dan antara dua kerabat. Resultan plot UTJ dinormalisasi kondrit (catatan, bahwa sumbu y adalah tak berdimensi) memungkinkan analisis pengayaan (atau pengurangan/depleksi) dalam setiap unsur lantanida relatif terhadap referensi standar yang sama, dalam hal ini, adalah Bumi awal. Analisis plot tersebut berfokus pada dua aspek yang berbeda. Pertama, sebagai UTJ adalah sama tidak kompatibel selama fraksionasi fase pengkristalan awal, kemiringan pada diagram UTJ (yang diwakili oleh La/Lu dinormalisasi) adalah hampir tidak terpengaruh oleh fraksionasi dan mewakili kelimpahan relatifnya dalam batuan sumber. Sehingga keseluruhan selubung sekitar data UTJ dari kerabat tertentu dapat menghasilkan informasi berharga kimia sumbernya. Kedua, total UTJ (ΣUTJ) harus meningkat sampai tahap terakhir fraksionasi, dan kerabat, berasal dari sumber yang sama dan terkait dengan fraksionasi, harus menghasilkan profil paralel.

3. Hasil dan Pembahasan

Sebanyak 6 sampel batuan vulkanik terpilih dari enam gunung api Kwater di Jawa Barat (Gn. Galunggung, Gn. Guntur, Gn. Papandayan, Gn. Tangkuban Perahu, Gn. Cikurai, dan Gn. Tampomas, dianalisis unsur utama, dan unsur tanah langka. Hasil analisis geokimia batuan disajikan pada Tabel 1.

Berdasarkan kandungan SiO_2 -nya (Tabel 1) batuan vulkanik dari 6 Gunung api Kwater di Jawa Barat komposisinya berkisar dari mafik hingga menengah; sedangkan berdasarkan plotting pada diagram K_2O versus silika menurut Peccerillo & Taylor (1976) batuan vulkaniknya diklasifikasikan sebagai basalt dan andesit basaltik dengan afinitas magma seri kalk-alkalin (Gambar 2).



Gambar 2. Nama Batuan dan afinitas magma 6 contoh batuan vulkanik Gunung Api Kwater di Jawa Barat (diagram dari Peccerillo & Taylor (1976).

Batuan basalt diwakili oleh 2 contoh batuan dari Gn. Galunggung (GL 2-2) dan Gn. Guntur (GT 18-2) mempunyai total konsentrasi unsur tanah jarang (ΣUTJ) berkisar dari 30,65 ppm hingga 51,66 ppm; sedangkan untuk batuan andesit basaltik mempunyai kisaran nilai ΣUTJ berkisar antara 54,22-110,97. Semua contoh batuan mempunyai anomali Eu negatif ($Eu^* < 1$), terkecuali contoh batuan dari Gn. Galunggung yang mempunyai anomali Eu positif ($Eu^* > 1$) dan anomali Ce negatif (Tabel 1).

Semua contoh yang dianalisis mempunyai konsentrasi yang lebih tinggi unsur tanah jarang ringan (UTJR) dibandingkan unsur tanah jarang berat (UTJB), yang merupakan karakteristik batuan vulkanik akibat derajat peleburan sepihak yang rendah, berasal dari sumber mantel diperkaya dengan UTJ-nya atau dari sumber dengan garnet (Wilson 1989). Namun demikian, dengan nilai rasio La_N/Sm_N dinormalisasi kondrit berkisar dari 1,02-3,19, maka menunjukkan UTJR yang diperkaya dan wilayah sumber mantelnya kurang heterogen untuk magma induk batuan vulkanik basalt dan andesit basaltik.

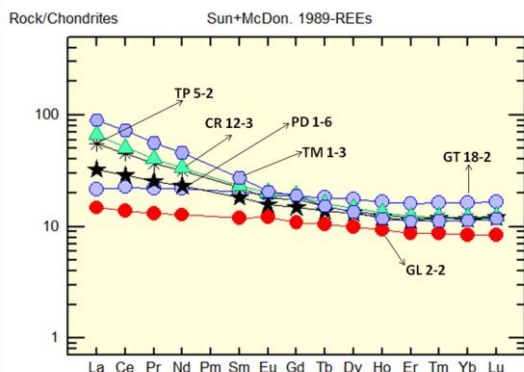
Pola UTJ dinormalisasi-kondrit (nilai kondrit dari Sun dan McDonough (1989) untuk semua contoh batuan mencerminkan perbedaan dalam total kelimpahan UTJ ($\Sigma UTJ = 30,65-110,97$ ppm) dan variasi fraksionasinya (Tabel 1) ($La_N/Yb_N = 1,24-7,51$, $La_N/Sm_N = 1,02-3,19$, $Tb_N/Yb_N = 1,11-1,32$). Semua contoh batuan menunjukkan pengayaan signifikan (< 100 kali kondrit) UTJR relatif terhadap UTJB dan menunjukkan fraksionasi sedang UTJR, sementara UTJB memperlihatkan kecenderungan relatif rata (Gambar 3). Anomali Eu negatif berkembang baik tapi tidak begitu cukup signifikan dalam semua contoh batuan ($Eu/Eu^* = 0,89-0,98$), terkecuali contoh batuan dari Gn. Galunggung yang mempunyai anomali Eu positif ($Eu/Eu^* > 1$).



Tabel 1. Analisis Geokimia contoh batuan vulkanik dari Gunung Api Kwarter di Jawa Barat

No Contoh	GL 2-2	GT 18-2
Basalt		
Unsur Utama (%)		
SiO ₂	48,14	50,01
TiO ₂	0,82	1,09
Al ₂ O ₃	15,63	18,31
Fe ₂ O ₃	10,17	10,91
MnO	0,16	0,18
MgO	11,45	6,04
CaO	11,46	10,13
Na ₂ O	2,20	3,09
K ₂ O	0,37	0,43
P ₂ O ₅	0,09	0,17
Total	100,49	100,36
Unsur Tanah Jarang (ppm)		
La	3,494	5,065
Ce	8,469	13,8
Pr	1,242	2,101
Nd	5,946	10,33
Sm	1,817	3,106
Eu	0,7042	1,113
Gd	2,217	3,816
Tb	0,3923	0,6853
Dy	2,527	4,459
Ho	0,5271	0,9438
Er	1,446	2,636
Tm	0,2209	0,4154
Yb	1,438	2,765
Lu	0,2133	0,4227
Total UTJ	30,653	51,658
La/Yb	1,65	1,24
La/Sm	1,20	1,02
Tb/Yb	1,22	1,11
Eu*	1,07	0,98
Ce*	1,00	1,02
No. Contoh	PD 1-6	TP 5-2
Andesit Basaltik		
Unsur Utama (%)		
SiO ₂	52,60	52,99
TiO ₂	0,85	0,88
Al ₂ O ₃	20,86	18,83
Fe ₂ O ₃	8,62	9,48
MnO	0,14	0,19
MgO	3,01	4,39
CaO	10,09	8,68
Na ₂ O	3,00	3,24
K ₂ O	0,83	1,15
P ₂ O ₅	0,13	0,20
Total	100,12	100,02
Unsur Tanah Jarang (ppm)		
La	7,66	13,02
Ce	17,57	27,66
Pr	2,42	3,5
Nd	10,82	14,71
Sm	2,793	3,402
Eu	0,9124	1,033
Gd	3,051	3,603
Tb	0,514	0,5619

Dy	3,341	3,425
Ho	0,6872	0,7258
Er	1,859	1,985
Tm	0,3029	0,3051
Yb	1,984	2,02
Lu	0,3043	0,3067
Total UTJ	54,21	76,25
La/Yb	2,62	4,38
La/Sm	1,71	2,39
Tb/Yb	1,16	1,24
Eu*	0,95	0,89
Ce*	1,02	1,04
No. Contoh	CR 12-3	TM 1-3
Andesit Basaltik		
Unsur Utama (%)		
SiO ₂	53,24	53,25
TiO ₂	1,01	0,82
Al ₂ O ₃	17,52	17,36
Fe ₂ O ₃	9,77	9,14
MnO	0,25	0,18
MgO	4,71	4,90
CaO	8,41	9,36
Na ₂ O	3,37	3,04
K ₂ O	1,50	1,60
P ₂ O ₅	0,23	0,25
Total	100,01	99,90
Unsur Tanah Jarang (ppm)		
La	15,82	21,33
Ce	31,13	44,55
Pr	3,855	5,344
Nd	15,59	21,4
Sm	3,558	4,171
Eu	1,155	1,195
Gd	3,934	3,92
Tb	0,5973	0,5709
Dy	3,73	3,457
Ho	0,756	0,6664
Er	2,037	1,853
Tm	0,3094	0,286
Yb	2,054	1,93
Lu	0,3135	0,2995
Total UTJ	84,83	110,97
La/Yb	5,23	7,51
La/Sm	2,78	3,19
Tb/Yb	1,30	1,32
Eu*	0,94	0,89
Ce*	1,01	1,06



Gambar 3. Kelimpahan unsur tanah langka (UTL) dinormalisasi kondrit semua contoh batuan vulkanik Gunung Api Kwarter di Jawa Barat (nilai normalisasi kondrit dari Sun dan McDonough, 1989).

GL: Gn. Galunggung; GT: Gn. Guntur; PD: Gn. Papandayan; TP: Gn. Tangkuban Perahu; CR: Gn. Cikurai; dan TM: Gn. Tampomas.

Keseluruhan contoh batuan berkomposisi mafik (basalt) dengan kandungan SiO_2 antara 47,81- 51,21 %, menunjukkan kelimpahan UTJR yang rendah dengan maksimum La mencapai sekitar 20 kali nilai kondrit. Fraksionasi UTJ menunjukkan kecil dengan nilai rata-rata $(\text{La}/\text{Yb})_N = 1,45$ dan berkisar dari 1,24-1,65. Begitu juga untuk fraksionasi UTJR yang menunjukkan rasio $(\text{La}/\text{Sm})_N$ yang cukup rendah dengan rata-rata 1,11 dan berkisar 1,02-1,20. Nilai ini lebih kecil sedikit secara rata-rata dibanding fraksionasi UTJB yang mempunyai rasio $(\text{Tb}/\text{Yb})_N$ berkisar dari 1,11-1,22, dengan rata-rata 1,16. Nilai rasio Eu/Eu^* berkisar antara 0,98 sampai 1,07, dengan rata-rata 1,03. Kisaran yang agak besar memberikan kecenderungan grafik yang sedikit agak berbeda diantara ke enam contoh batuan tersebut (Gambar 3). Kecenderungan pola UTJ batuan menunjukkan pola hampir datar dengan disertai anomali Eu yang tidak signifikan. Penurunan dari UTJR ke UTJB terlihat secara seragam menunjukkan derajat relatif kecil pelelehan sebagian di wilayah sumber, yang mengarah ke pengayaan istimewa UTJR dalam lelehan. Pengayaan UTJR relatif terhadap UTJB juga khas untuk masukan sedimen. Akumulasi plagioklas boleh jadi bertanggung jawab untuk adanya sedikit anomali Eu positif yang teramati atau fraksionasi hornblende juga dapat menyebabkan adanya sedikit anomali Eu positif (Rollinson, 1993).

Keseluruhan contoh batuan berkomposisi menengah (andesit basaltik) dengan kandungan SiO_2 antara 52,60-53,25%, menunjukkan kelimpahan UTJR yang tinggi dengan maksimum La mencapai sekitar 100 kali nilai kondrit. Fraksionasi UTJ menunjukkan sedang dengan nilai rata-rata $(\text{La}/\text{Yb})_N = 4,94$ dan berkisar dari 2,62-7,51. Begitu juga untuk

fraksionasi UTJR yang menunjukkan rasio $(\text{La}/\text{Sm})_N$ yang cukup sedang dengan rata-rata 1,11 dan berkisar 1,71-3,19. Nilai ini adalah 3,5 kali lebih besar secara rata-rata dibanding fraksionasi UTJB yang mempunyai rasio $(\text{Tb}/\text{Yb})_N$ berkisar dari 1,16-1,32, dengan rata-rata 0,29. Nilai rasio Eu/Eu^* berkisar antara 0,89 sampai 0,95 dengan rata-rata 0,91. Kecenderungan pola unsur UTJ batuan berkomposisi menengah (andesit basaltik) memperlihatkan perilaku yang berbeda dengan batuan yang berkomposisi mafik (basalt), yang menunjukkan pola kecuraman negatif dengan anomali Eu negatif yang tidak signifikan. Kecenderungan pola seperti tersebut merupakan indikasi kuat untuk tidak adanya garnet sisa dalam sumber mantel dan sumber magmanya atau derajat pencairan sebagian semestinya berbeda, serta adanya keterlibatan fraksionasi felspar selama diferensiasi magmanya (Wilson 1989; McCulloch & Gamble, 1991; Rollinson, 1993).

4. Kesimpulan

Berdasarkan pola kecenderungan unsur tanah jarang (UTJ), batuan vulkanik berkomposisi mafik (basalt) dan menengah (andesit basaltik) sumber magma atau derajat pelelehan sebagiannya berbeda. Batuan vulkanik berkomposisi mafik (basalt) menunjukkan adanya keterlibatan fraksionasi hornblende selama diferensiasi magmanya, sedangkan batuan vulkanik berkomposisi menengah (andesit basaltik) fraksionasi felspar lebih utama selama diferensiasi magmanya.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Pimpinan Fakultas Teknik Geologi (FTG), Universitas Padjadjaran yang telah memberikan kesempatan melaksanakan penelitian kepada kami dengan dana Hibah Penelitian Kompetitif Geologi, Tahun Anggaran 2015.

Daftar Pustaka

- Goldschmidt, Victor, 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *Journal of the Chemical Society*: 655-673.
- International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), [Online], Diakses di: <https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/> [30 November 2016].
- Kimura J.-I., Yoshida T. & Takaku Y. 1995. Igneous rock analysis using ICP-MS with internal standardization, isobaric ion overlap correction, and standard addition methods. *Science Report of Fukushima University* **56**, 1-12.



- Long, K.R., B. S. (2010). *Developing a Rare Earth Elements Mine*. USGS Scientific Investigations Report. The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States.
- Masuda, A., Nakamura, N. and Tanaka, T. (1973). Fine structures of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 37, 239-248.
- McCulloch M. T., dan J. A. Gamble (1991). Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 102, 358-374.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R. (1976). Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81.
- Ragland, P.C. (1989). *Basic Analytical Petrology*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Rollinson, H.R. (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Singapore Publisher (Ltd), Singapore, 352 pp
- Sun, S.S. and Mc Donough, W.F. (1989): Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts. In Saunders, A.D. and Norry, M.J. (Eds.): *Magmatism in the Ocean basins. Geological Society of London Special Publication* 42: 313-345.
- U.S. Department of Energy. (2011). *Critical Materials Strategy*. Department of Energy. U.S. Department of Energy.
- Wilson, M. (1989). *Igneous Petrogenesis: a Global Tectonic Approach*. London: Unwin Hyman.