

Karakteristik Geokimia Batuan Unsur Jejak dan Unsur Tanah Jarang Gunung Api Kaba untuk Interpretasi Tatanan Tektonik Berdasarkan Analisis ICP-MS

Muhammad Eval Juni Wijaya*¹, Sakilla Gia Mentari²

^{1,2}Teknik Geologi, Institut Teknologi Sumatera, Indonesia
Email: ¹muhammad.wijaya@gl.itera.ac.id, ²sakilla.mentari@gl.itera.ac.id

Abstrak

Gunung Kaba yang terletak di bagian timur Provinsi Bengkulu merupakan bagian dari jalur gunung api aktif di sepanjang zona subduksi barat Pulau Sumatra. Penelitian ini bertujuan untuk mengungkap karakteristik geokimia unsur jejak dan unsur tanah jarang (rare earth elements/REE) guna menafsirkan asal-usul magma serta tatanan tektoniknya. Sebanyak tujuh sampel batuan dari Gunung Kaba dianalisis menggunakan metode ICP-MS dan hasilnya dipresentasikan dalam bentuk diagram laba-laba yang dinormalisasikan terhadap *primitive mantle*, *N-MORB*, dan *chondrite*. Hasil analisis menunjukkan pola pengayaan unsur LILE dan LREE, serta penipisan unsur HFSE dan HREE, yang merupakan ciri khas magmatisme pada zona subduksi. Selain itu, terdapat indikasi transisi pola dari tatanan tektonik *island arc* menuju *active continental margin* (ACM), yang tercermin dari variasi kandungan unsur jejak. Temuan ini mendukung hipotesis bahwa bagian barat Pulau Sumatra terbentuk bukan hanya dipengaruhi oleh tatanan tektonik busur kepulauan (*island arc*), tetapi juga dipengaruhi oleh tatanan tektonik tepi benua aktif (*active continental margin*). Penelitian ini memberikan data geokimia baru terkait pemahaman mengenai interpretasi tatanan tektonik dan evolusi magma di zona subduksi Sumatra.

Kata kunci: *Active Continental Margin, Geokimia, Gunung Kaba, Island Arc, Unsur Jejak, Unsur Tanah Jarang*

Abstract

Mount Kaba, located in the eastern part of Bengkulu Province, is part of an active volcanic belt along the western subduction zone of Sumatra Island. This study aims to reveal the geochemical characteristics of trace elements and rare earth elements (REE) in order to interpret the origin of magma and its tectonic setting. A total of seven rock samples from Mount Kaba were analyzed using the ICP-MS method and the results are presented in the form of a spider diagram normalized to the primitive mantle, N-MORB, and chondrite. The results of the analysis show an enrichment pattern of LILE elements and LREE, as well as a depletion of HFSE elements and HREE, which are typical characteristics of magmatism in the subduction zone. In addition, there are indications of a transition pattern from an island arc tectonic setting to an active continental margin (ACM), which is reflected in the variation in the content of elements. These findings support the hypothesis that the western part of Sumatra Island was formed not only influenced by the tectonic setting of the island arc, but also influenced by the tectonic setting of the active continental margin (ACM). This study provides new geochemical data related to understanding the interpretation of tectonic settings and magma evolution in the Sumatran subduction zone.

Keywords: *Active Continental Margin, Geochemistry, Island Arc, Mount Kaba, Rare Earth Elements, Trace Elements*

1. PENDAHULUAN

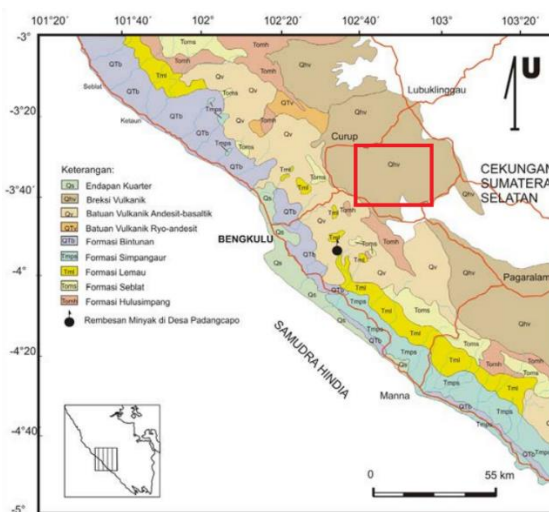
Bagian barat Pulau Sumatra dianggap sebagai batas zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia yang menunjam secara *oblique* terhadap Lempeng Benua Eurasia (Hutchings dan Mooney, 2021; Kong dkk., 2020), Zona subduksi ini membentuk rangkaian gunung api di sepanjang bagian barat Pulau Sumatra (Barber, 2000, dalam Zulkarnain, 2012). Daerah Bengkulu berada di bagian barat Pulau Sumatra yang terdiri dari satuan batuan gunung api kuartar, salah satunya berasal dari Gunung Kaba (Barber dkk., 2005). Kemunculan rangkaian gunung api tersebut memunculkan pertanyaan terkait tatanan tektonik pembentukannya.

Penelitian tentang asal usul tatanan tektonik berdasarkan data geokimia batuan telah dilakukan oleh Wilson (1989) yang mengungkapkan bahwa bagian barat Pulau Sumatra berupa tepi benua aktif atau *active continental margin (ACM)*. Zulkarnain (2012) mengungkapkan lebih lanjut bahwa daerah Bengkulu terbagi atas 2 zona yaitu busur kepulauan atau *island arc* di bagian barat dan tepi benua aktif atau *active continental margin (ACM)* di bagian timur. Penelitian terbaru terkait zona subduksi Sumatra juga dilakukan oleh Liu dkk. (2021), Hua dkk. (2022) dan Wang dkk. (2022) yang membahas tentang bagaimana data tomografi menjelaskan lebih detail tentang tatanan tektonik Sumatra berupa gambaran penunjaman antar lempeng.

Gunung kaba yang relatif berada di bagian timur Bengkulu menarik untuk diteliti lebih lanjut guna melengkapi dan mendukung interpretasi data geokimia batuan di zona subduksi Sumatra. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi unsur jejak dan unsur tanah jarang guna memperkuat pemahaman terkait interpretasi tatanan tektonik dan evolusi magma di zona subduksi Sumatra. Perbandingan dengan penelitian terdahulu adalah pada penelitian ini terdapat beberapa data geokimia baru guna mendukung rekonstruksi dan interpretasi tatanan tektonik Sumatra yang lebih komprehensif.

2. GEOLOGI REGIONAL

Geologi regional daerah Bengkulu di mana Gunung Kaba berada didominasi oleh batuan gunung api. Berdasarkan gambar 1, peta geologi lembar Bengkulu (Gafoer dkk., 1992, dalam Heryanto, 2007), gunung kaba terdiri dari 1 satuan yaitu Satuan Breksi Gunung Api (Qhv) yang terdiri dari breksi gunung api, lava dan tuf bersusunan andesit-basalt yang berasal dari Gunung Kaba.



Gambar 1. Peta Geologi Lembar Bengkulu (Gafoer dkk., 1992, dalam Heryanto, 2007)

3. METODE PENELITIAN

3.1. Lokasi Pengambilan Sampel

Lokasi pengambilan sampel berada di kompleks Gunung Kaba tepatnya pada koordinat $3^{\circ} 30' 56''$ S dan $102^{\circ} 37' 16''$ E. Pada tabel 1 yang berisi daftar unsur jejak dan unsur tanah jarang di Gunung Kaba, terdapat sebanyak 7 sampel batuan gunung api (sampel 13, 17, 20, 22, 23, 27 dan 29) dari Gunung Kaba bagian utara.

3.2. Analisis Laboratorium

Analisis geokimia *whole rock* dilakukan dengan metode ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Emission Mass Spectrometry*) untuk mendapatkan hasil berupa unsur jejak dan unsur tanah jarang

(Rollinson, 1993). Analisis geokimia dilakukan di laboratorium *ALS Laboratories*, Kanada. Sampel yang digunakan dalam analisis *ICP-MS* merupakan sampel *bulk rock* yang dihancurkan hingga berbentuk bubuk. Hasil dari analisis geokimia *whole rock* berupa komposisi geokimia batuan dalam satuan *ppm*.

3.3. Metode Normalisasi

Setelah diperoleh hasil berupa konsentrasi unsur jejak dan unsur tanah jarang, data geokimia yang telah diseleksi kemudian diolah dan diplot menggunakan diagram geokimia berupa diagram laba-laba atau diagram *spider* yang telah dinormalisasi terlebih dahulu terhadap nilai referensi *primitive mantle*, *N-MORB* dan *chondrites* (Gale dkk., 2013; Sun dan McDonough, 1995). Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai normalisasi sebagai berikut :

$$Cn = \frac{Cs}{Cr} \quad (1)$$

dengan keterangan :

Cn : konsentrasi normalisasi

Cs : konsentrasi unsur dalam sampel

Cr : konsentrasi unsur dalam nilai referensi

Diagram yang telah diplot nilai normalisasi kemudian dipakai dalam identifikasi pola distribusi unsur jejak dan unsur tanah jarang untuk menginterpretasi sumber, karakteristik, dan evolusi magma.

Tabel 1. Unsur Jejak dan Unsur Tanah Jarang di Gunung Kaba

SAMPLE	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga
SATUAN	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
STA13	441	61,4	10	6,27	5,87	3,2	1,54	20,2
STA17	418	60,9	20	6,29	5,92	3,57	1,39	20,2
STA20	421	59,1	10	5,91	5,59	3,48	1,44	20
STA22	343	47,8	30	4,67	5,28	2,72	1,28	19,9
STA23	487	49,6	40	4,97	4,97	3,13	1,38	20,7
STA27	456	65	10	6,68	6,54	3,6	1,5	20,2
STA29	466	64,8	10	6,76	6,25	3,56	1,54	20,3
SAMPLE	Gd	Hf	Ho	La	Lu	Nb	Nd	Pr
SATUAN	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
STA13	6,38	6,9	1,17	29,3	0,54	7,9	34,4	8,14
STA17	6,5	6,9	1,3	27,9	0,55	7,8	32,7	7,9
STA20	6,35	6,5	1,22	27,6	0,53	7,1	32,3	7,51
STA22	5,09	5,6	0,96	22,3	0,44	6	27,1	6,25
STA23	5,41	6	1,04	23,3	0,42	6,4	28,3	6,55
STA27	6,36	7,3	1,34	30,5	0,5	8	35,1	8,3
STA29	6,68	7,7	1,27	30,5	0,56	8,2	35,4	8,35
SAMPLE	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm
SATUAN	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
STA13	105	7,36	3	307	0,5	1,01	12,2	0,49
STA17	104	7,34	3	273	0,5	1,04	11,95	0,56
STA20	98,6	7,01	3	300	0,4	0,98	11,45	0,47
STA22	77	5,74	2	339	0,4	0,75	8,46	0,45
STA23	80,6	6,03	3	345	0,5	0,87	9,36	0,4
STA27	107,5	7,51	3	311	0,5	1	12,05	0,52
STA29	114	8,09	3	284	0,5	1,03	12,85	0,54
SAMPLE	U	V	W	Y	Yb	Zr		
SATUAN	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		
STA13	2,77	114	2	33,2	3,64	271		
STA17	2,69	133	2	33	3,64	273		
STA20	2,88	128	2	32,2	3,51	256		

STA22	2,02	185	2	27,6	2,58	204
STA23	2,13	177	2	27,6	2,88	216
STA27	2,76	107	2	34,2	3,49	277
STA29	2,89	113	2	34,8	3,76	290

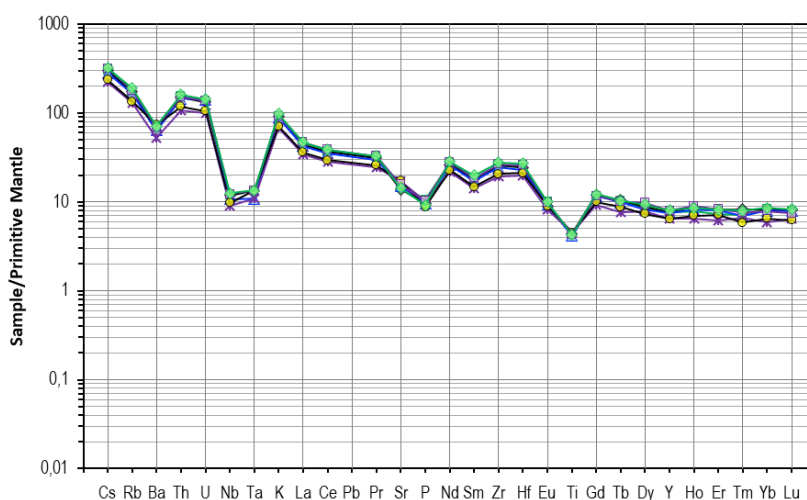
4. HASIL DAN DISKUSI

4.1. Hasil

Unsur jejak dan unsur tanah jarang di Gunung Kaba diplot pada diagram laba-laba yang dinormalisasikan terhadap nilai *primitive mantle*. Berdasarkan diagram pada gambar 2, unsur Cs mengalami peningkatan sebesar 100x, unsur Rb, Th, U mengalami peningkatan sebesar 50x, unsur K mengalami peningkatan sebesar 30x, unsur La, Ce, Pr mengalami peningkatan sebesar 20x, unsur Nd, Zr, Hf mengalami peningkatan sebesar 10x, unsur Sm mengalami peningkatan sebesar 5x dan unsur Gd, Tb, Dy, Y, Ho, Er, Tm, Yb, Lu mengalami peningkatan sebesar 3x.

Berdasarkan diagram pada gambar 2, unsur Cs, Rb, Th, U, K, Nd relatif mengalami peningkatan dibanding unsur lain pada diagram tersebut, unsur Ba, Nb, Ta, P, Sm, Ti relatif mengalami penurunan dibanding unsur lain pada diagram tersebut, unsur La, Ce, Pr, Zr, Hf, Gd, Tb, Dy, Y, Ho, Er, Tm, Yb, Lu relatif tidak mengalami perubahan dibanding unsur lain pada diagram tersebut.

Pola unsur jejak pada gambar 2, diagram laba-laba di Gunung Kaba yang dinormalisasikan terhadap *primitive mantle* (Sun dan McDonough, 1995) menunjukkan kandungan magma yang lebih kaya akan unsur jejak berupa pengayaan unsur *LILE* (*Large Ion Lithophile Element*) seperti unsur Cs, Rb, Th, U, K, La, dan Ce dibandingkan dengan unsur *HFSE* (*High Field Strength Elements*) seperti unsur Nb, Ta, Ti dan Y (Wilson, 1989).



Gambar 2. Diagram Laba-Laba Unsur Jejak Gunung Kaba yang dinormalisasikan Terhadap *Primitive Mantle* (Sun dan McDonough, 1995)

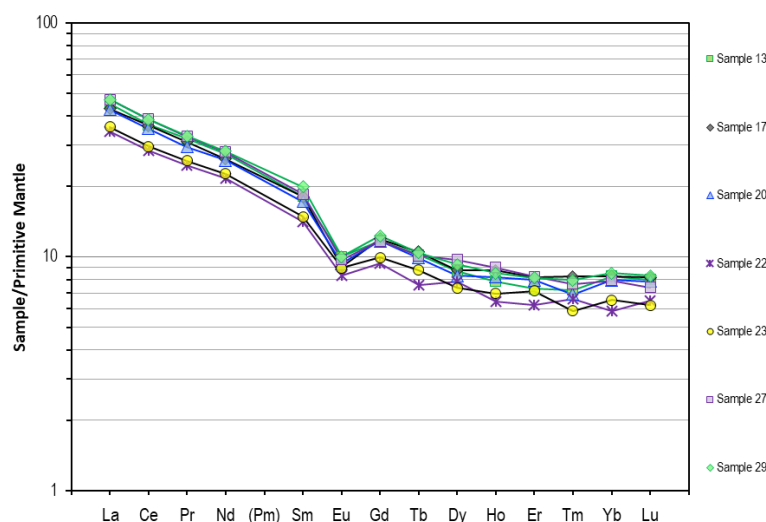
Unsur tanah jarang di Gunung Kaba diplot pada diagram laba-laba yang dinormalisasikan terhadap nilai *primitive mantle*. Berdasarkan diagram gambar 3, unsur La, Ce, Pr, Nd mengalami peningkatan sebesar 10x, unsur Sm mengalami peningkatan sebesar 5x, unsur Eu mengalami peningkatan sebesar 1x, unsur Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu mengalami peningkatan sebesar 3x.

Berdasarkan diagram pada gambar 3, unsur La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy relatif mengalami peningkatan dibanding unsur lain pada diagram tersebut, unsur Eu relatif mengalami penurunan dibanding unsur lain pada diagram tersebut, unsur Ho, Er, Tm, Yb, Lu relatif tidak mengalami perubahan dibanding unsur lain pada diagram tersebut.

Pola unsur tanah jarang pada gambar 3, diagram laba-laba di Gunung Kaba yang dinormalisasikan terhadap *primitive mantle* (Sun dan McDonough, 1995) menunjukkan bahwa magma mengalami

pengayaan unsur *LREE* (*Light Rare Earth Elements*) dan penipisan unsur *HREE* (*Heavy Rare Earth Elements*) (Wilson, 1989).

Secara umum, data geokimia unsur jejak dan unsur tanah jarang di Gunung Kaba yang dinormalisasikan terhadap *primitive mantle* menunjukkan pola pengayaan LREE terhadap HREE dan pola pengayaan unsur LILE serta pola penipisan unsur HFSE. Pola tersebut merupakan karakteristik tipikal magma yang dihasilkan pada zona konvergen atau zona subduksi (Wilson, 1989). Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan Zulkarnain (2011, 2012, 2014, 2016) berdasarkan data geokimia di Lampung, Bengkulu, dan Sumatera Tengah yang menunjukkan pola pengayaan unsur LILE dan pola penipisan unsur HFSE pada zona subduksi Sumatra.

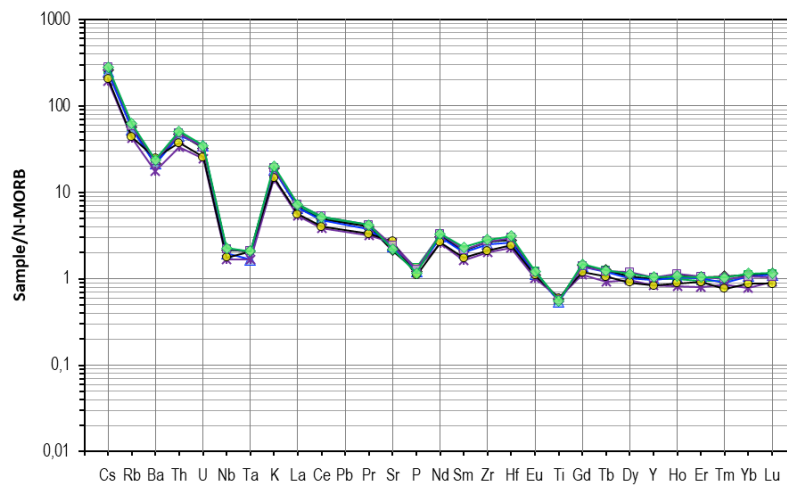


Gambar 3. Diagram Laba-Laba Unsur Tanah Jarang Gunung Kaba yang dinormalisasikan Terhadap *Primitive Mantle* (Sun dan McDonough, 1995)

Unsur jejak dan unsur tanah jarang di Gunung Kaba diplot pada diagram laba-laba yang dinormalisasikan terhadap nilai *N-MORB*. Berdasarkan diagram pada gambar 4, unsur Cs mengalami peningkatan sebesar 100x, unsur Rb, Th, U mengalami peningkatan sebesar 20x, unsur K mengalami peningkatan sebesar 5x, unsur La, Ce, Pr mengalami peningkatan sebesar 2x, unsur Nd, Sm, Zr, Hf mengalami peningkatan sebesar 1x, dan unsur Gd, Tb, Dy, Y, Ho, Er, Tm, Yb, Lu mengalami peningkatan sebesar 1/2x.

Berdasarkan diagram pada gambar 4, unsur Cs, Rb, Th, U, K, Nd, Hf relatif mengalami peningkatan dibanding unsur lain pada diagram tersebut, unsur Ba, Nb, Ta, P, Sm, Ti relatif mengalami penurunan dibanding unsur lain pada diagram tersebut, unsur La, Ce, Pr, Zr, Gd, Tb, Dy, Y, Ho, Er, Tm, Yb, Lu relatif tidak mengalami perubahan dibanding unsur lain pada diagram tersebut.

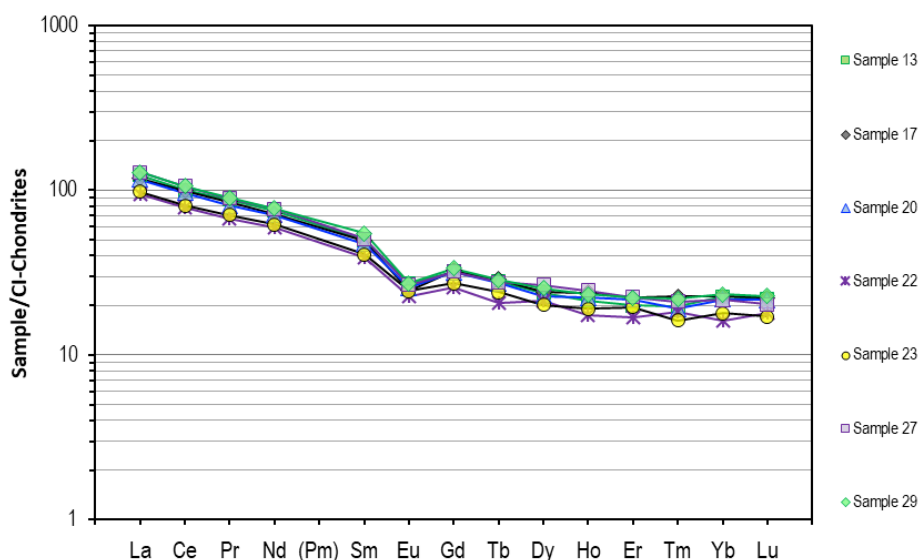
Pola unsur jejak pada gambar 4, diagram laba-laba di Gunung Kaba yang dinormalisasikan terhadap *N-MORB* (Gale dkk., 2013) dicirikan oleh penipisan unsur Ba, Nb, Ta, P, Ti dibandingkan dengan pola *N-MORB* (Wilson, 1989). Kandungan unsur P dan Sm juga lebih rendah daripada pola *island arc* pada umumnya. Konsentrasi unsur Sr, Rb dan Ba lebih rendah dari unsur jejak yang tidak kompatibel jika dibandingkan dengan pola *island arc*. Pada beberapa sampel batuan, semua unsur jejak yang tidak kompatibel dan kompatibel mengalami pengayaan. Pola unsur jejak masih menunjukkan pola *island arc* pada unsur Ta-Nb, tetapi mulai menunjukkan pola yang sama dengan *active continental margin* (ACM) di mana kandungan unsur Zr dan Hf jauh lebih tinggi daripada unsur P. Kesamaan lainnya dengan pola *active continental margin* (ACM) adalah penipisan yang signifikan pada unsur Ti dibandingkan dengan pola *N-MORB*. Jadi secara umum dapat diasumsikan bahwa magma Gunung Kaba berasal dari kondisi transisi yang berubah dari tatanan tektonik *island arc* menjadi *active continental margin* (ACM) (Wilson, 1989).



Gambar 4. Diagram Laba-Laba Unsur Jejak Gunung Kaba yang dinormalisasikan Terhadap *N-MORB* (Gale dkk., 2013)

Unsur tanah jarang di Gunung Kaba diplot pada diagram laba-laba yang dinormalisasikan terhadap nilai *primitive mantle*. Berdasarkan diagram pada gambar 5, unsur La mengalami peningkatan sebesar 50x, unsur Ce, Pr, Nd mengalami peningkatan sebesar 30x, unsur Sm mengalami peningkatan sebesar 20x, unsur Eu mengalami peningkatan sebesar 5x, unsur Gd, Tb, Dy, Ho mengalami peningkatan sebesar 10x dan unsur Er, Tm, Yb, Lu mengalami peningkatan sebesar 8x.

Berdasarkan diagram di atas, unsur La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy relatif mengalami peningkatan dibanding unsur lain pada diagram tersebut, unsur Eu relatif mengalami penurunan dibanding unsur lain pada diagram tersebut, unsur Ho, Er, Tm, Yb, Lu relatif tidak mengalami perubahan dibanding unsur lain pada diagram tersebut.



Gambar 5. Diagram Laba-Laba Unsur Tanah Jarang Gunung Kaba yang dinormalisasikan Terhadap *Chondrites* (Sun dan McDonough, 1995)

Pola unsur tanah jarang pada gambar 5, diagram laba-laba di Gunung Kaba yang dinormalisasikan terhadap *chondrites* (Sun dan McDonough, 1995) menunjukkan pola yang hampir datar dari unsur Ho ke unsur Lu dan sedikit pengayaan unsur tanah jarang yang tidak kompatibel dan penurunan kandungan unsur tanah jarang yang kompatibel. Terdapat penurunan unsur Eu yang mengindikasikan pengaruh kristalisasi plagioklas selama pembentukan magma. Hal ini dipercaya berasal dari sumber magma yang

lebih terfraksinasi (Philpotts dan Ague, 2009). Pola ini menggambarkan tipikal pola *island arc* (Wilson, 1989). Pada sampel batuan lain menunjukkan perbedaan berupa pola yang curam menuju unsur Eu dan kemudian menjadi relatif landai menuju unsur Lu. Pola lain menunjukkan kandungan yang sama pada unsur tanah jarang yang kompatibel dari unsur Eu ke Lu dibandingkan dengan pola *N-MORB*. Komposisi ini dianggap sebagai magma primitif dari *active continental margin* (ACM). Sampel batuan lain menunjukkan lebih banyak pengayaan pada unsur tanah jarang yang tidak kompatibel dan kompatibel berasal dari magma primitif yang lebih terfraksinasi. Pola ini adalah pola yang khas untuk magma yang berasal dari *active continental margin* (ACM) (Wilson, 1989).

4.2. Diskusi

Unsur LILE (*Large Ion Lithophile Elements*) memiliki sifat yang sangat *mobile* dan cenderung mudah terbawa atau terfraksinasi ke dalam fluida seperti air (H₂O). Karena mobilitasnya yang tinggi ini, unsur LILE sering kali menjadi indikator penting dalam proses magmatisme, khususnya di lingkungan tektonik zona subduksi. Pada Gunung Kaba, pengayaan unsur jejak LILE pada magma yang terbentuk disebabkan oleh proses penambahan fluida ke dalam mantel bumi, yang berasal dari kerak samudera yang mengalami subduksi di bawah kerak benua. Fluida ini memainkan peran krusial dalam mengubah komposisi kimia magma yang dihasilkan (Rustioni dkk., 2021).

Fluida yang mengandung H₂O ini berasal dari sedimen laut yang tertimbun di atas kerak samudera. Saat kerak samudera tersebut menunjam ke bawah kerak benua dalam proses subduksi, tekanan dan suhu yang tinggi menyebabkan terjadinya dehidrasi pada sedimen laut tersebut. Proses dehidrasi ini melepaskan air beserta unsur LILE yang terkandung di dalam sedimen, sehingga fluida yang dihasilkan menjadi kaya akan unsur-unsur tersebut. Selanjutnya, fluida yang mengandung H₂O dan unsur LILE ini bergerak ke atas menuju mantel yang berada di atasnya. Karena sifat fluida ini yang mudah bergerak, unsur LILE yang terbawa juga ikut tertransportasi dan mengakibatkan pengayaan unsur tersebut di mantel (Zhao dkk., 2019; Zheng, 2019).

Pengayaan unsur LILE dalam mantel akibat penambahan fluida ini memiliki efek yang sangat penting terhadap proses magmatisme di zona subduksi. Kehadiran fluida yang kaya H₂O dan LILE dapat menurunkan titik lebur mantel secara signifikan. Penurunan titik lebur ini menyebabkan sebagian mantel menjadi lebih mudah meleleh dan menghasilkan magma yang kemudian naik menuju permukaan. Magma ini memiliki komposisi kimia yang khas, berbeda dari magma yang terbentuk di zona non-subduksi, dan seringkali mengandung konsentrasi unsur jejak yang tinggi. Oleh karena itu, magmatisme di zona subduksi seperti yang terjadi di Gunung Kaba sangat dipengaruhi oleh interaksi fluida hasil dehidrasi sedimen kerak samudera dan mantel di sekitarnya. Proses ini tidak hanya penting dalam pembentukan magma, tetapi juga memberikan petunjuk geokimia yang dapat digunakan untuk memahami dinamika tektonik dan evolusi kerak bumi di daerah subduksi. (Li dkk., 2022; Wijaya dan Setijadji, 2022).

Sementara itu, unsur HFSE (*High Field Strength Elements*) memiliki sifat yang berbeda dibandingkan dengan unsur LILE. Unsur HFSE dikenal bersifat *immobile*, artinya unsur-unsur ini tidak mudah berpindah atau terbawa oleh fluida selama proses-proses geologi seperti subduksi atau metasomatisme. Karena sifatnya yang stabil dan kurang reaktif terhadap fluida, kandungan unsur HFSE dalam batuan cenderung relatif konstan dan tidak banyak mengalami perubahan signifikan sejak asalnya di mantel hingga mencapai permukaan bumi. Hal ini membuat unsur HFSE menjadi parameter penting dalam studi geokimia untuk melacak asal-usul magma dan proses pembentukan kerak (Zhong dkk., 2021).

Dalam analisis geokimia, kandungan unsur HFSE dalam sampel batuan sering dinormalisasikan terhadap komposisi *primitive mantle*, yang merupakan representasi mantel bumi awal berdasarkan data referensi yang diusulkan oleh Sun dan McDonough pada tahun 1995. Normalisasi ini dilakukan untuk memudahkan perbandingan dan identifikasi pola distribusi unsur dalam batuan tersebut. Ketika data normalisasi ini dibandingkan antara unsur HFSE dan unsur LILE, terlihat bahwa unsur HFSE cenderung menunjukkan pola yang relatif datar atau stabil, sementara unsur LILE lebih mudah mengalami variasi yang signifikan. Variasi ini terutama terjadi dalam bentuk pengayaan atau penipisan unsur LILE yang

disebabkan oleh mobilitas unsur tersebut dalam fluida yang bergerak di zona subduksi (Dong dkk., 2023).

Akibatnya, ketika melihat pola unsur HFSE yang dinormalisasi terhadap *primitive mantle*, unsur-unsur tersebut seringkali mengalami penipisan relatif dibandingkan dengan unsur LILE. Penipisan ini bukan berarti unsur HFSE hilang, melainkan bahwa unsur LILE mengalami pengayaan yang lebih besar karena mobilitasnya yang tinggi, sehingga perbandingan konsentrasi unsur HFSE terhadap LILE tampak menurun. Fenomena ini memberikan informasi penting tentang proses magmatisme dan interaksi fluida dalam mantel selama subduksi, di mana unsur HFSE bertindak sebagai unsur yang mempertahankan jejak asalnya, sedangkan unsur LILE lebih dipengaruhi oleh proses tambahan dari fluida (Atlas dkk., 2022).

Dengan memahami perbedaan sifat mobilitas antara unsur HFSE dan LILE ini, para ahli geologi dapat menggunakan pola distribusi kedua kelompok unsur tersebut untuk menginterpretasikan proses pembentukan magma, kondisi fisik-kimia di dalam mantel, serta sejarah evolusi tektonik suatu daerah. Misalnya, jika dalam sampel magma ditemukan penipisan unsur HFSE bersamaan dengan pengayaan unsur LILE, hal ini bisa mengindikasikan adanya kontribusi fluida subduksi yang kaya unsur LILE ke dalam mantel sumber magma. Dengan demikian, studi perbandingan unsur HFSE dan LILE sangat penting dalam rekonstruksi proses geodinamika dan sumber magma di lingkungan zona subduksi (Saha dkk., 2019).

Berdasarkan diagram laba-laba unsur tanah jarang Gunung Kaba yang dinormalisasikan terhadap *primitive mantle* (Sun dan McDonough, 1995), terlihat adanya pola konsisten di setiap sampel batuan yang dianalisis. Pola ini menunjukkan keseragaman karakteristik unsur tanah jarang, yang mengindikasikan bahwa sumber magma dari mantel memiliki tipe magma yang serupa di seluruh sampel tersebut. Meskipun demikian, terdapat variasi kecil di mana beberapa sampel menunjukkan magma yang sedikit lebih terkaya unsur tanah jarang dibandingkan sampel lain, meskipun perbedaan ini tidak terlalu signifikan. Variasi tersebut kemungkinan disebabkan oleh proses diferensiasi magma pada kedalaman dangkal di kerak bumi, yang menghasilkan magma yang lebih berevolusi dan memiliki konsentrasi unsur tanah jarang yang lebih tinggi (Rollinson, 1993).

Hasil pola unsur jejak dan unsur tanah jarang yang diperoleh pada penelitian ini memperkuat interpretasi bahwa magmatisme Gunung Kaba memiliki keterkaitan erat dengan dinamika zona subduksi aktif. Perbandingan antara pola unsur LILE yang diperkaya dan pola unsur HFSE yang menipis, serta pola unsur tanah jarang yang menunjukkan adanya anomali unsur Eu negatif, mendukung adanya proses diferensiasi magma yang dipengaruhi oleh fraksinasi mineral plagioklas di kerak benua. Selain itu, keberadaan pola transisi dari pola *island arc* ke pola *active continental margin* memberikan gambaran bahwa evolusi magma Gunung Kaba tidak sepenuhnya merepresentasikan satu tatanan tektonik tunggal, melainkan hasil interaksi yang kompleks antar proses tektonik dan magmatik. Temuan ini memberikan kontribusi penting terhadap pemahaman geodinamika di Sumatra bagian barat, khususnya terkait peran subduksi lempeng Indo-Australia yang menyebabkan variasi karakteristik geokimia magma seiring perkembangan busur magmatik dari zona busur kepulauan menuju zona tepi benua aktif (Hawkesworth dan Kemp 2006).

Implikasi tektonik dan geodinamika dari pola distribusi unsur jejak dan unsur tanah jarang ini sangat penting sebagai data pendukung yang menguatkan keberadaan proses subduksi aktif di wilayah tersebut, yang bertanggung jawab dalam pembentukan busur magmatik seperti Pegunungan Barisan. Selain itu, data ini juga berperan dalam memvalidasi model geodinamika yang sedang berkembang di Sumatra, dengan menunjukkan secara jelas pengaruh penambahan material dari lempeng samudera yang menjunjam ke bawah kerak benua bagian atas. Penambahan material tersebut memberikan kontribusi signifikan terhadap proses evolusi magma di daerah subduksi, serta membantu memahami dinamika dan interaksi antara lempeng tektonik yang membentuk karakteristik magmatisme di kawasan ini.

5. KESIMPULAN

Unsur jejak dan unsur tanah jarang Gunung Kaba menunjukkan pola yang memiliki kesamaan dengan pola dari tatanan tektonik *island arc*. Beberapa unsur jejak dan unsur tanah jarang lain juga menunjukkan pola yang memiliki kesamaan dengan pola dari tatanan tektonik *active continental margin*

(ACM). Hal ini memberikan bukti bahwa bagian barat Pulau Sumatra bukan murni merupakan produk dari tatanan tektonik *island arc* tetapi juga berasal dari tatanan tektonik *active continental margin* (ACM). Pola geokimia unsur jejak dan unsur tanah jarang dari Gunung Kaba menunjukkan ciri khas zona subduksi dengan indikasi transisi dari pola *island arc* menuju pola *active continental margin*. Hal ini menambah pemahaman terhadap kompleksitas evolusi magma di zona subduksi Sumatra berdasarkan data geokimia serta memperkuat model tektonik di Sumatra yang telah ada.

DAFTAR PUSTAKA

- Atlas, Z. D., Germa, A., Boss, B., Meireles, O., Ward, A., & Ryan, J. G. (2022). *Variable element enrichment sources and contributions to volcanic rocks along the Lesser Antilles Island Arc*. *Frontiers in Earth Science*, 10, 782179. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.782179>
- Barber, A. J., Crow, M. J., & Milsom, J. (Eds.). (2005). *Sumatra: geology, resources and tectonic evolution*. Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/gsl.mem.2005.031>
- Dong, L., Yang, Z., & Song, M. (2023). *Prolonged mantle modification beneath the North China craton: Evidence from contrasting Mafic Dykes in Jiaodong Peninsula*. *Journal of Earth Science*, 34(4), 1150-1164. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1737-7>
- Gale, A., Dalton, C. A., Langmuir, C. H., Su, Y., & Schilling, J. G. (2013). *The mean composition of ocean ridge basalts*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(3), 489-518. <https://doi.org/10.1029/2012GC004334>
- Hawkesworth, C. J., & Kemp, A. I. S. (2006). *Evolution of the continental crust*. *Nature*, 443(7113), 811-817. <https://doi.org/10.1038/nature05191>
- Hua, Y., Zhao, D., & Xu, Y. G. (2022). *Azimuthal anisotropy tomography of the Southeast Asia subduction system*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2), e2021JB022854. <https://doi.org/10.1029/2021JB022854>
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). *The seismicity of Indonesia and tectonic implications*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9), e2021GC009812. <https://doi.org/10.1029/2021GC009812>
- Kong, F., Gao, S. S., Liu, K. H., Zhang, J., & Li, J. (2020). *Seismic anisotropy and mantle flow in the Sumatra subduction zone constrained by shear wave splitting and receiver function analyses*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(2), e2019GC008766. <https://doi.org/10.1029/2019GC008766>
- Li, H., Hermann, J., & Zhang, L. (2022). *Melting of subducted slab dictates trace element recycling in global arcs*. *Science Advances*, 8(2), eabh2166. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abh2166>
- Liu, S., Suardi, I., Xu, X., Yang, S., & Tong, P. (2021). *The geometry of the subducted slab beneath Sumatra revealed by regional and teleseismic traveltime tomography*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(1), e2020JB020169. <https://doi.org/10.1029/2020JB020169>
- McDonough, W. F., & Sun, S. S. (1995). *The composition of the Earth*. *Chemical geology*, 120(3-4), 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Philpotts, A. R., & Ague, J. J. (2009). *Principles of igneous and metamorphic petrology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511813429>
- Rollinson, H. R. (1993). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315845548>
- Rustioni, G., Audetat, A., & Keppler, H. (2021). *The composition of subduction zone fluids and the origin of the trace element enrichment in arc magmas*. *Contributions to mineralogy and petrology*, 176(7), 51. <https://doi.org/10.1007/s00410-021-01810-8>
- Saha, A., Mudholkar, A. V., Kamesh Raju, K. A., Doley, B., & Sensarma, S. (2019). *Geochemical characteristics of basalts from Andaman subduction zone: Implications on magma genesis at*

- intraoceanic back-arc spreading centres. Geological Journal*, 54(6), 3489-3508.
<https://doi.org/10.1002/gj.3345>
- Wang, X., Liu, X., Zhao, D., Liu, B., Qiao, Q., Zhao, L., & Wang, X. (2022). *Oceanic plate subduction and continental extrusion in Sumatra: Insight from S-wave anisotropic tomography. Earth and Planetary Science Letters*, 580, 117388. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117388>
- Wijaya, M. E. J., & Setijadji, L. D. (2022). *A Preliminary Volcanological Study of North Eastern Kaba Volcano, Bengkulu Province, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1071, No. 1, p. 012018). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1071/1/012018>
- Wilson, M. (Ed.). (1989). *Igneous petrogenesis*. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6788-4>
- Zhao, L., Guo, F., Fan, W., & Huang, M. (2019). *Roles of subducted pelagic and terrigenous sediments in Early Jurassic mafic magmatism in NE China: Constraints on the architecture of Paleo-Pacific subduction zone. Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(3), 2525-2550. <https://doi.org/10.1029/2018jb016487>
- Zheng, Y. F. (2019). *Subduction zone geochemistry. Geoscience Frontiers*, 10(4), 1223-1254. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.02.003>
- Zhong, R., Zhang, M., Yu, C., & Cui, H. (2021). *The Fluid Mobilities of K and Zr in Subduction Zones: Thermodynamic Constraints. Minerals*, 11(4), 394. <https://doi.org/10.3390/min11040394>
- Zulkarnain, I. (2011). *Geochemical evidence of island-arc origin for Sumatra Island; a new perspective based on volcanic rocks in Lampung Province, Indonesia. Indonesian Journal on Geoscience*, 6(4), 213-225. <https://doi.org/10.17014/ijog.6.4.213-225>
- Zulkarnain, I. (2012). *New Geochemical Data of Island-Arc Origin for Sumatra : The Bengkulu Case. Riset Geologi dan Pertambangan*, 22(1), 11-23. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2012.v22.54>
- Zulkarnain, I. (2014). *Geochemical Evidence of Island-Arc Origin in Volcanic Rocks of Central Sumatera. Riset Geologi dan Pertambangan*, 24(1), 23-41. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2014.v24.79>
- Zulkarnain, I. (2016). *Sumatera is not a Homogeneous Segment of Gondwana Derived Continental Blocks : A New Sight based on Geochemical Signatures of Pasaman Volcanic in West Sumatera. Riset Geologi dan Pertambangan*, 26(1), 1-13. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2016.v26.271>