

## Proses Pembentukan dan Asal Material Formasi Kayasa di Halmahera Berdasarkan Unsur Jejak dan Unsur Tanah Jarang

### *Genesis and Material Source of Kayasa Formation in Halmahera Based on Trace and Rare Earth Elements*

Ronaldo Irzon

<sup>1</sup>Pusat Survei Geologi, Jl. Diponegoro 57 Bandung, Indonesia, 40122

\*E-mail: ronaldoirzon18@gmail.com

Naskah diterima: 28 April 2019, direvisi: 15 Mei 2019, disetujui: 28 Mei 2019

[10.17146/eksplorium.2019.40.1.5445](https://doi.org/10.17146/eksplorium.2019.40.1.5445)

#### ABSTRAK

Kerumitan pembentukan batuan di Pulau Halmahera dipengaruhi konvergensi setidaknya tiga lempeng besar dan posisinya yang berada dalam kolisi aktif dua busur. Formasi Kayasa adalah salah satu dari empat satuan batuan gunung api di Pulau Halmahera. Analisis petrografi, unsur jarang, dan unsur tanah jarang (UTJ) dimanfaatkan untuk mempelajari proses pembentukan maupun asal materi batuan Formasi Kayasa. Mikroskop bipolar dimanfaatkan pada studi petrografi sedangkan *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* digunakan untuk analisis kandungan unsur jejak dan unsur tanah jarang terhadap tujuh sampel segar dan empat batuan teralterasi maupun lapuk pada domain Formasi Kayasa. Seluruh sampel segar diklasifikasikan sebagai andesit-basalt berdasarkan perbandingan komposisi kuarsa, K-felspar, dan plagioklas. Kristalisasi fraksional plagioklas diduga berperan penting dalam proses pembentukan Formasi Kayasa. Batuan segar pada studi ini diperkirakan terkristalisasi pada kondisi oksidatif dalam lingkungan laut sedangkan batuan teralterasi atau lapuk terbentuk pada lingkungan reduktif di atas permukaan laut. Berdasarkan pengamatan megaskopis dan pola diagram laba-laba UTJ, material pembentukan Formasi Kayasa sangat mungkin berasal dari lempeng samudera.

**Kata kunci:** Formasi Kayasa, geokimia, kristalisasi fraksional plagioklas, pola UTJ

#### ABSTRACT

*The complexity of rock formation on Halmahera Island is influenced by convergences of at least three main plates and is located in the active collision of two arcs. The Kayasa Formation is one of four volcanic rock units on Halmahera Island. Petrographic analysis, rare elements, and rare earth elements (REE) are applied in studying the rock emplacement process and the material source of Kayasa Formation. Bipolar microscopy is utilized in petrographic studies while Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry is used for measuring the trace and rare earth elements compositions in seven fresh samples and four altered/weathered rocks in Kayasa Formation's domain. The fresh samples are classified as andesite-basalt based on quartz, K-feldspar, and plagioclase modal composition. Plagioclase fractional crystallization is thought to play an important role in the crystallization of Kayasa Formations. Fresh rocks in this study tend to crystallize under oxidative conditions in the marine environment, whilst altered or weathered ones formed in a reductive environment above sea level. Based on megascopic observations and REE patterns, the material of Kayasa Formation is very likely derived from the ocean plate.*

**Keywords:** Kayasa Formation, geochemistry, plagioclase fractional crystallization, REE pattern

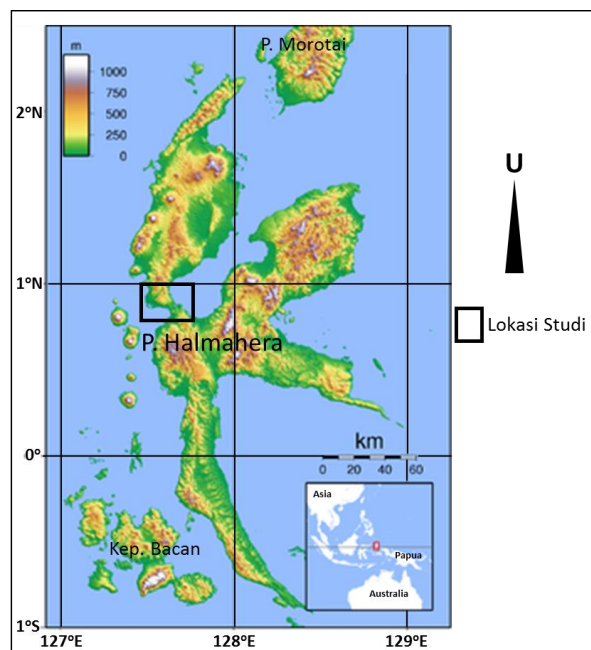
#### PENDAHULUAN

Pulau Halmahera merupakan salah satu pulau di wilayah Kepulauan Maluku dan

berada di bagian timur Indonesia antara 3<sup>0</sup> LU–1<sup>0</sup> LS dan 127<sup>0</sup>–129<sup>0</sup> BT (Gambar 1). Berdasarkan keadaan geologinya pulau ini

dapat dibagi menjadi dua wilayah, yaitu bagian barat dan bagian timur. Busur vulkanik di bagian barat Halmahera merupakan rangkaian pegunungan yang terbentang dari Pulau Morotai, bagian utara pulau ini, Pulau Ternate, Pulau Tidore, hingga Pulau Bacan. Pada sisi lain, batuan di bagian timur Halmahera membentuk busur yang memanjang ke Pulau Gebe hingga ke bagian utara kepala burung Papua. Batuan vulkanik dan vulkaniklastik merupakan alas dari bagian barat Pulau Halmahera sedangkan batuan ultramafik berikut sebagian kecil batuan metamorfik berskala rendah menjadi *basement* pada bagian timur.

Kerumitan skema tektonik di Pulau Halmahera disebabkan oleh konvergensi tiga lempeng yang mempengaruhi pembentukan batuan di Halmahera, yaitu: Lempeng Eurasia, Lempeng Australia, dan Lempeng Samudera Filipina [1]. Pulau Halmahera diperkirakan berada di ujung selatan dari jalur subduksi Lempeng Samudera Filipina ke bawah Lempeng Eurasia [2,3]. Sesar Sorong yang berada di selatan Pulau Halmahera berbatasan langsung dengan Lempeng Australia. Lempeng Minadanao Timur berada dekat dengan Pulau Halmahera namun tidak luas dan saat ini cenderung tak bergerak relatif terhadap Lempeng Eurasia maupun Lempeng Samudera Filipina sehingga pengaruhnya sering diabaikan dalam interpretasi tektonik. Kemudian, Halmahera juga merupakan satu-satunya lokasi kolisi aktif antara dua busur, yaitu Busur Maluku-Sangihe dan Busur Laut Halmahera [2].



**Gambar 1.** Peta Pulau Halmahera yang berada di Kepulauan Maluku. Wilayah studi cukup bergelombang dengan ketinggian hingga 500 m dpl.

## GEOLOGI DAERAH STUDI

Lokasi pengambilan sampel batuan gunung api pada studi ini berada di selatan  $1^{\circ}$  Lintang Utara pada Peta Geologi Lembar Ternate skala 1:250.000 [4]. Terdapat satuan-satuan batuan beku intrusi, batuan gunung api, dan sedimen pada peta geologi tersebut. Satuan batuan intrusi terdiri dari Komplek Batuan Ultrabasa, Gabro, dan Diorit yang masing-masing diperkirakan membeku pada masa sebelum Kapur, Kapur, dan Oligosen secara berurutan. Formasi Dodaga (Kapur), Batugamping (Paleosen–Eosen), Konglomerat (Paleosen–Eosen), Formasi Dorosagu (Paleosen–Eosen), Formasi Tutuli (Oligosen–Miosen), Konglomerat (Miosen), Formasi Titeng (Miosen–Pliosen), Formasi Weda (Miosen–Pliosen), Batugamping terumbu (Holosen), dan Aluvium (Holosen) adalah urutan satuan-satuan batuan sedimen dari tua ke muda. Namun demikian, hanya Formasi Weda yang berada di sekitar area studi. Batuan gunung api di dekat lokasi studi

terdiri dari empat satuan batuan, yaitu Formasi Bacan yang berumur Oligosen–Miosen, Formasi Kayasa yang tererupsi pada masa Plistosen, serta batuan gunung api Holosen dan tufa berumur Holosen. Batuan gunung api Formasi Kayasa yang terdiri dari breksi, lava, dan tufa bersusunan andesit dan basal merupakan topik pada studi ini. Pentarikan metode K-Ar menghasilkan data bahwa Formasi Kayasa terkristalisasi pada rentang 3–2 jtl (Pliosen) [5,6].

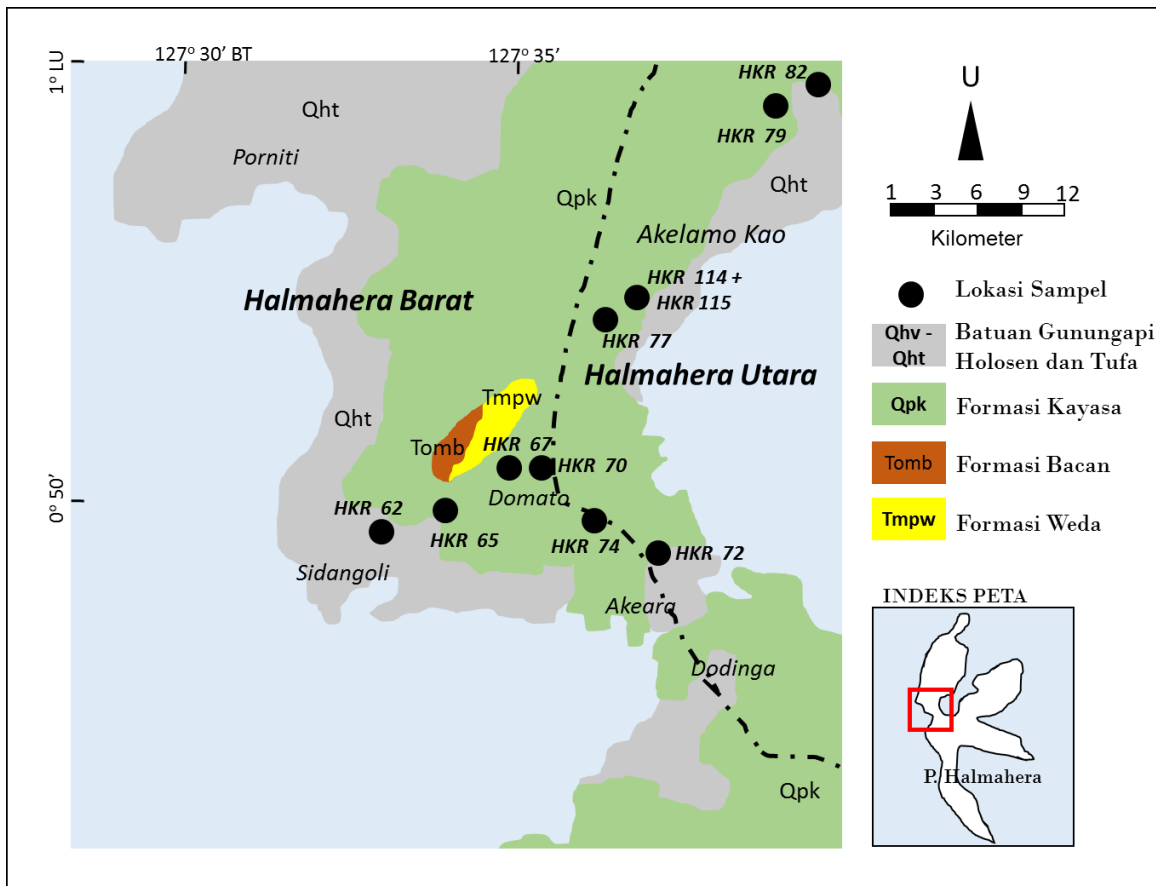
## **METODOLOGI**

Penelitian dilaksanakan dengan pengumpulan data megaskopis Formasi Kayasa di lapangan mengenai keadaan singkapan, keterdapatannya alterasi maupun pelapukan, dan deskripsi sampel batuan. Sampel yang telah terkumpul kemudian dianalisis kandungan unsur jejak dan unsur tanah jarang menggunakan perangkat *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS) di Laboratorium Pusat Survei Geologi.

### ***Keadaan Singkapan Batuan***

Sebelas sampel batuan gunung api pada sepuluh stasiun pengamatan dari domain Formasi Kayasa di bagian tengah Pulau Halmahera telah diidentifikasi dan dianalisis. Secara administratif, lima sampel berada di Kabupaten Halmahera Barat (HKR 62, HKR 65, HKR 67, HKR 70, dan HKR 74) dan enam sampel di Kabupaten Halmahera Utara

(HKR 72, HKR 77, HKR 79, HKR 82, HKR 114, dan HKR 115). Sebaran lokasi pengambilan sampel diperhatikan pada Gambar 2. Tujuh sampel dapat dikategorikan sebagai batuan gunung api segar berdasarkan pengamatan megaskopis. HKR 62 teridentifikasi sebagai batuan gunung api keabuan, berbutir halus, dan masif. Batugamping dapat diamati menumpang pada bagian atas batuan gunung api yang berada di Desa Sidangoli, Kecamatan Jailolo Selatan ini. HKR 65 terdapat di perbatasan Desa Sidangoli dan Domato pada kaki Gunung Topodali. Batuan gunung api pada lokasi tersebut berupa bongkah-bongkah berukuran 1,5–2,5 m berwarna abu-abu, porfiritik, kompak, dan masif. Dua singkapan terletak di Desa Domato (HKR 67 dan HKR 70). HKR 67 adalah breksi batuan gunung api berukuran hingga 70 cm dengan masa dasar tuf berukuran halus–sedang sedangkan kenampakan megaskopis HKR 70 menunjukkan tanda-tanda pelapukan akibat warna kecoklatan pada rekahan-rekahnannya. Rekahan-rekahan tanpa adanya isian larutan hidrotermal berarah N 345<sup>0</sup> E/10<sup>0</sup> dapat diperhatikan pada singkapan batuan gunung api, porfiritik, kompak, dan masif di wilayah pebukitan di Akeara (HKR 74). Situasi singkapan dengan kekar lembar juga dapat dijumpai di bagian utara Akelamo Kao pada lokasi HKR 77 dan HKR 79.

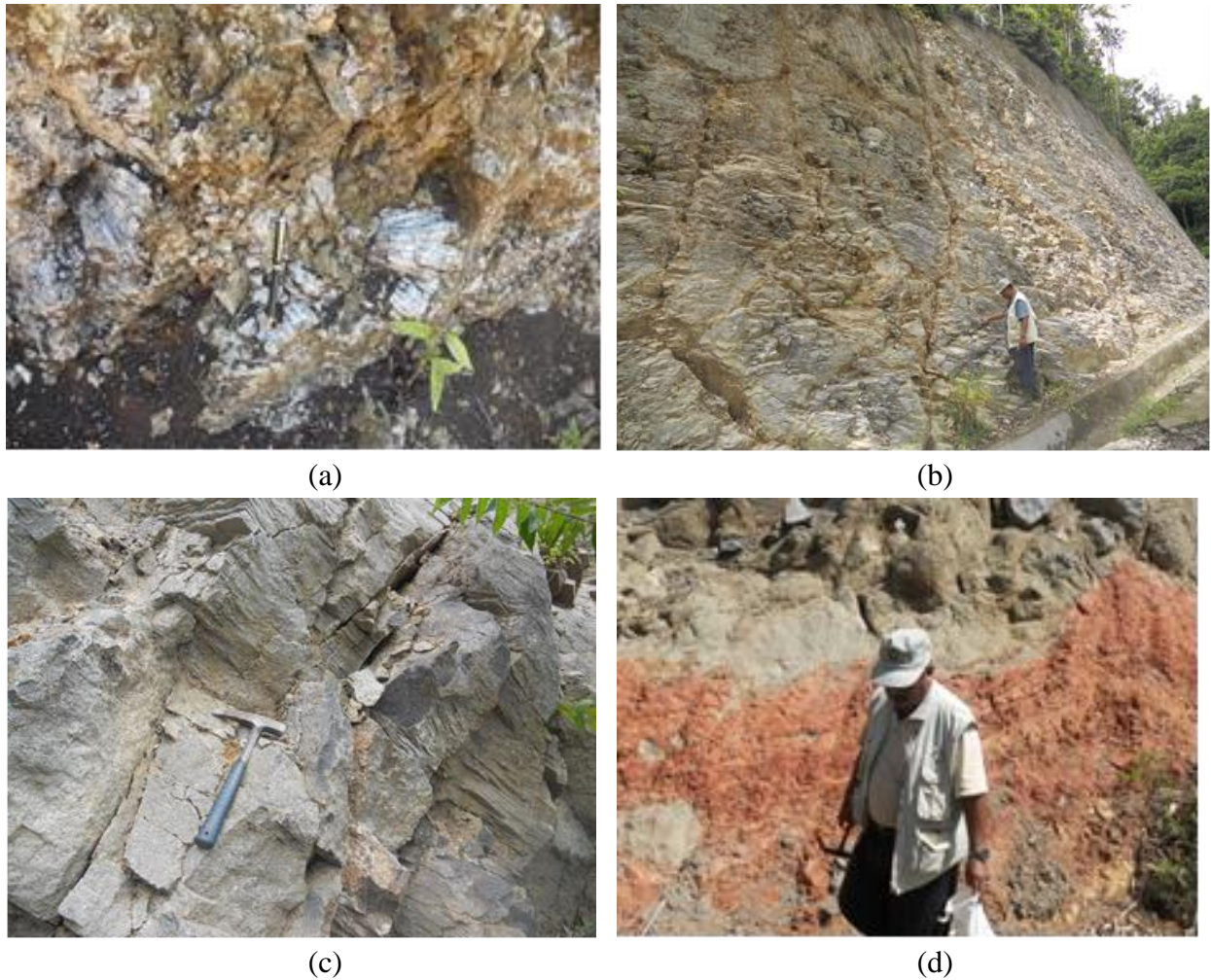


**Gambar 2.** Lokasi pengambilan sampel pada domain Formasi Kayasa di bagian tengah Pulau Halmahera (modifikasi dari [4]).

Identifikasi singkapan batuan gunung api dengan banyak lubang (*vuggy*) di bagian timur Akeara (HKR 72) terbantu oleh proyek pembangunan jalan di sana. Singkapan batuan gunung api abu-abu berkekar lembar berarah N 275<sup>0</sup> E/30<sup>0</sup> dapat dijumpai pada lokasi HKR 82 di bagian utara Akelamo Kao dan berjarak sekitar 2 km di timur HKR 79. Sampel pada lokasi HKR 82 ini cenderung sudah lapuk berdasarkan pada warnanya yang kecoklatan akibat oksida besi. Singkapan batuan gunung api dengan kekar lembar juga dapat dijumpai di wilayah selatan Akelamo Kao (HKR 114). Namun demikian dapat diperhatikan adanya beberapa bagian batuan yang teralterasi akibat intrusi pada lokasi ini (HKR 115). Beberapa kondisi megaskopis stasiun pengamatan dilihat pada Gambar 3.

### **Analisis Laboratorium**

Delapan sampel telah dianalisis menggunakan mikroskop polarisasi untuk mengetahui mineral pembentuk batuan berikut perbandingan jumlahnya sehingga dapat menentukan nama batuan. Kelimpahan unsur jejak dan unsur tanah jarang diukur dengan ICP-MS sebagai perangkat yang memiliki ketelitian dan limit deteksi sangat baik hingga level *part per billion*. Preparasi dan analisis dilaksanakan di Laboratorium Pusat Survei Geologi, Bandung. Preparasi analisis mikroskopis dimulai dengan memilih dan menandai bagian dari sampel batuan gunung api untuk dibuatkan sayatan tipis. Mikroskop polasisasi dimanfaatkan untuk mengetahui komposisi modal dari sampel yang diperiksa.



**Gambar 3.** Kondisi megaskopis beberapa stasiun pengamatan: a) batugamping terumbu dengan kontak pada intrusi Formasi Kayasa di Sidangoli (HKR 62); b) rekahan-rekahan pada lokasi HKR 70 tampak berwarna kecoklatan akibat pelapukan; c) batuan gunung api abu-abu, porfiritik, berkekar lembar 10–20 cm HKR 77 dengan arah N 275° E/50°; dan d) bagian teralterasi dan lapuk di lokasi HKR 115.

Bagian lapuk pada analisis sampel segar harus dibuang terlebih dahulu sebelum dicuci dan dikeringkan. Pada sisi lain, sampel yang dianggap lapuk langsung dijemur di bawah panas matahari selama setidaknya satu hari. Sampel kemudian dihancurkan dan digerus hingga mendapatkan ukuran butir setidaknya 200 mesh. Sekitar 0,1 gr sampel hasil penggerusan didestruksi dengan tiga jenis asam, yaitu HNO<sub>3</sub>, HF, dan HClO<sub>4</sub> sehingga memperoleh larutan induk. Selain sampel batuan, dua jenis *certified reference material*, yaitu AGV-2 dan GBW 07113 dipreparasi sesuai dengan tahapan pengerjaan pada

sampel dan dianalisis untuk menjaga akurasi hasil pengukuran. Detil preparasi, penataan perangkat, dan proses pengukuran dalam studi ini berdasarkan pada beberapa studi sebelumnya [7–9].

## HASIL ANALISIS

### *Analisis Mikroskopis*

Studi mikroskopis telah dilaksanakan pada masing-masing enam dan dua buah sampel yang diperkirakan segar dan terkena alterasi atau pelapukan berdasarkan kenampakan di lapangan secara berurutan. Pada kategori batuan segar, fenokris terdiri

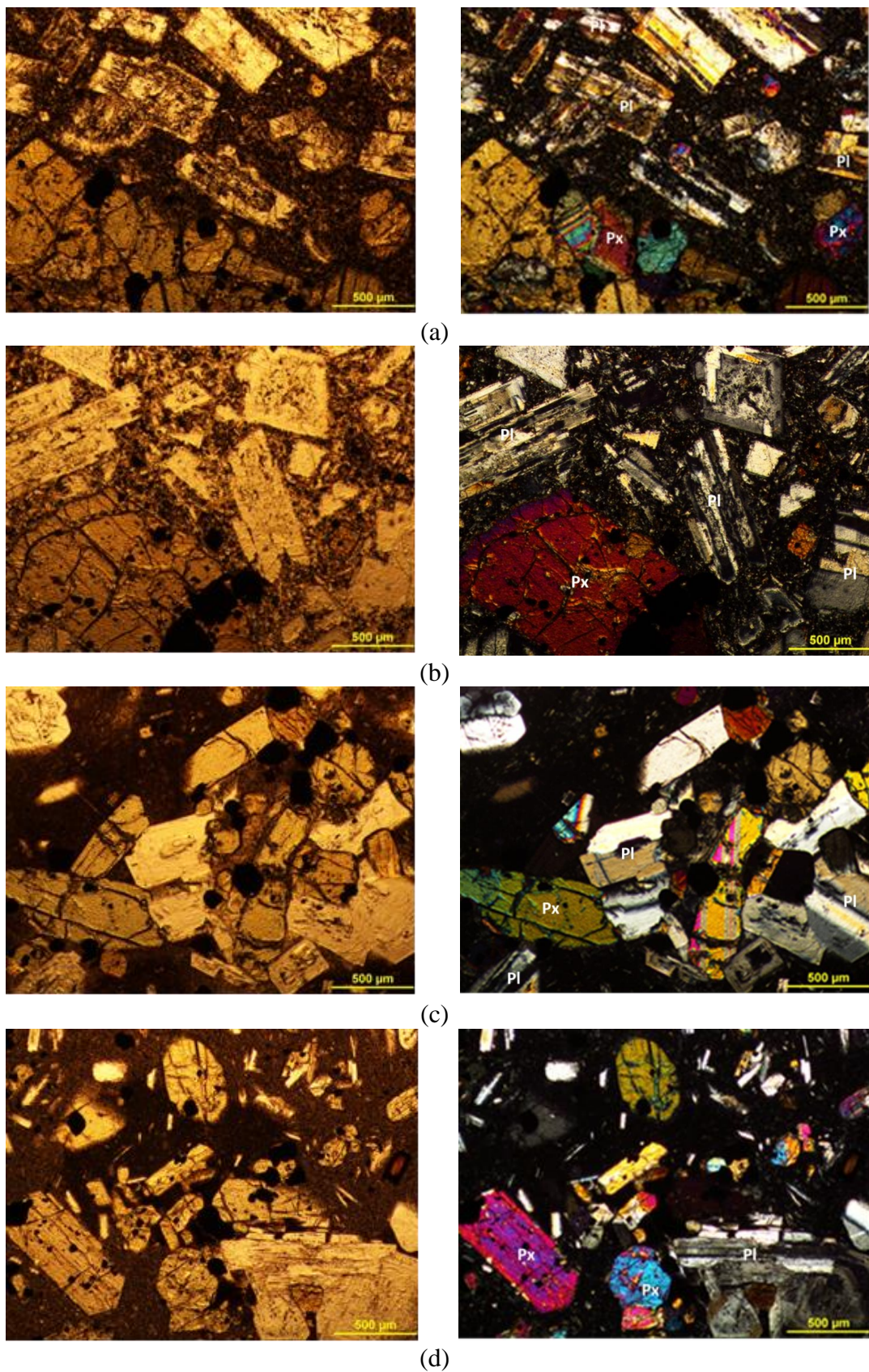
dari plagioklas, K-felspar, dan kuarsa dengan kisaran komposisi 31–48%, 7–9%, dan 5–7% secara berurutan. Secara umum sampel menunjukkan tekstur hipokristalin, porfiritik, dan cukup segar. K-feldspar berbentuk subhedral sedangkan kuarsa tampil sebagai kristal subhedral hingga anhedral. Sebagian kecil plagioklas pada beberapa sampel tampak telah berubah menjadi serisit hingga mencapai 21%. Tiga sampel dari kelompok ini (HKR 74, HKR 77, dan HKR 79) tampak memiliki kandungan piroksen dengan jenis orthopiroksen maupun klinopiroksen sekitar 4% hingga 5%. Sedikit mineral aksesoris berupa zirkon dan apatit hanya dapat dijumpai pada HKR 67. Masa dasar sampel ini terdiri dari mikrolit feldspar, mineral mafik, dan gelas.

Dua sampel dari kelompok teralterasi/lapuk (HKR 72 dan HKR 82) juga menunjukkan urutan plagioklas, K-felspar,

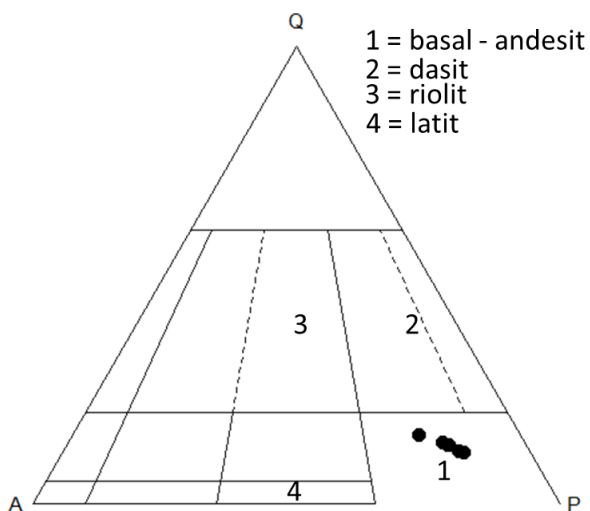
dan kuarsa sebagai mineral utama dengan kisaran kandungan 31–39%, 6–7%, dan 5–6% secara berurutan. Piroksen masih dapat diamati pada sayatan tipis HKR 82, namun tidak pada HKR 72. Meski tidak signifikan, jumlah modal serisit tampak meningkat pada rentang 9–10% daripada kelompok batuan segar ( $\leq 2\%$ ). Sejumlah minor zeolit sebagai penanda pelapukan [10,11] dapat diamati pada HKR 72. Zirkon terdeteksi sebagai mineral aksesoris pada HKR 82. Masa dasar kelompok sampel ini juga terdiri dari mikrolit feldspar, mineral mafik, dan gelas. Komposisi modal hasil analisis mikroskopis terangkum pada Tabel 1. Beberapa mikrofoto pada studi ini dapat diamati pada Gambar 4. Menggunakan diagram segitiga kuarsa-plagioklas-K-felspar, seluruh sampel segar pada studi ini diklasifikasikan sebagai basal-andesit (Gambar 5).

**Tabel 1.** Komposisi modal analisis mikroskopis batuan Formasi Kayasa. \* = batuan berubah atau lapuk, Pl = plagioklas, Kfs = K-felspar, Qz = kuarsa, Md = masa dasar, Zrn = zirkon, Apt = apatit, Sr = serisit, Zeo = zeolit.

Sampel	Fenokris				Md	Mineral Aksesoris		Mineral Ubahan	
	Pl	Kfs	Qz	Px		Zrn	Apt	Sr	Zeo
HKR 62	39	8	7		45			1	
HKR 65	48	8	7		36			1	
HKR 67	40	8	7	4	44	0,5	0,5		
HKR 74	39	7	6	5	43				
HKR 77	37	8	7	5	43				
HKR 79	31	9	7	4	47			2	
HKR 72*	39	6	5		40			9	1
HKR 82*	31	7	6	2	43	1		10	



**Gambar 4.** Mikrofoto beberapa sampel dari Formasi Kayasa dengan lensa nikol sejajar (kiri) dan bersilang (kanan): a) fenokris piroksen dan plagioklas dengan kembar albit pada HKR 62; b) Sebagian plagioklas tampak telah berubah menjadi serisit pada HKR 65; c) sampel dari Domato (HKR 67) terutama terdiri dari plagioklas; dan d) piroksen masih dapat dijumpai pada HKR 82.



**Gambar 5.** Seluruh enam sampel batuan segar dari Formasi Kayasa pada studi ini dikategorikan sebagai basal-andesit berdasarkan diagram QAP.

### **Komposisi Unsur Jejak dan Unsur Tanah Jarang**

Unsur Sr dan Ba adalah unsur jejak dengan kelimpahan terbesar, yaitu dengan rerata 388 ppm dan 345 ppm secara berurutan. Pada sisi lain, rerata komposisi unsur jejak lain, yaitu Sc (25 ppm), Ga (17 ppm), Nb (4,6 ppm), Cs (1,4 ppm), Ta (0,48 ppm), dan Tl (0,33 ppm) jauh lebih kecil dari 100 ppm. Rentang jumlah unsur tanah jarang (UTJ) pada seluruh sampel berada pada kadar rendah-menengah, yaitu 49,36 ppm (HKR 114) hingga 137 ppm (HKR 67). Secara umum, UTJ terbagi dalam dua kelompok berdasarkan berat atomnya lanthanum hingga europium sebagai UTJ-ringan (nomor atom 57 hingga 63) dan gadolinium hingga lutetium sebagai UTJ-berat (nomor atom 64 hingga 71). Walaupun bernomor atom kecil (nomor atom 39), *yttrium* justru digolongkan dalam UTJ-berat oleh beberapa penelitian terdahulu akibat kerimpitan sifat kimia dan fisiknya [12,13]. Berdasarkan kosep tersebut maka rasio rerata UTJ-ringan terhadap rerata UTJ-berat adalah 71,35 : 46,15. Cerium, Neodymium, dan lanthanum adalah tiga UTJ

dengan rerata komposisi > 10 ppm, yaitu 49 ppm, 29 ppm, dan 22 ppm secara berurutan. Nominal anomali Ce ( $Ce/Ce^*$ ) dan anomali Eu ( $Eu/Eu^*$ ) dihitung berdasarkan pada persamaan (1) dan persamaan (2). Besaran *chondrite* [14] digunakan untuk normalisasi seluruh komponen UTJ. Kelimpahan unsur jejak maupun unsur tanah jarang pada penelitian ini terlampir pada Tabel 2.

$$Ce/Ce^* = \frac{Ce_N^2}{La_N \times Pr_N} \quad (1)$$

$$Eu/Eu^* = \frac{Eu_N^2}{Sm_N \times Gd_N} \quad (2)$$

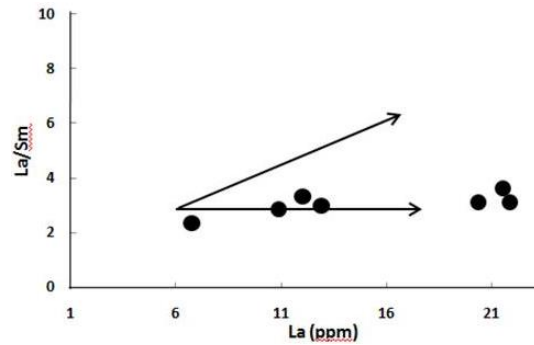
## **PEMBAHASAN**

### **Rasio Unsur Kimia**

Pembentukan batuan akibat evolusi magma (proses difenrensiasi) terdiri dari beberapa mekanisme, diantaranya pelelehan parsial (*partial melting*), kristalisasi fraksional (*fractional crystallization*), pencampuran magma (*magma mixing*), dan asimililasi (*assimilation*). Ketika temperatur suatu magma mulai meninggi, mineral yang memiliki temperatur pembentukan paling rendah akan ikut melebur terlebih dahulu bersama magma tersebut dalam proses pelelehan parsial. Sebaliknya, mineral tertentu dengan temperatur pembentukan tertinggi justru mulai berpisah dari magma induk saat magma mendingin pada peristiwa kristalisasi fraksionasi. Magma yang bersifat lebih basa akan mendingin dan terkristalisasi sedangkan yang bersifat asam akan sangat terpanaskan (*superheated*) pada skema pencampuran magma. Batuan samping bereaksi dan bergabung dengan magma dalam proses asimilasi. Kecenderungan rasio La/Sm terhadap perubahan kelimpahan La adalah salah satu pendekatan geokimia terutama untuk membedakan skema pelelehan parsial dan kristalisasi fraksionasi yang bertolak belakang berdasarkan kondisi temperatur



dalam pembentukan batuan [15,16]. Rasio La/Sm tidak banyak berubah terhadap kenaikan kelimpahan La (Gambar 6) yang menunjukkan bahwa pembentukan Formasi Kayasa lebih banyak dikontrol oleh kristalisasi fraksional.

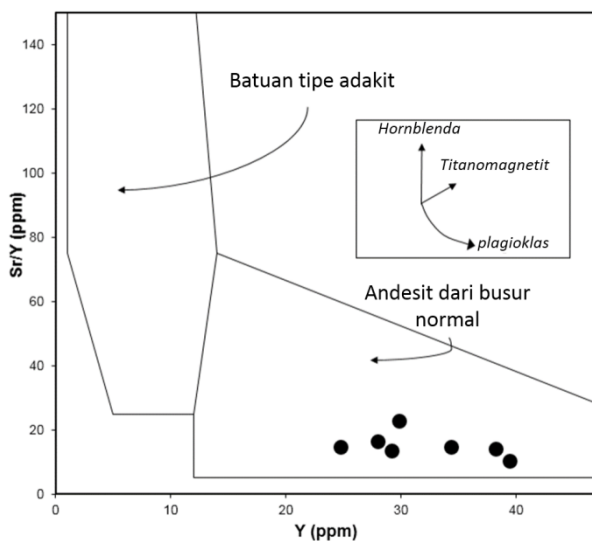


**Gambar 6.** Kristalisasi fraksional lebih mempengaruhi proses pembentukan Formasi Kayasa daripada pelelehan parsial.

**Tabel 2.** Komposisi unsur jejak maupun unsur tanah jarang seluruh sampel dari wilayah Formasi Kayasa.

Sampel	HKR 62	HKR 65	HKR 67	HKR 74	HKR 77	HKR 79	HKR 114	HKR 70*	HKR 72*	HKR 82*	HKR 115*
<i>UnsurJejak</i>											
Sr	457,49	395,42	408,76	499,94	529,62	361,71	471,84	232,44	433,17	238,94	245,91
Cs	0,77	1,07	2,23	1,59	1,77	2,00	0,88	1,57	1,17	1,42	0,91
Ba	203,18	214,36	441,49	361,88	378,75	457,92	167,23	551,08	403,84	310,56	309,35
Nb	1,98	2,41	4,81	4,48	7,50	1,94	1,58	14,51	3,59	2,85	4,95
Ta	0,10	0,17	0,43	0,51	0,71	0,09	0,19	0,18	0,29	0,22	2,37
Ga	16,35	16,30	17,66	16,25	17,57	13,73	16,76	14,70	15,61	21,84	24,14
Sc	26,12	26,09	23,03	25,61	27,12	22,51	37,38	9,60	22,36	27,23	35,06
Tl	0,09	0,06	1,03	0,22	0,21	0,20	0,05	0,47	0,53	0,31	0,53
<i>Unsur Tanah Jarang</i>											
La	12,03	10,90	21,88	20,36	21,52	12,91	6,75	12,82	16,24	8,14	9,96
Ce	25,45	20,53	48,80	31,64	36,50	20,97	15,79	28,02	43,93	25,72	37,20
Pr	3,51	3,42	7,12	6,59	6,18	3,99	2,24	3,45	5,64	2,70	2,77
Nd	14,43	14,40	29,36	27,06	24,93	16,94	10,12	13,03	26,00	11,14	11,26
Sm	3,62	3,78	6,99	6,53	5,93	4,30	2,84	3,07	7,33	3,06	3,03
Eu	0,83	0,86	1,35	1,40	1,26	1,04	0,71	0,79	1,73	0,72	0,66
Gd	2,93	3,03	5,24	4,40	4,43	3,07	2,21	2,33	5,89	2,35	2,55
Tb	0,55	0,60	0,95	0,85	0,86	0,59	0,45	0,45	1,13	0,45	0,46
Dy	3,86	4,30	6,28	5,59	5,85	3,98	3,18	3,20	8,18	3,22	3,28
Ho	0,86	0,95	1,34	1,16	1,25	0,84	0,70	0,73	1,89	0,73	0,76
Er	2,44	2,62	3,63	3,08	3,38	2,28	1,94	2,18	5,57	2,19	2,30
Tm	0,36	0,39	0,55	0,46	0,51	0,35	0,28	0,35	0,87	0,35	0,39
Yb	2,42	2,58	3,05	3,00	3,30	2,32	1,87	2,43	5,86	2,49	2,89
Lu	0,37	0,40	0,53	0,46	0,50	0,35	0,28	0,38	0,98	0,39	0,47
Y	27,99	29,23	39,47	34,36	38,22	24,76	20,92	22,76	45,41	21,03	21,84
Tot UTJ	73,66	68,76	137,07	112,58	116,40	73,93	49,36	73,23	131,24	63,65	77,98
Ce/Ce*	0,89	0,65	0,89	0,43	0,58	0,49	0,96	1,03	1,22	1,74	2,91
Eu/Eu*	0,61	0,60	0,47	0,64	0,56	0,77	0,75	0,82	0,65	0,67	0,53
Sr/Y	16,34	13,53	10,36	14,55	13,86	14,61	22,55	10,21	9,54	11,36	11,26

Penelitian mengenai batuan adakit berguna untuk mempelajari evolusi lempeng benua. Istilah adakit berasal dari batuan yang ditemukan di Pulau Adak [17]. Selain itu, penelitian terhadap keberadaan batuan adakit semakin meningkat akibat korelasi terhadap deposit Au-Cu berskala besar [18,19]. Intrusi di Sintang [12] dan metatonalit di Pegunungan Schwaner [20] merupakan beberapa batuan tipe adakit yang telah teridentifikasi dan digunakan untuk memperjelas kondisi tektonik di wilayah tersebut. Batuan gunung api pada Formasi Kayasa terbentuk dari hasil evolusi busur vulkanik normal dan bukan hasil pelelehan parsial langsung dari lempeng yang mensubduksi [17,20] berdasarkan penggunaan diagram rasio Sr/Y terhadap komposisi Y (Gambar 7).



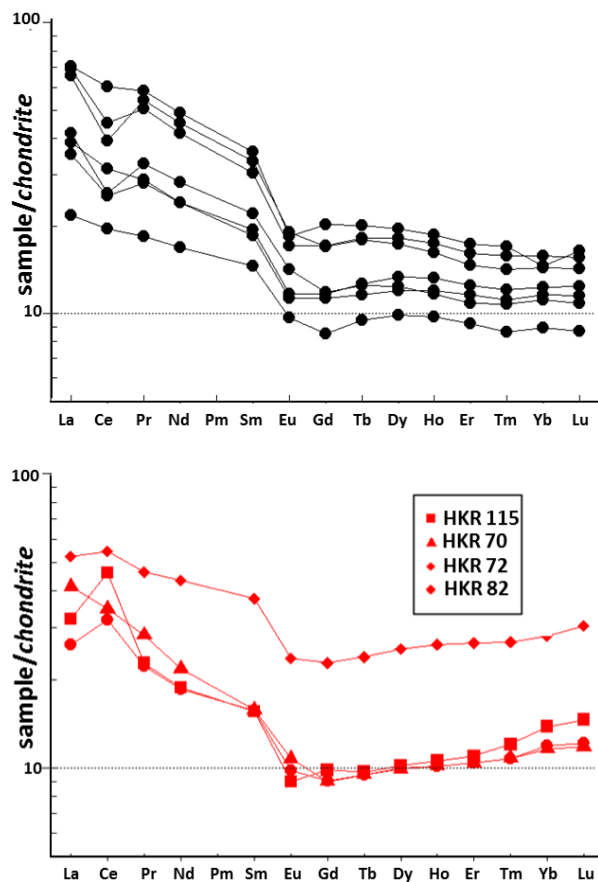
**Gambar 7.** Batuan gunung api Formasi Kayasa menunjukkan tipikal batuan yang terbentuk dari hasil evolusi magma normal dan cenderung dikontrol oleh kristalisasi plagioklas.

Ketiadaan deposit Au-Cu ekonomis pada wilayah Formasi Kayasa juga dapat dikorelasikan dengan afiliasinya terhadap batuan non-adakit. Kemudian, korelasi diagram La vs La/Sm (Gambar 6) dengan Y vs Sr/Y (Gambar 7) menunjukkan bahwa

kristalisasi fraksional plagioklas berperan penting dalam pembentukan batuan yang diteliti.

### ***Pola Diagram Laba-laba UTJ***

Walaupun tak sesering diagram Harker, pola diagram hasil normalisasi UTJ juga dapat dimanfaatkan dalam menjelaskan korelasi antar sampel, pembeda kelompok sampel, proses pembentukan batuan, dan kondisi alterasi/pelapukan [7,8,18,19,21]. Oleh karena itu, kandungan UTJ batuan dari Formasi Kayasa pada studi ini dinormalisasi terhadap kadar *chondrite* [22] untuk menghilangkan *Oddo-Harkins effect*. Terdapat pola yang berbeda antara batuan segar dari Formasi Kayasa dan batuan teralterasi/lapuknya. Penunjaman cukup tajam pada UTJ-ringan dan diikuti kecenderungan lebih mendatar di UTJ-berat terdeteksi pada kelompok batuan segar (Gambar 8a). Sedikit pengayaan dalam kisaran UTJ-berat justru terlihat pada batuan teralterasi/lapuk (Gambar 8b). Kelompok UTJ-berat disimpulkan terakomodasi pada beberapa mineral, yaitu: zirkon, garnet, dan piroksen terutama jenis orto [23–27]. Oleh sebab itu, keberadaan mineral zirkon pada HKR 82 dapat diasumsikan sebagai penyebab pola UTJ-berat yang cenderung menaik. Meski memerlukan analisis mikroskopis yang lebih mendetil, ortopiroksen diduga lebih melimpah dibanding klinopiroksen pada kelompok batuan teralterasi/lapuk terkait pola UTJ-beratnya.



**Gambar 8.** Diagram normalisasi komposisi UTJ sampel yang dianalisis terhadap nilai *chondrite* [22]: a) kelompok batuan gunung api segar; dan b) beberapa sampel yang diduga telah mengalami alterasi maupun pelapukan. Perbedaan dua kelompok ini tampak pada kecenderungan UTJ-berat dan jenis anomali Ce.

Anomali Eu negatif dengan kisaran  $Eu/Eu^*$  antara 0,46 hingga 0,81 dapat diamati pada kedua kelompok batuan yang diartikan sebagai jumlah plagioklas yang sedikit pada magma sumber [24], kontaminasi kerak [28], maupun terjadinya pemisahan plagioklas dari magma selama proses differensiasi [7,21]. Mengacu kepada jumlah modal plagioklas  $\geq 31\%$  maka opsi terakhir tampak lebih memungkinkan. Fakta ini turut memperkuat penjelasan sebelumnya mengenai kristalisasi fraksional plagioklas berdasarkan rasio unsur kimia (Gambar 6 dan Gambar 7). Namun demikian, anomali negatif Ce (0,43–0,89) terindikasi pada seluruh batuan segar

sedangkan batuan teralterasi atau lapuk justru cenderung menampilkan anomali positif Ce (0,96–2,91). Penelitian terdahulu menyebutkan bahwa anomali negatif Ce dapat disebabkan oleh pengaruh air laut atau lingkungan oksidatif pada proses kristalisasinya [8,21,29–32]. Dengan demikian, kelompok batuan segar diperkirakan terbentuk pada lingkungan oksidatif dan dipengaruhi oleh air laut sedangkan batuan kelompok lain terbentuk pada kondisi non-oksidatif tanpa adanya pengaruh air laut.

## KESIMPULAN

Seluruh batuan gunung api segar Formasi Kayasa diklasifikasikan sebagai andesit-basalt berdasarkan perbandingan modal kuarsa-K-felspar-plagioklas. Kristalisasi fraksional lebih berpengaruh daripada pelelehan parsial pada pembentukan batuan gunung api Formasi Kayasa di bagian tengah Pulau Halmahera. Plagioklas diduga terkristalisasi selama proses differensiasi batuan berdasarkan pada diagram Sr/Y versus Y dan keterdapatannya anomali Eu negatif pada diagram hasil normalisasi UTJ. Sampel segar pada studi ini diperkirakan terkristalisasi pada lingkungan oksidatif dalam lingkungan laut sedangkan batuan teralterasi atau lapuk terbentuk pada situasi cenderung non-oksidatif tanpa keterlibatan air laut. Berdasarkan pengamatan megaskopis dan pola diagram laba-laba UTJ, material pembentukan Formasi Kayasa berasal dari lempeng samudera.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat diselesaikan melalui izin penggunaan data dari Kepala Pusat Survei Geologi. Bapak Harry Utoyo dan Ibu Imtihanah telah berperan besar dalam bimbingannya mengenai geologi Maluku,

penggunaan data petrografi, dan korelasi petrografi dan geokimia. Kami berterima kasih kepada Bapak Heri Hermiyanto Zajuli atas saran dan bimbingannya. Ibu Indah dan Ibu Citra telah banyak membantu dalam menjaga akurasi data analisis. Penulis juga berterimakasih kepada Bapak Professor Ildrem Syafri dari Universitas Padjadjaran mengenai perkembangan aplikasi geokimia

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Hall, M. G. Audley-Charles, F. T. Banner, S. Hidayat, and S. L. Tobing, "Late Palaeogene–Quaternary geology of Halmahera, Eastern Indonesia: initiation of a volcanic island arc," *J. Geol. Soc. London.*, vol. 145, no. 4, pp. 577–590, 1988.
- [2] R. Hall, "Plate boundary evolution in the Halmahera region, Indonesia," *Tectonophysics*, vol. 144, no. 4, pp. 337–352, 1987.
- [3] A. S. Hakim and R. Hall, "Tertiary volcanic rocks from the Halmahera Arc, eastern Indonesia," *J. Southeast Asian Earth Sci.*, vol. 6, no. 3–4, pp. 271–287, 1991.
- [4] T. Apandi and D. Sudana, *Peta Geologi Lembar Ternate, Maluku Utara*, Bandung: Pusat Pengembangan dan Penelitian Geologi, 1980
- [5] R. Hall, J. R. Ali, and C. D. Anderson, "Cenozoic motion of the Philippine Sea plate: palaeomagnetic evidence from eastern Indonesia," *Tectonics*, vol. 14, no. 5, pp. 1117–1132, 1995.
- [6] S. Baker and J. Malaihollo, "Dating of Neogene igneous rocks in the Halmahera region: arc initiation and development," *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, vol. 106, no. 1, pp. 499–509, 1996.
- [7] R. Irzon and B. Abdullah, "Geochemistry of Ophiolite Complex in North Konawe, Southeast Sulawesi," *Eksplorium Bul. Pus. Teknol. Bahan Galian Nukl.*, vol. 37, no. 2, pp. 101–114, 2016.
- [8] R. Irzon, "Geochemistry of Late Triassic weak Peraluminous A-Type Karimun Granite, Karimun Regency, Riau Islands Province," *Indones. J. Geosci.*, vol. 4, no. 1, pp. 21–37, 2017.
- [9] R. Irzon, "Comagmatic Andesite and Dacite in Mount Ijo, Kulonprogo: A Geochemistry Perspective," *J. Geol. dan Sumberd. Miner.*, vol. 19, no. 4, pp. 221–231, 2018.
- [10] M. G. Andrews and A. D. Jacobson, "The radiogenic and stable Sr isotope geochemistry of basalt weathering in Iceland: Role of hydrothermal calcite and implications for long-term climate regulation," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 215, pp. 247–262, 2017.
- [11] P. A. E. P. von Strandmann *et al.*, "Experimental determination of Li isotope behaviour during basalt weathering," *Chem. Geol.*, vol. 517, pp. 34–43, 2019.
- [12] U. Hartono and S. Suyono, "Identification of Adakite from The Sintang Intrusives In West Kalimantan," *J. Geol. dan Sumberd. Miner.*, vol. 16, no. 3, pp. 173–178, 2006.
- [13] C. Zhanheng, "Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry," *J. rare earths*, vol. 29, no. 1, pp. 1–6, 2011.
- [14] W. V. Boynton, *Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies*, in: *Developments in geochemistry*, vol. 2, Elsevier, 1984, pp. 63–114.
- [15] X. Wang *et al.*, "Geochemistry of high-Mg andesites from the early Cretaceous Yixian Formation, western Liaoning: Implications for lower crustal delamination and Sr/Y variations," *Sci. China Ser. D Earth Sci.*, vol. 49, no. 9, pp. 904–914, 2006.
- [16] Y. Chen, Y. Zhang, D. Graham, S. Su, and J. Deng, "Geochemistry of Cenozoic basalts and mantle xenoliths in Northeast China," *Lithos*, vol. 96, no. 1–2, pp. 108–126, 2007.
- [17] M. J. Defant and M. S. Drummond, "Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere," *Nature*, vol. 347, no. 6294, p. 662, 1990.
- [18] P. R. Castillo, "Adakite petrogenesis," *Lithos*, vol. 134, pp. 304–316, 2012.
- [19] M. Kolb, A. Von Quadt, I. Peytcheva, C. A. Heinrich, S. J. Fowler, and V. Cvetković, "Adakite-like and normal arc magmas: distinct fractionation paths in the East Serbian segment of the Balkan–Carpathian arc," *J. Petrol.*, vol. 54, no. 3, pp. 421–451, 2012.
- [20] K. L. Zaw, L. D. Setijadji, I. W. Warmada, and K. Watanabe, "Petrogenetic interpretation of granitoid rocks using multicationic parameters in the Sanggau area, Kalimantan island, Indonesia," *J. Appl. Geol.*, vol. 3, no. 1, 2011.
- [21] R. Irzon, I. Syafri, J. Hutabarat, and P. Sendjaja, "REE Comparison Between Muncung Granite Samples and their Weathering Products, Lingga Regency, Riau Islands," *Indones. J. Geosci.*, vol. 3, no. 3, pp. 149–161, 2016.
- [22] W.V. Boynton, *Geochemistry of Rare Earth Elements: Meteorite Studies*. In: P. Henderson, Ed., *Rare Earth Element Geochemistry*, New York: Elsevier, pp. 63–114, 1984.
- [23] W. Hsu, "Rare earth element geochemistry and petrogenesis of Miles (IIE) silicate inclusions," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 67, no. 24, pp. 4807–4821, 2003.
- [24] Y. Wu and Y. Zheng, "Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age," *Chinese Sci. Bull.*, vol. 49, no. 15, pp. 1554–1569, 2004.

- [25] C. V. D. Rao, M. Santosh, R. Purohit, J. Wang, X. Jiang, and T. Kusky, “LA-ICP-MS U–Pb zircon age constraints on the Paleoproterozoic and Neoproterozoic history of the Sandmata Complex in Rajasthan within the NW Indian Plate,” *J. Asian Earth Sci.*, vol. 42, no. 3, pp. 286–305, 2011.
- [26] M. Z. El-Bialy and K. A. Ali, “Zircon trace element geochemical constraints on the evolution of the Ediacaran (600–614 Ma) post-collisional Dokhan Volcanics and Younger Granites of SE Sinai, NE Arabian–Nubian Shield,” *Chem. Geol.*, vol. 360, pp. 54–73, 2013.
- [27] A. Fornelli, A. Langone, F. Micheletti, A. Pascazio, and G. Piccarreta, “The role of trace element partitioning between garnet, zircon and orthopyroxene on the interpretation of zircon U–Pb ages: an example from high-grade basement in Calabria (Southern Italy),” *Int. J. Earth Sci.*, vol. 103, no. 2, pp. 487–507, 2014.
- [28] P. Koutsovitis, A. Magganas, and A. Katerinopoulos, “Calc-alkaline volcanic rocks in mélange formations from the South Othris region, Greece: Petrogenetic and geotectonic implications,” *Geochem Miner. Pet.*, vol. 47, pp. 79–95, 2009.
- [29] T. El-Hasan, A. Al-Malabeh, and K. Komuro, “Rare Earth Elements geochemistry of the Cambrian shallow marine manganese deposit at Wadi Dana, south Jordan,” *Jordan J. Earth Environ. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 45–52, 2008.
- [30] R. Kerrich, N. Said, C. Manikyamba, and D. Wyman, “Sampling oxygenated Archean hydrosphere: Implications from fractionations of Th/U and Ce/Ce\* in hydrothermally altered volcanic sequences,” *Gondwana Res.*, vol. 23, no. 2, pp. 506–525, 2013.
- [31] N. Öksüz and N. Okuyucu, “Mineralogy, geochemistry, and origin of Buyukmahal manganese mineralization in the Artova ophiolitic complex, Yozgat, Turkey,” *J. Chem.*, vol. 2014, 2014.
- [32] K. Hashizume, D. L. Pinti, B. Orberger, C. Cloquet, M. Jayananda, and H. Soyama, “A biological switch at the ocean surface as a cause of laminations in a Precambrian iron formation,” *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 446, pp. 27–36, 2016.

