



## **Karakteristik Petrografi dan Geokimia Unsur Utama Batuan Vulkanik Pulau Ponelo, Gorontalo Utara**

### ***Petrography and Major Element Geochemistry Characteristics of Volcanic Rocks in Ponelo Island, North Gorontalo***

**Siti Chusnul Chatimah Nurahmah, Mega Fatimah Rosana, dan Iyan Haryanto**

Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung Sumedang KM.21, Hegarmanah, Kec. Jatinangor, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat 45363

email: [siti.nurr5712@gmail.com](mailto:siti.nurr5712@gmail.com)

Naskah diterima: 23 Maret 2024, Revisi terakhir: 27 November 2024, Disetujui: 28 November 2024 Online: 28 November 2024

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v25i4.892>

**Abstrak**-Batuan vulkanik Pulau Ponelo terletak pada Kepulauan Ponelo di bagian utara Busur Utara Sulawesi yang mana asal usul mengenai batuan ini belum diketahui. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik petrografi dan geokimia unsur utama batuan vulkanik Pulau Ponelo yang belum pernah diidentifikasi sebelumnya. Metode penelitian menggunakan analisis mikroskopis (petrografi) dan geokimia (XRF). Batuan vulkanik Pulau Ponelo merupakan batuan andesit basaltik dengan beberapa tekstur, seperti porfiritik intergranular, glomeroporfiritik, seriate, serta berbagai tekstur mikro-plagioklas. Afinitas magma batuan vulkanik Pulau Ponelo berupa kalk-alkalin dengan terjadinya proses fraksinasi kristal, pencampuran magma, serta magma pada sistem *magma plumbing* berupa dekompresi adiabatik, konveksi, injeksi magma, serta *degassing* atau eksolusi air akibat peristiwa *undercooling* saat erupsi. Tatanan tektonik pembentukan batuan ini berupa zona subduksi busur kepulauan dengan karakteristik pengayaan fluida akibat adanya dehidrasi lempeng saat subduksi terjadi.

**Katakunci:** Andesit basaltik Ponelo, busur kepulauan, Busur Utara Sulawesi.

**Abstract**-Ponelo volcanic rocks located in Ponelo Island, northern part of the North Sulawesi Arc where the origin of these rocks remains unidentified. Therefore, this research aims to determine the petrography and major elements characteristics of Ponelo volcanic rocks which has never been discovered before. Microscopic (petrography) and geochemical analysis (XRF) are the methods of this study. Ponelo volcanic rocks are characterized as basaltic andesite with porphyritic intergranular, glomeroporphyritic, seriate, and micro-plagioclase textures. The magma affinity of Ponelo volcanic rocks is calc-alkaline with crystal fractionation, magma mixing, and magmatic process in magma plumbing systems is adiabatic decompression, convection, magma injection, and degassing or water exsolution driven undercooling caused by eruption. The tectonic settings of Ponelo volcanic rocks is an island arc with fluid enrichment characteristic due to plate dehydration when subduction occurs.

**Keywords:** Ponelo basaltic andesite, island arc, North Sulawesi Arc.

## PENDAHULUAN

Secara regional, batuan pada Busur Utara Sulawesi didominasi oleh batuan vulkanik dan intrusi berumur Neogen, batuan vulkanik dan sedimen berumur Paleogen, serta sedimen silisiklastik dan karbonat berumur Miosen-Plistosen (Kavalieris dkk, 1992; Bachri, 2006; Gan dkk., 2022; Nugraha dkk, 2022). Ponelo merupakan satu pulau yang terletak di bagian utara Busur Utara Sulawesi, tepatnya secara administrasi di Kabupaten Gorontalo Utara. Berdasarkan Peta Geologi Lembar Tilamuta (Bachri dkk, 2011), pulau ini terbentuk hanya dari batuan sedimen berumur Pliosen-Plistosen (TQsl). Namun, pada survei lapangan yang penulis lakukan ditemukan batuan vulkanik di pulau ini, berupa lava yang tersingkap pada tiga daerah yang berbeda, yaitu Malambe (bagian utara), Ponelo (bagian tengah), dan Otiola (bagian selatan) (Gambar 1). Berdasarkan hasil pemetaan skala 1:250.000 oleh Akase dan Supriadi (2022), sebaran batuan vulkanik ini sekitar 2,53 km atau 31,73% dari total luasan wilayah Pulau Ponelo. Karakteristik megaskopis batuan vulkanik ini berupa batuan basalt dengan ciri-ciri berwarna abu-abu kehitaman, masif, afanitik, serta tekstur vesikular. Pada beberapa singkapan terdapat struktur kekar lembar dan terdapat rekahan yang cukup masif (Gambar 2).

Dengan adanya batuan vulkanik di pulau ini menimbulkan pertanyaan mengenai proses pembentukan batuan ini. Maka dari itu penelitian

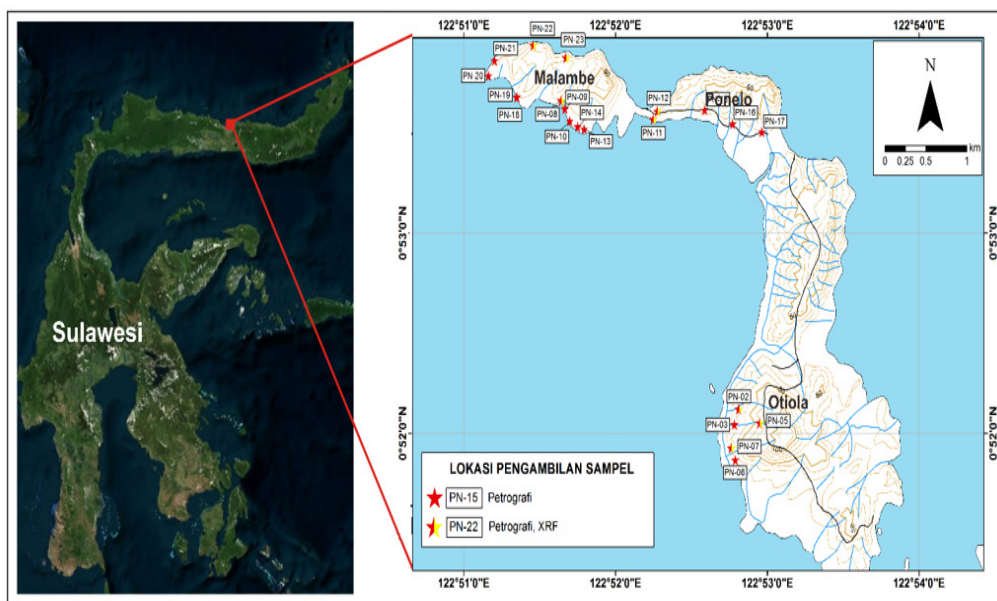
ini dilakukan guna mengetahui karakteristik batuan vulkanik Ponelo yang belum pernah diungkapkan sebelumnya.

## METODOLOGI

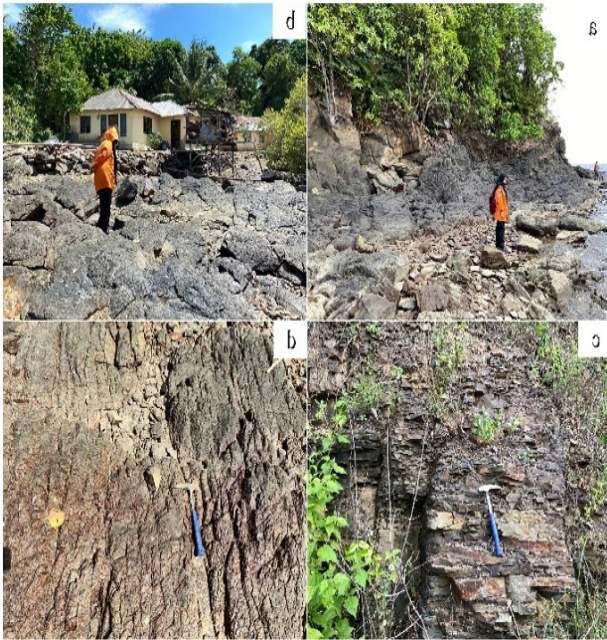
Lokasi pengambilan sampel batuan vulkanik Ponelo dibagi menjadi tiga wilayah berdasarkan desa yang ada di Pulau Ponelo (Gambar 2). Pengambilan sampel batuan ini dipilih berdasarkan kriteria batuan yang segar (tidak lapuk) dan dapat mewakili daerah penelitian. Sebanyak 20 sampel untuk analisis petrografi dan 8 sampel untuk analisis geokimia unsur utama.

Analisis petrografi 20 sampel batuan vulkanik Ponelo yang didapatkan di tiga daerah berbeda menggunakan mikroskop polarisasi, dilakukan untuk penentuan jenis batuan, komposisi mineral, serta tekstur batuan dan mineral. Sampel batuan dibuat sayatan tipis dengan ketebalan 0,03 mm yang kemudian dianalisis menggunakan mikroskop polarisasi di Laboratorium Petrologi Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran.

Setelah analisis petrografi, analisis geokimia pada 8 sampel terpilih dari 20 sampel petrografi yang mewakili ketiga daerah menggunakan XRF (*X-ray Fluorescence*) dengan satuan ukur persentase (%). Hasil analisis ini berupa kandungan geokimia batuan utuh dengan data unsur utama (unsur mayor dan minor). Analisis ini dilakukan di Laboratorium PT. Intertek Indonesia, Jakarta.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian.



Gambar 2. Singkapan batuan vulkanik di Pulau Ponelo yang disertai kekar lembar dan rekahan yang masif

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Petrogafi

Analisis petrografi dilakukan terhadap 20 contoh batuan yang berasal dari Desa Malambe, Ponelo, dan Otiola (Gambar 1). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik batuan secara mikroskopis. Secara umum batuan vulkanik Ponelo cukup segar, memiliki tekstur porfiritik dengan komposisi fenokris berupa plagioklas, klinopiroksen, serta mineral opak. Fenokris-fenokris tersebut tertanam dalam massa dasar gelas serta mikrolit plagioklas dan piroksen. Berdasarkan komposisi mineralnya, secara petrografi batuan vulkanik Ponelo berjenis basal porfiri (Travis, 1995).

Batuan vulkanik Pulau Ponelo secara keseluruhan membentuk beberapa tekstur mikro batuan berupa intergranular, interstelar glomerofiritik, dan seriate (Gambar 3). Intergranular merupakan tekstur batuan yang menggambarkan mineral mafik (piroksen, olivin) serta opak mengisi ruang antar plagioklas yang berbentuk tabular (Gill, 2010). Pada sampel terlihat mineral piroksen dan juga sedikit mineral opak sebagai masadasar di antara plagioklas yang berbentuk tabular. Selain kristal, terdapat gelas sebagai masadasar mengisi ruang plagioklas membentuk tekstur intersertal. Glomeroporfiritik merupakan tipe dari tekstur porfiritik dengan fenokris berkumpul pada satu bagian dalam batuan membentuk agregat yang disebut glomerokris. Tipe glomeroporfiritik pada batuan vulkanik Ponelo berupa monomineralik glomerokris yaitu terdapat lebih dari dua plagioklas

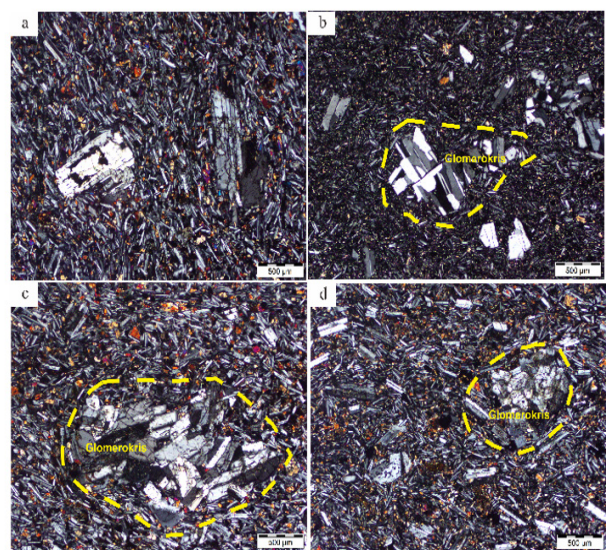
dengan ukuran hampir sama (MacKenzie dkk, 1982; Bennett dkk, 2019). Seriate merupakan tipe tekstur porfiritik juga, dengan ukuran kristal yang kontinu dari fenokris hingga masadasar. Tekstur ini mengindikasikan magma yang berjalan lambat menuju permukaan (Gill, 2010). Sampel pada daerah Otiola dan Malambe memiliki tekstur *seriate*.

Plagioklas pada batuan vulkanik Ponelo memiliki bentuk prismatic panjang dengan kembaran polisintesis dan karlsbad. Mineral ini merupakan penyusun utama batuan vulkanik Ponelo (55-62%) dengan komposisi  $An_{48-61}$  (andesin-labradorit). Tekstur mikro yang dimiliki oleh plagioklas berupa *fine oscillatory zoning*, *coarse sieve*, *synneusis*, *resorption surface*, *round corner zone*, dan *microlites* (Gambar 4).

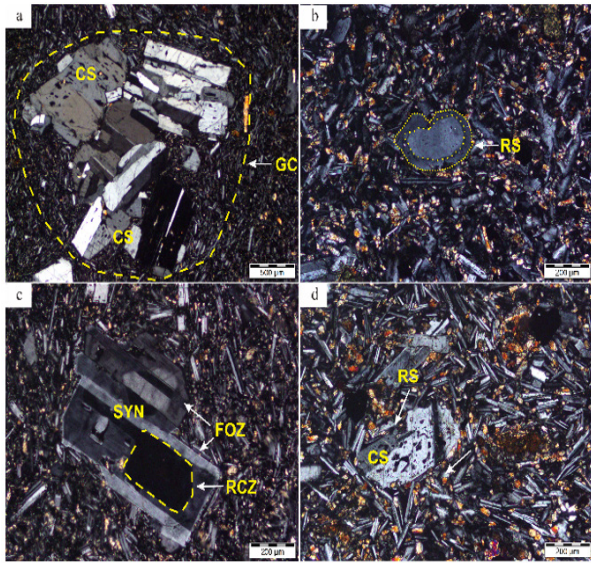
Klinopiroksen (15-29%) berjenis augit hadir sebagai fenokris dan masadasar. Klinopiroksen berbentuk prismatic pendek serta memiliki kembaran karlsbad. Mineral ini juga memiliki tekstur mikro berupa *sieve*.

Mineral opak (9-17%) hadir sebagai fenokris dan masadasar. Kelimpahan mineral opak sebagai masadasar berada pada batuan vulkanik daerah Ponelo dan Malambe, sementara kelimpahan mineral ini sebagai fenokris hadir pada batuan vulkanik daerah Otiola.

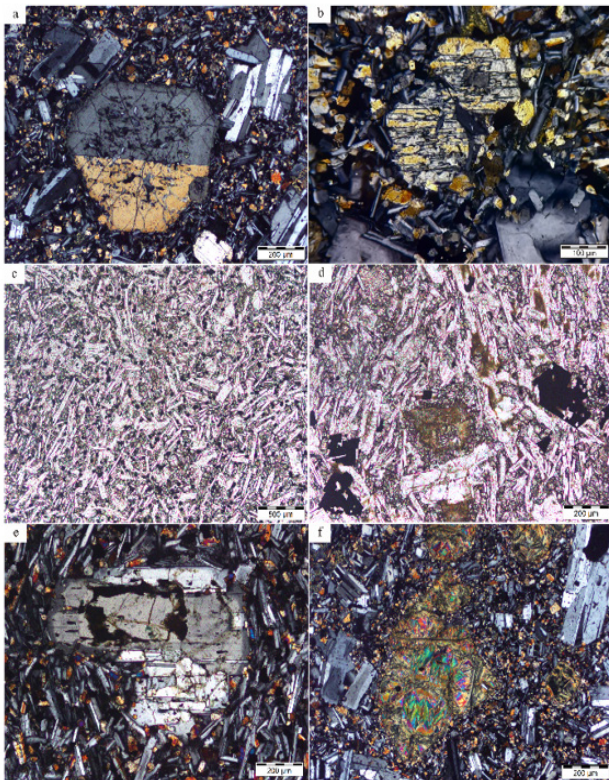
Mineral ubahan seperti bowlingit, serta mineral lempung lainnya terlihat menggantikan mineral utama seperti piroksen dan plagioklas (pseudomorph). Bowlingite merupakan campuran mineral ubahan yang terdiri dari smektit-klorit, serpentinit, serta sejumlah kecil dari talk, mika, dan kuarsa (Deer dkk, 2013).



Gambar 3. Fotomikrografik batuan vulkanik Ponelo yang menunjukkan tekstur porfiritik, intergranular, dan intersertal. Tekstur seriate ditunjukkan pada gambar (b) dan (d) serta tekstur glomeroporfiritik pada gambar (b), (c), dan (d).



Gambar 4. Plagioklas batuan vulkanik Ponelo. CS: coarse sieve, GC: glomerocryst, RS: resorption surface, FOZ: fine oscillatory zoning, SYN: synneusis, dan RCZ: round corner zoning



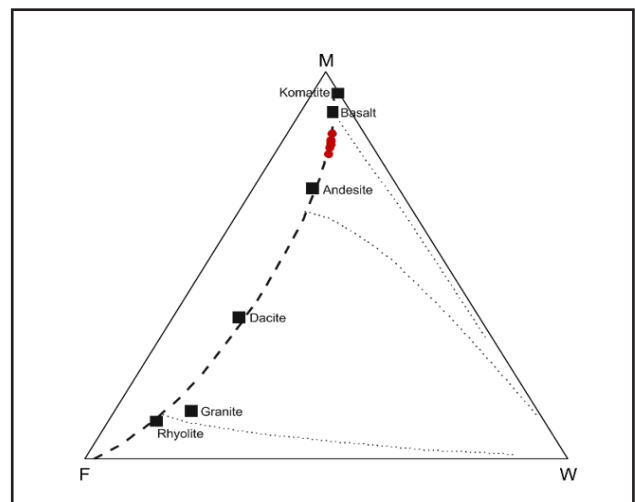
Gambar 5. (a) Klinopiroksen dengan kembaran karlsbad dan tekstur sieve, (b) Klinopiroksen dengan kembaran polisintesis, (c) Mineral opak dengan kelimpahan sebagai masadasar, (d) Mineral opak dengan kelimpahan sebagai fenokris, (e) Mineral lempung (cokelat) pseudomorph plagioklas, dan (f) Pseudomorph sempurna bowlingint.

**Geokimia**

Analisis geokimia XRF dilakukan pada delapan sampel batuan yang mewakili batuan vulkanik Ponelo di tiga desa, yaitu Malambe, Ponelo, dan Otiola. Data geokimia batuan utuh (*whole rock*) disajikan pada Tabel 1. Kandungan LOI (*loss of ignition*) yang sangat rendah (<0,01-0,55 wt%) mengindikasikan adanya sedikit perubahan kimiawi paska magmatisme. Selain itu, diagram terner FMW (Ohta & Arai, 2007) menunjukkan bahwa sampel batuan vulkanik Ponelo terletak pada garis putus-putus F-M yang merupakan standar tingkat kesegaran batuan, sehingga derajat pelapukan dari sampel sangat rendah (Gambar 6). Oleh karenanya, data geokimia batuan utuh batuan vulkanik Ponelo dapat digunakan untuk mengetahui sifat magma aslinya.

**CIPW Norm**

CIPW norm digunakan untuk penentuan kandungan mineral normatif berdasarkan data geokimia unsur utama. Mineral normatif yang ditemukan pada batuan vulkanik Ponelo berupa kuarsa, plagioklas, ortoklas, diopsid, hipersten, ilmenit, hematit, apatit, dan sfen (titanit; Tabel 2). Mineral opak yang dijumpai pada analisis petrografi dapat diinterpretasikan sebagai mineral ilmenit, hematit, dan apatit. Beberapa mineral yang tidak terdeteksi pada pengamatan petrografi seperti ortoklas, hipersten, dan kuarsa mengindikasikan mineral-mineral ini terbentuk dengan ukuran yang sangat kecil (massa dasar afanitik) sehingga tidak dapat diidentifikasi. Absennya mineral normatif feldspatoid (nephelin dan leusit) serta terdapatnya mineral normatif kuarsa menunjukkan bahwa magma pembentuk batuan vulkanik Ponelo bersifat jenuh silika (*silica-oversaturated*; Gill, 2010).



Gambar 6. Diagram FMW (Ohta & Arai, 2007). Sampel merupakan batuan segar dengan tingkat pelapukan yang sangat rendah

Tabel 1. Komposisi geokimia batuan utuh dari batuan vulkanik Pulau Ponelo

Sampel	PN002	PN005	PN007	PN008	PN011	PN012	PN022	PN023
Unsur Utama, wt%								
SiO <sub>2</sub>	53.83	53.33	53.84	54.54	55.60	53.87	55.18	55.12
TiO <sub>2</sub>	1.08	1.02	1.06	1.10	1.23	1.05	1.23	1.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.73	16.48	16.70	17.38	16.35	16.61	16.04	16.03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.77	10.40	10.54	10.23	10.62	10.54	11.38	11.46
MnO	0.19	0.19	0.20	0.18	0.18	0.16	0.19	0.20
MgO	5.02	5.20	5.18	3.96	3.72	4.50	3.65	3.68
CaO	9.18	8.84	8.98	8.80	7.90	8.97	8.17	8.19
Na <sub>2</sub> O	2.69	2.62	2.66	2.86	3.20	2.64	3.07	3.08
K <sub>2</sub> O	0.73	0.89	0.90	0.89	1.06	0.83	0.84	0.85
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23	0.22	0.22	0.24	0.28	0.22	0.27	0.27
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
LOI	<0.01	0.08	<0.01	0.15	0.12	0.55	0.10	0.07
Total	100	99,4	100	100	100	100	100	100

Tabel 2. Mineral normatif dari data geokimia batuan vulkanik Pulau Ponelo berdasarkan kalkulasi CIPW norm

Sampel	PN-02	PN-05	PN-07	PN-08	PN-11	PN-12	PN-22	PN-23
Mineral Normatif %								
Kuarsa	11,61	11,64	11,2	12,6	13,46	12,63	14,35	14,15
Plagioklas	54,18	52,75	53,48	56,16	54,19	53,36	53,48	53,47
Ortoklas	4,31	5,26	5,32	5,26	6,26	4,9	4,96	5,02
Nepheline	0	0	0	0	0	0	0	0
Leusit	0	0	0	0	0	0	0	0
Korundum	0	0	0	0	0	0	0	0
Diopsid	7,48	7,09	7,19	5,46	5,19	7,02	6,01	6,32
Hipersten	9,04	9,69	9,57	7,33	6,86	7,96	6,3	6,28
Olivin	0	0	0	0	0	0	0	0
Ilmenit	0,41	0,41	0,43	0,39	0,39	0,34	0,41	0,43
Magnetit	0	0	0	0	0	0	0	0
Hematit	10,77	10,4	10,54	10,23	10,62	10,54	11,38	11,46
Apatit	0,53	0,51	0,51	0,56	0,65	0,51	0,63	0,63
Sphene (Titanit)	2,13	1,98	2,05	2,2	2,52	2,13	2,49	2,44

### Afinitas Magma

Unsur utama digunakan untuk mengetahui karakteristik batuan serta afinitas magma menggunakan beberapa diagram, diantaranya *total alkali silica* atau TAS (Le Bas dkk, 1986), diagram diskriminan afinitas magma (Jensen, 1976; Irvine & Baragar, 1971; Ewart, 1982; Gambar 7). Dari hasil plotting jenis dan afinitas batuan delapan sampel, batuan vulkanik Ponelo berjenis andesit basaltik. Hal ini selaras dengan komposisi dari plagioklas An<sub>48-61</sub> (andesin-labradorit) yang didapat pada analisis petrografi. Sampel juga termasuk dalam basalt subalkalin dengan afinitas kalk-alkalin berdasarkan diagram AFM, diagram SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O, dan diagram Al-

Fe+Ti-Mg, walaupun pada diagram AFM sampel PN-023 menunjukkan afinitas toleitik karena kandungan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya (11,46 wt%) sementara untuk sampel lainnya berada di antara batas afinitas toleitik dan kalk-alkalin. Dengan kandungan LOI sampel PN-023 yang hanya 0,07%, maka kelimpahan Fe ini bukan berasal dari pelapukan.

### Evolusi Magma

Diagram Harker menunjukkan korelasi SiO<sub>2</sub> dengan unsur utama batuan, dalam hal ini diagram ini digunakan untuk mengetahui proses diferensiasi

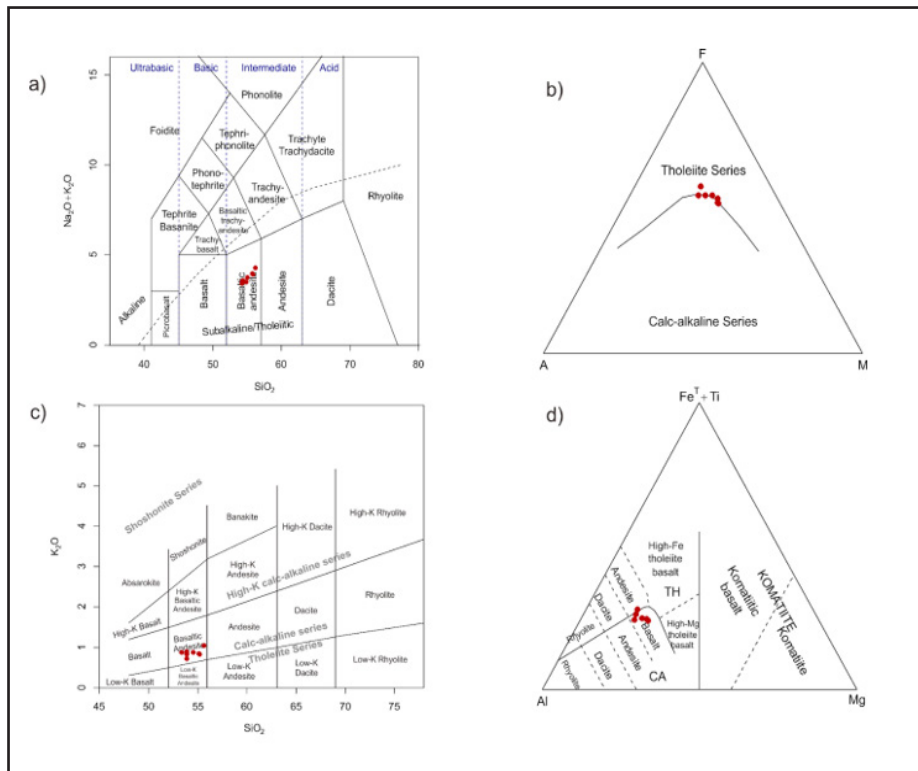
magma dan fraksinasi kristal. Dari hasil geokimia, batuan vulkanik Ponelo memiliki kandungan unsur utama hampir mirip dan juga diagram diskriminan afinitas magma menunjukkan pola yang sama dari delapan sampel. Dapat diindikasikan bahwa batuan vulkanik yang berada di Pulau Ponelo merupakan batuan komagmatik.

Batuan vulkanik Ponelo menunjukkan korelasi positif pada  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}^*$ ,  $\text{TiO}_2$ , dan  $\text{P}_2\text{O}_5$  serta berbanding terbalik dengan  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ , dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Korelasi negatif menunjukkan bahwa terjadi fraksinasi kristal pada unsur-unsur Ca, Mg, dan Al saat pembekuan batuan serta korelasi positif menunjukkan tidak terjadinya kristalisasi mineral yang mengandung Na, Fe, Ti, dan P. Penurunan tren  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dikaitkan dengan proses fraksinasi kristal plagioklas Ca dan piroksen yang mana kedua mineral ini menjadi mineral dominan batuan yang terlihat saat analisis petrografi dilakukan (Hartono, 2000).

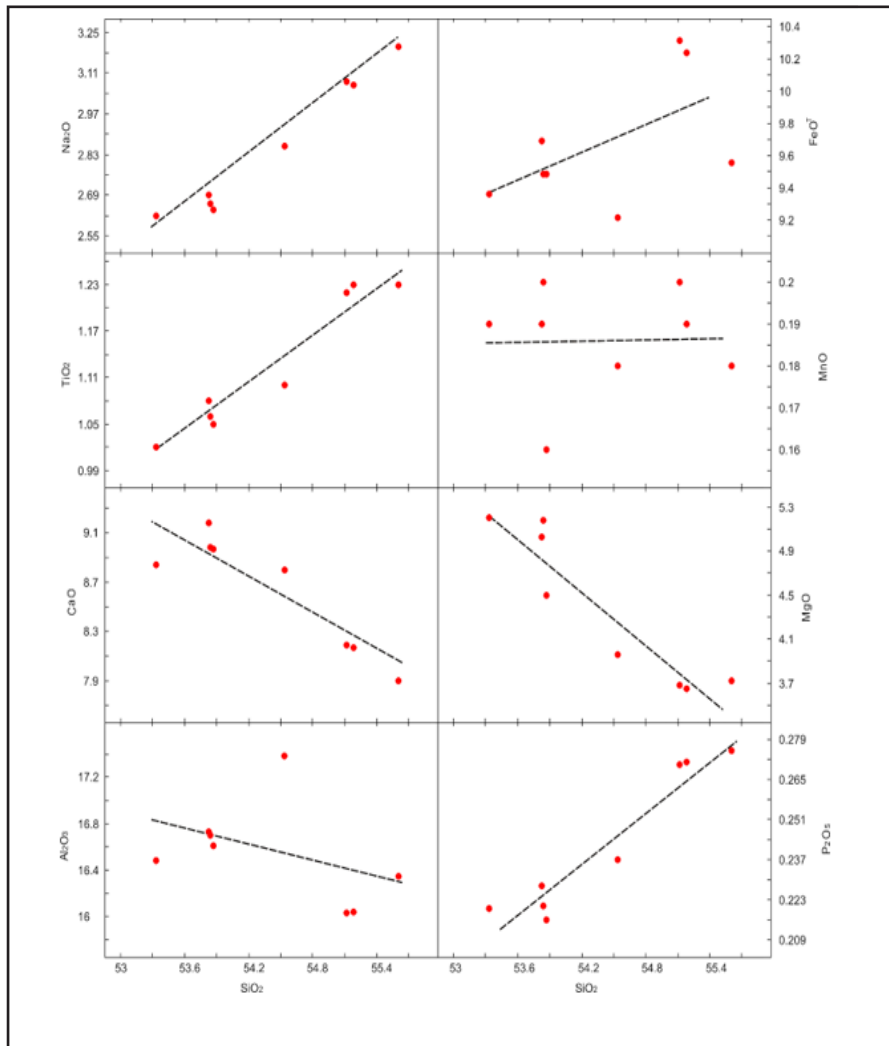
Korelasi negatif  $\text{CaO}$  diikuti oleh korelasi negatif

$\text{Na}_2\text{O}$  terhadap  $\text{SiO}_2$  menunjukkan fraksinasi kristal normal. Dua unsur tersebut biasanya dibawa oleh mineral plagioklas, dalam hal ini semakin bertambahnya  $\text{SiO}_2$  maka kandungan plagioklas Ca akan semakin berkurang dan plagioklas Na akan semakin bertambah. Hal ini selaras dengan ditemukannya *oscillatory zoning* plagioklas yang terlihat saat analisis petrografi.

Dari analisis diagram Harker (Gambar 8) dapat disimpulkan terjadinya fraksinasi kristal atau diferensiasi normal pada pembentukan batuan vulkanik Pulau Ponelo. Walaupun terlihat jelas kenaikan dan penurunan pada masing-masing diagram, terdapat beberapa kecenderungan yang terlihat acak atau tidak linier, diinterpretasikan sebagai ketidakstabilan kondisi magma saat pembekuan. Ketidakstabilan ini dapat dikaitkan dengan adanya pencampuran magma atau *magma mixing*, dimana hal ini selaras dengan ditemukannya tekstur *sieve* dan resorpsi di plagioklas dan klinopiroksen serta tekstur yang terlihat saat analisis petrografi.



Gambar 7. (a) Diagram TAS (Le Bas dkk, 1986), (b) diagram AFM (Irvine & Baragar, 1971), (c) diagram afinitas rasio  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  (Ewart dkk, 1982), dan (d) diagram afinitas terner Al-Fe+Ti-Mg (Jensen, 1976).



Gambar 8. Pola unsur utama vs oksida silika.

## DISKUSI

### Magmatisme

Proses diferensiasi magma dapat dicerminkan dari tekstur batuan dan kandungan kimianya. Beberapa proses yang terekam berdasarkan analisis petrografi dan geokimia berupa fraksinasi kristal dan pencampuran magma. Fraksinasi kristal atau diferensiasi normal ditunjukkan dengan keberagaman fenokris dan tekstur *oscillatory zoning* pada plagioklas. Tren penurunan dan kenaikan beberapa unsur oksida utama terhadap  $\text{SiO}_2$  (Gambar 8), yaitu korelasi negatif unsur-unsur Ca, Mg, Al terhadap silika, mengindikasikan fraksinasi normal mineral-mineral mafik seperti piroksen dan Ca-plagioklas. Fraksinasi kristal juga ditunjukkan oleh nilai MgO batuan vulkanik Pulau Ponelo yang rendah (3,62-5,20 wt%) dibandingkan dengan konsentrasi magma primer (MgO = 10-15 wt%; Ayalew dkk, 2016).

Proses pencampuran magma pada batuan vulkanik Pulau Ponelo terlihat jelas dengan adanya tekstur

*sieve* dan *resorption surface* serta ketidakteraturan pola unsur mayor pada diagram Harker. Tekstur *coarse sieve* yang ditemukan pada plagioklas dan piroksen dapat juga diakibatkan oleh pencampuran (*mixing/mingling*) magma (Tsuchiyama, 1985). Tekstur *resorption surface* juga menandakan adanya injeksi magma dan dekompresi (Renjith, 2014; Bennett dkk, 2019). Tren acak atau tidak linier pada diagram Harker dapat diinterpretasikan sebagai ketidakstabilan kondisi magma saat pembekuan, yang dapat diakibatkan karena pencampuran magma.

Menurut Renjith (2014), tekstur yang dibentuk oleh plagioklas dapat menggambarkan aktivitas magma pada sistem *magma plumbing*. Tekstur *coarse sieve* pada plagioklas yang juga terbentuk pada klinopiroksen menjadi indikasi adanya proses dekompresi adiabatik saat magma bermigrasi dari dapur magma dalam ke dapur magma dangkal. Proses konveksi terjadi pada magma ditunjukkan dengan adanya *fine oscillatory zoning*, *synneus*, glomerokris, dan *round corner zone*. Turbulensi yang terjadi saat proses konveksi

menyebabkan kristal–kristal berkumpul menjadi satu tempat yang disebut *glomerocryst*. Tekstur *synneus* terbentuk akibat arus konveksi yang menyebabkan kristal plagioklas berotasi dan menempel pada bidang planar kristal lainnya.

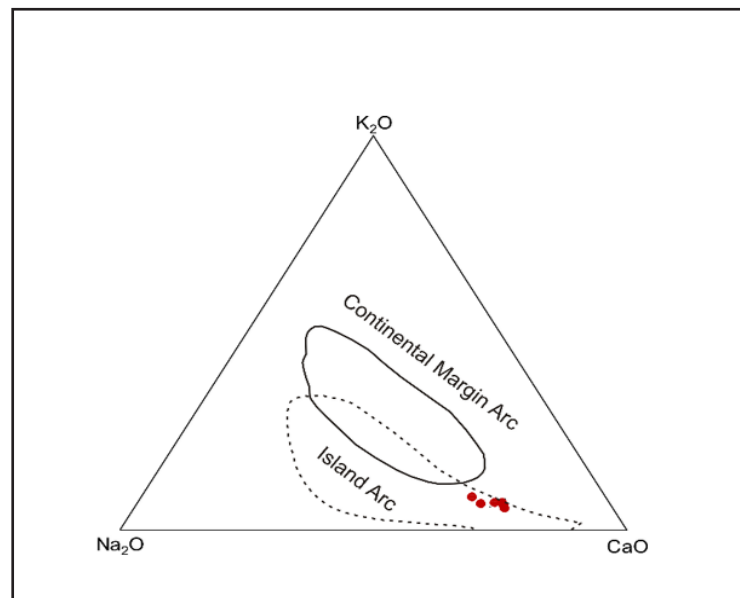
Tekstur *round corner zone* menunjukkan adanya disolusi minor ketika kristal berpindah *gradient magmatic*, menunjukkan adanya fraksinasi kristal normal. Tekstur ini biasanya berasosiasi dengan *fine oscillatory zoning*. Sementara tekstur *resorption surface* menunjukkan ketidakstabilan magma akibat injeksi magma yang lebih primitif, atau bisa diartikan sebagai percampuran magma. Tekstur ini terbentuk di bagian pinggir kristal, mengindikasikan bahwa injeksi magma terjadi setelah proses dekompresi adiabatik dan konveksi. Hal ini juga menunjukkan terjadinya percampuran magma pada pembentukan batuan vulkanik Pulau Ponelo.

Adanya mikrolit plagioklas menunjukkan bahwa terjadi peristiwa *degassing* atau eksolusi air akibat *undercooling* yang berhubungan dengan proses erupsi pada pembentukan batuan vulkanik Pulau Ponelo. Mikrolit plagioklas ini juga membentuk tekstur intergranular dan intersertal dengan mineral piroksen, opak, dan gelas menunjukkan perbedaan nukleasi pada mineral-mineral tersebut.

### Tatanan Tektonik

Selain afinitas kalk-alkalin, kandungan  $\text{TiO}_2 < 1,3$  wt% (1,02-1,23 wt%), serta kandungan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang tinggi (16,03-17,38 wt%) menunjukkan bahwa batuan vulkanik Pulau Ponelo merupakan batuan yang dihasilkan oleh lingkungan subduksi (Gill, 1981; Hartono, 2000; Wilson, 2007). Diagram  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$  (Tittley & Beane, 1981; Gambar 9) menunjukkan secara lebih spesifik bahwa batuan vulkanik Pulau Ponelo merupakan batuan subduksi busur kepulauan.

Terdapat mineral ubahan dengan komposisi senyawa OH seperti bowlingit menunjukkan adanya proses pasca magmatisme yang mempengaruhi proses pembentukan batuan. Diinterpretasikan bahwa pembekuan batuan vulkanik Pulau Ponelo yang mengalami pengayaan fluida sehingga membentuk mineral-mineral dengan senyawa OH. Dengan latar belakang bahwa batuan vulkanik pada Busur Utara Sulawesi merupakan zona yang mengalami aktivitas subduksi sejak Eosen hingga sekarang (Polvé dkk, 1997; Rangin dkk, 1997; Nichols dan Hall, 1999; Zhang dkk, 2022; Advokaat dan van Hinsbergen, 2024; Dong dkk, 2024), pengayaan fluida pada batuan ini diinterpretasikan sebagai akibat dari dehidrasi lempeng yang tersubduksi dan masuknya cairan serta sedimen yang berasal dari lempeng ke dalam lapisan mantel.



Gambar 9. Diagram  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$  (Tittley & Beane, 1981).



## KESIMPULAN

Batuan vulkanik Pulau Ponelo merupakan andesit basaltik bertekstur porfiritik dengan afinitas magma kalk-alkalin. Pembentukan batuan ini melibatkan proses fraksinasi kristal dan juga pencampuran magma. Berdasarkan mikrotekstur plagioklas, aktivitas magma pada sistem *magma plumbing* berupa dekompresi adiabatik saat magma bermigrasi, arus konveksi, injeksi magma, serta pendinginan yang menyebabkan pelepasan gas atau eksolusi air.

Berdasarkan kandungan afinitas kalk-alkalin, kandungan  $\text{TiO}_2$ , kandungan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dan diagram  $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O-CaO}$  menunjukkan bahwa lingkungan

tektonik pembentukan batuan vulkanik Ponelo adalah zona subduksi busur kepulauan. Kehadiran mineral dengan senyawa OH (bowlingit) dapat diinterpretasikan adanya dehidrasi cairan lempeng yang tersubduksi.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih diucapkan kepada BPPT Kemendikbudristek melalui Beasiswa Pendidikan Indonesia (BPI) atas pembiayaan pendidikan dan riset. Terima kasih juga kepada semua rekan-rekan yang membantu proses pengambilan sampel di lapangan serta analisis di laboratorium.

## ACUAN

- Advokaat, E.L., and van Hinsbergen, D.J.J., 2024. Finding Argoland: Reconstructing a microcontinental archipelago from the SE Asian accretionary orogen. *Gondwana Research*, 128, 161–263.
- Akase, N. and Supriadi, 2022. Geology of Ponelo Region And Surroundings, North Gorontalo Regency. *UNM Geographic Journal*, 5(2), 101–105.
- Ayalew, D., Jung, S., Romer, R.L., Kersten, F., Pfänder, J.A., and Garbe-Schönberg, D., 2016. Petrogenesis and Origin of Modern Ethiopian Rift Basalts: Constraints from Isotope and Trace Element Geochemistry. *Lithos*, 258, 1–14.
- Bachri, S., 2006. Stratigrafi Lajur Volcano-plutonik Daerah Gorontalo, Sulawesi. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 16(2), 94–106.
- Bachri, S., Sukido, dan Ratman, N., 2011. *Peta Geologi Lembar Tilamuta, Sulawesi*. Pusat Survei Geologi, Badan Geologi.
- Bennett, E. N., Lissenberg, C. J., & Cashman, K. V. (2019). The significance of plagioclase textures in mid-ocean ridge basalt (Gakkel Ridge, Arctic Ocean). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 174(6).
- Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J., 2013. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.
- Dong, M., Hao, T., Xu, L., Zhang, J., Zhang, J., Lü, C., and He, Q., 2024. Subduction without Volcanic Arc Magma: Insights from Two Young Subduction Zones in the Western Pacific. *Tectonophysics*, 874, 230231.
- Ewart, A., 1982. The Mineralogy and Petrology of Tertiary-Recent Orogenic Volcanic Rocks; with Special Reference to the Andesitic-basaltic Compositional Range. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*, 26–87.
- Gan, C., Wang, Y., Qian, X., Lu, X., Mustapha, K. A., Zhang, Y., and Wu, S., 2022. Diorite Enclaves and Host Granite of the Early Miocene Gorontalo Pluton in the North Sulawesi Arc, Indonesia: Implications For Recycled Oceanic Crust and Crust-Mantle Interaction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 227, 105101.
- Gill, J.B., 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics* (Vol. 16). Springer Berlin Heidelberg.
- Gill, R., 2010. *Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide*. Wiley-Blackwell, John Wiley and Sons, Ltd, Publication.
- Hartono, G., 2000. Studi Gunungapi Tersier: Sebaran Pusat Erupsi dan Petrologi di Pegunungan Selatan Yogyakarta. Tesis. Institut Teknologi Bandung.
- Irvine, T.N., and Baragar, W.R.A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523–548. www.nrcresearchpress.com
- Jensen, L.S., 1976. A New Cation Plot for Classifying Subalkalic Volcanic Rocks. *Ontario Division of Mines Miscellaneous Paper*, 66.
- Kavalieris, I., Van Leeuwen, T.M., and Wilson, M., 1992. Geological Setting and Styles of Mineralization, North Arm of Sulawesi, Indonesia. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 7(2–3), 113–129.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., and Zanettin, B., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 745–750.
- MacKenzie, W.S., Donaldson, C.H., and Guilford, C., 1982. *Atlas of Igneous Rocks and Their Textures* (Vol. 148). Longman Harlow.
- Nichols, G., and Hall, R., 1999. History of the Celebes Sea Basin based on Its Stratigraphic and Sedimentological Record. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17(1–2), 47–59.

- Nugraha, A.M.S., Hall, R., and BouDagher-Fadel, M., 2022. The Celebes Molasse: A revised Neogene stratigraphy for Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 228, 105140.
- Ohta, T., and Arai, H., 2007. Statistical Empirical Index of Chemical Weathering in Igneous Rocks: A New Tool for Evaluating the Degree of Weathering. *Chemical Geology*, 240(3–4), 280–297.
- Polvé, M., Maury, R.C., Bellon, H., Rangin, C., Priadi, B., Yuwono, S., Joron, J.L., and Atmadja, R.S., 1997. Magmatic Evolution of Sulawesi (Indonesia): Constraints on the Cenozoic Geodynamic History of the Sundaland Active Margin. *Tectonophysics*, 272(1), 69–92.
- Rangin, C., Maury, R.C., Polve, M., Bellon, H., Priadi, B., Soeria-Atmadja, R., Cotten, J., and Joron, J.L., 1997. Eocene to Miocene Back-Arc Basin Basalts and Associated Island Arc Tholeiites from Northern Sulawesi (Indonesia); Implications for the Geodynamic Evolution of the Celebes Basin. *Bulletin de La Societe Geologique de France*, 168(5), 627–635.
- Renjith, M.L., 2014. Micro-textures in Plagioclase from 1994-1995 Eruption, Barren Island Volcano: Evidence of Dynamic Magma Plumbing System in the Andaman Subduction Zone. *Geoscience Frontiers*, 5(1), 113–126.
- Titley, S.R., and Beane, R.E., 1981. Porphyry Copper Deposits, Part 1. Geologic Settings, Petrology, and Tectogenesis. *Economic Geology*, 75, 214–235.
- Travis, R.B., 1995. *Classification of Rocks*. Colorado School of Mines.
- Tsuchiyama, A., 1985. Contributions to Mineralogy and Petrology Dissolution Kinetics of Plagioclase in the Melt of the System Diopside-Albite-Anorthite, and Origin of Dusty Plagioclase in Andesites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89, 1–16.
- Wilson, M., 2007. *Igneous petrogenesis*. Springer.
- Zhang, X., Huang, T.N., Chung, S.L., Maulana, A., Mawaleda, M., Tien, C.Y., Lee, H.Y., and Liu, P.P., 2022. Late Eocene Subduction Initiation of the Indian Ocean in the North Sulawesi Arc, Indonesia, Induced by Abrupt Australian Plate Acceleration. *Lithos*, 422, 106742.