Eksplorium *p*-ISSN 0854-1418
Volume 41 No. 2, November 2020: 73–86 *e*-ISSN 2503-426X

Peran Kontaminasi Kerak pada Diferensiasi Magma Pembentuk Batuan Vulkanik Sungai Ampalas, Mamuju, Sulawesi Barat

Crustal Contamination Role on Magma Differentiation of Volcanic Rocks in Ampalas River, Mamuju, West Sulawesi

Windi Anarta Draniswari[1]*, Sekar Indah Tri Kusuma[2], Tyto Baskara Adimedha[1], I Gde Sukadana[1]
[1]Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir-BATAN
Jl. Lebak Bulus Raya No 9, Pasar Jumat, Jakarta, Indonesia, 12440
[2]Teknik Geologi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto No.13, Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia, 50275
*E-mail: windi.draniswari@batan.go.id

Naskah diterima: 10 Oktober 2020, direvisi: 13 November 2020, disetujui: 17 November 2020
DOI: 10.17146/eksplorium.2020.41.2.6040

ABSTRAK

Anomali radiometri telah ditemukan di area Sungai Amplas pada bongkah batuan vulkanik. Nilai yang terukur dari spektrometer gama adalah 787 ppm eU dan 223 ppm eTh. Penemuan ini menarik untuk pengembangan eksplorasi. Studi lebih lanjut diperlukan untuk mengetahui karekteristik batuan pembawa mineral radioaktif dari sampel *in-situ*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik petrologi dan geokimia batuan vulkanik Ampalas sebagai studi awal untuk mengetahui proses akumulasi mineral radioaktif pada batuan vulkanik Ampalas. Metodologi yang digunakan meliputi pengamatan lapangan, pengambilan sampel batuan, analisis petrografi dan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Batuan vulkanik ampalas tersusun atas ponolit, foidit, dan foid-syenit. Tekstur batuannya terdiri dari porfiritik, aliran, *rim* piroksen, *zoning*, pseudo-leusit, korosi, inklusi mafik, dan *sieve*. Karakteristik geokimia menunjukkan alkalinitas tinggi dan indikasi pengayaan mineral radioaktif yang tersebar dalam batuan. Proses magmatis yang berperan dalam pembentukan batuan vulkanik adalah fraksionasi kristal (fraksionasi leusit dan alkali felspar), asimilasi kerak kontinen, dan pencampuran magma. Interaksi antara magma dan kerak menyebabkan diferensiasi magma berkelanjutan yang menghasilkan akumulasi uranium dan torium lebih tinggi.

Kata kunci: Ampalas, vulkanik, geokimia, kontaminasi kerak

ABSTRACT

Anomalous radiometry has been found in Ampalas River Area on volcanic rock boulder. The values measured from gamma spectrometer are 787 ppm eU and 223 ppm eTh. This discovery is promising for exploration development. Further study need to figure the radioactive mineral bearing rock characteristic from in-situ samples. The research aim is to determine the petrology and geochemical characteristics of Ampalas volcanic rocks as preliminary study to find radioactive mineral accumulation process of Ampalas volcanic rocks. The methodologies are field observation, rock sampling, petrography, and X-Ray fluorescence (XRF) analyses. The Ampalas volcanic rocks consist of phonolite, phoidite, and phoid syenite. Their textures are porphyritic, flow, pyroxene rim, zoning, pseudo-leucite, corrosion, mafic inclusions, and sieve. The geochemical characteristics show high alkalinity and radioactive mineral enrichment disseminating on rock. The magmatic processes which play a significant role in radioactive mineral-bearing rocks formation are crystal fractionations (leucite and alkaline feldspar fractionations), continental crust assimilation, and magma mixing. Long interaction between magma and crust creates advanced magma differentiation causing higher uranium and thorium accumulation.

Keywords: *Ampalas, volcanic, geochemistry, crustal contamination*

PENDAHULUAN

Uranium (U) dan torium (Th) merupakan unsur yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar nuklir untuk reaktor [1]. Kedua unsur tersebut dapat berasosiasi dengan unsur lain membentuk mineral radioaktif yang menyusun batuan. Salah satu jenis batuan pembawa mineral radioaktif yang banyak dijumpai di Indonesia adalah kelompok batuan vulkanik tipe alkalin dengan mineral penyusun utama berupa piroksen, alkali felspar, felspatoid, dan biotit [1]. Pada pengamatan di lapangan, keberadaan mineral radioaktif dapat ditunjukkan dengan nilai dosis radiometri yang tinggi pada batuan, baik yang berupa bongkah sedimen maupun singkapan.

Sungai Ampalas yang terletak di Kalukku, Mamuju tersusun oleh batuan anggota Formasi Gunungapi Adang. Secara stratigrafi, perselingan batuan piroklastik, *tuffities*, dan batuan vulkanik alkalin fanerik maupun afanitik menyusun Formasi Gunungapi Adang dari tua ke muda [1]. Hasil pemetaan radiometri PTBGN-BATAN pada tahun 2013 menunjukkan bahwa Sungai Ampalas memiliki anomali radiometri sebesar 787 ppm eU dan 223 ppm eTh pada bongkah batuan alkalin [2]. Angka tersebut merupakan angka yang menjanjikan untuk kegiatan eksplorasi tetapi perlu dilakukan studi detail untuk mengetahui karakteristik batuan pembawa mineral radioaktif dari sampel insitu di lapangan. Data bongkah tidak dapat digunakan sebagai media analisis pembentukan batuan maupun pengayaan mineral radioaktif sehingga perlu dilakukan analisis pada sampel insitu, baik yang segar maupun teralterasi agar mekanisme pembentukan mineral radioaktif dan daerah prospek dapat ditentukan dengan tepat.

Karakteristik batuan vulkanik yang tampak pada pengamatan petrologi sangat ditentukan oleh proses evolusi magma yang terjadi sebelum magma keluar ke permukaan. Proses-proses tersebut meliputi diferensiasi magma, fraksionasi kristal, asimilasi magma, maupun kontaminasi kerak [3]. Proses-proses tersebut akan terekam dengan baik sebagai aspek petrologi batuan seperti tekstur mineral, tekstur batuan, maupun pola geokimia batuan dan mineral [4, 5].

Aspek petrologi pada fase mineral, meliputi bentuk dan tekstur mineral sangat sensitif terhadap perubahan yang terjadi pada suatu sistem vulkanik [6]. Perubahan tekstur dan komposisi mineral dapat terjadi sebagai akibat dari perubahan kondisi fisika dan kimia di dapur magma yang meliputi perubahan temperatur, tekanan H_2O, fugasitas oksigen, dan komposisi larutan magma [7, 8]. Pengamatan rinci pada aspek petrologi batuan vulkanik di Sungai Ampalas belum pernah dilakukan sebelumnya. Oleh karena itu, pengamatan petrologi dan analisis geokimia batuan sangat efektif untuk mengetahui proses evolusi magma di daerah tersebut.

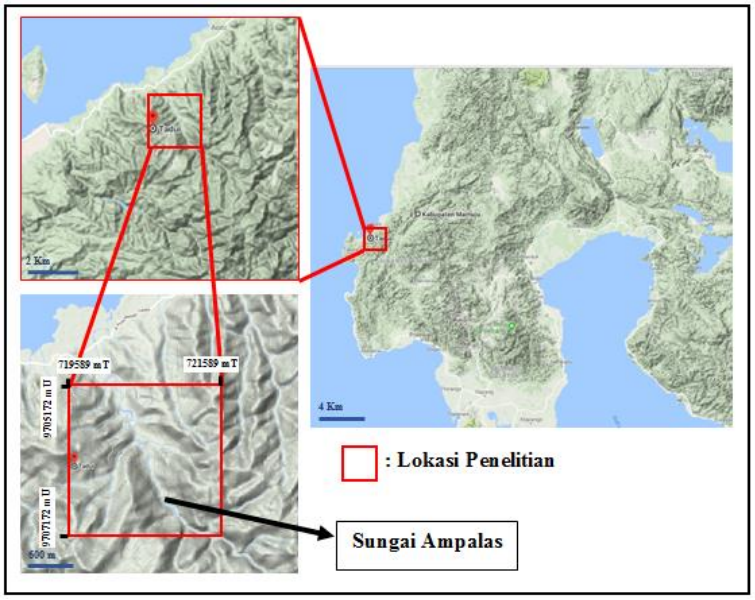
Sejak tahun 1992 telah berkembang ide bahwa batuan alkalin dapat terbentuk melalui proses kontaminasi kerak maupun tanpa proses kontaminasi kerak [9]. Penelitian yang menerapkan metode petrografi, geokimia mineral, dan inklusi fluida pada sampel batuan teralterasi yang mengandung uranium sudah pernah dilakukan di Cina [10]. Pembentukan endapan uranium pada daerah vulkanik merupakan hasil dari proses bertahap yang dimulai sejak proses evolusi magma pada tahapan pembentukan intrusi magma alkalin, pembentukan rekahan, transportasi oleh fluida hidrotermal, dan pengendapan pada lingkungan reduksi [11]. Berdasarkan kondisi geologi Mamuju dan

p-ISSN 0854-1418
e-ISSN 2503-426X

penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [10–12], idealnya pola komposisi unsur minor dan *High Field Strength Element* (HFSE) batuan vulkanik di Mamuju akan menunjukkan jejak kontaminasi kerak dan fraksionasi kristal yang intensif. Hal ini perlu dibuktikan dengan analisis petrologi dan geokimia terhadap sampel batuan vulkanik Sungai Ampalas di laboratorium.

Penelitian dilakukan pada batuan vulkanik yang tersingkap di sekitar Sungai Ampalas bagian hilir, Kecamatan Kalukku, Kabupaten Mamuju, Sulawesi Barat. Daerah penelitian terletak pada 719589–721589 mT dan 9705172–9707172 mU berdasarkan sistem proyeksi koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM) Zona 50S (Gambar 1). Penelitian ini hanya dilakukan pada sampel batuan vulkanik di sekitar hilir Sungai Ampalas sebagai satu kesatuan tanpa memperhatikan faktor umur batuan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui proses magmatik yang berpengaruh pada pembentukan batuan vulkanik dan keterdapatan unsur radioaktif di Sungai Ampalas. Hasil dari penelitian ini dapat menjadi studi awal untuk analisis proses akumulasi mineral radioaktif dalam batuan di Sungai Ampalas dan dapat bermanfaat sebagai panduan bagi pemangku kebijakan terkait kegiatan eksplorasi mineral radioaktif untuk menentukan area prospek kerja yang lebih detail. Batuan dengan proses magmatik yang sama dengan batuan yang diteliti pada penelitian ini diinterpretasikan akan memiliki karakter mineralisasi yang sama.



Gambar 1. Lokasi penelitian.

GEOLOGI REGIONAL

Kondisi geologi regional Pulau Sulawesi menjadi dasar interpretasi pada penelitian ini. Pulau Sulawesi dan sekitarnya merupakan daerah yang memiliki kondisi litologi dan struktur yang kompleks. Daerah ini merupakan hasil konvergensi tiga lempeng pada Neogen [13]. Ketiga lempeng tersebut adalah Lempeng Indo-Australia di sebelah selatan, Lempeng Eurasia di sebelah barat, dan Lempeng Pasifik di sebelah timur. Konvergensi ini menghasilkan banyak tipe

struktur dalam berbagai skala yang mencakup zona subduksi dan kolisi, sesar, dan perlipatan. Kondisi geologi pada masa kini menunjukkan bahwa hampir semua struktur Neogen dan Pre-Neogen aktif atau mengalami reaktivasi [13].

Pulau Sulawesi dapat dibagi menjadi empat mandala berdasarkan kondisi litotektoniknya, yaitu Mandala Barat (*West and North Sulawesi Volcano-Plutonic Arc*), Mandala Tengah (*Central Sulawesi Metamorphic Belt*), Mandala Timur (*East Sulawesi Ophiolite Belt*), dan Fragmen Kontinen Banggai-Sula dan Tukang Besi [13]. Lokasi penelitian termasuk dalam Mandala Barat.

Mandala Geologi Sulawesi Barat didominasi oleh batuan gunungapi dan batuan plutonik Miosen yang membentuk jalur gunungapi Tersier. Gunungapi tersebut terbentuk sebagai hasil tunjaman lempeng berumur Neogen dari arah timur [13]. Proses tektonik (berurutan dari tua ke muda) yang mempengaruhi batuan vulkanik di Sulawesi Barat antara lain [13]:

1. Penunjaman ke arah barat yang diikuti dengan pembentukan Formasi Bua atau Formasi Langi pada umur Paleosen. Saat proses ini terjadi, Pulau Sulawesi masih menyatu dengan Pulau Kalimantan.
2. Fase transgresi pada umur Eosen hingga Oligosen. Pada fase ini tidak terjadi aktivitas volkanisme. Proses sedimentasi berjalan efektif menghasilkan endapan sedimen laut dangkal berupa batuan karbonat yang cukup tebal. Endapan tersebut termasuk dalam Formasi Tonasa.
3. Penunjaman kembali ke arah barat pada umur Miosen Awal. Penunjaman ini berkaitan dengan pembentukan batuan vulkanik Camba yang memiliki afinitas kalk-alkali. Pada fase ini mulai terjadi pemisahan antara Pulau Sulawesi dan Kalimantan berupa rekahan kerak benua.
4. Proses obduksi yang terjadi pada akhir Miosen Awal. Proses ini diawali dengan terhentinya penunjaman ke arah barat dan terjadi kolisi antara keping benua bagian barat dan timur yang diikuti oleh obduksi kerak samudera sehingga terbentuk Formasi Kalamiseng.
5. Fase volkanisme aktif pada akhir Miosen Tengah hingga Plistosen. Volkanisme pada masa ini menghasilkan batuan dengan afinitas soshonitik–ultra potasik yang dicirikan dengan kandungan K yang tinggi. Pada fase ini juga terjadi aktivitas ekstensi kerak yang dicirikan dengan adanya sesar bertingkat di Selat Makasar dan Tinggian Bone serta struktur *host-graben* di bagian tengah lengan selatan Sulawesi.

Daerah Mamuju, Majene, hingga Palopo bagian timur merupakan daerah yang sangat terpengaruh oleh tektonik Neogen pada Lengan Selatan Sulawesi dengan tipe batuan vulkanik ultrapotasik [1]. Mineral felspatoid berupa leusit merupakan salah satu penyusun produk volkanisme yang dijumpai di lengan barat Sulawesi pada zona Makassar–Toraja, berupa lava atau produk terobosan berkomposisi basaltik–andesitik berumur 13–11 jtl [14]. Mineral felspatoid ini juga ditemukan dalam batuan gunungapi Adang yang tersusun oleh tuf, lava, dan breksi gunungapi bersusunan leusit–basalt, sebagian mikaan, dan tersebar di sebagian besar daerah Mamuju, Sulawesi Barat [15]. Secara geologi regional, Sungai Ampalas termasuk dalam Kompleks Gunungapi Adang.

Kompleks Gunungapi Adang tersusun atas batuan vulkanik basa hingga intermediet yang memiliki nilai laju dosis radiasi cukup tinggi [16]. Interpretasi citra satelit

p-ISSN 0854-1418
e-ISSN 2503-426X

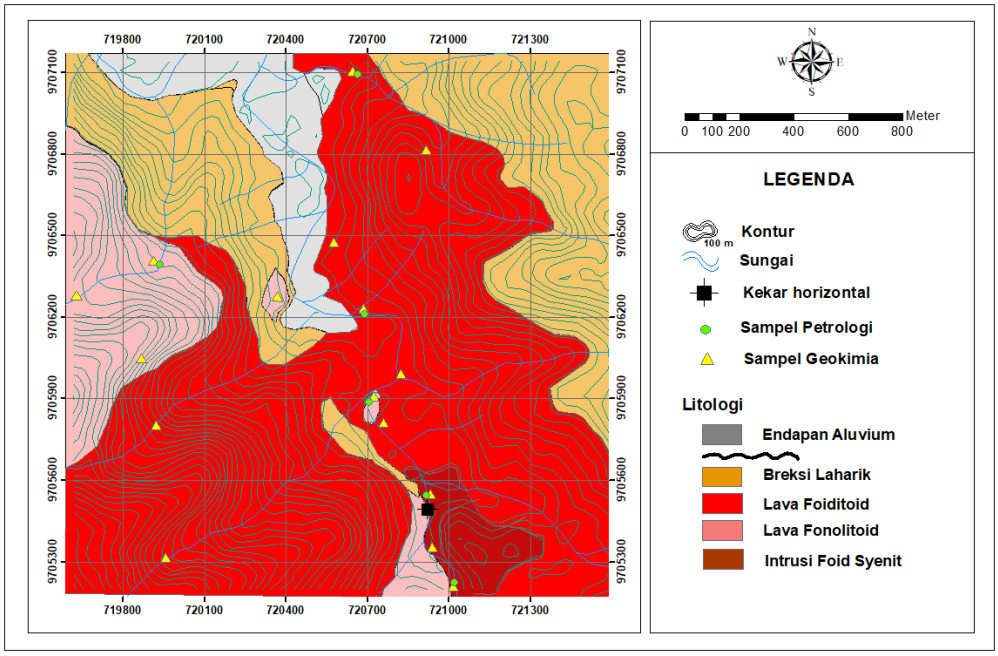
menunjukkan bahwa Kompleks Gunungapi Adang dapat dibagi menjadi tujuh kompleks yang lebih kecil, yaitu Tapalang, Ampalas, Adang, Malunda, Karampuang, Sumare, dan Labuang Rano. Litologi penyusun Kompleks Gunungapi Adang secara umum berupa batuan intrusi, sedimen tua, serta batuan intrusi dangkal dan ekstrusi [16]. Berdasarkan kondisi geologi regional Pulau Sulawesi maka batuan yang digunakan pada penelitian ini seluruhnya digolongkan sebagai bagian dari Kompleks Gunungapi Adang, anggota Kompleks Ampalas. Tipe batuan beku berupa batuan vulkanik yang terbentuk pada fase volkanisme aktif.

METODOLOGI

Penelitian ini dibatasi pada batuan dari Satuan Intrusi Foid Syenit, Satuan Lava Fonolitoid, dan Satuan Lava Foiditoid (Gambar 2). Sampel diambil dari singkapan batuan pada masing-masing satuan batuan di sekitar Sungai Ampalas bagian hilir. Sampel diambil secara acak pada setiap lokasi yang menunjukkan perubahan fisik batuan yang teramati di lapangan. Analisis terdiri dari analisis petrologi dan geokimia.

Kajian awal untuk mengetahui proses magmatis yang pernah terjadi di daerah Ampalas dimulai dengan identifikasi jenis litologi batuan yang tersingkap di Sungai Ampalas. Identifikasi dilakukan secara makroskopis melalui pengamatan langsung menggunakan lup perbesaran 5x pada sampel batuan *(hand specimen)*. Identifikasi secara mikroskopis dilakukan pada enam sayatan tipis batuan dengan menggunakan mikroskop polarisasi perbesaran 50x di Laboratorium Petrologi PTBGN-BATAN. Hasil analisis petrografi berupa identifikasi komposisi dan tekstur mineral penyusun batuan.

Analisis geokimia dilakukan pada enam belas sampel dengan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) di Laboratorium Pengujian XRF PTBGN-BATAN. Analisis geokimia XRF bermanfaat untuk mengetahui komposisi *whole rock* dari sampel batuan Sungai Ampalas, baik unsur utama maupun unsur minor dan jejak.



Gambar 2. Peta Geologi dan Lokasi Pengambilan Sampel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

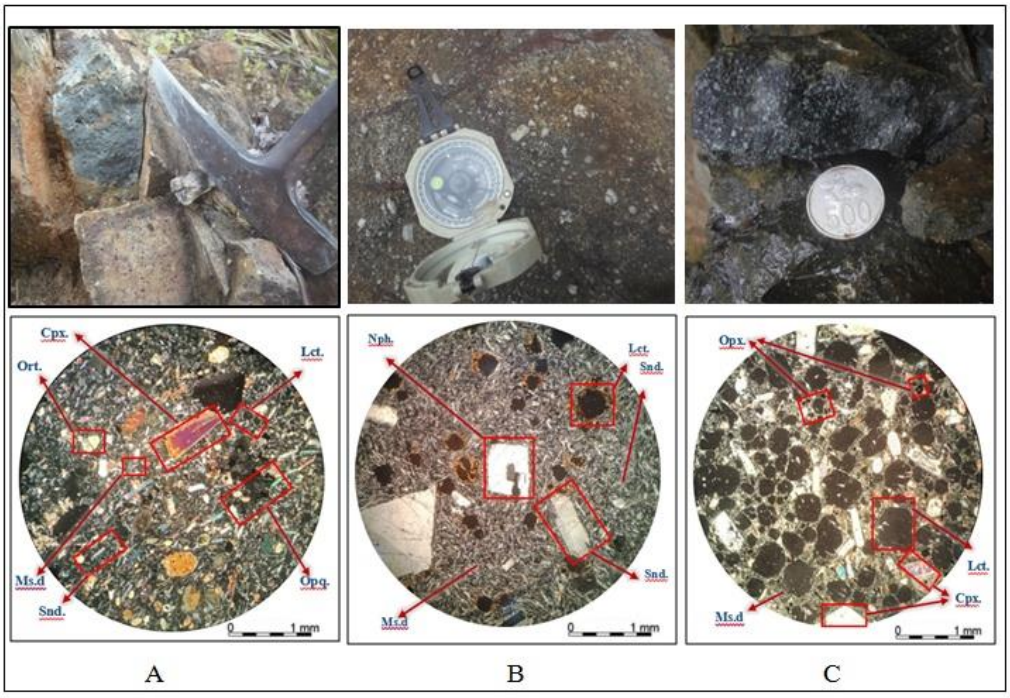
Petrologi Batuan Vulkanik Sungai Ampalas

Hasil pengamatan petrologi pada enam sampel batuan Sungai Ampalas menunjukkan tiga jenis litologi yang terdiri atas litologi foid syenit (SA6), foidit (SA1, SA2), serta ponolit (SA3, SA4, dan SA5) berdasarkan klasifikasi Streckeisen (Gambar 3, Tabel 1).

Ponolit banyak tersingkap di dinding tepi Sungai Ampalas dalam kondisi agak lapuk dan sebagian besar terkekarkan. Ponolit yang dijumpai di Sungai Ampalas memiliki karakteristik berwarna abu-abu hingga hitam, tekstur porfiritik, hipokristalin. Fenokris terdiri atas piroksen, sanidin, leusit, nefelin, alkali felspar, plagioklas, hornblenda, biotit, dan mineral opak yang tertanam dalam masa dasar berupa piroksen, alkali felspar, dan gelas (Tabel 1). Masa dasar pada ponolit umumnya membentuk tekstur aliran. Pada singkapan ponolit di Sungai Ampalas juga teramati adanya *xenolith* dan *clots* biotit serta klinopiroksen.

Foidit dicirikan dengan warna abu-abu dengan bintik putih, porfiritik, hipokristalin, tersusun oleh fenokris berupa leusit berukuran kasar, piroksen, dan biotit. Fenokris tertanam dalam masa dasar afanitik berwarna abu-abu. Fenokris leusit umumnya berbentuk euhedral dan telah lapuk sehingga tampak berwarna putih secara mikroskopis. Pada singkapan foidit di Sungai Ampalas juga teramati *xenolith* berupa ponolit.

Foid syenit memiliki karakteristik berwarna abu-abu hingga coklat muda, tekstur porfiritik, hipokristalin, kristal berukuran kasar. Fenokris berupa piroksen, sanidin, leusit, nefelin, alkali felspar, plagioklas, dan mineral opak dalam masa dasar afanitik. Singkapan foid syenit melampar sepanjang sekitar 25 meter di tepi Sungai Ampalas dan umumnya telah mengalami proses alterasi. Hasil bor dangkal singkapan foid syenit dengan kedalaman sekitar 40 cm menunjukkan kehadiran mineral sekunder berupa mineral sulfida seperti pirit dan kalkopirit.



Gambar 3. Batuan vulkanik yang tersingkap di area Sungai Ampalas. A) Ponolit, B) Foid Syenit, C) Foidit.

Tabel 1. Komposisi sampel batuan vulkanik Sungai Ampalas

Kode	Komposisi Fenokris (%)									Komposisi Masa dasar (%)		Litologi
	Cpx	Snd	Leu	Nef	Hbl	Bt	Alf	Plag	Opq	Kristal	Gelas	
SA1	15	3	40	-	-	7	7	5	3	10	10	Foidit
SA2	15	5	45	3	-	3	5	3	5	6	10	Foidit
SA3	30	5	15	2	3	10	10	5	5	3	12	Ponolit
SA4	35	5	10	3	5	12	-	10	5	5	10	Ponolit
SA5	25	10	10	5	-	7	10	3	3	15	12	Ponolit
SA6	5	20	15	10	-	-	10	10	5	20	5	Foid Syenit

Ket : Cpx=Klinopiroksen, Snd=Sanidin, Leu=Leusit, Nef=Nefelin, Hbl=hornblenda, Bt=Biotit, Alf=Alkali felspar, Plag=Plagioklas, Opq=Mineral Opak

Tekstur dan Struktur

Sistem magma di bawah permukaan bumi merupakan sistem dinamis yang dapat menyebabkan perubahan komposisi magma berupa perubahan komposisi silika, volatil, maupun unsur-unsur lain dalam magma [17]. Perubahan tersebut akan terekam sebagai tekstur dan struktur batuan.

Tekstur porfiritik merupakan tekstur yang paling umum dijumpai pada sayatan tipis sampel batuan Sungai Ampalas (Tabel 2). Tekstur ini mengindikasikan ada setidaknya dua kali proses kristalisasi yang berbeda pada saat pembentukan batuan vulkanik Sungai Ampalas. Pembentukan fenokris terjadi terlebih dahulu sehingga dapat membentuk kristal dengan bentuk yang sempurna. Masa dasar terbentuk setelah terjadi kristalisasi fenokris. Pembentukan masa dasar terjadi pada lingkungan yang relatif lebih dekat dengan permukaan bumi sehingga menghasilkan kristal yang lebih halus (didominasi oleh mikrolit piroksen dan gelas) yang menunjukkan proses pembekuan yang relatif lebih cepat dibandingkan pembentukan fenokris.

Tekstur aliran juga teramati pada hampir semua masa dasar sampel batuan vulkanik Sungai Ampalas berupa kesejajaran mineral-mineral yang menunjukkan orientasi satu arah yang sama (Tabel 2). Tekstur aliran mengindikasikan bahwa mineral-mineral tersebut membeku bersamaan dengan magma yang terus mengalir. Foid syenit memiliki masa dasar yang didominasi oleh kristal sedangkan dua litologi lainnya memiliki masa dasar dengan komposisi gelas yang lebih banyak.

Rim piroksen teramati pada foidit dan ponolit (Tabel 2). Tekstur *rim* piroksen umumnya hadir akibat proses pencampuran magma [18]. Interpretasi lebih lanjut terhadap tekstur ini memerlukan data kimia mineral berupa perubahan komposisi dari inti ke tepi kristal.

Tekstur *zoning* dijumpai pada seluruh sampel batuan vulkanik Sungai Ampalas (Tabel 2). Tekstur *zoning* pada plagioklas dan leusit yang dijumpai pada sayatan tipis batuan vulkanik Sungai Ampalas dapat mengindikasikan adanya ketidaksetimbangan pada saat pembekuan magma [19, 20]. Dalam kondisi normal, kristal dari mineral yang memiliki kesetimbangan *solid solution* akan terpisah dari larutannya sesaat setelah mengkristal tetapi apabila terjadi ketidakseimbangan, misalnya diakibatkan oleh pendinginan cepat [21], reaksi ini akan

berjalan tidak sempurna [7]. Akibatnya akan terbentuk perubahan komposisi dari inti ke tepi kristal dan menghasilkan tekstur *zoning*.

Tekstur *sieve* hanya dijumpai pada dua sampel sayatan tipis batuan vulkanik Sungai Ampalas (Tabel 2). Keberadaan tekstur *sieve* ini dapat mengindikasikan terjadinya proses pencampuran magma. Pencampuran magma menyebabkan ketidakseimbangan pada reservoir di bawah permukaan. Ketidakseimbangan tersebut memicu absorbsi pada tubuh kristal oleh cairan magma baru sehingga akan terjadi perubahan fisik dan kimia pada reservoir magma dan kristal-kristal yang telah terbentuk sebelumnya, salah satunya dalam bentuk tekstur *sieve* [22].

Tabel 2. Tekstur sampel batuan vulkanik Sungai Ampalas

Kode	Tekstur								
	Porfiritik	Aliran	*Rim* Piroksen	*Zoning*	*Sieve*	*Pseudo Leucite*	Korosi	Inklusi Mafik	Xenolith
SA1	v	-	-	v	v	-	v	-	v
SA2	v	v	-	v	v	v	v	-	-
SA3	v	-	v	v	v	-	-	v	v
SA4	v	v	-	v	v	-	-	-	-
SA5	v	v	v	v	v	v	v	v	-
SA6	v	-	-	v	v	-	-	-	-

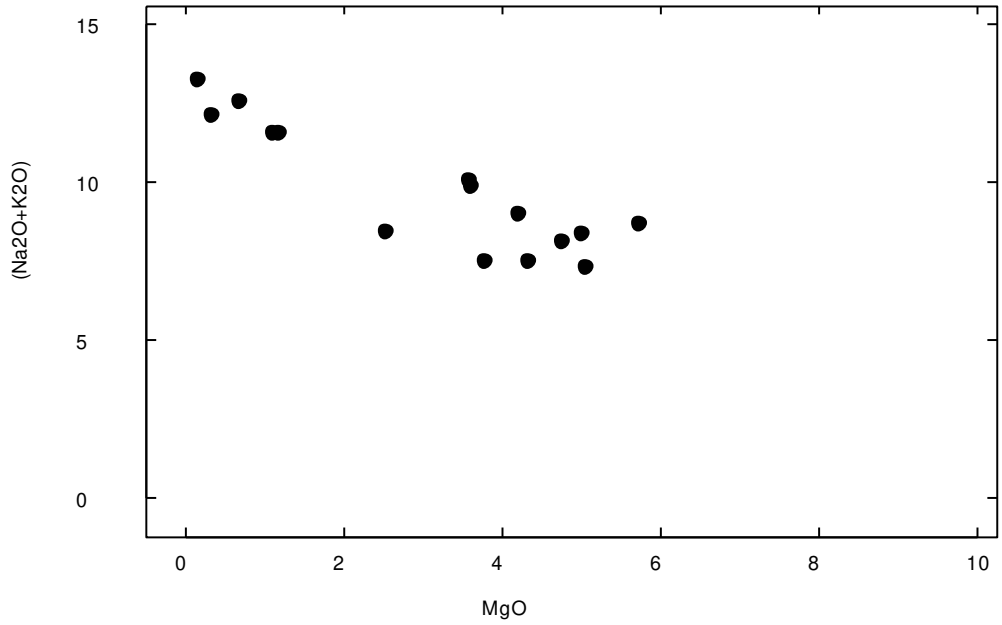
Geokimia Batuan Vulkanik Sungai Ampalas

Seluruh sampel yang digunakan dalam penelitian ini telah mengalami proses pelapukan dan alterasi hidrotermal dalam tingkatan yang berbeda-beda sehingga seluruh data cenderung memiliki nilai *Lost on Ignition* (LOI) yang relatif tinggi, yaitu antara 2,19 –6,06. Oleh karena itu, analisis geokimia sampel batuan Sungai Ampalas tidak hanya dilakukan terhadap unsur utama melainkan juga pada unsur jejak karena unsur jejak memiliki sifat yang lebih stabil dan *immobile* meskipun batuan telah mengalami pelapukan atau alterasi hidrotermal. Secara umum, ketiga jenis batuan vulkanik Sungai Ampalas memiliki perbedaan secara karakter petrografi tetapi cenderung memiliki kesamaan secara geokimia.

Hasil analisis XRF pada sampel batuan vulkanik Sungai Ampalas menunjukkan rentang komposisi SiO_2 antara 54,98–64,56% massa dan MgO antara 0,17–5,76% massa. Variasi komposisi SiO_2 dan MgO dalam sampel batuan vulkanik Sungai Ampalas menunjukkan kelompok batuan intermediet. Secara umum, variasi tersebut mengindikasikan adanya proses fraksionasi kristal dalam magma [3]. Hal ini diperkuat dengan adanya variasi kehadiran mineral yang teramati secara makroskopis maupun mikroskopis serta pola data geokimia MgO vs Na_2O+K_2O yang menunjukkan tren berbanding terbalik. Seiring dengan proses differensiasi, komposisi MgO mengalami penurunan dan komposisi Na_2O+K_2O mengalami peningkatan (Gambar 4).

Rata-rata komposisi Na_2O dan K_2O adalah 4,74 dan 4,98% massa. Batuan vulkanik Sungai Ampalas bersifat tidak jenuh silika (*undersaturated*). Pengayaan K_2O dalam batuan sangat berhubungan dengan

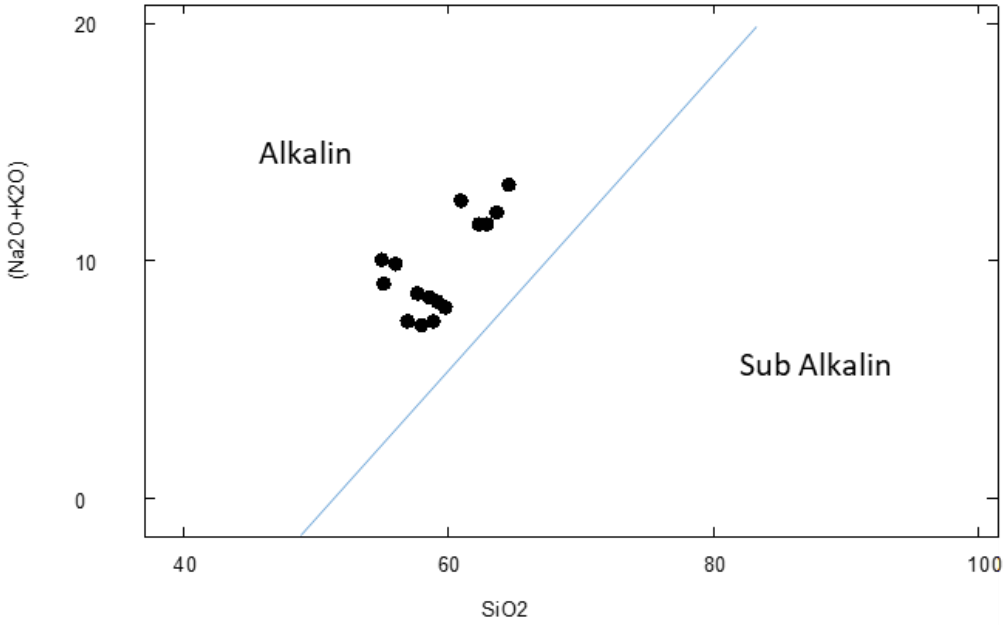
unsur-unsur *incompatible* termasuk unsur radioaktif [1]. Kandungan K_2O dalam batuan akan cenderung berbanding lurus dengan kandungan unsur radioaktif di dalamnya [1].



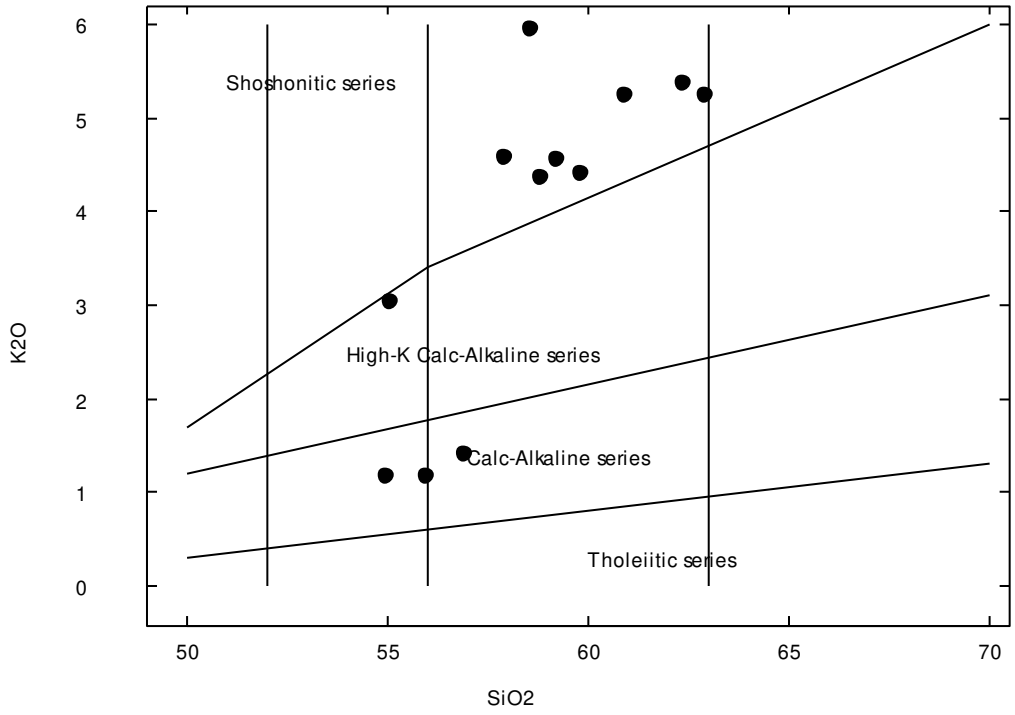
Gambar 4. Diagram MgO vs Na_2O+K_2O [23].

Batuan vulkanik di Sungai Ampalas memiliki komposisi K_2O yang relatif tinggi dibandingkan dengan Na_2O. Perbandingan antara komposisi K_2O dan Na_2O vs SiO_2 dapat digunakan sebagai metode untuk menentukan variasi seri magma suatu kompleks batuan vulkanik [3]. Hasil analisis alkalinitas batuan melalui perbandingan K_2O dan Na_2O pada sampel batuan vulkanik Sungai Ampalas menunjukkan adanya variasi seri magma alkalin (Gambar 5). Secara geologi, seri batuan alkalin memiliki implikasi khusus dalam tatanan geodinamik suatu lingkungan [3]. Batuan tipe ini jarang muncul pada awal zona subduksi aktif dan sering muncul bersamaan atau setelah proses kolisi yang melibatkan interaksi *intraplate*. Fase magmatisme setelah kolisi umumnya berhubungan dengan rekahan kerak benua [1]. Tren positif pada Gambar 5 juga menguatkan interpretasi adanya fraksionasi K-felspar dan felspatoid pada batuan.

Sampel batuan alkalin di Sungai Ampalas menunjukkan rentang afinitas kalk-alkalin hingga soshonitik (Gambar 6). Batuan tipe alkalin dengan rentang afinitas yang bervariasi umumnya terbentuk dalam tataan tektonik yang memiliki alas kerak kontinen [3]. Tidak ada korelasi khusus antara seri magma dengan jenis litologi tetapi analisis lebih lanjut antara hubungan litologi yang telah diketahui umur relatifnya dengan seri magma dapat menjadi metode untuk mengetahui urutan fase magmatisme yang terjadi di dapur magma bawah permukaan Sungai Ampalas.



Gambar 5. Diagram SiO_2 vs Na_2O+K_2O [23].



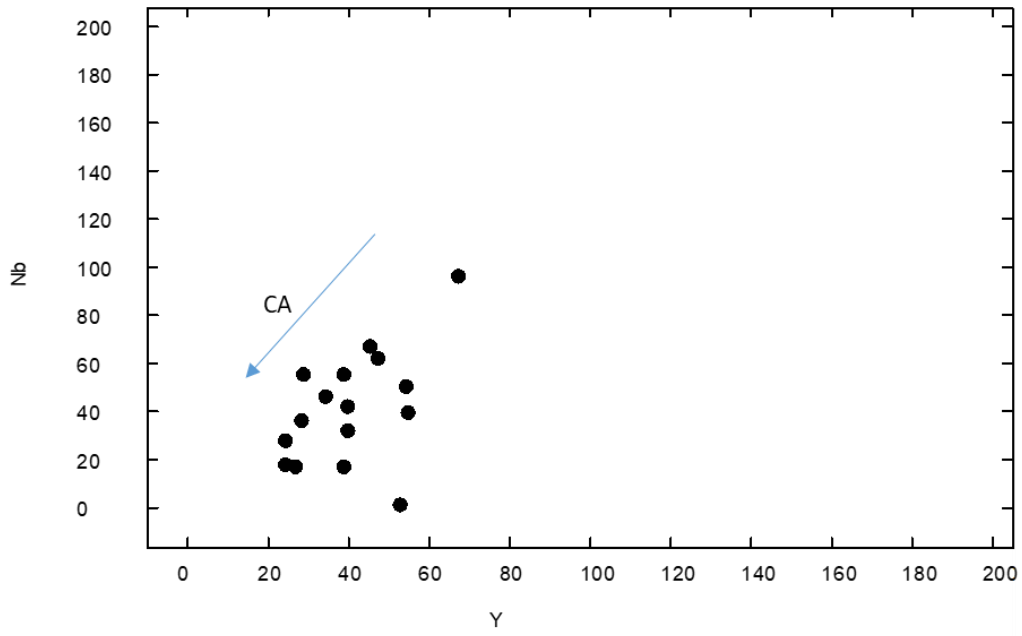
Gambar 6. Diagram afinitas magma [23].

Unsur anggota HFSE (*High Field Strength Element*) yang digunakan dalam penelitian ini adalah Y dan Nb. Perbandingan antara komposisi Y dan Nb pada sampel batuan vulkanik Sungai Ampalas menunjukkan pola data yang memiliki gradien positif dan diinterpretasikan termasuk dalam kelompok batuan alkalin peralihan dari *intraplate* menuju *volcanic arc + syn collision* (Gambar 7). Pola data tersebut

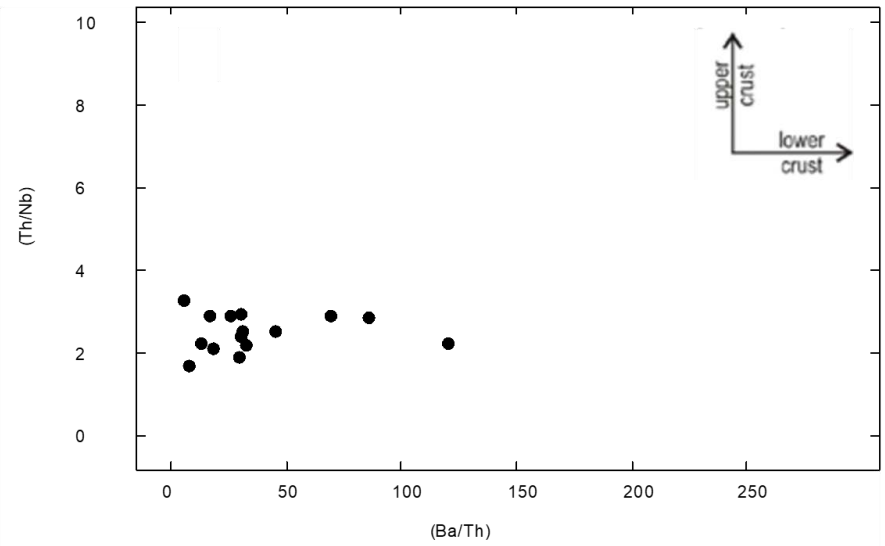
mengindikasikan adanya proses kontaminasi kerak kontinen (CA). Batuan yang mendapat pengaruh kontaminasi kerak kontinen yang kuat akan cenderung memiliki rasio Y-Nb yang kecil dan termasuk dalam kelompok *volcanic arc* + *syn-collision* (Gambar 7).

Untuk memperkuat interpretasi berdasarkan perbandingan Y dan Nb dilakukan perbandingan lebih lanjut antara Ba/Th dan Th/Nb (Gambar 8). Pola perbandingan Ba/Th dan Th/Nb menunjukkan variasi horizontal yang menunjukkan bahwa kontaminasi dominan berasal dari kerak bagian bawah *(lower crust).* Data tersebut semakin memperkuat indikasi keterlibatan proses kontaminasi kerak kontinen dalam pembentukan batuan vulkanik Sungai Ampalas yang mungkin juga mempengaruhi akumulasi mineral radioaktif di batuan vulkanik Sungai Ampalas.

Pada penelitian terdahulu disebutkan bahwa kelompok batuan ponolit dan nefelin syenit memiliki rata-rata kelimpahan Th sebesar 17,1 ppm, U sebesar 6,5 ppm, dan K sebesar 5,78% [24]. Sampel batuan vulkanik dari hilir Sungai Ampalas memiliki kelimpahan rata-rata Th, U, dan K berturut-turut sebesar 130,7 ppm, 20,3 ppm, dan 4,98%. Tingginya nilai rata-rata kelimpahan U dan Th di hilir Sungai Ampalas diinterpretasikan akibat pengaruh kerak bagian bawah sebagai kontaminan dalam proses differensiasi magma. Pada magma pembentuk batuan vulkanik Ampalas, selain proses diferensiasi akibat kondisi fisika dan kimia di reservoir magma, proses diferensiasi juga dipengaruhi oleh kontaminasi kerak kontinen bagian bawah. Lelehan yang terbentuk pada proses subduksi di bagian bawah mengalami asimilasi dengan kerak kontinen sehingga stabilitas magma terganggu dan fraksionasi felspatoid terjadi. Ketidaksetimbangan kondisi reservoir magma kemudian terekam sebagai tekstur pada kristal seperti *sieve* dan *zoning*. Dalam perjalanan menuju ke permukaan, differensiasi terus terjadi dan differensiasi tingkat lanjut menghasilkan pengayaan U dan Th dalam batuan.



Gambar 7. Diagram Y vs Nb yang menunjukkan adanya pengaruh kontaminasi kerak [25].



Gambar 8. Diagram Ba/Th vs Th/Nb yang menunjukkan adanya pengaruh kerak bagian bawah [25].

KESIMPULAN

Karakter petrologi batuan vulkanik di Sungai Ampalas terdiri atas tiga jenis litologi yaitu ponolit, foidit, dan foid syenit. Tekstur yang dijumpai pada batuan tersebut antara lain tekstur porfiritik, aliran, *rim* piroksen, *zoning,* pseudo-leusit, korosi, inklusi mafik, dan *sieve*. Batuan vulkanik sebagai pembawa mineral radioaktif di Sungai Ampalas menunjukkan karakteristik geokimia berupa alkalinitas yang tinggi, kalk alkalin hingga soshonitik, dan menunjukkan adanya pengayaan mineral radioaktif. Proses magmatis yang berperan dalam pembentukan batuan pembawa mineral radioaktif di Sungai Ampalas antara lain fraksionasi kristal yang terdiri atas fraksionasi leusit dan alkali felspar lain, asimilasi kerak kontinen, dan pencampuran magma. Interaksi magma yang menembus kerak kontinen bagian bawah menyebabkan terjadinya diferensiasi berkelanjutan yang mendukung akumulasi U dan Th dalam batuan. Penelitian lanjutan dengan analisis isotop dan kimia mineral perlu dilakukan untuk menentukan kondisi litotektonik berdasarkan kondisi lingkungan saat mineral terbentuk.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir yang telah memberikan kesempatan dalam pengambilan data dan penulisan makalah ini. Penulis juga berterima kasih kepada Tim Laboratorium Petrologi dan XRF yang telah memberikan bimbingan dan kerja sama dalam melakukan analisis.

DAFTAR PUSTAKA

[1] I. G. Sukadana, "Petrogenesis Batuan Vulkanik Adang dan Kaitannya dengan Keterdapatan Mineral Radioaktif di Kabupaten Mamuju, Sulawesi Barat," Universitas Gadjah Mada, 2015.

[2] PTBGN BATAN, "Laporan Teknis PTBGN BATAN 2013," Jakarta, 2013.

[3] J. D. Winter, *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology John D. Winter Second Edition*, 2nd ed. London: Pearson Education Limited, 2013.

[4] S. E. Sichel, A. Motoki, S. E. Sichel, T. Vargas, J. R. Aires, S. Silva, A. Balmant, dan J. Gonçalves, "Geochemical evolution of the felsic alkaline rocks of tanguá and Rio bonito intrusive bodies , state of Rio de Janeiro , Brazil," *Geociencias*, vol. 29, no. 3, pp. 291–310, 2010.

[5] A. Motoki, S. E. Sichel, T. Vargas, D. P. Melo, dan K. F. Motoki, "Geochemical behaviour of trace elements during fractional crystallization and crustal assimilation of the felsic alkaline magmas of the state of Rio de Janeiro, Brazil,"

An. Acad. Bras. Cienc., vol. 87, no. 4, pp. 1959–1979, 2015.

[6] K. D. Putirka, M. A. Kuntz, D. M. Unruh, dan N. Vaid, "Magma evolution and ascent at the craters of the moon and neighboring volcanic fields, Southern Idaho, USA: Implications for the evolution of polygenetic and monogenetic volcanic fields," *J. Petrol.*, vol. 50, no. 9, pp. 1639–1665, 2009.

[7] M. L. Renjith, "Micro-textures in plagioclase from 1994-1995 eruption, Barren Island Volcano: Evidence of dynamic magma plumbing system in the Andaman subduction zone," *Geosci. Front.*, vol. 5, no. 1, pp. 113–126, 2014.

[8] M. Cuney dan K. Kyser, "Recent and Not-So-Recent Developments in Uranium Deposits and Implications for Exploration.," *Econ. Geol.*, vol. 104, no. 4, pp. 600–601, 2009.

[9] M. Cuney, A. Emetz, J. Mercadier, V. Mykchaylov, V. Shunko, dan A. Yuslenko, "Uranium deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine: A review of some of the major deposits and genetic constraints," *Ore Geol. Rev.*, vol. 44, pp. 82–106, 2012.

[10] H. D. Schorscher dan M. E. Shea, "The Regional Geology of the Pocos de Caldas Alkaline Complex: Mineralogy and Geochemistry of Selected Nepheline Syenites and Phonolites," *J. Geochemical Explor.*, vol. 45, pp. 25–51, 1992.

[11] L. Qiu, D. P. Yan, M. Ren, W. Cao, S. L. Tang, Q. Y. Guo, L. T. Fan, J. Qiu, Y. Zhang, dan Y. W. Wang, "The source of uranium within hydrothermal uranium deposits of the Motianling mining district, Guangxi, South China," *Ore Geol. Rev.*, vol. 96, pp. 201–217, 2018.

[12] P. Bruneton dan M. Cuney, "Geology of uranium deposits," in *Uranium for Nuclear Power: Resources, Mining and Transformation to Fuel*, no. 1956, Elsevier Ltd, 2016, pp. 11–52.

[13] Y. S. Yuwono, R. C. Maury, R. Soeria-Atmadja, dan H. Bellon, "Tertiary and Quaternary geodynamic evolution of South Sulawesi constraints from the study of volcanic units," *Maj. Ikat. Ahli Geol. Indones.*, vol. 13, no. 1, pp. 32–48, 1988.

[14] B. Priadi, "Volkanisme Tersier-Kuarter di Lengan Barat Sulawesi," *Proceeding "Geologi Sulawesi dan Prospeknya" Makasar*, 2009.

[15] N. Ratman dan S. Atmawinata, "Peta Geologi Lembar Mamuju dan Sekitarnya, Sulawesi, Skala 1:250.000," Bandung, 1993.

[16] I. G. Sukadana, A. Harijoko, dan L. D. Setijadji, "Tectonic Setting of Adang Volcanic Complex in Mamuju Region, West Sulawesi Province," *Eksplorium*, vol. 36, no. 1, pp. 31–44, 2015.

[17] J. Blundy dan K. Cashman, "Petrologic Reconstruction of Magmatic System Variables and Processes," *Rev. Mineral. Geochemistry*, vol. 69, no. 1, pp. 179–239, 2008.

[18] M. J. Rutherford dan J. D. Devine, "Magmatic Conditions and Magma Ascent as Indicated by Hornblende Phase Equilibria Á re and Reactions in the 1995 ± 2002 Soufrie Hills Magma," *J. Petrol.*, vol. 44, no. 8, pp. 1433–1454, 2003.

[19] D. A. Jerram, K. J. Dobson, D. J. Morgan, dan M. J. Pankhurst, *The Petrogenesis of Magmatic Systems: Using Igneous Textures to Understand Magmatic Processes*. Elsevier Inc., 2018.

[20] K. Deniz dan Y. K. Kadioğlu, "Assimilation and fractional crystallization of foid-bearing alkaline rocks: Buzlukdağ intrusives, Central Anatolia, Turkey," *Turkish J. Earth Sci.*, vol. 25, no. 4, pp. 341–366, 2016.

[21] M. J. Streck, "Mineral Textures and Zoning as Evidence for Open System Processes," *Rev. Mineral. Geochemistry*, vol. 69, no. 1, pp. 595–622, 2008.

[22] N. M. Asrial, M. F. Rosana, K. Arfiansyah, dan N. Nordin, "Petrogenesis of Andesite in Bukitcula, Baleendah District, Southern Bandung, West Java," *J. Geol. Sci. Appl. Geol.*, vol. 3, no. 3, pp. 1–6, 2019.

[23] A. Peccerillo dan S. R. Taylor, "Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey," *Contrib. to Mineral. Petrol.*, vol. 56, pp. 63–81, 1976.

[24] T. P. Mernagh dan Y. Miezitis, *A Review of the Geochemical Processes Controlling the Distribution of Thorium in the Earth's Crust and Australia's Thorium Resources*. Australia: Onshore Energy and Mineral Division, 2008.

[25] J. A. Pearce dan J. R. Cann, "Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses," *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 19, no. 2, pp. 290–300, 1973.