



# **Analisis Petrografi dan Geokimia Batuan Diorit-Granodiorit-Granit di Daerah Gorontalo, Sulawesi**

## ***Petrographic and Geochemical Analysis of the Diorite-Granodiorite-Granite Rocks at Gorontalo Area, Sulawesi***

Sam Permanadewi dan Hanang Samodra

Pusat Riset Sumber Daya Geologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional

email: [sam\\_permanadewi@yahoo.com](mailto:sam_permanadewi@yahoo.com)

Naskah diterima: 09 Agustus 2022, Revisi terakhir: 26 September 2022, Disetujui: 26 September 2022, Online: 04 November 2022

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v23.4.235-246>

**Abstrak** - Petrografi dan geokimia batuan granitoid didekati dari aspek petrografi dan *whole-rock X-ray fluorescence* (XRF) serta pemodelan data geokimia unsur utama menggunakan perangkat lunak GCDkit berbasis bahasa pemrograman R. Kelompok batuan Gorontalo diorit-granodiorit-granit (DGG) merupakan kelompok batuan beku plutonik bersifat menengah-asam yang dapat dibedakan jenisnya berdasarkan persentase kehadiran mineral kuarsa, alkali feldspar dan plagioklas serta komposisi geokimia. Secara fisik, batuan tersebut menunjukkan struktur masif, tekstur holokristalin dengan bentuk kristal umumnya euhedral-subhedral dengan ukuran kristal fanerik sedang hingga sangat kasar. Analisis pada batuan Gorontalo DGG menunjukkan kecenderungan sifat magnesian dengan indeks saturasi aluminium seluruhnya adalah metaluminous dan memiliki seri magma dengan tipe kalk-alkalin yang berasosiasi dengan lingkungan subduksi dengan perkiraan kedalaman peleburan sebagian magma terjadi pada kedalaman antara 114 hingga 160 km. Material batuan yang mengalami peleburan berasal dari dua jenis yang berbeda, yaitu *low* dan *high-K mafic rocks*. Selanjutnya, proses diferensiasi magma Gorontalo DGG setidaknya mengalami proses *magma mixing*, *gravitational settling* mineral, dan fraksinasi.

**Katakunci:** DGG, geokimia, Gorontalo, petrografi.

**Abstract** - *Petrographic and geochemical of granitoid rocks was approached from the petrographic and whole-rock aspects of X-ray fluorescence (XRF) as well as the main element geochemical data modeling using GCDkit software based on the R programming. The Gorontalo diorite-granodiorite-granite (DGG) rock group is a group of intermediate-acid plutonic igneous rocks that can be distinguished by type based on the percentage presence of quartz, alkali feldspar, plagioclase minerals and geochemical composition. These rocks have a massive structure; holocrystalline texture and the crystal form is generally euhedral-subhedral with medium to coarse phaneritic crystal sizes. Analysis of the Gorontalo DGG shows that the rocks have magnesian type, metaluminous as aluminum saturation index and they have a calc-alkaline magma series associated with a subduction tectonic setting with an estimated partial melting depth at a depth in between 114 to 160 km. The source of rock material comes from two different types, namely low and high-K mafic rocks. Furthermore, the Gorontalo DGG magma differentiation process at least undergoes several processes such as magma mixing, gravitational settling of minerals, and fractionation.*

**Keywords:** DGG, geochemistry, Gorontalo, petrography.

## PENDAHULUAN

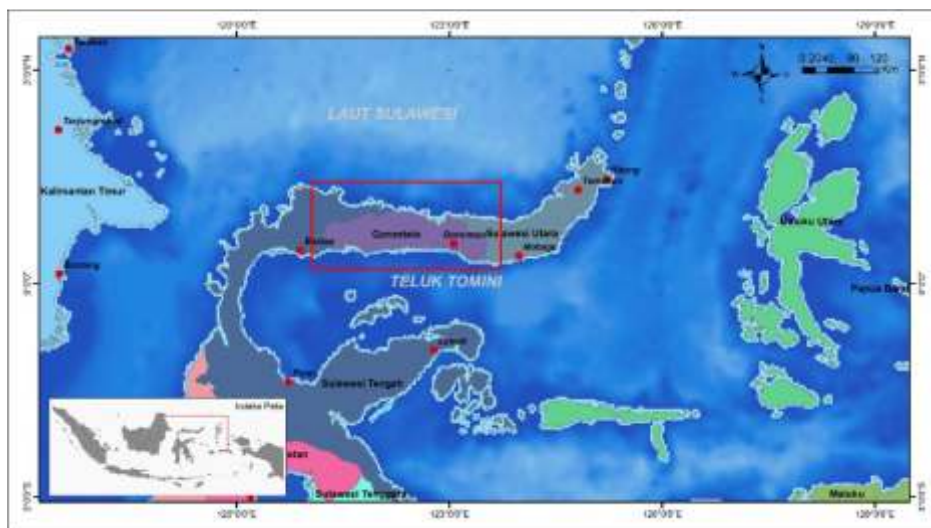
Daerah Gorontalo terletak di lengan utara Pulau Sulawesi yang membentang arah barat-timur, sebelum berbelok ke utara atau timurlaut (Gambar 1), memiliki sejarah geologi yang cukup panjang sejak puluhan juta tahun lalu hingga sekarang. Daerah ini merekam dan mengawetkan berbagai proses geologi seperti sedimentasi di laut dalam, 18 kegunungapian, dan magmatisme yang dipengaruhi oleh kegiatan tektonik seperti penunjaman dan tubrukan lempeng kerakbumi, perputaran, dan gaya tarikan (Silver dkk., 1983). Disebutkan oleh Hall & Spakman (2015) bahwa kejadian penunjaman dan tubrukan antara *Sula Spur* dengan lengan utara Sulawesi dimulai pada Eosen dan menerus hingga Miosen. Peristiwa itu menginisiasi terbentuknya Sesar Gorontalo yang alihannya bergerak dengan kecepatan sekitar 11 mm/tahun (Socquet dkk., 2006) dan memicu terjadinya *pull-apart basin* yang menghasilkan Danau Limboto, termasuk Lembah Bone dan Lembah Pinogu.

Batuan tertua di wilayah ini, yang termasuk dalam batuan Mesozoikum adalah Kompleks Metamorfik yang terdiri atas sekis dan genes (Ratman, 1976). Batuan yang diduga berumur Trias-Jura ini tersingkap di ujung barat wilayah Provinsi Gorontalo (Sukamto dkk., 1994). Himpunan batuan Paleogen (Paleosen - Oligosen) yang menindih takselaras satuan sekis dan genes terdiri atas batuan sedimen *flysch*, batuan gunungapi basal-spilit, dan batuan terobosan dioritan (Sukamto dkk., 1994). Selanjutnya, himpunan batuan Neogen (Miosen Awal - Pliosen) yang menindih takselaras satuan di bawahnya terdiri atas batuan gunungapi andesit-basal, batuan sedimen Miosen,

batuan gunungapi andesit-riolit, dan batugamping Miosen yang diterobos oleh batuan beku bersusunan granitan (Sukamto dkk., 1994). Pada rentang umur yang paling muda, yakni himpunan batuan Kuartar di daerah Gorontalo dan sekitarnya terdiri atas endapan molasa, batugamping koral, dan aluvium.

Kegiatan kegunungapian dan magmatisme terekam baik pada Kenozoikum Akhir, di pantai utara Gorontalo terbentuk Breksi Wobudu yang berumur Pliosen Awal dan di pantai selatan Gorontalo diwarnai oleh penerobosan dasit secara komagmatik dan kegunungapian (Apandi & Bachri, 1997; Bachri dkk., 1993). Penanggalan secara K-Ar pada batuan di daerah itu menghasilkan umur  $5,3 \pm 2,0$  juta tahun (Perello, 1994; Polve dkk., 1997; Pearson & Caira, 1999). Banyak ahli yang menduga bahwa peristiwa kegunungapian di daerah Gorontalo pada Kenozoikum Akhir ini disertai dengan pembentukan kaldera.

Ketakselarasan yang memisahkan batuan Paleogen, Neogen dan Kuartar di daerah ini menunjukkan adanya dinamika tektonik selama Kenozoikum. Ketakselarasan di permulaan Miosen menggambarkan terjadinya tektonik cukup nyata, yang berkaitan dengan tubrukan antara lengan utara Sulawesi dengan fragmen benua kecil *Sula Spur* (van Leeuwen & Muhardjo, 2005) atau fragmen Banggai-Sula (Perello, 1994; Pearson & Caira, 1999). Gaya tarikan yang disebabkan oleh mundurnya penunjaman di daerah Laut Banda dan sekitarnya menyebabkan *Sula Spur* terfragmentasi (Spakman & Hall, 2010). Kajian batuan granitoid di daerah ini dilakukan untuk melengkapi data petrologi khususnya jenis batuan dan geokimia yang meliputi seri, tipe dan proses pembekuan magma pembentuk batuan beku yang dijumpai.



Gambar 1. Lokasi kegiatan yang berada di Provinsi Gorontalo (warna merah).

## METODE

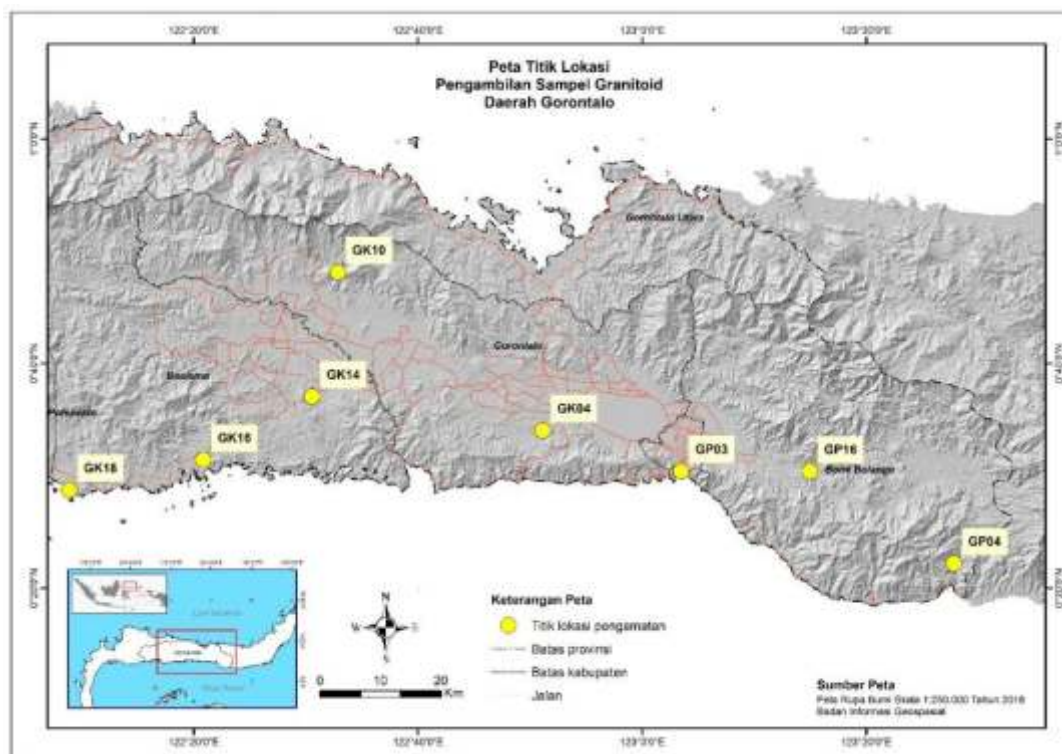
Kegiatan survei lapangan dilaksanakan dengan melakukan pengamatan dan identifikasi batuan secara fisik pada beberapa lokasi di wilayah kajian (Gambar 2), serta pengambilan sampel batuan untuk keperluan analisis laboratorium. Tinjauan analisis geokimia batuan granitoid didekati dari aspek petrografi dan *whole-rock X-ray fluorescence* (XRF; Goto dkk., 1996; Tsuchiya dkk., 1989) dimana jumlah sampel batuan yang digunakan untuk analisis petrografi adalah sebanyak enam sampel, sedangkan delapan sampel batuan dilakukan analisis geokimia. Analisis geokimia XRF menghasilkan nilai persen berat unsur-unsur oksida utama seperti  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , dan  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Sepuluh unsur oksida utama masing-masing dengan jumlah persen berat (sudah dinormalkan menjadi 100 %) sehingga dapat diketahui jenis batuan berdasarkan kandungan total alkali silika, seri magma, dan fase tektonik pembentukannya (Samodra dkk., 2021). Selanjutnya, pemodelan lain data geokimia unsur utama menggunakan perangkat lunak GCDkit berbasis bahasa pemrograman R (Janoušek dkk., 2006).

## HASIL

Batuan beku plutonik bersifat menengah-asam yang ada termasuk dalam satu kelompok batuan granitoid berdasarkan survei lapangan, tubuh pluton batuan membentuk struktur batolit-stok dengan dimensi pluton mencapai  $>100 \text{ km}^2$ . Batuan dikelompokkan sebagai kelompok Gorontalo DGG (diorit-granodiorit-granit) yang menunjukkan struktur masif, tekstur holokristalin, bentuk kristal umumnya euhedral-suhedral dengan ukuran kristal fanerik halus-kasar. Pada kelompok granodiorit-granit umumnya tersusun atas mineral kuarsa, plagioklas, K-feldspar, biotit, dan mineral opak. Kelompok diorit dan sebagian granodiorit tersusun atas mineral kuarsa, plagioklas, K-feldspar, biotit, hornblende, piroksen, dan mineral opak.

### Analisis Petrografi

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik batuan secara mikroskopis, hal tersebut dilakukan untuk mengetahui lebih rinci struktur dan komposisi mineral batuan secara mikroskopis dan sebagai dasar dalam analisis geokimia lanjutan. Hasil pengamatan petrografi 6 (enam) sampel batuan tersebut seperti di bawah ini.



Gambar 2. Peta titik lokasi pengamatan dan pengambilan sampel batuan di Gorontalo.

**Sampel GK04**

Pengamatan di bawah mikroskop menunjukkan kondisi batuan cukup segar, tekstur holokristalin yang tersusun oleh mineral plagioklas 35 %, K-feldspar 20 %, piroksen (kecenderungan jenis ortopiroksen) 18 %, biotit 12 %, hornblende 6 %, kuarsa 5 %, dan mineral opak 4 %. Secara umum, ukuran kristal berkisar antara 0,4-2,47 mm (fanerik halus-sedang) dengan bentuk kristal euhedral-subhedral. Untuk jenis plagioklas teridentifikasi dengan nilai An-38 dan beberapa menunjukkan struktur *oscillatory zoning*. Setempat juga dijumpai adanya tekstur glomeroporfiritik mineral piroksen-hornblende-plagioklas. Kondisi mineral piroksen umumnya telah berubah (Gambar 3).

**Sampel GK10**

Kondisi batuan sangat segar dengan tekstur holokristalin, *inequigranular serrate* porfiritik yang tersusun atas mineral plagioklas 35 %, K-feldspar 18 %, piroksen (kecenderungan jenis klinopiroksen) 18 %, hornblende 6 %, biotit 14 %, kuarsa 8 %, dan mineral opak 3 % yang memiliki kisaran ukuran kristal antara 0,92-5,2 mm (fanerik halus-kasar), dengan bentuk kristal antara euhedral-subhedral. Selain itu juga setempat teramati adanya tekstur glomeroporfiritik mineral piroksen-hornblende-plagioklas. Plagioklas memiliki jenis andesin dengan nilai An-48 dan beberapa plagioklas memiliki struktur *oscillatory zoning* (Gambar 4).

**Sampel GK14**

Pengamatan di bawah mikroskop batuan ini memiliki tekstur holokristalin dengan komposisi mineral utamanya adalah K-feldspar 36 %, kuarsa 28 %, plagioklas 18 %, biotit 14 %, dan mineral opak 4 %. Ukuran kristal berkisar antara 0,6-3,3 mm (fanerik halus-sedang) dengan bentuk kristal euhedral-subhedral dan kemas *inequigranular serrate* porfiritik. Mineral plagioklas yang hadir memiliki nilai An-2 dengan jenis albit. Selain itu, teramati juga adanya tekstur kumulat dan *enclave* mafik (MMEs).

Setempat dijumpai adanya mineral ubahan berupa klorit dengan porsi yang cukup sedikit (Gambar 5).

**Sampel GK18**

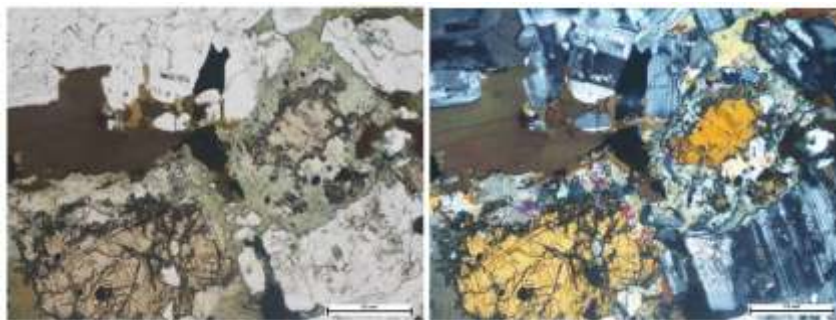
Di bawah mikroskop batuan berwarna coklat kehijauan hingga tak berwarna dengan tekstur holokristalin, *inequigranular porfiritik*, mikrokristalin dengan komposisi mineral utamanya sebagai fenokris adalah plagioklas 34 %, kuarsa 21 %, K-feldspar 18 %, biotit 8 %, dan mineral opak 3 %. Secara umum, fenokris berukuran butir antara 1,15-3,05 mm (fanerik sedang). Mikrokristal plagioklas, K-feldspar, kuarsa sebagai masa dasar 13 % berukuran antara 0,38-0,80 mm (fanerik halus). Plagioklas yang hadir memiliki jenis albit dengan nilai An-8. Kehadiran sedikit mineral klorit menunjukkan bahwa kondisi batuan telah mengalami sedikit pelapukan. Teramati juga mineral tambahan apatit sebagai inklusi dalam mineral feldspar (Gambar 6).

**Sampel GP03**

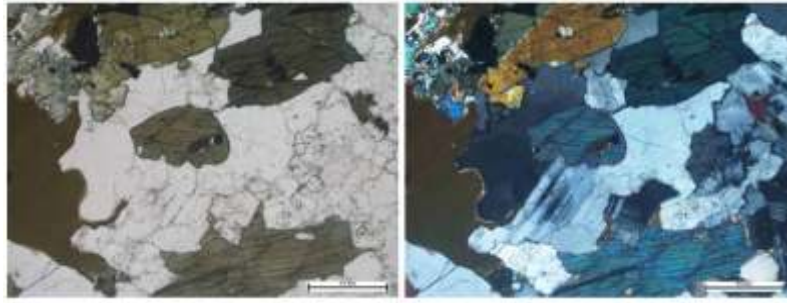
Pengamatan di bawah mikroskop batuan ini menunjukkan tekstur holokristalin yang mineral utamanya adalah K-feldspar 38 %, plagioklas 26 %, kuarsa 11 %, piroksen (kecenderungan sebagai ortopiroksen) 8 %, biotit 8 %, hornblende 6 %, dan mineral opak 3 % dengan ukuran kristal berkisar antara 0,56-3,34 mm (fanerik halus-sedang) serta bentuk kristal euhedral-subhedral. Mineral plagioklas teridentifikasi berjenis andesin dengan nilai An-40 dan menunjukkan adanya struktur *oscillatory zoning* (Gambar 7).

**Sampel GP04**

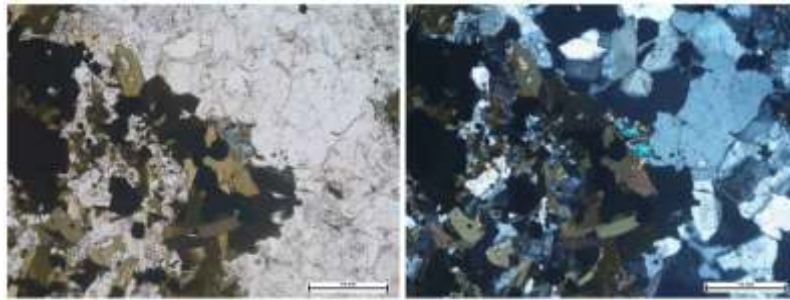
Batuan ini memiliki tekstur holokristalin dengan komposisi mineral utamanya adalah plagioklas 30 %, piroksen 22 %, K-feldspar 15 %, biotit 11 %, kuarsa 9 %, hornblende 9 %, dan mineral opak 3 %, dimana memiliki kisaran ukuran kristal antara 0,38-2,16 (fanerik halus-sedang) dengan bentuk kristal euhedral-subhedral serta kemas *inequigranular, porfiritik*. Mineral plagioklas yang ada menunjukkan jenis andesin dengan nilai An-48 dan mineral tersebut memiliki struktur *oscillatory zoning*. (Gambar 8)



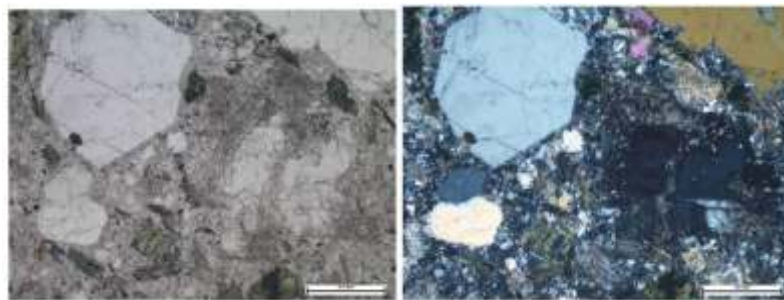
**Gambar 3.** Mikrofoto sampel 21GK04A, kiri: //nikol, kanan: x-nikol.



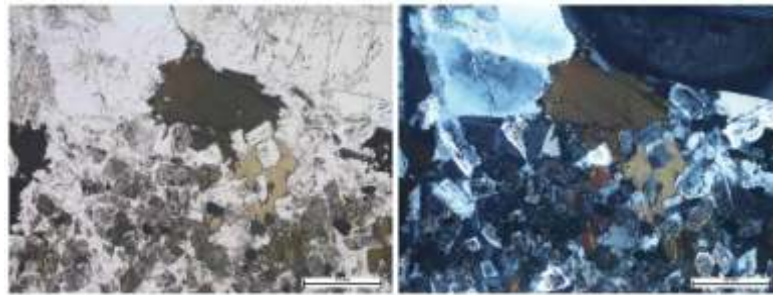
**Gambar 4.** Mikrofoto sampel 21GK10A, kiri: //nikol, kanan: x-nikol.



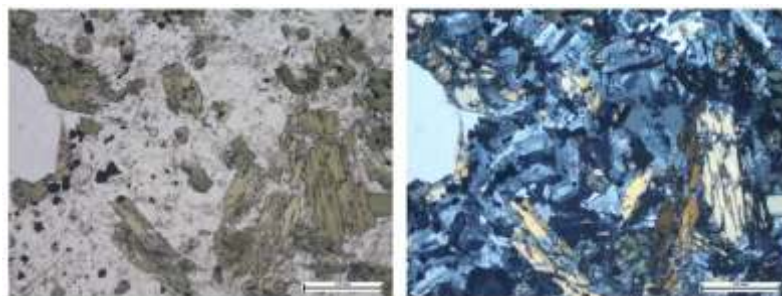
**Gambar 5.** Mikrofoto sampel 21GK14A, kiri: //nikol, kanan: x-nikol.



**Gambar 6.** Mikrofoto sampel 21GK18A, kiri: //nikol, kanan: x-nikol.



**Gambar 7.** Mikrofoto sampel 21GP03A1, kiri: //nikol, kanan: x-nikol.



**Gambar 8.** Mikrofoto sampel 21GP04A1, kiri: //nikol, kanan: x-nikol.

**Analisis Geokimia**

Keseluruhan sampel batuan yang telah dilakukan analisis petrografi juga dilakukan analisis geokimia untuk mengetahui komposisi unsur utama. Terdapat dua sampel, yakni sampel 21GK16 dan 21GP16 yang dilakukan analisis geokimia namun tidak dilakukan pengamatan petrografi (Tabel 1). Data komposisi unsur utama yang telah dilakukan perhitungan normaliasi, selanjutnya dilakukan pemodelan dalam bentuk plot ke diagram untuk mengetahui karakteristik geokimia yang ada. Karakterisasi ini menggunakan beberapa diagram, yakni diagram ternari MFW untuk mengetahui tingkat pelapukan batuan (Ohta & Arai, 2007) dan diagram diskriminan granitoid untuk menentukan variasi nilai ASI (*aluminum saturation index*), dan kecenderungan sifat Fe-Mg pada batuan (Frost dkk., 2001).

Selanjutnya, penentuan seri magma batuan menggunakan diagram AFM (Irvine & Baragar, 1971), klasifikasi kelompok batuan dengan menggunakan diagram TAS (total alkali silika) (Middlemost, 1994), dan diagram sumber magma untuk mengetahui kecenderungan material asal peleburan magma (Laurent dkk., 2014). Terkait dengan sumber magma, dilakukan juga perhitungan kedalaman peleburan magma pada jalur subduksi dengan pendekatan rumus perhitungan oleh Hutchison (1973). Dalam hal ini jalur penunjaman dianggap mempunyai bentuk yang ideal dan terbatas pada model lingkungan subduksi di Indonesia secara umum. Rumus tersebut adalah:

$$d(\text{kedalaman}) = [320 - (3,65 \times \%SiO_2)] + (25,52 \times \%K_2O)$$

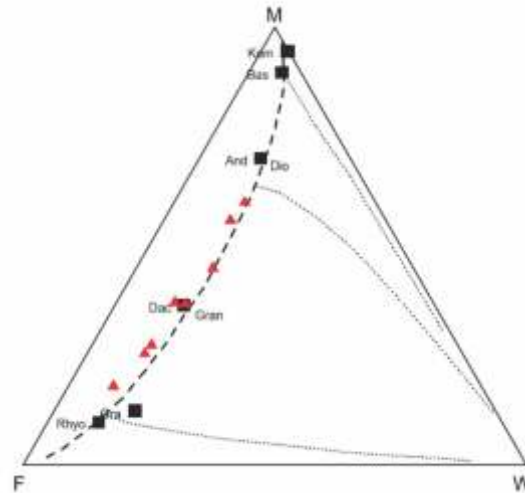
Konfirmasi kondisi batuan dilakukan untuk mengetahui tingkat kesegaran batuan dan memastikan batuan tidak mengalami proses pelapukan yang intens sehingga dapat menghasilkan nilai kadar yang tidak akurat pada saat dilakukan analisis geokimia. Diagram MFW (Gambar 9) menunjukkan bahwa keseluruhan keseluruhan sampel berada pada posisi garis putus-putus tebal sepanjang kurva M-F dimana kurva tersebut merupakan garis standar tingkat kesegaran batuan. Seluruh sampel berada pada rentang tingkat kesegaran andesit/diorit hingga mendekati riolit/granit. Setidaknya dengan diagram ini dapat meyakinkan bahwa nilai komposisi unsur utama dari keseluruhan dalam kondisi yang relatif akurat untuk dilakukan analisis lanjutan.

Besaran nilai komposisi silika (SiO<sub>2</sub>) pada keseluruhan sampel batuan berkisar 61,9-71 wt%. Karakterisasi nilai total alkali silika menunjukkan rentang nilai Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O antara 4,9 wt% hingga 6,8 wt% terhadap komposisi silika. Diagram TAS menunjukkan perbandingan parameter unsur utama SiO<sub>2</sub> terhadap Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O untuk mengetahui kelompok batuan (Gambar 10). Berdasarkan diagram tersebut, terdapat enam sampel batuan yang termasuk dalam kelompok batuan beku plutonik asam sebagai granodiorit dan satu sampel batuan, GP16, sebagai kelompok granit. Selain itu, satu sampel batuan sebagai batuan beku plutonik yang termasuk dalam kelompok diorit, yaitu sampel GP10.

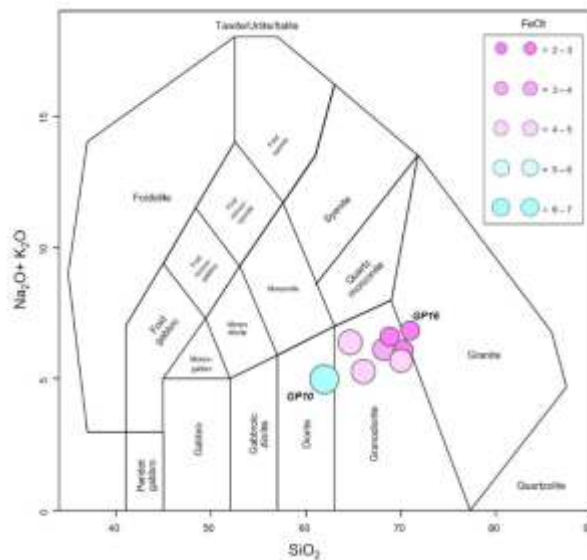
Selanjutnya, nilai komposisi silka juga dilakukan perbandingan terhadap unsur FeO<sub>t</sub> untuk mengetahui

**Tabel 1.** Hasil analisis kimia batuan dengan metoda XRF dalam berat persen (wt.%) yang telah dilakukan normalisasi

No. Sampel	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
GK04	68,32	0,53	14,82	3,88	0,08	0,97	5,10	4,07	2,06	0,19
GK10	61,99	0,67	16,81	6,74	0,13	2,42	6,06	3,31	1,68	0,18
GK14	70,34	0,37	15,09	2,75	0,11	1,24	3,89	3,56	2,52	0,14
GK16	64,72	0,64	15,99	4,70	0,08	2,29	4,98	3,39	3,00	0,22
GK18	68,87	0,36	15,76	2,79	0,07	1,27	4,15	3,44	3,15	0,14
GP03	70,04	0,49	14,31	4,05	0,13	1,06	4,09	3,74	1,95	0,14
GP04	66,06	0,70	15,10	4,82	0,13	2,25	5,50	3,58	1,68	0,18
GP16	71,01	0,32	14,93	2,46	0,08	0,57	3,58	4,45	2,40	0,21



**Gambar 9.** Diagram MFW untuk mengetahui tingkat pelapukan batuan (Ohta & Arai, 2007).



**Gambar 10.** Diagram TAS ( $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O+K}_2\text{O}$ ) untuk menentukan kelompok batuan beku plutonik dimana keseluruhan batuan termasuk dalam kelompok diorit-granodiorit-granit (Middlemost, 1994). Nilai skala warna FeOt dalam wt%.

hubung kait kedua unsur tersebut. Sampel GP16 yang memiliki komposisi silika tertinggi hanya memiliki kandungan FeOt sekitar 2 wt%, 3 kali lipat lebih kecil dibandingkan dengan sampel GP10 yang memiliki unsur FeOt sekitar 6 wt%. Namun demikian, sampel GP10 tersebut memang hanya memiliki nilai komposisi silika sebesar 61,9 wt%. Data tersebut menunjukkan bahwa makin tinggi nilai komposisi silika makin rendah nilai unsur FeOt yang dimiliki pada batuan (Gambar 10).

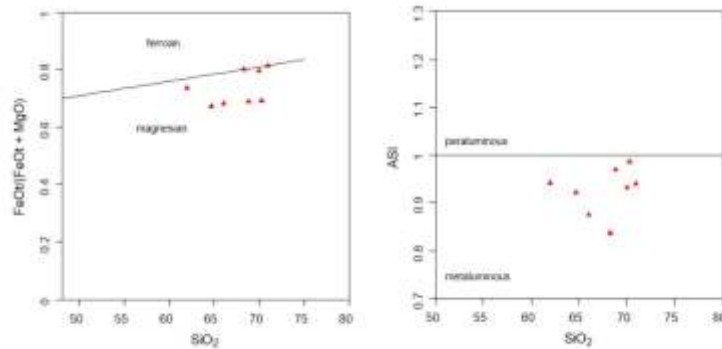
Pada diagram  $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})\text{-SiO}_2$  (Gambar 11) keseluruhan sampel termasuk dalam kelompok batuan magnesian dimana terdapat tiga sampel batuan

yang memiliki nilai  $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})\text{-SiO}_2$  sekitar 0,8 yang menjadikan ketiganya berada sangat dekat dengan garis batas kelompok ferroan-magnesian. Ketiga sampel tersebut memiliki nilai  $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})\text{-SiO}_2$  sedikit lebih tinggi apabila dibandingkan dengan empat sampel lainnya yang memiliki nilai sekitar 0,7 dan satu sampel memiliki nilai sekitar 0,75. Hal ini menggambarkan bahwa walaupun keseluruhan sampel termasuk dalam kelompok magnesian, namun terdapat beberapa sampel yang memiliki kecenderungan ferroan rendah karena terletak pada dekat garis batas antara keduanya.

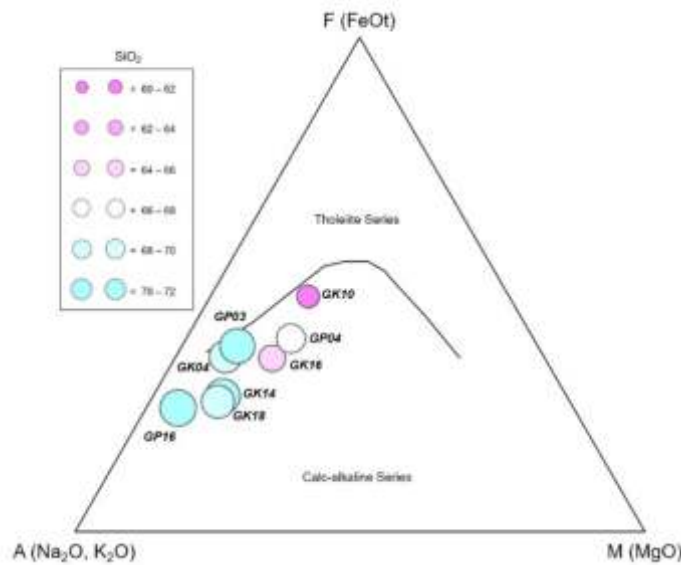
Penentuan seri magma menggunakan diagram ternary AFM menunjukkan bahwa keseluruhan batuan berada pada kelompok seri magma kalk-alkalin (Gambar 12).

Posisi sampel batuan di dalam diagram cenderung mengikuti tren garis batas antara seri toleitik dan seri kalk-alkalin pada bagian kiri. Untuk mengetahui kecenderungan tersebut, dilakukan penambahan parameter warna yang merepresentasikan nilai komposisi silika batuan. Batuan yang memiliki komposisi silika cenderung lebih rendah, yakni sekitar 60-62 wt% berada di dekat garis batas antara seri toleitik - kalk-alkalin dan cenderung lebih dekat dengan titik segitiga F. Namun, pada batuan berkomposisi silika tinggi sekitar 70-72 wt% berada lebih dekat dengan titik segitiga A. Hal tersebut menggambarkan bahwa makin besar nilai komposisi silika, maka nilai M (MgO) dan F (FeOt) cenderung makin rendah.

Data perbandingan komposisi batuan pada diagram ternary  $3CaO-Al_2O_3/(FeOt+MgO)-5K_2O-Na_2O$  (Gambar 13) menunjukkan bahwa keseluruhan batuan memiliki kecenderungan nilai  $3CaO$  yang cukup dominan yakni berkisar antara 60-80 %. Namun, untuk masing-masing nilai  $Al_2O_3/(FeOt+MgO)$  dan  $5K_2O-Na_2O$  memiliki porsi relatif hampir sama pada seluruh sampel sekitar 20-40 %. Hal ini mengindikasikan adanya kecenderungan dua material atau batuan asal yang berbeda pada saat mengalami peleburan magma. Empat sampel (GK,10, GP04, GK16, dan GK18) terbentuk dari hasil peleburan batuan asal dengan jenis *high-K mafic rocks* dimana memiliki nilai  $5K_2O-Na_2O$  lebih tinggi dibandingkan empat sampel lainnya yang termasuk dalam kelompok batuan sumber *low-K mafic rocks*.

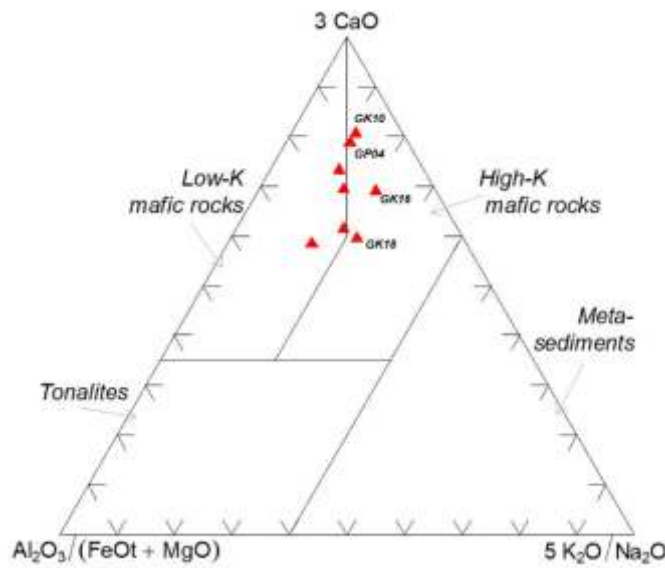


**Gambar 11.** Diagram FeOt/(FeOt+MgO)-SiO<sub>2</sub> untuk mengetahui kecenderungan sifat ferroan-magnesian (kiri) dan diagram indeks saturasi alkali (ASI); Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O-CaO-SiO<sub>2</sub> (Frost dkk., 2001).



**Gambar 12.** Diagram AFM untuk menentukan pengelompokkan seri magma batuan (Irvine & Baragar, 1971). Nilai skala warna SiO<sub>2</sub> dalam wt%.





**Gambar 13.** Diagram sumber peleburan magma guna menunjukkan kecenderungan asal-usul batuan yang mengalami peleburan magma (Laurent, 2014).

**Tabel 2.** Rangkuman karakterisasi batuan terhadap analisis geokimia unsur utama batuan dengan berbagai model diagram dan nilai “d” (kedalaman jalur Benioff)

No. Sampel	Batuan	Sifat Fe-Mg	Indeks Saturasi Aluminium	Seri Magma	Batuan Sumber	d (km)
GK04	Granodiorit	Magnesian	<i>Metaluminous</i>	Kalk-alkalin	<i>Low-K mafic</i>	123,13
GK10	Diorit	Magnesian	<i>Metaluminous</i>	Kalk-alkalin	<i>High-K mafic</i>	136,70
GK14	Granodiorit	Magnesian	<i>Metaluminous</i>	Kalk-alkalin	<i>Low-K mafic</i>	127,60
GK16	Granodiorit	Magnesian	<i>Metaluminous</i>	Kalk-alkalin	<i>High-K mafic</i>	160,34
GK18	Granodiorit	Magnesian	<i>Metaluminous</i>	Kalk-alkalin	<i>High-K mafic</i>	148,99
GP03	Granodiorit	Magnesian	<i>Metaluminous</i>	Kalk-alkalin	<i>Low-K mafic</i>	114,15
GP04	Granodiorit	Magnesian	<i>Metaluminous</i>	Kalk-alkalin	<i>High-K mafic</i>	121,69
GP16	Granit	Magnesian	<i>Metaluminous</i>	Kalk-alkalin	<i>Low-K mafic</i>	122,06

**PEMBAHASAN**

Berdasarkan komposisi mineral dan tesktur batuan pada analisis petrografi yang telah dilakukan, keseluruhan batuan termasuk dalam jenis batuan beku plutonik menengah sampai asam. Hal tersebut juga dikonfirmasi oleh analisis geokimia dengan menggunakan diagram TAS menunjukkan bahwa keseluruhan batuan termasuk ke dalam kelompok diorit-granodiorit-granit. Sehingga untuk memudahkan penamaan maka pengelompokan

batuan menggunakan terminologi Gorontalo DGG (diorit-granodiorit-granit).

Selanjutnya, pada pengamatan mikroskopis dapat teramati beberapa tekstur khusus seperti *enclave* mafik atau MMEs (*mafic microgranular enclaves*), kumulat mineral mafik (biotit-hornblende), dan *oscillatory zoning* pada beberapa mineral plagioklas. Hal tersebut sangat penting, mengingat beberapa parameter ini menjadi indikasi terjadinya proses diferensiasi magma melalui proses pencampuran dua atau lebih jenis magma

(*magma mixing*), *gravitational settling* mineral, dan fraksinasi. Tentu hal ini menjadi penting untuk dapat menjelaskan proses evolusi magma pembentuk batuan Gorontalo DGG.

Proses diferensiasi magma ini juga didukung oleh diagram TAS (Gambar 10), pada kelompok batuan diorit, kandungan FeOt yang merepresentasikan kehadiran mineral mafik berkisar antara 6-7 wt%. Selanjutnya, seiring dengan perkembangan magma dengan ditandai dengan kenaikan komposisi SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O dan K<sub>2</sub>O, komposisi FeOt berkurang drastis mencapai 3 kali lipat lebih rendah pada batuan granit. Selain itu, proses diferensiasi magma ditunjukkan oleh diagram AFM (Gambar 12) di mana terbentuk tren makin besar komposisi silika, maka akan terjadi penurunan komposisi FeOt dan MgO larutan magma.

Kelompok batuan Gorontalo DGG menunjukkan adanya kehadiran komposisi mineral mafik hidrous hornblende dan biotit baik secara kenampakan megaskopis maupun mikroskopi. Kenampakan ini mengindikasikan bahwa sistem magma terbentuk pada lingkungan tektonik subduksi yang umum membentuk mineral-mineral hidrous akibat proses peleburan kerak batuan. Selanjutnya, data geokimia juga menunjukkan adanya karakterisasi seri magma yang bersifat kalk-alkalin, jenis indeks saturasi aluminium pada seluruh batuan adalah metaluminous dan sumber batuan asal sebagai bahan utama peleburan magma berasal dari jenis batuan *low* dan *high-K mafic rocks* dimana hal tersebut umumnya cenderung berasosiasi dengan lingkungan subduksi. Menurut Maulana dkk. (2016), aktivitas magmatik di Sulawesi Utara terkait dengan subduksi dimulai pada pertengahan Eosen dan berlanjut hingga Pliosen dengan terobosan besar di sekitar batas Oligosen-Miosen. Batuan pluton granitoid di utara Sulawesi, seperti di Gorontalo terbentuk akibat adanya proses zona subduksi ke arah barat laut (Kavalieris dkk., 1992; Polvé dkk., 1997).

Analisis diagram AFM (Gambar 12) menjelaskan adanya hubungkait antara komposisi MgO dan keterdapatannya dua jenis sumber magma yang berbeda. Plot terhadap empat batuan dengan komposisi silika sekitar 68-72 wt% memiliki nilai prosentase MgO pada diagram sekitar 10-15 %, sedangkan tiga batuan lainnya dengan komposisi silika sekitar 60-66 wt% memiliki nilai MgO sekitar 15-25 %. Dua kelompok batuan dengan kecenderungan nilai MgO yang berbeda ini dapat dibagi menjadi kelompok DGG MgO rendah dan MgO tinggi. Apabila dibandingkan dengan diagram sumber magma (Gambar 13), maka

tiga batuan yang termasuk dalam kelompok MgO tinggi tersebut memiliki kecenderungan jenis batuan sumber adalah jenis *high-K mafic rocks*. Selanjutnya, empat batuan yang termasuk dalam kelompok DGG MgO rendah memiliki jenis batuan sumber *low-K mafic rocks*. Namun, terdapat satu sampel batuan, GK18, termasuk dalam kelompok DGG MgO rendah berdasarkan diagram AFM yang memiliki kecenderungan jenis batuan sumber *high-K mafic rocks*. Hal tersebut menjadi sangat mungkin, mengingat pada tren diagram AFM, sampel batuan GK 18 berada dekat dengan batas antara kelompok DGG MgO rendah dan tinggi.

Hasil perhitungan kedalaman pembentukan magma pada Jalur Benioff untuk seluruh batuan Gorontalo DGG berkisar pada kedalaman 114-160 km. Pada kelompok batuan yang memiliki batuan sumber jenis *high-K mafic rocks*, terbentuk pada kedalaman sekitar 136-160 km, sedangkan pada kelompok batuan yang berasal dari jenis *low-K mafic rocks* memiliki kedalaman pembentukan relatif lebih dangkal, yaitu antara 114-127 km. Namun, granodiorit GP04 yang termasuk dalam kelompok batuan sumber *high-K mafic rocks* terbentuk pada kedalaman relatif dangkal sekitar 121 km. Hal tersebut perlu dilakukan studi lebih lanjut mengingat pada studi ini masih terbatas pada penggunaan data geokimia unsur utama oksida.

## KESIMPULAN

Mengacu pada hasil analisis petrografi dan data geokimia yang telah dilakukan, keseluruhan sampel batuan termasuk dalam kelompok batuan Gorontalo DGG (diorit-granodiorit-granit) memiliki karakterisasi sebagai batuan diorit-granodiorit-granit berjenis magnesian dengan indeks saturasi aluminium seluruhnya adalah metaluminous. Selain itu, Gorontalo DGG memiliki seri magma dengan tipe kalk-alkalin yang berasosiasi dengan lingkungan subduksi dengan perkiraan kedalaman peleburan sebagian magma terjadi pada kedalaman antara 114 hingga 160 km. Kecenderungan jenis material batuan pada proses peleburan sebagian magma yang membentuk batuan Gorontalo DGG berasal dari dua jenis yang berbeda, yaitu *low* dan *high-K mafic rocks*. Selanjutnya, dalam proses diferensiasi magma Gorontalo DGG setidaknya mengalami proses (*magma mixing*), *gravitational settling* mineral, dan fraksinasi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Bapak Kepala Pusat Survei Geologi, Koordinator Kegiatan Geosains atas izin penerbitan karya tulis ini serta rekan-rekan di Laboratorium

Petrografi dan Kimia Pusat Survei Geologi yang telah membantu hingga dapat terselesaikan tulisan ini.

#### KONTRIBUTOR TULISAN

Sam Permanadewi dan Hanang Samodra, semuanya adalah kontributor utama tulisan ini.

#### ACUAN

- Apandi, T. dan Bachri, S., 1997. *Geologi Lembar Kotamobagu, Sulawesi, Skala 1:250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Bachri, S., Sukido, dan Ratman, N., 1994. *Geologi Lembar Tilamuta, Sulawesi, Skala 1:250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J. and Frost, C.D., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033-2048.
- Goto, Atsushi, Tatsumi, and Yoshiyuki, 1996. Technical Note: Quantitative Analysis of Rocks Samples by An X-Ray Fluorescence Spectrometer (II). *The Rigaku Journal*, 13(2), 1996.
- Hall, R. and Spakman, W., 2015. Mantle Structure and Tectonic History of SE Asia. *Tectonophysics*, 658: 14-45.
- Hutchison, C.S., 1973. Tectonic Evaluation of Sundaland: A Phanerozoic Synthesis. *Geol Soc. Malaysia Bulletin*, 61-86.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8: 523-548.
- Janoušek, V., Farrow, C.M. and Erban, V., 2006. Interpretation of Whole-rock Geochemical Data in Igneous Geochemistry: Introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, 47(6): 1255-1259.
- 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: 112-129.
- Laurent, A., Janousek, V., Magna, T., Schulmann, K. and Mikova, J., 2014. Petrogenesis and Geochronology of a Post-Orogenic Calc-Alkaline Magmatic Association: the Zulova Pluton, Bohemian Massif. *Journal of Geosciences*, 59(4): 415-440.
- van Leeuwen, T.M. and Muhandjo, 2005. Stratigraphy and Tectonic Setting of the Retaceous and Paleogene Volcanic-Sedimentary Successions in Northwest Sulawesi, Indonesia: Implications for the Cenozoic Evolution of Western and Northern Sulawesi. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(3): 481-511.
- Maulana, A., Imai, A., Van Leeuwen, T., Watanabe, K., Yonezu, K., Nakano, T., Boyce, A., Page, L., and Schersten, A., 2016. Origin and Geodynamic Setting of Late Cenozoic Granitoids in Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124: 102-125. journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jseaes](http://www.elsevier.com/locate/jseaes).
- Middlemost, E.A., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earthscience Reviews*, 37(3-4): 215-224.
- Nobutaka, T., Tomoyuki, S., Yoshiyuki, K., Masaaki, O., Eiichi, T., Yoshihiko G., Jai Ho, C., Shoichi, T., and Yu, H., 1989. Major Element Analysis of Rock Sample by X-Ray Fluorescence Spectrometry, using Scandium Anode Tube. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Series 4, Geology and Mineralogy*, 22 (3): 489-502.
- 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.
- Pearson, D.F. and Caira, N.M., 1999. Geology and Metallogeny of Central North Sulawesi. PACRIM'99 Congress, *Australian Institute of Mining and Metallurgy*, 4(99): 311-326.
- Perello, J., 1994. Geology, porphyry Cu-Au, and epithermal Cu-Au-Ag mineralization of the Tombulilato district, North Sulawesi, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50(1.3): 221-256. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90026-4](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0375-6742(94)90026-4).

- 
- Polvé, M., Maury, R.C., Bellon, H., Rangin, C., Priadi, B., Yuwono, S., Joron, J.L., and Soeria-Atmadja, R., 1997. Magmatic Evolution of Sulawesi: Constraints on the Cenozoic Geodynamic History of the Sundaland Active Margin. *Tectonophysics*, 272: 69–92.
- Ratman, N., 1976. *Geologi Lembar Tolitoli, Sulawesi, Skala 1:250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Samodra, H., Prabowo, A., Kusworo, A., Permanadewi, S., Ratdomopurbo, A., 2021. Inventarisasi Geodiversity dan Identifikasi Geoheritage Daerah Gorontalo. Laporan Survei Tahun 2021, Pusat Survei Geologi, Bandung (tidak diterbitkan).
- Silver, E.A., McCaffrey, R. and Smith, R.B., 1983. Collision, Rotation, and the Initiation of Subduction in the Evolution of Sulawesi, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B11): 9407-9418.
- Socquet, A., Simons, W., Vigny, C., McCaffrey, R., Subarya, C., Sarsito, D., Ambrosius, B., and Spakman, W., 2006. Microblock Rotations and Fault Coupling in SE Asia Triple Junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and Earthquake Slip Vector Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B8).
- Spakman, W. and Hall, R., 2010. Surface Deformation and Slab Mantle Interaction during Banda Arc Subduction Rollback. *Nature Geoscience*, 3(8): 562-566.
- Sukamto, R., Samodra, H., and Santoso, S., 1994. *Geologi Indonesia Lembar Manado, Sulawesi, Skala 1:1.000.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
-