

IMOBILITAS UNSUR TANAH JARANG (UTJ) SELAMA MINERALISASI CU PADA GRANITOID SULIT AIR, PROVINSI SUMATRA BARAT

RARE EARTH ELEMENTS (REE) IMMOBILITY DURING CU MINERALIZATION AT SULIT AIR SUITE, WEST SUMATRA PROVINCE

Ronaldo Irzon^{1,2}, Ildrem Syafri¹, Iwan Setiawan³, Johannes Hutabarat¹, Purnama Sendjaja², Agus Didit Haryanto¹

¹Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran University

²Pusat Survei Geologi

³Pusat Penelitian Geoteknologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

ABSTRAK Transfer massa terkait perubahan komposisi geokimia batuan induk akibat alterasi hidrotermal, metasomatisme, maupun pelapukan menjadi topik untuk mempelajari proses geologi terkait. Perubahan massa tersebut dapat dijelaskan dan divisualisasikan melalui metode *Isocon*. Mineralisasi tembaga teridentifikasi pada salah satu bagian dari Granitoid Sulit Air di Kecamatan X Koto Diatas, Kabupaten Solok. Tulisan ini bertujuan untuk menjelaskan transfer massa akibat mineralisasi Cu pada Granitoid Sulit Air dengan diagram *Isocon*. XRF dan ICP-MS di Laboratorium Pusat Survey Geologi, Kementerian ESDM (2015) digunakan sebagai perangkat pengukuran kadar oksida utama, unsur jejak, dan unsur tanah jarang. Berdasarkan korelasi antara kandidatnya, Al₂O₃ dianggap sebagai oksida *immobile*. K₂O, Rb, Sr, dan Ba terkayakan sedangkan oksida utama lain maupun unsur jejak diketahui berkurang akibat mineralisasi Cu.

UTJ terdeteksi *immobile* akibat mineralisasi Cu dengan karakter yang relatif sama antara batuan segar dan teralterasi. Meski demikian, sebagian Ce teroksidasi akibat proses mineralisasi sehingga menurunkan anomali positif Ce. Penurunan nilai anomali negatif Eu pada sampel teralterasi dapat mengakibatkan plagioklas semakin berkurang. Karakter tipe-I Granitoid Sulit Air diperjelas melalui nilai perbandingan A/CNK, perbandingan N₂O terhadap K₂O, perbandingan Rb/Sr, dan perbandingan Rb/Ba. Afinitas granitoid busur kepulauan menunjukkan bahwa pembentukan Granitoid Sulit Air terkait dengan vulkanisme di bagian barat Sumatra.

Kata kunci : Granitoid Sulit Air, geokimia, *Isocon*, mineralisasi Cu.

ABSTRACT Mass transfer related strange changes in the geochemical composition of the host rock due to hydrothermal alteration, metamorphism, and weathering is an interesting topic for studying related geological processes. The transfer can be explained and visualized through the *Isocon* method. Copper mineralization was identified in an area of Sulit Air Suite at X Koto Diatas District, Solok Regency. This paper aims to explain mass transfer due to Cu mineralization on Sulit Air Suite with *Isocon* diagrams. XRF and ICP-MS of the Center for Geological Survey Laboratory were applied to measure the major oxides, trace elements, and rare earth elements contents of the samples. Based on the correlation between candidates, Al₂O₃ is considered as the immobile species. K₂O, Rb, Sr, and Ba appear to be enriched while other major oxides and rare elements are reduced due to Cu

Naskah masuk : 11 Februari 2019
Naskah direvisi : 25 Juli 2019
Naskah diterima : 23 November 2019

Ronaldo Irzon
Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran
University, Jl. Raya Bandung-Sumedang Km. 21.
Jatinangor, Sumedang, Indonesia
Email: ronaldoirzon18@gmail.com

mineralization. REEs are immobile due to Cu mineralization with relatively the same character between fresh and altered rocks. However, some Ce was probably oxidized due to the mineralization process thus reducing the positive anomaly Ce. Moreover, the more negative Eu anomaly means that plagioclase might have been replaced by K-feldspar due to this alteration. The I-type characters of Sulit Air Suite are clarified by A/CNK value, N₂O to K₂O comparison, Rb/Sr ratio, and Rb/Ba ratio. The affinity to the volcanic arc granitoid implies that the Sulit Air Suite is related to volcanism in the western part of Sumatra.

Keywords : saturation of CaCO₃, partial pressure of CO₂, karstic groundwater, Gunungkidul

PENDAHULUAN

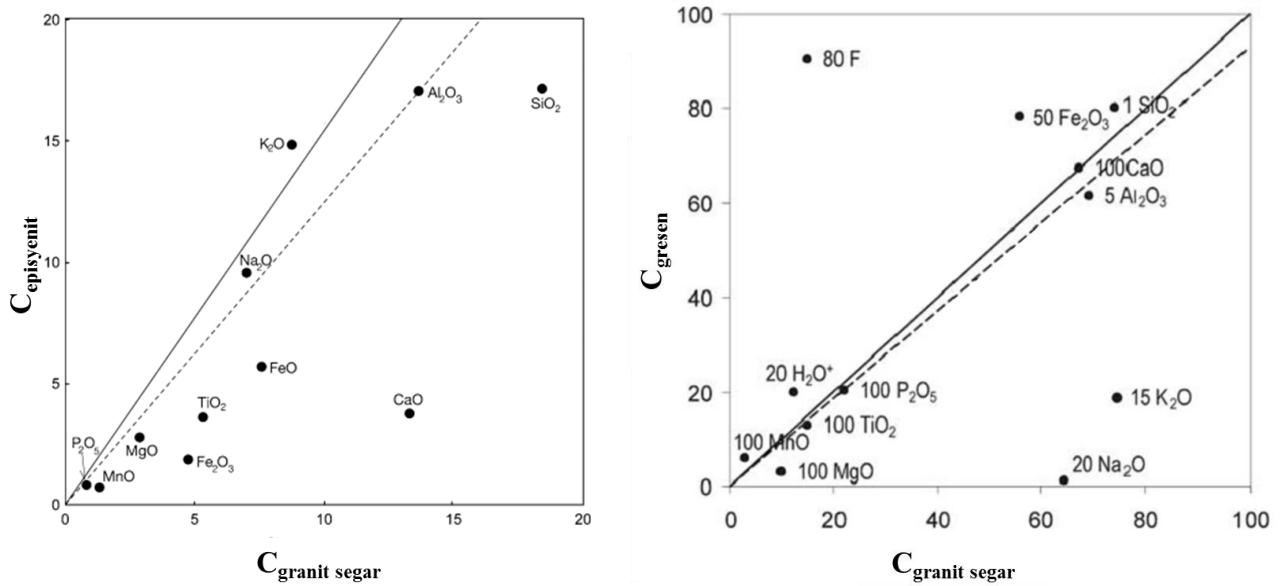
Batuan granitik dapat terbentuk dalam semua jenis kondisi tektonik sehingga banyak studi yang membahas mengenai klasifikasinya, seperti orogenik dan non orogenik (Martin dan Piwinski, 1972), tipe-I dan tipe-S (Chappell, 1974), dan seri ilmenit dan magnetit (Ishihara, 1977). Granit tipe-I, -S, -A, -M, -C, dan -H dikenal sebagai klasifikasi alfabetis sebagai hasil penelitian Chappell (1974) berdasarkan sumber, tipe mineral utama, *Shand's Index*, rasio Rb/Sr, pola kelimpahan unsur tanah jarang (UTJ), proses pembentukan, maupun mineralisasi yang menyertainya. Apabila intrusi batuan granitik menempati area yang luas maka disebut sebagai batolit, seperti Tak Batholith di Thailand, Bhongir Fort Batholith di India, Riga Batholith di Latvia, Cordillera Blanca Batholith di Peru dan Darling Batholith di Afrika Selatan.

Busur vulkanik yang memanjang di bagian barat Pulau Sumatra terbentuk akibat subduksi Lempeng Indo-Australia ke bawah Lempeng Eurasia sehingga membentuk deretan gunungapi yang memanjang, sejajar dengan garis zona penunjaman, dan disebut sebagai Pegunungan Bukit Barisan. Aktifitas tektonik tersebut menyebabkan terbentuknya beragam batuan vulkanik, plutonik, dan metamorfik. Batuan granitik yang terdapat didekat wilayah Bukit Barisan dikelompokkan sebagai *Volcanic Arc Suite* sebagai tambahan dari tiga wilayah granit lain di Asia Tenggara, yaitu: *Eastern Province*, *Main Range Province*, dan *Western Province* (Cobbing, 2005). Granitoid Sulit Air (juga dikenal sebagai *Sulit Air Suite*) merupakan batuan intrusi

asam yang berlokasi di wilayah Bukit Barisan, di timur Danau Singkarak, Kabupaten Solok, Provinsi Sumatra Barat.

Komposisi geokimia oksida utama maupun unsur jejak pada batuan induk dapat berubah akibat alterasi hidrotermal (Stemprok et al., 2005; Idrus et al., 2009; Nishimoto et al., 2014; Le Vaillant et al., 2015; Parsapoor et al., 2017), metamorfisme (Higashino et al., 2015; Bedout dan Penniston-Dorland, 2015), maupun pelapukan (Maulana et al., 2014; Irzon et al., 2016; Quesnel et al., 2017; Sonzogni et al., 2017) sehingga mengakibatkan pengayaan atau pengurangan konsentrasi suatu unsur kimia tertentu. Evaluasi dan ilustrasi sederhana mengenai perubahan kelimpahan geokimia telah diajukan untuk mempelajari lebih detail mengenai proses geologi terkait. Meski hanya terbatas pada proses isothermal-isobarik, perhitungan transfer massa berdasarkan koefisien aktifitas H₂O diajukan oleh Helgeson et al. (1970). Konveksi fluida dijadikan prinsip penentuan transfer massa ketika alterasi (Wood dan Hewett, 1982). Metoda kalkulasi perubahan massa berdasarkan komponen *immobile* telah dimanfaatkan untuk memvisualisasikan perubahan komposisi kimia (Gresens, 1967). Metode yang kemudian dikenal sebagai *Isocon* ini terus dikembangkan karena dianggap aplikatif terhadap beragam proses geologi, tidak memerlukan manipulasi terhadap data pengukuran dan dapat diilustrasikan secara visual (Grant, 1986; Brimhall dan Dietrich, 1987; Grant, 2005). Beberapa diagram *Isocon* hasil penelitian sebelumnya ditampilkan pada Gambar 1.

UTJ adalah kelompok unsur dengan karakter kimia yang mirip dan berada dalam deret lanthanida pada Tabel Kimia. Radius ion yang besar menyebabkan UTJ pada umumnya bersifat tidak kompatibel sehingga sulit tergantikan oleh kation utama dalam mineral pembentuk batuan (Migaszewski and Galuszka, 2015). Industri katalis, magnet, keramik, baterai, elektronik, hingga militer membutuhkan UTJ sehingga berharga mahal (Irzon et al., 2016; Irzon, 2018). Pada sisi saintifik kelimpahan kelompok ini dapat dipergunakan untuk menjelaskan sumber bahan pembentukan, proses pembentukan, dan penarikan batuan (Tropper et al., 2011; Irzon, 2018; Irzon, 2019). Ce/Ce* dan Eu/Eu* adalah dua anomali penting yang dapat menjelaskan proses pembentukan batuan. Kondisi oksidatif atau reduktif suatu proses bisa dipelajari berdasarkan nilai Ce/Ce*, sedangkan perubahan



Gambar 1. Beberapa diagram *Isocon* hasil penelitian sebelumnya: a) Perubahan komposisi akibat alterasi hidrotermal granit menjadi episyenit di Toki – Jepang (Nishimoto dkk., 2014); dan b) Transfer massa antara granit segar dan gresen kaya wolfram di Krusne – Republik Ceko (Stemprok et al., 2005).

komposisi plagioklas dapat diketahui dengan penghitungan Eu/Eu^* seperti ditunjukkan oleh beberapa penelitian sebelumnya (Maulana et al., 2014; Irzon dan Abdullah, 2016; Schwark et al., 2018; Irzon, 2018; Tungalag et al., 2018; Verhaert et al., 2018). Penelitian ini bertujuan untuk memvisualisasikan proses transfer massa akibat mineralisasi Cu pada Granitoid Sulit Air melalui diagram *Isocon*. Studi ini juga membahas karakterisasi Granitoid Sulit Air berdasarkan geokimia oksida utama, unsur jejak, dan unsur tanah jarang.

METODE

Seluruh sampel dipreparasi dan dianalisis di Laboratorium Pusat Survei Geologi, pada tahun 2015. Setelah pengeringan di bawah panas matahari selama setidaknya sehari, sampel digerus hingga berukuran 200 mesh. Kelimpahan oksida utama diukur menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) Advant, sedangkan komposisi unsur jejak dan UTJ dianalisis dengan Thermo X-Series *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS). Preparasi analisis XRF dapat dilaksanakan dengan metode *pressed pellet* maupun *fused bed*. *Platinum crucibel* diperlukan untuk preparasi metode *fused bed* yang rentan mengkontaminasi sampel sehingga mengakibatkan kesalahan pengukuran (Devi et al., 2015; Chubarov et al., 2016). Oleh sebab itu

penelitian ini menggunakan metode *pressed pellet* untuk menghindari kontaminasi tersebut. *Lost on Ignition* (LOI) dihitung untuk mengetahui jumlah bahan volatil pada sampel, yakni dengan pemanasan *crucibel* kosong maupun *crucible* berisi pada 1000°C. Perhitungan LOI yang dilakukan pada studi sebelumnya (Irzon dan Abdullah, 2016) diterapkan pada studi ini seperti tertera pada persamaan (1):

$$LOI = (A - B)/(A - C) \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

A, B, dan C masing-masing adalah berat *crucible* berisi sample, berat *crucible* berikut residu, dan berat *crucible* kosong.

Asam nitrat (*ultrapure grade*), asam formiat (*ultrapure grade*), dan asam perklorat (*pro analysis grade*) disiapkan untuk proses destruksi asam terhadap 0,1 g sampel hasil penggerusan. Perpaduan asam nitrat dan asam formiat bermanfaat untuk mengoksidasi bahan organik pada sampel dan saling melengkapi dalam pelarutan unsur yang diukur. 10 ml asam formiat dan 3 ml asam nitrat ditambahkan ke dalam cawan Teflon yang sudah berisi sampel. Cawan Teflon dimasukkan ke dalam *microwave digestion* pada temperatur 170°C selama dua jam untuk mempercepat destruksi. Sampe berikut larutan kemudian dipanaskan di atas *hotplate* untuk

menguapkan asam yang tersisa sampai hampir kering. Bila tidak ditemukan endapan, maka larutan dimasukkan dalam botol penyimpanan sebagai larutan induk. Namun demikian, apabila masih terdapat butiran sampel yang tidak larut, maka proses destruksi asam diulangi kembali dan dengan penambahan 4 ml asam perklorat. Beberapa jam sebelum analisis ICP-MS, larutan induk diencerkan menggunakan asam nitrat 2%. AGV-2 dan GBW-7113 merupakan dua *standard reference materials* pada studi dan telah disiapkan sesuai dengan preparasi sampel untuk sertifikasi pengujian.

Perhitungan pada metode *Isocon* dimulai dengan kalkulasi rasio massa batuan asal terhadap batuan teralterasi dan dikaitkan dengan perubahan konsentrasi suatu oksida atau unsur seperti pada persamaan (2):

$$C_i^A = M^O/M^A(C_i^O + \Delta C_i) \dots\dots\dots(2)$$

C_i adalah konsentrasi sedangkan M merupakan massa oksida/unsur. "O" dan "A" secara berturut-turut menunjukkan batuan asal dan batuan teralterasi. Oleh karena itu, M^O dan M^A diartikan sebagai massa batuan asal dan massa batuan teralterasi. Perubahan konsentrasi oksida/unsur "i" disimbolkan dengan ΔC_i . Dengan menganggap ΔC_i bernilai nol pada oksida/unsur tidak mobil (*immobile*), maka persamaan (2) berubah menjadi persamaan (3):

$$C^A = M^O/M^A C^O \dots\dots\dots(3)$$

Perubahan komposisi secara umum terhadap kondisi asal ditunjukkan secara visual oleh slop diagram *Isocon*. Oksida maupun unsur yang diplot diatas garis *Isocon* berarti telah mengalami kenaikan komposisi dan sebaliknya. Pengayaan maupun penurunan kadar oksida/unsur tersebut dihitung menggunakan persamaan (4):

$$\Delta C_i/C_i^O = (M^A/M^O)(C_i^A/C_i^O) - 1 \dots\dots\dots(4)$$

Secara matematis, oksida/unsur yang mengalami pengayaan ditunjukkan oleh $\Delta C_i/C_i^O > 1$ dan sebaliknya.

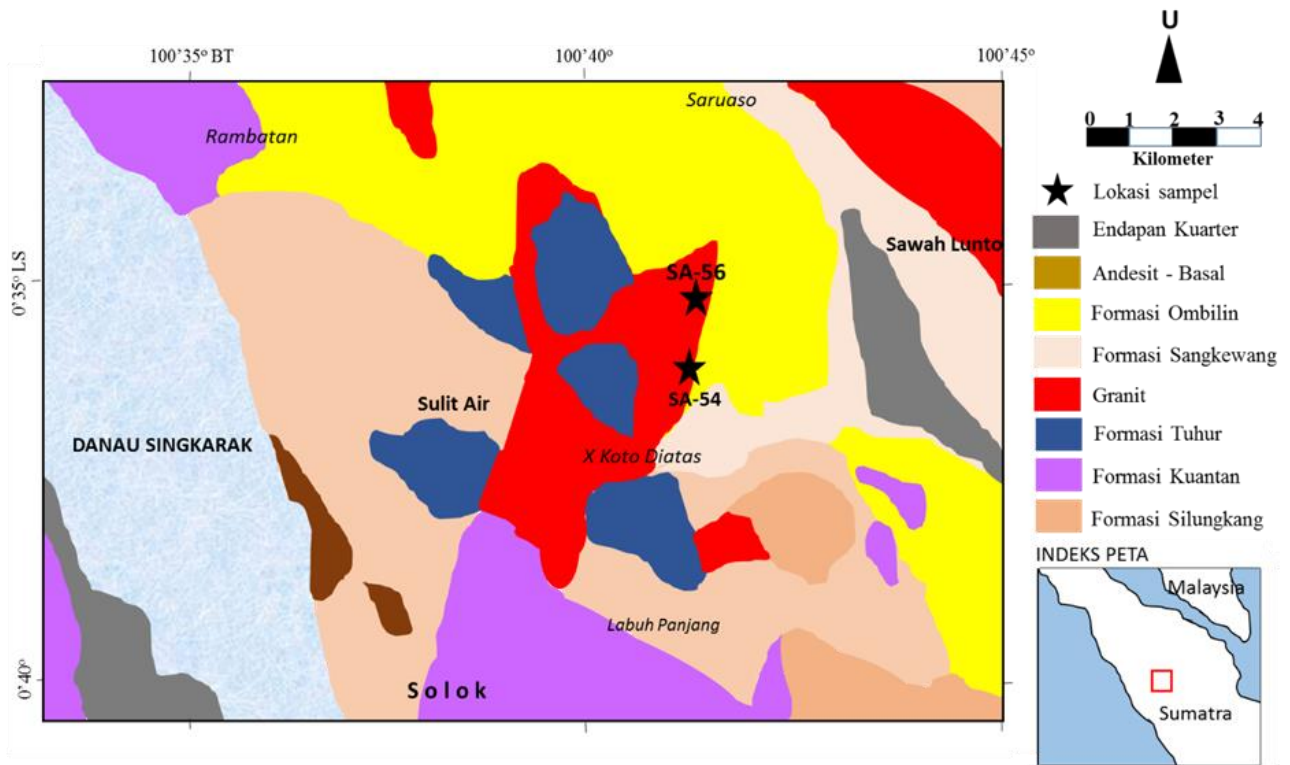
GEOLOGI

Unit batuan disekitar area studi dapat dibagi dalam tiga kelompok, yaitu batuan metamorf (Formasi Kuantan dan Formasi Tuhur), batuan sedimen

(Formasi Ombilin, Formasi Sangkewang, dan endapan Kuarter), dan batuan vulkanik-intrusi (Formasi Silungkang, unit-unit Granitoid, dan Andesit-Basal) (Silitonga dan Kastowo, 1995). Formasi Kuantan berumur Perm hingga Karbon dan pada lokasi penelitian lebih lanjut dapat dibedakan menjadi Anggota Bawah, Anggota Gamping, dan Anggota Serpih – Filit. Batugamping dan batu sabak berumur Trias membentuk Formasi Tuhur. Batupasir kuarsa, serpih lempungan, dan konglomerat kuarsa pembentuk Formasi Ombilin (Miosen) maupun serpih napalan dan breksi andesit dari Formasi Sangkewang (Oligosen) berbatasan langsung dengan Granitoid Sulit Air. Tuff batupung di timur lokasi pengambilan sampel dan Aluvium Sungai yang berada di sekitar Danau Singkarak terendapkan pada masa Kuarter.

Formasi Silungkang yang diperkirakan terbentuk pada masa Perm merupakan batuan vulkanik tertua pada wilayah studi, sedangkan beberapa unit granitoid di Peta Geologi Lembar Solok mengintrusi pada zama Trias (Silitonga dan Kastowo, 1995). Beberapa penelitian setelahnya membagi intrusi granitoid di wilayah ini menjadi beberapa pluton, yaitu: Granitoid Sulit Air, Granit Lassi, Granit Tanjung Gadang, Granit Ombilin, dan Granit Sijunjung (Silitonga dan Kastowo, 1975; Pulonggono dan Cameron, 1984; Koning dan Aulia, 1985; Sato, 1991; Imtihanah, 2000; Cobbing, 2005; Imtihanah, 2005). Aliran lava, breksi, aglomerat, dan batuan hipabisal dari Unit Andesit – Basal berumur Miosen Akhir dapat dijumpai di tenggara Danau Singkarak. Kondisi geologi wilayah Sulit Air dan sekitarnya berikut titik pengambilan contoh dapat diperhatikan pada Gambar 2.

McCourt et al. (1996) menjelaskan lima periode plutonisme di Sumatra sejak Mesozoikum hingga Kenozoikum yang terkait dengan vulkanisme, yaitu: Trias Akhir – Jura Awal, Pertengahan Jura – Kapur Awal, Pertengahan Kapur – Akhir Kapur, Eosen Awal, dan Miosen – Pliosen berdasarkan evolusi tektoniknya. Terdapat masa istirahat antara periode plutonisme tadi akibat akresi lempeng alochton sekitar 20-35 juta tahun. Kemudian, berdasarkan penarikan radiometri K-Ar, McCourt et al. (1996) juga menyimpulkan bahwa bersama dengan Batolit Bungo, Granodiorit Sulit Air terbentuk pada periode Pertengahan Jura – Kapur Awal. Penentuan umur beberapa sampel dari Granitoid Sulit Air lain oleh Imtihanah (2000)



Gambar 2. Peta Geologi daerah studi dan lokasi pengambilan sampel pada Peta Geologi Lembar Solok Skala 1:250.000 (modifikasi dari Silitonga dan Kastowo, 1995).

menyimpulkan bahwa batuan membeku pada 193 ± 4 jtl (Permulaan Jura) dengan metode rasio isotop $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Dengan menggunakan analisis dua sampel, Imtihanah (2005) menyebutkan bahwa intrusi tersebut berafinitas calc-alkaline, terbentuk pada busur vulkanik, dan bertipe-I berdasarkan kelimpahan geokimia oksida utama, unsur jejak, dan beberapa UTJ. Namun demikian, belum pernah ada penelitian yang membahas geokimia Granitoid Sulit Air dengan pengukuran kadar UTJ yang lengkap. Mineralisasi tembaga (Cu) terdapat pada Granitoid Sulit Air di X Koto Diatas (Kabupaten Solok) yang tergolong sebagai *vein type deposit* dengan banyaknya urat kuarsa. Mineralisasi tersebut tentu menyebabkan perubahan komposisi geokimia batuan induk.

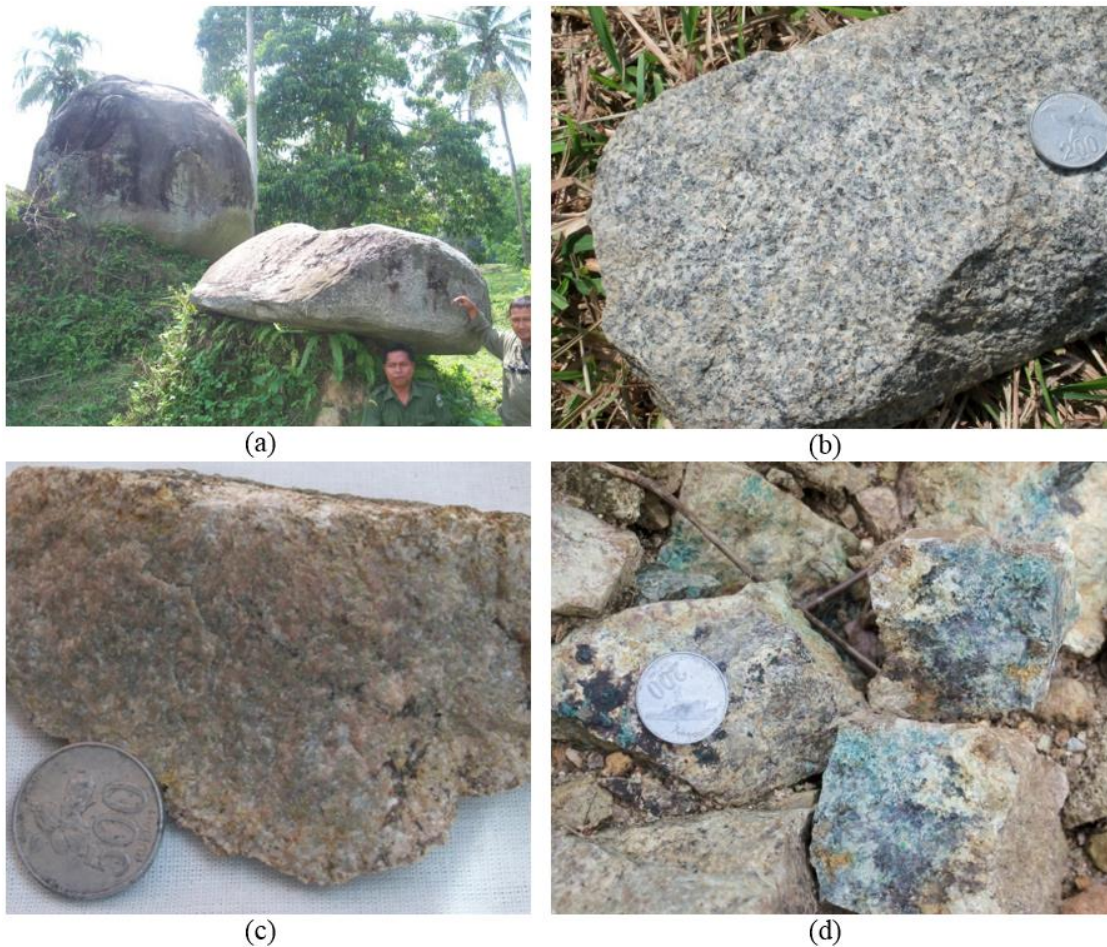
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Sampel pertama (SA-56 A) dideskripsikan sebagai batuan granitik berwarna abu kecoklatan dengan mineral mafik yang tampak telah berubah dan berada di dekat dengan pusat mineralisasi. Bijih malakit berwarna hijau kebiruan pada lokasi ini diambil sebagai sampel kedua (SA-56 B)

dengan beberapa titik terdapat oksida besi. Sampel berikutnya merupakan granitoid berwarna abu-abu, granular, dengan kuarsa, k-felspar, dan biotit sebagai mineral pembentuk utama di Luak Bayau (SA-54) yang masih segar, tanpa adanya indikasi urat kuarsa, dan berjarak lebih dari 2 km dari lokasi mineralisasi Cu sehingga dapat dianggap sebagai batuan yang tak terpengaruh mineralisasi. Kondisi singkapan batuan yang menjadi target pengambilan sampel di lapangan terlampir pada Gambar 3. Data penelitian sebelumnya mengenai geokimia Granitoid Sulit Air (Imtihanah, 2005) diambil sebagai data sekunder untuk memperkuat penafsiran geokimia.

Tipikal felsik pada tiga sampel granitoid segar (nomor sampel SA-54), data sekunder (I-98-7, dan I-98-8; Imtihanah, 2005) dan satu granit di lokasi mineralisasi (nomor sampel SA-56 A) ditunjukkan oleh komposisi $\text{SiO}_2 > 55\%$. Sampel Granitoid Sulit Air segar bersifat lebih asam dengan kadar SiO_2 lebih besar daripada yang teralterasi yaitu $>60,5\%$ dan $58,95\%$ secara berurutan (Tabel 1). Meski SA-56 A berkomposisi Al_2O_3 dan K_2O lebih tinggi daripada tiga contoh granit segar, sampel ini menunjukkan kadar



Gambar 3. Kondisi lapangan di Sulit Air dan kenampakan di lapangan sampel: a) Sampel SA-54 diambil dari bongkah besar granit di Luak Bayau; b) Kenampakan di lapangan SA-54 yang berwarna abu terang, berbutir sedang hingga kasar dengan kuarsa, K-felspar, dan biotit sebagai mineral utama; c) SA-56 A sebagai granit yang dekat dengan mineralisasi; dan d) Bijih malakit yang diambil di Kecamatan X Koto Diatas.

Fe₂O₃T, MnO, CaO, MgO, dan Na₂O yang lebih rendah. K₂O yang tinggi pada sampel (10%) menunjukkan bahwa kemungkinan batuan tersebut berada dalam zona alterasi potasik (Boomeri et al., 2009; Ugidos et al., 2016; Tungalag et al., 2018). Sampel granit teralterasi menunjukkan kelimpahan Ga, Rb, Sr, Nb, Cs, dan Ta yang lebih tinggi daripada granit segar. Kadar tembaga yang jauh lebih tinggi pada SA-56 A (272 ppm) daripada tiga batuan segar (52-66 ppm) menandakan bahwa sampel ini memang terpengaruh oleh mineralisasi tembaga. Kandungan bahan volatil pada seluruh sampel granit (LOI) berkisar antara 1,23% hingga 1,78%.

Bahan volatil pada bijih malakit (SA-56 B) tergolong rendah dengan LOI 1,28%. Kadar Cu pada sampel bijih malakit meningkat bila

dibandingkan dengan sampel lain yaitu mencapai 2,5% dan 52-272 ppm secara berurutan. SiO₂, CaO, dan Fe₂O₃T merupakan oksida utama pada sampel ini dengan kelimpahan masing-masing 37,1%, 29,5%, dan 18,51%. Na₂O dan K₂O pada sampel bijih malakit sangat kecil <0,1%. Jumlah oksida besi dan oksida kalsium sampel teralterasi terdeteksi jauh lebih besar daripada batuan granit segar meski terdapat pengurangan signifikan terhadap oksida aluminium. Kelimpahan Ba dan Sr pada bijih malakit pun sangat rendah, yaitu 29 ppm dan 53 ppm secara berurutan. Meski jumlah total UTJ pada granit teralterasi (48,66 ppm) meningkat 10% daripada granit segar (41,33 %), kadar yang rendah pada SA-56 B (11 ppm) menunjukkan bahwa mineralisasi Cu tidak membawa UTJ.

Tabel 1. Komposisi geokimia batuan teralterasi (SA-56 A), bijih malakit (SA-56 B), dan granit segar (SA-54, I-98-7, dan I-98-8) pada kompleks Granitoid Sulit Air.

| No. Sampel | SA-56 A | SA-56 B | SA-54 | I-98-7* | I-98-8* |
|---|---------|----------|--------|---------|---------|
| Oksida Utama (wt %) | | | | | |
| SiO ₂ | 58,95 | 37,70 | 60,59 | 63,18 | 63,85 |
| TiO ₂ | 0,32 | 0,18 | 0,48 | 0,52 | 0,51 |
| Al ₂ O ₃ | 20,85 | 6,03 | 17,84 | 16,24 | 16,07 |
| Fe ₂ O _{3T} | 1,93 | 18,51 | 5,33 | 6,24 | 5,93 |
| MnO | 0,06 | 0,5 | 0,11 | 0,10 | 0,12 |
| CaO | 2,34 | 29,5 | 5,06 | 5,54 | 5,44 |
| MgO | 1,12 | 3,35 | 3,39 | 2,73 | 2,52 |
| Na ₂ O | 2,17 | 0,03 | 3,05 | 3,22 | 3,28 |
| K ₂ O | 10,00 | 0,05 | 2,58 | 2,32 | 2,18 |
| P ₂ O ₅ | 0,10 | 0,15 | 0,16 | 0,10 | 0,12 |
| SO ₃ | 0,06 | 0,08 | 0,01 | - | - |
| LOI | 1,78 | 1,28 | 1,23 | 1,50 | 1,51 |
| Total | 99,67 | 97,35 | 99,84 | 101,70 | 101,53 |
| Unsur Jejak dan Unsur Tanah Jarang (ppm) | | | | | |
| Sc | 8,25 | 8,02 | 15,60 | 28,00 | 22,00 |
| Cu | 272,00 | 25400,00 | 53,00 | 52,00 | 66,00 |
| Ga | 15,90 | 10,20 | 11,90 | 14,40 | 15,00 |
| Rb | 326,00 | t.d. | 75,00 | 62,10 | 56,90 |
| Sr | 2257,00 | 53,80 | 278,00 | 344,00 | 343,00 |
| Y | 23,60 | 12,50 | 26,40 | 22,50 | 26,60 |
| Nb | 7,76 | 2,28 | 4,45 | 2,40 | 2,60 |
| Cs | 1,90 | 0,45 | 1,58 | - | - |
| Ba | 1730,00 | 29,30 | 530,00 | 418,70 | 400,00 |
| La | 10,00 | 3,39 | 7,57 | - | - |
| Ce | 20,36 | 5,79 | 18,70 | 19,00 | 23,00 |
| Pr | 2,24 | 0,29 | 1,68 | - | - |
| Nd | 9,46 | 1,71 | 7,43 | - | - |
| Sm | 0,63 | t.d. | 0,45 | - | - |
| Eu | 0,06 | t.d. | 0,09 | - | - |
| Gd | 1,13 | t.d. | 0,84 | - | - |
| Tb | 0,46 | 0,12 | 0,42 | - | - |
| Dy | 1,75 | t.d. | 1,64 | - | - |
| Ho | 0,55 | 0,11 | 0,53 | - | - |
| Er | 0,91 | t.d. | 0,87 | - | - |
| Tm | 0,17 | t.d. | 0,17 | - | - |
| Yb | 0,84 | t.d. | 0,83 | - | - |
| Lu | 0,11 | 0,07 | 0,12 | - | - |
| ∑UTJ | 48,66 | 11,48 | 41,33 | - | - |
| Indeks Pelapukan | | | | | |
| CIA | 53,11 | - | 51,15 | 47,95 | 48,07 |
| CALMAG | 75,27 | - | 50,63 | 49,26 | 50,13 |

Karena penelitian ini tidak menyertakan analisis petrografi, indeks CIA (Chemical Index of Alteration) yang diajukan oleh Nesbitt dan Young (1982) dan CALMAG yang diajukan oleh Driese et al. (2005) digunakan untuk mempertegas

tingkat pelapukan batuan. Kedua indeks pelapukan pada setiap sampel dapat dilihat pada Tabel 1. CIA dan CALMAG pada sampel granit segar berada dalam rentang 48,07-51,15 dan 49,26-50,63 secara berurutan. Pada sisi lain, SA-

Tabel 2. Penentuan unsur atau oksida immobile dengan metode Korelasi antar kandidatnya.

| | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | Nb | Sc | P ₂ O ₅ | Y |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------|---------|--------|-------------------------------|--------|
| Al ₂ O ₃ | 1 | -0,9759 | 0,9979 | 0,9269 | -0,1851 | 0,2303 |
| TiO ₂ | | 1 | -0,9773 | 0,8943 | 0,3540 | 0,2562 |
| Nb | | | 1 | 0,9478 | -0,1605 | 0,1709 |
| Sc | | | | 1 | -0,0809 | 0,1518 |
| P ₂ O ₅ | | | | | 1 | 0,7125 |
| Y | | | | | | 1 |

56 A menunjukkan peningkatan CIA (53,11) dan CALMAG (75,27) sehingga sesuai sebagai batuan yang telah terubah. Indeks pelapukan pada SA-56 B tidak dihitung karena merupakan bijih Cu (malakit).

Pembahasan

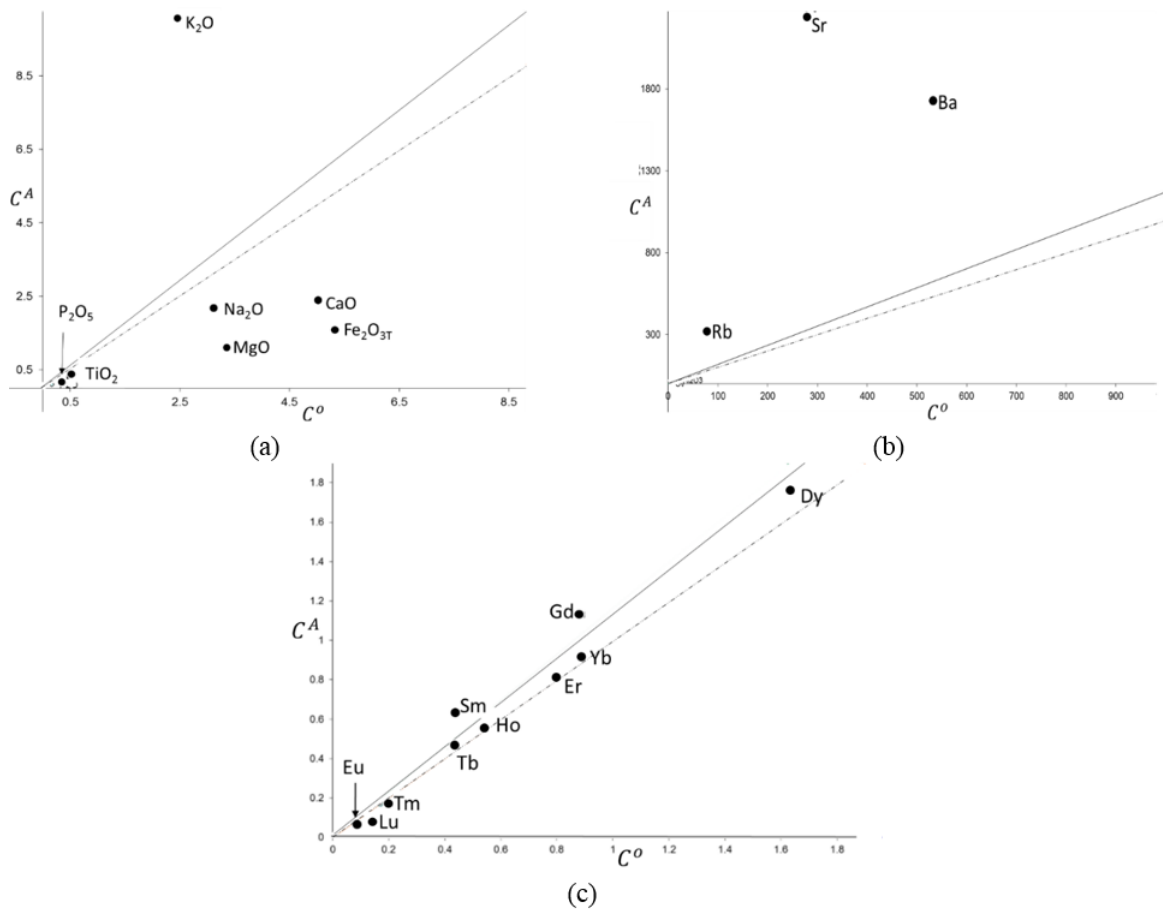
Mobilisasi Unsur Akibat Alterasi

Dalam suatu proses geologi seperti pelapukan, alterasi, atau metamorfisme-metasomatisme suatu batuan, terdapat kelompok unsur immobile dan mobile. Kelompok unsur immobile sangat resisten terhadap proses geologi tersebut atau justru sangat teradsorpsi oleh mineral sekunder. Sebaliknya, kelompok unsur-unsur mobile terutama berasal dari mineral yang mudah terlarut, seperti felspar, mika, dan apatit. Oleh sebab itu, Ca, Na, P, K, Sr, Ba, Rb, Mg and Si diklasifikasikan sebagai kelompok yang sangat mobile, sedangkan Al, Ti, Zr, Hf, Fe, Th, dan Sc termasuk kedalam unsur immobile (Middleburg et al., 1988). Resistensi kelompok immobile juga disebabkan oleh derajat kelarutannya yang sangat rendah sehingga dianggap tidak terpengaruh oleh alterasi, metamorfisme- metasomatisme, maupun pelapukan (Taylor dan Eggleton, 2001).

Sample SB-56 A dan SB-54 dipilih untuk mewakili batuan teralterasi dan batuan segar secara berurutan untuk membuat diagram Isocon. Pemilihan unsur atau oksida immobile menjadi faktor penting dalam pembuatan diagram Isocon. Al (atau Al₂O₃), Ti (atau TiO₂), Zr, P, Nb, Y, Cr, Sc, Hf, La, dan Th merupakan unsur-unsur immobile pada kasus alterasi hidrotermal maupun metamorfisme-metasomatisme (Higashino et al., 2015; Liu et al., 2016; Quesnel et al., 2017; Sonzogni et al., 2017). Zr, Cr, Hf, dan Th tidak diukur pada penelitian ini. Dengan demikian, Al₂O₃, TiO₂, Nb, Sc, P, dan Y dapat menjadi

kandidat sebagai unsur immobile. Penentuan unsur atau oksida immobile dilaksanakan melalui uji korelasi antar kandidat-kandidat tersebut sebagaimana telah dijelaskan pada penelitian terdahulu (Liu et al., 2016). Hasil uji korelasi antara kadidat unsur atau oksida immobile ditampilkan pada Tabel 2. Korelasi P dan Y sangat rendah terhadap kandidat unsur atau oksida immobile lain sehingga keduanya dapat diabaikan. Al₂O₃ dan Sc lebih tepat ditentukan sebagai unsur atau oksida immobile pada studi ini karena memiliki korelasi lebih baik terhadap kandidat lain relatif terhadap Ti dan Nb. Meski demikian, Al lebih tepat diajukan sebagai unsur atau oksida immobile akibat kelimpahannya yang jauh lebih besar dari pada Sc (Nishimoto et al., 2014; Gong et al., 2016; Liu et al., 2016).

Dengan menganggap Al₂O₃ sebagai unsur atau oksida immobile selama proses mineralisasi, maka terdapat penurunan massa sebesar 14,4%. K₂O adalah satu-satunya oksida utama yang mengalami pengayaan, sedangkan oksida utama lain mengalami penurunan komposisi (Gambar 4). Fe₂O_{3T} dan MgO mengalami penurunan paling besar relatif terhadap kondisi awal dengan $\Delta C_i/C_i^o$ masing-masing -0,78 dan -0,72 (Tabel 3). Sr dan Rb sangat terkayakan akibat mineralisasi Cu ini dengan $\Delta C_i/C_i^o$ adalah 5,95 dan 2,72 secara berurutan. Meski tidak setinggi Sr dan Rb, juga dapat diamati adanya pengayaan Ba ($\Delta C_i/C_i^o = 1.79$). Pada sisi lain, diagram ini juga menunjukkan telah terjadi pengurangan kadar CaO akibat destruksi plagioklas karena alterasi. Pengayaan Sr, Rb, dan Ba berikut peningkatan kadar K₂O pada SB-56 A mungkin disebabkan oleh peningkatan kadar K-felspar (Rolland et al., 2003). Pengurangan plagioklas dan peningkatan kadar K-felspar akibat mineralisasi juga sesuai dengan penjelasan sebelumnya mengenai anomali



Gambar 4. Hasil plot setiap oksida dan unsur pada diagram *Isocon* dengan Al_2O_3 dianggap sebagai unsur atau oksida *immobile*: a) Oksida utama; b) Sr, Ba, dan Rb; c) Unsur jejak dan UTJ. Garis tegas adalah garis *Isocon*, sedangkan garis putus-putus mewakili massa konstan. Diagram ini menunjukkan bahwa diantara oksida utama, hanya K_2O yang mengalami pengayaan. Ba, Sr, dan Rb terkayakan sangat signifikan sedangkan UTJ cenderung tidak banyak berubah.

negatif Eu. UTJ relatif stabil dan terplotkan sangat dekat dengan garis *Isocon* dengan $(\Delta C_i/C_i^o)$ berkisar antara -0.43 sampai 0.20 sehingga memperjelas sifat UTJ yang relatif tidak kompatibel terhadap alterasi maupun metamorfosis (Verdiansyah, 2016).

Pengayaan atau pengurangan suatu unsur atau oksida geokimia batuan segar terhadap batuan teralterasi dapat diperbandingkan dengan menggunakan diagram Harker. Batuan yang mengalami evolusi normal dapat ditunjukkan melalui korelasi yang kuat antara SiO_2 terhadap oksida maupun unsur jarang lain. Namun demikian, terdapat perbedaan antara tiga batuan segar Granitoid Sulit Air terhadap batuan hasil alterasi seperti dapat diperhatikan pada Gambar 5. Pengayaan kadar Rb, Ba, Sr, dan K maupun pengurangan komposisi Na pada Tabel 3

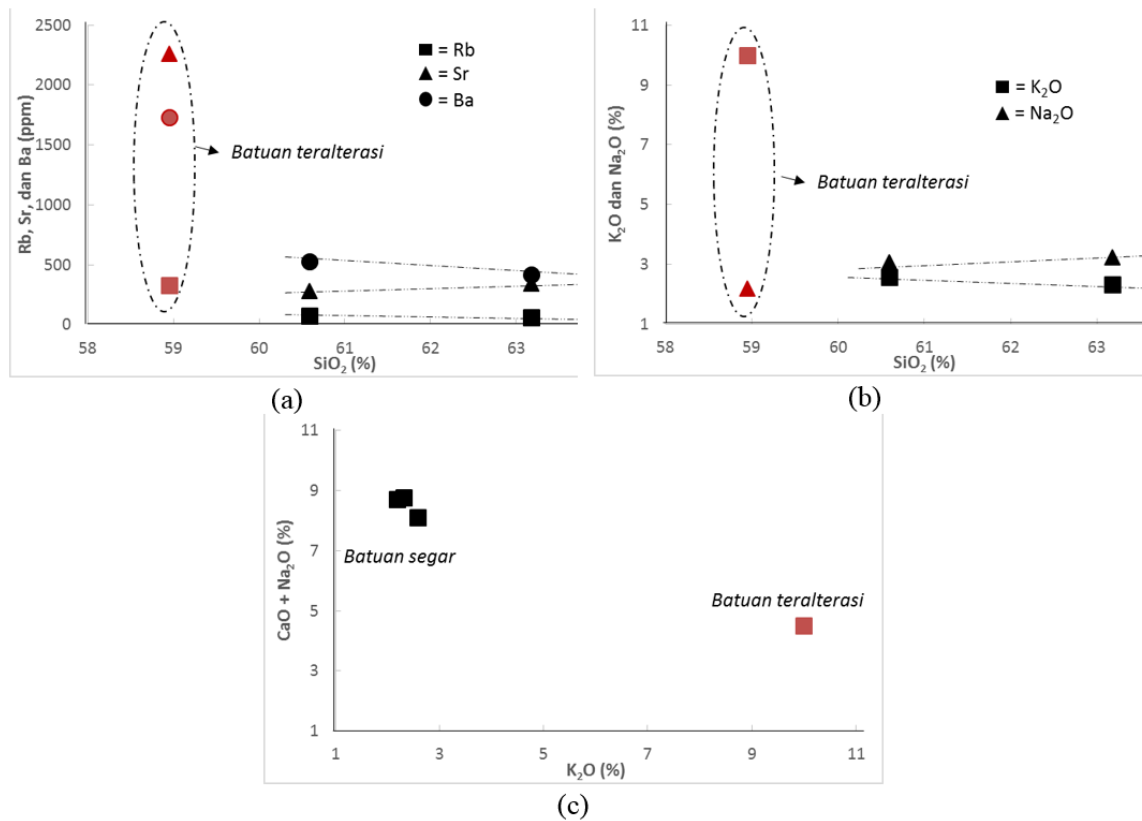
diperjelas pada korelasi beberapa oksida dan unsur tersebut terhadap SiO_2 pada Gambar 4a dan b. Berdasarkan korelasi Rb dan K terhadap SiO_2 maka terdapat kemungkinan bahwa alterasi yang terjadi adalah K-metasomatisme. Lebih lanjut, K-metasomatisme dipertegas melalui korelasi negatif $CaO+Na_2O$ terhadap K_2O yang juga menggambarkan pemisahan plagioklas dari batuan sumber (Gambar 5c) (Hwang dan Moon, 2018).

Klasifikasi Granitoid Sulit Air

Contoh batuan SA-56 A telah terpengaruh mineralisasi sedangkan sample SA-56 B merupakan bijih malakit sehingga keduanya tidak sesuai untuk digunakan dalam klasifikasi geokimia Granitoid Sulit Air. Dengan demikian hanya terdapat tiga sampel granit yang layak digunakan untuk menjelaskan Granitoid Sulit Air

Tabel 3. Pengayaan (positif) maupun pengurangan (negatif) setiap spesies dengan menganggap Al₂O₃ sebagai spesies *immobile* pada proses mineralisasi Cu pada Granit Sulit Air di X Koto Diatas.

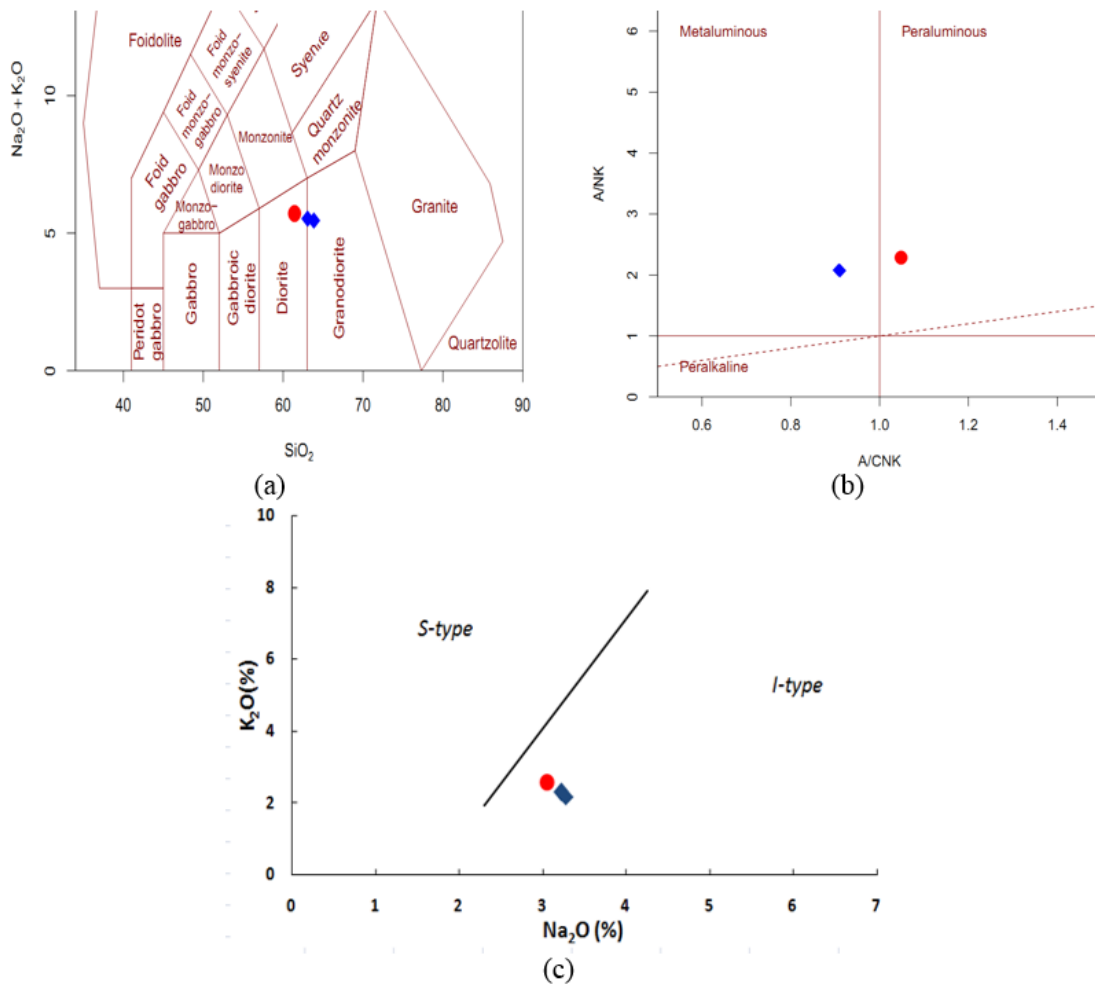
| Spesies | $\Delta C_i/C_i^o$ | Spesies | $\Delta C_i/C_i^o$ | Spesies | $\Delta C_i/C_i^o$ |
|---------------------------------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|
| SiO ₂ | -0,17 | Sc | -0,55 | La | 0,13 |
| TiO ₂ | -0,43 | Ga | 0,14 | Ce | -0,07 |
| Al ₂ O ₃ | 0 | Rb | 2,72 | Pr | 0,14 |
| Fe ₂ O _{3T} | -0,78 | Sr | 5,95 | Nd | 0,09 |
| MnO | -0,58 | Y | -0,24 | Sm | 0,20 |
| CaO | -0,6 | Nb | 0,49 | Eu | -0,43 |
| MgO | -0,72 | Cs | 0,03 | Gd | 0,15 |
| Na ₂ O | -0,39 | Ba | 1,79 | Tb | -0,06 |
| K ₂ O | 2,32 | | | Dy | -0,09 |
| P ₂ O ₅ | -0,47 | | | Ho | -0,11 |
| | | | | Er | -0,11 |
| | | | | Tm | -0,14 |
| | | | | Yb | -0,13 |
| | | | | Lu | -0,22 |



Gambar 5. a) Rb, Sr, dan Ba telah mengalami pengayaan akibat mineralisasi Cu; b) Pengayaan K₂O pada batuan teralterasi dapat dijadikan indikasi K-metasomatisme; c) K-metasomatisme diperkuat oleh korelasi negatif K₂O terhadap CaO+Na₂O.

dengan basis geokimia, yaitu SA-54, I-98-7, dan I-98-8. Granitoid Sulit Air terdeteksi berada dalam rentang diorit hingga granodiorit berdasarkan diagram Middlemost (1985) seperti dapat ditampilkan pada Gambar 6a. Perbandingan

komposisi Al₂O₃ terhadap CaO, Na₂O, dan K₂O menunjukkan bahwa pluton yang dipelajari bersifat metalumina hingga peralumina lemah dengan A/CNK berkisar dari 0,91 hingga 1,05 (Shand, 1943) seperti ditampilkan pada Gambar

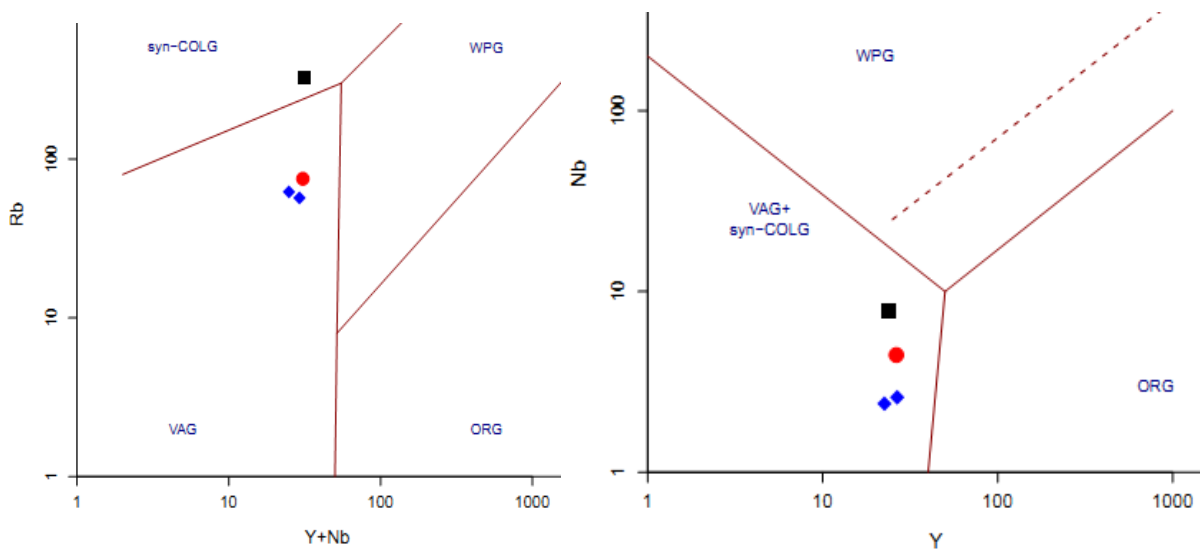


Gambar 6. Klasifikasi geokimia Granitoid Sulit Air: a) Pluton ini berkisar antara diorit hingga granodiorit berdasarkan perbandingan komposisi SiO_2 terhadap Na_2O+K_2O (Middlemost, 1985); b) Nilai A/CNK menunjukkan bahwa batuan tersebut bertipe metalumina – peralumina lemah; c) Diagram Na_2O terhadap K_2O memperkuat kesimpulan bahwa Granitoid Sulit Air merupakan tipe-I. ● = SB-54 A dan ◆ = I-98-7 dan I-98-8 hasil penelitian sebelumnya (Imtihanah, 2005).

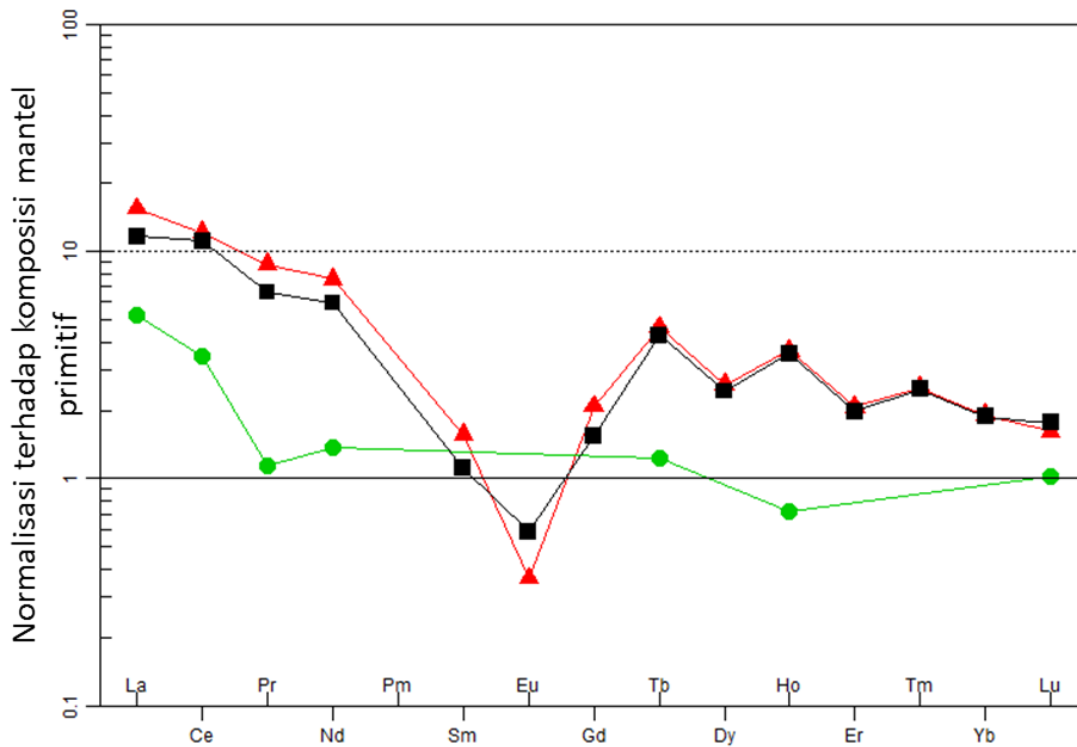
6b. Granitoid Sulit Air dapat diklasifikasikan bertipe-I karena $A/CNK < 1,1$ (Wang et al., 2012; Tang et al., 2017). dan yang diperkuat dengan diagram perbandingan kadar K_2O terhadap Na_2O (Gambar 6c). Rasio Rb/Sr dan Rb/Ba pada Granitoid Sulit Air $< 0,18$ dan $< 0,15$ secara berurutan. Dua rasio unsur jejak tersebut lebih dekat dengan tipikal granit tipe-I dengan Rb/Sr dan Rb/Ba pada 0,6 dan 0,3 secara berurutan. Pada sisi lain, Rb/Sr maupun Rb/Ba pada granit tipe-S jauh lebih besar yaitu 1.8 dan 0.5 (Whalen et al., 1987; Schwark et al., 2018).

Pearce (1984) mengajukan empat klasifikasi tektonik batuan granitik, yaitu ocean ridge granite, volcanic arc granite, within-plate granite, dan

collisional granite. Klasifikasi tersebut didasarkan atas komposisi Rb, Y, Nb, Ta, dan Yb. Seluruh unsur jejak tersebut berkonsentrasi kecil pada volcanic arc granite namun berkomposisi tinggi dalam within plate granite. Meski Rb dan Ta pada collisional granite relatif tinggi, kadar Nb-nya rendah. Pada sisi lain, kelimpahan Y, Ta, dan Yb pada dengan kandungan Rb yang rendah merupakan tipikal dari ocean ridge granite. Afinitas terhadap lajur vulkanik Bukit Barisan ditunjukkan oleh Granitoid Sulit Air melalui hasil plot Rb terhadap $Y+Nb$ dan Nb terhadap Y sebagai volcanic arc granite (Gambar 7) dan sesuai dengan penelitian sebelumnya (Cobbing, 2005). Karakter tipe-I dan volcanic arc granite dari pluton pada studi ini sesuai dengan kesimpulan



Gambar 7. Klasifikasi tektonik Granitoid Sulit Air berdasarkan klasifikasi Pearce dkk. (1984). a) Pluton ini berafiliasi terhadap *Volcanic Arc Granite* (VAG) berdasarkan perbandingan Y+Nb terhadap Rb; dan b) Diagram Y versus Nb mempertajam klasifikasi sampel sebagai *volcanic arc granite*. ● = SB-54 A dan ◆ = I-98-7 dan I-98-8 hasil penelitian sebelumnya (Imtihanah, 2005).



Gambar 8. Kesamaan pola diagram laba-laba UTJ ditunjukkan oleh sampel segar maupun teralterasi setelah dinormalisasi dengan nilai mantel primitif (McDonough and Sun, 1995). Meski demikian, anomali negatif Eu pada SB-56 A lebih tajam daripada SB-54 yang menandakan bahwa kemungkinan semakin banyak plagioklas yang berubah menjadi mineral lain pada proses mineralisasi. ▲ = SA-56 A, ■ = SA-54, ● = SA-56 B.

sebelumnya mengenai pembentukan Granitoid Sulit Air pada periode Pertengahan Jura – Kapur Awal (McCourt et al., 1996).

Karakter UTJ

Pola yang relatif sama ditunjukkan oleh granit segar maupun granit teralterasi dalam studi ini, yaitu pengayaan UTJ-ringan relatif terhadap komposisi mantel primitif, UTJ-berat cenderung datar, dan anomali negatif Eu. Pada sisi lain, kadar UTJ pada bijih malakit tergolong rendah (11,48 ppm) yang bermakna bahwa mineralisasi Cu di lokasi studi tidak membawa mineral yang berasosiasi dengan UTJ. Diagram laba-laba UTJ pada penelitian ini dapat diamati pada Gambar 8.

Mineralisasi menurunkan nilai anomali Ce dengan Ce/Ce^* dari 1,59 (granit segar) menjadi 1,07 (granit teralterasi). Penurunan anomali Ce dapat disebabkan oleh oksidasi sebagian unsur tersebut menjadi Ce^{4+} dan kemudian terpisah dari UTJ lain yang tetap bertahan dalam kondisi UTJ^{3+} . Meski tidak signifikan, terdapat peningkatan derajat anomali negatif Eu (Gambar 8) pada sampel teralterasi ($Eu/Eu^* = 0,04$) terhadap sampel segar ($Eu/Eu^* = 0,20$) yang dapat disebabkan oleh penurunan jumlah plagioklas pada sampel teralterasi. Fakta tersebut sesuai dengan beberapa penelitian sebelumnya bahwa plagioklas dapat tergantikan oleh K-felspar pada zona alterasi potasik (Boomeri et al, 2009). Rb bukan unsur yang kompatibel dengan plagioklas (Ren et al., 2003), sehingga tidak ada korelasi yang bisa disimpulkan secara langsung antara perubahan jumlah unsur tersebut terhadap fraksinasi plagioklas. Penambahan jumlah Rb pada sampel teralterasi (SA-56 A) merupakan akibat dari K-metasomatisme seperti dijelaskan pada beberapa studi terdahulu (Armbrust dr., 1977); Yang et al., 2011; Montreuil et al., 2013).

KESIMPULAN

Al_2O_3 dapat dianggap sebagai oksida *immobile* dalam penggambaran diagram *Isocon* akibat koefisien korelasinya lebih baik dari calon unsur atau oksida *immobile* lain. Batuan teralterasi pada penelitian ini telah mengalami pengayaan K_2O , Rb, Sr, dan Ba disebabkan oleh proses K-metasomatisme. Sebaliknya, Na_2O , MgO , CaO , dan Fe_2O_{3T} relatif berkurangan akibat mineralisasi Cu. UTJ dapat disimpulkan bersifat *immobile* selama proses mineralisasi Cu di X Koto Diatas. Rasio A/CNK, Rb/Sr, Rb/Ba, dan diagram

N_2O terhadap K_2O menunjukkan karakter Granitoid Sulit Air sebagai tipe-I.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkanterimakasih kepada kepala Pusat Survei Geologi, Kementerian ESDM atas ijin penggunaan data dalam tulisan ilmiah ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Bapak Eko Partoyo dan Bapak M. Heri Hermiyanto Zajuli atas saran dan diskusinya. Juga kepada Bapak Kurnia yang telah membantu selama kerja di lapangan, serta Ibu Irfany dan Ibu Indah yang membantu dalam analisis XRF dan ICP –MS. Diskusi dengan Ibu Imtihanah telah membantu penulis dalam penafsiran geokimia batuan yang diteliti.

DAFTAR PUSTAKA

- Armbrust, G. A., Oyarzun M, J., dan Arias, J., 1977. Rubidium as a guide to ore in Chilean porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 72(6), 1086-1100.
- Barber, A. J., Crow, M. J., dan Milsom, J. (eds.), 2005. Sumatra: Geology, resources and tectonic evolution. Geological Society of London.
- Brimhall, G. H., dan Dietrich, W. E., 1987. Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: results on weathering and pedogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(3), 567-587.
- Boomeri, M., Nakashima, K. dan Lentz, D. R., 2009. The Miduk porphyry Cu deposit, Kerman, Iran: A geochemical analysis of the potassic zone including halogen element systematics related to Cu mineralization processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 103(1), 17-29.
- Chappell, B. W., 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8, 173-174.
- Chubarov, V., Amosova, A. dan Finkelshtein, A., 2016. X-ray fluorescence determination of sulfur chemical state in sulfide ores. *X-Ray Spectrometry*, 45(6), 352-356.

- Cobbing, E. J., 2005. Granites. Geological Society, London, Memoirs, 31(1), 54-62.
- Devi, P. R., Trupti, A. C., Nicy, A., Dalvi, A. A., Swain, K. K., Wagh, D. N. dan Verma, R., 2015. Evaluation of uncertainty in the energy dispersive X-ray fluorescence determination of platinum in alumina. *Analytical Methods*, 7(12), 5345-5351.
- Gong, Q., Yan, T., Li, J., Zhang, M. dan Liu, N., 2016. Experimental simulation of element mass transfer and primary halo zone on water-rock interaction. *Applied Geochemistry*, 69, 1-11.
- Grant, J. A., 1986. The isocon diagram; a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic geology*, 81(8), 1976-1982.
- Grant, J. A., 2005. Isocon analysis: A brief review of the method and applications. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30(17-18), 997-1004.
- Gresens, R. L., 1967. Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical geology*, 2, 47-65.
- Helgeson, H. C., Brown, T. H., Nigrini, A., dan Jones, T. A., 1970. Calculation of mass transfer in geochemical processes involving aqueous solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(5), 569-592.
- Higashino, F., Kawakami, T., Tsuchiya, N., Satish-Kumar, M., Ishikawa, M., Grantham, G. H., Sakata, S., Hattori, K. dan Hirata, T., 2015. Geochemical behavior of zirconium during Cl-rich fluid or melt infiltration under upper amphibolite facies metamorphism—A case study from Brattnipene, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 110(4), 166-178.
- Hwang, J., dan Moon, S. H., 2018. Geochemical evidence for K-metasomatism related to uranium enrichment in Daejeon granitic rocks near the central Ogcheon Metamorphic Belt, Korea. *Geosciences Journal*, 1-13.
- Idrus, A., Kolb, J. dan Meyer, F. M., 2009. Mineralogy, litho-geochemistry and elemental mass balance of the hydrothermal alteration associated with the gold-rich Batu Hijau porphyry copper deposit, Sumbawa Island, Indonesia. *Resource geology*, 59(3), 215-230.
- Imtihanah, 2000. Isotopic Dating of the Sumatran Fault System (SFS) (Doctoral dissertation, University of London).
- Imtihanah, 2005. Rb/Sr Geochronology and Geochemistry of Granitoid Rocks From Western Part of Central Sumatra. *Jurnal Sumber Daya Geologi*, 15(2), 103-117
- Irzon, R., Syafri, I., Hutabarat, J. dan Sendjaja, P., 2016. REE Comparison Between Muncung Granite Samples and their Weathering Products, Lingga Regency, Riau Islands. *Indonesian Journal on Geoscience*, 3(3), 149-161.
- Irzon, R. dan Abdullah, B., 2016. Geochemistry of Ophiolite Complex in North Konawe, Southeast Sulawesi. *Eksplorium: Buletin Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir*, 37(2), 101-114.
- Irzon, R. 2018., Limbah Pencucian Bauksit Sebagai Sumber Unsur Tanah Jarang Potensial; Studi Kasus Pulau Selayar, Provinsi Kepulauan Riau. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 13(1), 45-57.
- Irzon, R. 2019. Proses Pembentukan dan Asal Material Formasi Kayasa di Halmahera Berdasarkan Unsur Jejak dan Unsur Tanah Jarang. *Eksplorium*, 40(1), 19-32.
- Ishihara, S., 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining geology*, 27(145), 293-305.
- Koning, T. and Aulia, K., 1985. Petroleum geology of the Ombilin Intermontane Basin, West Sumatra. In: Indonesian Petroleum Association, Proceedings of the 14th Annual Convention, Jakarta, I, 117-137.

- Le Vaillant, M., Barnes, S. J., Fiorentini, M. L., Santaguida, F. dan Törmänen, T., 2016. Effects of hydrous alteration on the distribution of base metals and platinum group elements within the Kevitsa magmatic nickel sulphide deposit. *Ore Geology Reviews*, 72, 128-148.
- Liu, Y., Ma, S., Zhu, L., Sadeghi, M., Doherty, A. L., Cao, D. dan Le, C., 2016. The multi-attribute anomaly structure model: An exploration tool for the Zhaojikou epithermal Pb-Zn deposit, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 169, 50-59.
- Martin, R. F., dan Piwinski, A. J., 1972. Magmatism and tectonic settings. *Journal of Geophysical Research*, 77(26), 4966-4975.
- Maulana, A., Yonezu, K. dan Watanabe, K., 2014. Geochemistry of rare earth elements (REE) in the weathered crusts from the granitic rocks in Sulawesi Island, Indonesia. *Journal of Earth Science*, 25(3), 460-472.
- McDonough, W. F. dan Sun, S. S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3-4), 223-253.
- McCourt, W. J., Crow, M. J., Cobbing, E. J., dan Amin, T. C., 1996. Mesozoic and Cenozoic plutonic evolution of SE Asia: evidence from Sumatra, Indonesia. Geological Society, London, Special Publications, 106(1), 321-335.
- Middelburg, J. J., van der Weijden, C. H., dan Woittiez, J. R., 1988. Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks. *Chemical Geology*, 68(3-4), 253-273.
- Middlemost, E. A., 1985. *An Introduction to Igneous petrology, Magma and magmatic Rocks*. Longmans.
- Migaszewski, Z. M. dan Galuszka, A., 2015. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 45(5), 429-471.
- Montreuil, J. F., Corriveau, L., & Grunsky, E. C., 2013. Compositional data analysis of hydrothermal alteration in IOCG systems, Great Bear magmatic zone, Canada: to each alteration type its own geochemical signature. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 13, 229-247.
- Nishimoto, S., Yoshida, H., Asahara, Y., Tsuruta, T., Ishibashi, M. dan Katsuta, N., 2014. Episyenite formation in the Toki granite, central Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167(1), 960.
- Parsapoor, A., Khalili, M. dan Maghami, M., 2017. Discrimination between mineralized and unmineralized alteration zones using primary geochemical haloes in the Darreh-Zar porphyry copper deposit in Kerman, southeastern Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 132, 109-126.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. dan Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of petrology*, 25(4), 956-983.
- Pulunggono, A., dan Cameron, N. R. 1984. Sumatran microplates, their characteristics and their role in the evolution of the Central and South Sumatra basins. In: Indonesian Petroleum Association, Proceedings of the 13th Annual Convention, 13, 1221 - 1443.
- Quesnel, B., de Veslud, C. L. C., Boulvais, P., Gautier, P., Cathelineau, M. dan Drouillet, M., 2017. 3D modeling of the laterites on top of the Koniambo Massif, New Caledonia: refinement of the per descensum lateritic model for nickel mineralization. *Mineralium Deposita*, 52(7), 961-978.
- Rolland, Y., Cox, S., Boullier, A. M., Pennacchioni, G. dan Mancktelow, N., 2003. Rare earth and trace element mobility in mid-crustal shear zones: insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 214(1-2), 203-219.

- Sato, K., 1991. K-Ar ages of granitoids in Central Sumatra, Indonesia. *Bulletin Geological Survey of Japan*, 42, 111-181.
- Schwark, L., Jung, S., Hauff, F., Garbe-Schönberg, D. dan Berndt, J., 2018. Generation of syntectonic calc-alkaline, magnesian granites through remelting of pre-tectonic igneous sources—U-Pb zircon ages and Sr, Nd and Pb isotope data from the Donkerhoek granite (southern Damara orogen, Namibia). *Lithos*, 310, 314-331.
- Shand, S.J., 1943. *Eruptive rocks*. D. Van Nostrand Company, New York.
- Silitonga, P. H. dan Kastowo, D., 1995. Geological Map of the Solok Quadrangle, Sumatra (Quadrangle 0815) Scale 1: 250,000. Geological Research and Development Centre Bandung.
- Sonzogni, Y., Treiman, A. H. dan Schwenzer, S. P., 2017. Serpentinite with and without brucite: A reaction pathway analysis of a natural serpentinite in the Josephine ophiolite, California. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 112(2), 59-76.
- Štemprok, M., Pivec, E., & Langrová, A., 2005. The petrogenesis of a wolframite-bearing greisen in the Vykmanov granite stock, Western Krušné hory pluton (Czech Republic). *Bulletin of Geosciences*, 80(3), 163-184.
- Tang, Y., Li, X., Xie, Y., Liu, L., Lan, T., Meffre, S. dan Huang, C., 2017. Geochronology and geochemistry of late Jurassic adakitic intrusions and associated porphyry Mo–Cu deposit in the Tongcun area, east China: Implications for metallogenesis and tectonic setting. *Ore Geology Reviews*, 80, 289-308.
- Taylor, G., dan Eggleton, R. A., 2001. *Regolith Geology and Geomorphology*. John Wiley & Sons.
- Tropper, P., Manning, C. E., & Harlov, D. E., 2011. Solubility of CePO₄ monazite and YPO₄ xenotime in H₂O and H₂O–NaCl at 800 C and 1 GPa: Implications for REE and Y transport during high-grade metamorphism. *Chemical Geology*, 282(1-2), 58-66.
- Tungalag, N., Jargalan, S., Khashgerel, B. E., Mijiddorj, C. dan Kavalieris, I., 2018. Characteristics of the Late Devonian Tsagaan Suvarga Cu–Mo deposit, Southern Mongolia. *Mineralium Deposita*, 1-12.
- Ugidos, J. M., Barba, P., Valladares, M. I., Suárez, M. dan Ellam, R. M., 2016. The Ediacaran–Cambrian transition in the Cantabrian Zone (northern Spain): sub-Cambrian weathering, K-metasomatism and provenance of detrital series. *Journal of the Geological Society*, 173(4), 603-615.
- Verdiansyah, O., 2016. Perubahan Unsur Geokimia Batuan Hasil Alterasi Hidrotermal di Gunung Wungkal, Godean, Yogyakarta. *Kurvatek*, 1, 56-67.
- Verhaert, M., Bernard, A., Saddiqi, O., Dekoninck, A., Essalhi, M. dan Yans, J., 2018. Mineralogy and Genesis of the Polymetallic and Polyphased Low Grade Fe-Mn-Cu Ore of Jbel Rhals Deposit (Eastern High Atlas, Morocco). *Minerals*, 8(2), 39.
- Wang, Q., Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Guan, Q., Zhang, X. Q., Sui, Q. L., Hu, Z.C. dan Mo, X. X., 2012. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53, 59-66.
- Whalen, J. B., Currie, K. L. dan Chappell, B. W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to mineralogy and petrology*, 95(4), 407-419.
- Wood, J. R., & Hewett, T. A., 1982. Fluid convection and mass transfer in porous sandstones - A theoretical model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(10), 1707-1713.
- Yang, X., Yang, X., Zhang, Z., Chi, Y., Yu, L., dan Zhang, Q., 2011. A porphyritic

copper (gold) ore-forming model for the Shaxi-Changpushan district, Lower Yangtze metallogenic belt, China: geological and geochemical constraints. *International Geology Review*, 53(5-6), 580-611.

.