

PERUBAHAN UNSUR GEOKIMIA BATUAN HASIL ALTERASI HIDROTERMAL DI GUNUNG WUNGKAL, GODEAN, YOGYAKARTA

Okki Verdiansyah^{1,a}

¹Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta, Indonesia

^aokki.verdiansyah@sttnas.ac.id

Abstrak

Daerah Godean merupakan daerah perbukitan yang terdiri dari batuan beku yang diikuti oleh adanya alterasi hidrotermal dan pelapukan batuan yang cukup intensif. Litologi daerah Gunung Wungkal terdiri dari Andesit dasitik sampai dasit hornblenda, yang teralterasi lemah (klorit-pirit) sampai kaolinit-smektit kuat kemudian terlapukan. Perubahan batuan terlihat dari adanya perubahan mineral, massa, volume dan geokimia mineral yang selanjutnya dihitung dengan metode Isocon - Grant (1986, 2005). Kemiringan (slope) isocon diperoleh dari nilai unsur 'immobile' (Ga, Y, Dy, Tm, Th) sebesar 1.01. Geokimia batuan alterasi lemah menuju argilik menunjukkan adanya perubahan massa sebesar -0.76%, perubahan volume +13.29%, dengan penambahan oksida utama P_2O_5 , TiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 mencapai 0.24, penurunan oksida utama Na_2O , K_2O , MnO , MgO , CaO mencapai 0.65 serta diikuti perubahan signifikan unsur tanah jarang Ho, Lu, Yb dan Er mencapai 0.24, sedangkan penurunan unsur tanah jarang Ce, Nd, Pr, La mencapai 0.15, sedangkan penambahan unsur jejak Pb, Tl, As, Cs mencapai 2.24. Perubahan unsur - unsur diinterpretasi sebagai faktor adanya perubahan mineralogi dari peningkatan pengaruh hidrotermal yang diikuti pelapukan dengan bukti keberadaan sulfida (pirit) yang teroksidasi menjadi limonit, pengkayaan mineral lempung berupa kaolinit dan halloysit pada daerah Godean. Hasil penelitian ini dapat dipakai sebagai pembuktian adanya alterasi hidrotermal, serta dapat digunakan untuk penelitian mengenai hal terkait lebih lanjut pada daerah Godean, ataupun daerah setipe lainnya.

Kata kunci: Geokimia, Isocon, Alterasi hidrotermal, Mineral, Yogyakarta

Abstract

Godean is a hilly area that is composed of igneous rock which is followed by the hydrothermal alteration and weathering fairly intensive. Lithology of Gunung Wungkal area consists of andesite to dacite hornblende, which weakly altered to chlorite-pyrite and kaolinite-smectite continue to weathering. Changes of the rocks seen from minerals assemblages, rock mass, rock volume and geochemistry, then calculated by the Isocon method by Grant (1986, 2005). The Isocon slope obtained from the value of the immobile element (Ga, Y, Dy, Tm, Th) has value at 1:01. Rock geochemistry of weakly altered rocks to the argillic showed the presence of mass change of -0.76%, the volume change +13.29%, with the addition of major oxides P_2O_5 , TiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 reached 0.24, the decline in the main oxide Na_2O , K_2O , MnO , MgO , CaO reached up to 0.65 and followed by a significant change of rare earth elements Ho, Lu, Yb and Er reached up to 0.24, while the decline in rare earth elements Ce, Nd, Pr, La reaches to 0.15, while increase trace elements of Pb, Tl, As, Cs reaches 2.24. This changes of elements is interpreted as a factor increasing of hydrothermal controlled followed weathering, with oxidized of sulphides (pyrite) to limonite, enrichment of clay minerals such as kaolinite and halloysit in Godean. The results of this study can be used as proof of the existence of hydrothermal alteration, and can be used for other researches in Godean, and around it.

Keywords: Geochemistry, isocon, hydrothermal alteration, minerals, yogyakarta

1. Pendahuluan

Gunung Wungkal berada pada perbukitan di kecamatan Godean, Kabupaten Sleman, Provinsi Yogyakarta. Daerah Godean telah diinterpretasi sebagai bagian dari gunung api purba (Bronto, 1999; 2014), yang berumur Miosen yang diinterpretasi seumur dengan jajaran Pegunungan Selatan bagian utara yang berumur antara 11.3 – 17.2 Jtl. Vulkanisme dan magmatisme daerah Godean diinterpretasi serupa dengan Gajahmungkur (Wonogiri) dan Menoreh (Magelang), yang disertai tahapan mineralisasi pada

bagian fasies pusat erupsinya. Penelitian mengenai alterasi hidrotermal telah diawali oleh Bakar (1997) dengan menyebutkan adanya alterasi argilik dan epidot di daerah Godean, dan Verdiansyah (2016) yang menyimpulkan adanya alterasi hidrotermal diikuti mineralisasi pada daerah Gunung Wungkal.

Litologi daerah Godean diinterpretasi bervariasi mulai dari andesit, mikrodiorit, diorit, dasit, dan basalt (Rahardjo, 1997; Subiyanto, 1991; Bakar, 1991 dalam Bronto, 1999, Bronto, dkk., 2014) pada objek pengamatan yang kemungkinan tidak jauh berbeda.

Alterasi hidrotermal dan pelapukan yang terjadi pada daerah Wungkal, telah terbukti dengan karakteristik keberadaan mineral lempung dan beberapa kehadiran sulfida dan oksidasi. Geokimia batuan pada daerah Wungkal belum dibahas secara detil oleh Verdiansyah (2016), sehingga perlu dijabarkan mengenai perubahan-perubahan yang terjadi pada batuan alterasi di daerah Wungkal.

Proses alterasi pada dasarnya adalah metasomatisme yaitu penambahan atau pertukaran unsur dari suatu mineral menjadi mineral yang baru, dimana pada prosesnya akan terjadi perubahan massa, volum dan konsentrasi unsur. Penambahan dan pengurangan unsur dalam *mass transfer* ini telah dirumuskan dengan metode Grant (1986, 2005) sebagai modifikasi dan penyempurnaan metode kestimbangan massa dan volum oleh Gressent (1967).

2. Metode Penelitian

Penelitian merupakan pengembangan dari Verdiansyah (2016), yang membahas mengenai karakteristik mineral lempung di Gunung Wungkal, Godean. Pengembangan data ini untuk memperkuat keyakinan adanya alterasi dari karakteristik perubahan geokimia yang terjadi.

Metode penelitian berupa pengambilan data lapangan, analisis kimia, validasi dan pengolahan data, serta interpretasi.

Data kimia berasal dari 2 conto batuan yang teralterasi ringan (klorit – pirit) dengan kode GD_009_RO dan batuan teralterasi kaolinit – smektit – illit diikuti limonit dengan kode GD_004_RO, yang dianalisa kimia dengan metode *XRF (X ray fluorences)* dan *ICP-OES (Inductively Coupled Plasma optical emission spectrometry)* oleh laboratorium PT. Intertek Utama Servis di Jakarta. Hasil analisa laboratorium berupa unsur kimia oksida utama (*Major Oxide*), unsur jejak (*trace element*) dan unsur tanah jarang (*rare earth elements*), dengan jumlah unsur teranalisa sekitar 46 unsur.

Pengolahan data dengan menggunakan metode *isocon* (Grant, 1986; Grant, 2005) yang dibantu dengan program EASYGRANT (Lopez-moro, 2012) berupa modifikasi perhitungan pada Microsoft office excel.

Hasil pengolahan kemudian diinterpretasi dengan konsep metasomatisme, dan pendekatan mineralogi yang terbentuk di lapangan.

3. Hasil dan Analisis

Hasil penelitian berupa review geologi dan keberadaan alterasi hidrotermal di Gunung Wungkal, Godean, Yogyakarta disertai pembahasa perubahan geokimia yang terjadi seperti karakteristik sampel batuan, perhitungan *isocon* yang menjelaskan tentang perubahan unsur oksida utama, unsur jejak, dan unsur tanah arang yang terjadi.

3.1. Geologi daerah Godean

Hasil analisis peta topografi dan pengamatan bentang alam di lapangan, daerah penelitian dapat dibagi menjadi dua satuan geomorfologi yaitu pertama satuan perbukitan denudasional dan yang kedua satuan bergelombang lemah fluvial. Satuan geomorfologi perbukitan denudasional menempati bagian tengah dari daerah penelitian dan dengan luasan $\pm 40\%$ dari keseluruhan daerah penelitian, perbukitan tersebut membentang dengan arah barat laut – tenggara dengan beda tinggi dengan dataran di sekitarnya 34 - 60 meter, berlereng terjal dengan sudut lereng $\pm 51^\circ$ dan elevasi ± 200 meter di atas permukaan laut.

Tataan geologi tersebut di atas batuan di daerah Godean dan sekitarnya dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu Batuan berumur Tersier yang dihasilkan kegiatan gunung api purba dan Endapan G. Merapi, yang berumur Kuarter terdiri atas endapan longsoran dan lahar.

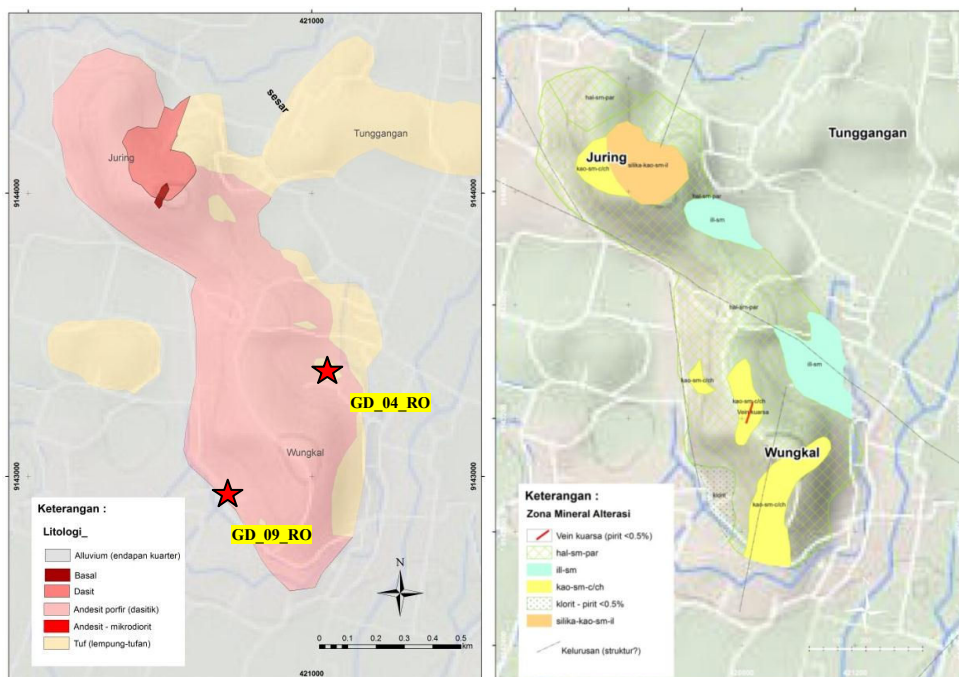
Struktur geologi regional berupa sesar turun dan mendatar arah tenggara – barat yang berada pada bagian utara daerah Godean, yang merupakan interpretasi dari Sudarno (1999). Pada daerah penelitian, struktur geologi terlihat sebagai zona hancuran atau breksiasi, zona *shear* dan kelurusan-kelurusan yang terdapat pada beberapa lokasi seperti Wungkal selatan dan Juring. Kelurusan ini juga diinterpretasi berasosiasi dengan ubahan yang terbentuk pada daerah Godean

Litologi daerah Godean terdiri dari 4 kelompok batuan yaitu batuan beku, sedimen campuran antara vulkanik dengan endapan klastika butiran halus, piroklastik, dan aluvial. Keberadaan batuan ini tidak terlepas dari kemungkinan kompleksnya pembentukan batuan di daerah Godean, yang diperkirakan sebagai bagian dari sistem gunung api kaldera Godean yang masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut. Satuan piroklastik dan sedimen – vulkaniklastik masih sulit dipisahkan dalam penelitian ini, serta endapan longsoran dan fluvio-vulkanik masih digabungkan.

Geologi daerah Godean, dibagi menjadi satuan intrusi andesit – mikrodiorit, satuan andesit dasitik – dasit, satuan dasit, satuan basal, dan satuan sedimen – vulkaniklastika (Gambar 1).

Batuan beku daerah Godean terdiri dari andesit porfir – mikrodiorit pada daerah G. Berjo, Butak, sampai Ngampon dengan sebaran selatan – timurlaut, batuan andesit – dasit pada G Wungkal, Basalt pada Gunung Juring serta tuf – batulempung tufan yang banyak tersingkap di sekeliling Gunung Wungkal dan Gede. Batuan beku dibandingkan dengan Formasi Andesit Tua dan batuan tuf – lempungan dibandingkan dengan anggota Formasi Nanggulan.

Gunung Wungkal, Godean, terdiri dari litologi dasit (walau terlihat transisi andesit menuju dasit) yang cukup luas dengan batuan sedimen vulkaniklastik di sekitarnya. Batuan di daerah Wungkal tergolong menjadi batuan subvulkanik yang tidak keluar ke permukaan, yang kemudian mengalami proses hidrotermal dan pelapukan kuat. Batuan klastika di Wungkal terdiri dari tuf dan batulempung tufan, yang diinterpretasi sebagai endapan sedimen lingkungan danau atau laut dangkal. Pola sebaran sedimen ini berada disekeliling gunung Wungkal, dan beberapa terdapat sebagai senolit dengan pola teratur yang diinterpretasi sebagai robohan atap intrusi. Pada kontak dengan sedimen – vulkaniklastik ini juga, terdapat pengisian mineral sekunder berupa klorit dan epidot. Struktur geologi daerah Wungkal, sulit dijumpai secara optimal karena kondisi sudah sangat lapuk. Namun kelurusan – kelurusan dari zona *shear* dapat diperoleh dilapangan dengan arah dominan N32E dan N10E, yang juga mempengaruhi sebaran mineral lempung. Zona – zona lemah ini banyak tersebar pada bagian Wungkal selatan.



Gambar 1. (a) Peta geologi dan (b) peta alterasi daerah Wungkal, Godean, Yogyakarta.

Analisa geokimia unsur utama batuan, dilakukan pada sampel GD_009_RO yang kemudian dipadukan bersama dengan data geokimia penelitian sebelumnya (Bronto, 1999; Bakar, 1995) serta dikompilasi dengan pembanding batuan busur kepulauan berkompposisi intermediet sampai asam dari data PetDB (www.earthchem.org/petdb) yang telah dilakukan seleksi (Tabel 1). Analisa geokimia menunjukkan bahwa conto batuan beku GD_09_RO didaerah Wungkal adalah termasuk kedalam batuan asam dengan nama dasit (TAS diagram oleh Le Maitre et al, 1989) – riodasit (pada diagram R1-R2) dengan afinitas kapur alkali (pada AFM diagram oleh Irvine & Baragar), serta batuan ini masuk kedalam tatanan tektonik busur gunung api kepulauan (pada diagram Ti-Mn-P oleh Pearce & Cann, 1973).

Perubahan unsur Geokimia Batuan Hasil Alterasi Hidrotermal di Gunung Wungkal, Godean, Yogyakarta
(O. Verdiansyah)

Tabel 1. Data geokimia unsur utama batuan daerah Godean dan pembanding. Fe-oksida dari data laboratorium adalah Fe_2O_3 total, pada tabel ini digunakan perhitungan $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ menurut Middlemost, 1989 (dalam Rollinson, 1993) untuk menentukan nilai FeO dan Fe_2O_3 .

Data geokimia batuan dari daerah Godean													
ID	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3T}	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃ /FeO
A1	55.00	0.64	19.84	6.99	1.61	5.38	0.13	5.13	8.26	2.91	0.79	0.31	0.30
A2	54.38	0.63	20.67	7.00	1.62	5.38	0.12	4.53	8.58	2.96	0.80	0.33	0.30
D1	64.48	0.10	15.77	4.93	1.41	3.52	0.19	5.54	3.02	3.73	1.57	0.67	0.40
D2	66.35	0.10	15.70	4.76	1.36	3.40	0.19	4.89	2.54	3.81	1.10	0.56	0.40
GD1	55.57	0.48	16.49	7.00	1.62	5.38	0.12	7.99	7.99	3.37	0.61	0.38	0.30
GD2	57.10	0.61	17.32	7.05	1.83	5.22	0.14	6.26	6.97	3.39	0.79	0.37	0.35
GD7	61.63	0.20	17.39	6.28	1.63	4.65	0.09	3.96	6.00	3.54	0.63	0.28	0.35
GD_09_RO	66.94	0.40	15.82	4.62	1.32	3.30	0.10	1.73	3.03	4.28	1.73	0.16	0.40

3.2. Alterasi Hidrotermal

Proses hidrotermal dapat terkontrol litologi dan struktur, yang merupakan permeabilitas untuk keluarnya larutan hidrotermal. Konsep dalam hidrotermal adalah akan terbentuknya mineral alterasi (silikat) dan terbentuknya mineral bijih (logam sulfida), serta diikuti presipitasi khusus seperti pembentukan urat kuarsa. Daerah Wungkal, terlihat telah terbentuk sistem hidrotermal dengan dilihat dari beberapa parameter utama yaitu :

- Alterasi** : hadirnya mineral alterasi berupa klorit dan pirit pada beberapa singkapan alaupun masih terlihat intensitas lemah. Kaolinit WX yang hadir mengikuti pola tertentu, dimana terdapat nilai kristalinitas >1 pada zona alterasi kaolinit – smektit yang diinterpretasi sebagai jalur hidrotermal dan kemungkinan adanya mineralisasi. Adanya silisifikasi pada batuan Tuf daerah Wungkal, dan pada dasit dan tuf di Juring.
- Mineralisasi** : hadirnya pirit pada daerah Wungkal, pada sampel GD_09_RO baik secara fisik maupun secara geokimia serta terbentuknya urat kuarsa sebagai float dan singkapan di TG.27 yang diikuti diseminasi pirit. Berdasarkan perhitungan terdapat pirit sebanyak 0.22 % pada Dasit terubah kloritik sangat lemah, dan sebanyak 3.67 % pada vein kuarsa. Terjadi pengkayaan secara geokimia beberapa unsur seperti As, Sb, S, Ag.

Sistem hidrotermal daerah Wungkal kemungkinan dikontrol oleh adanya jalur urat kuarsa yang membentuk sebaran mineral lempung kelompok hidrotermal berpola utara – selatan. Asosiasi alterasi yang terbentuk pada sistem hidrotermal adalah kaolinit-smektit yang diikuti kristalinitas tinggi kaolinit (>1), intensitas Fe pada smektit lemah (<1.5), serta diikuti pembentukan vein kuarsa, dan disertai adanya kalsit dan karbonat. Zonasi alterasi hidrotermal pada daerah Wungkal dibagi menjadi klorit – pirit, kaolinit – smektit, illit – smektit, dan halloysit – smektit (Gambar 1b).

Sistem hidrotermal daerah Wungkal, dapat di plotkan dalam diagram pH-Temperatur dalam Corbet & Leach (1996) menunjukkan sebagai alterasi netral (pH 6-7), dengan sistem air meteorik kemungkinan bikarbonat (terdapat kalsit) sehingga diinterpretasi sebagai sistem epitermal sulfidasi rendah. Kadar batuan juga menunjukkan tidak adanya anomali signifikan pada unsur Cu-Pb-Zn, namun tinggi dalam Arsen (As), sehingga dinyatakan sistem mineralisasi epitermal telah terbentuk pada daerah Wungkal.

Mineral hasil alterasi hidrotermal yang dijumpai adalah kaolinit, smektit, kalsit, klorit, illit yang diikuti oleh penambahan pirit (FeS_2). Proses pelapukan membentuk mineral lempung dan tanah pada batuan teralterasi akan berlangsung lebih cepat karena faktor adanya sulfida dan telah adanya mineral lempung. Oksidasi kristal pirit akan membentuk larutan yang lebih asam dan meluruhkan klorit serta beberapa mineral mafik sekitarnya, yang akhirnya menghasilkan pengkayaan Ca, Mg, Si dan Al secara lokal yang kemudian menghasilkan illit dan illit-smektit (*interlayer*), dan faktor utama yang terpengaruh adalah adanya oksidasi dari Fe^{2+} . Larutan kaya ion ini membentuk siklus mineral lempung baru, dan logam hasil uraian akan membentuk mineral oksida besi seperti hematit.

3.2. Karakteristik sampel batuan

Conto batuan yang dipakai dalam analisis perhitungan *isocon* adalah Dasit Hornblenda (GD_09_RO) dan Dasit teralterasi kaolinit – smektit (GD_04_RO) (Gambar 2).

a. GD_09_RO :

Deskripsi : Dasit hornblenda memiliki tekstur porfiritik dengan fenokris 32.5% berupa plagioklas (andesin), sanidin, hornblenda, kuarsa, biotit dan masa dasar berupa kuarsa? (sperulit?), plagioklas, hornblenda, gelas vulkanik, mikrolit, serta terdapat beberapa mineral sekunder seperti kalsit. Mineral sekunder yang hadir berupa klorit (<1%) dan pirit (<0.01%) sehingga dapat dikatakan batuan ini teralterasi sangat lemah atau masih tergolong segar.

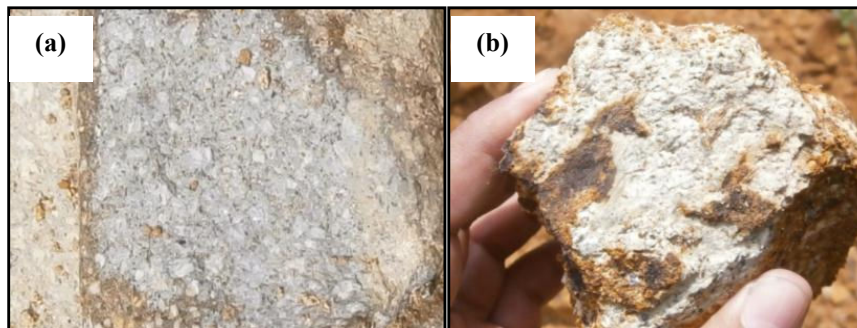
Tergolong batuan asam (66.6 % SiO₂), dengan tipe magma dasit kapur alkali (TAS Diagram)

Sifat fisik : Koheren, pejal, densitas perhitungan adalah 2.58 gr/mL

b. GD_04_RO

Deskripsi : Batuan beku teralterasi kaolinit-smektit, terlapukan. Mineral utama terlihat kaolinit, smektit menggantikan fenokris, dan limonit menggantikan mineral mafik sebelumnya. Kaolinit pada sampel ini merupakan jenis kaolinit hipogen dan halloysit yang berasal dari pelapukan.

Sifat fisik : Batuan padat, rapuh, densitas perhitungan adalah 2.26 gr/mL.



Gambar 2. Sampel batuan dari gunung Wungkal, (a) Dasit hornblenda alterasi lemah (GD_09_RO), dan (b). Batuan teralterasi kaolinit – smektit – limonit (GD_04_RO).

3.3. Perhitungan kesetimbangan massa dan *Isocon*

Grant (1986), dan Gressens (1967) melakukan perhitungan dari perubahan unsur – unsur *immobile* dan *mobile* dengan konsep metasomatisme, dimana terjadi penambahan dan pengurangan unsur (i) dari batuan awal (o) menuju batuan setelahnya (a). Formula perhitungan kesetimbangan massa oleh Grant (1967) adalah sebagai berikut :

$$\Delta m_i = fv(\rho_a/\rho_o)C_a^i - C_o^i$$

$$C_a = (m_o/m_a)C_o$$

$$(\Delta C_a^i/C_o^i) = (m_a/m_o)(C_a^i/C_o^i) - 1$$

$$(\Delta C_a^i/C_o^i) = (C_a^{Al_2O_3}/C_o^{Al_2O_3})(C_a^i/C_o^i) - 1$$

$$(\Delta C_a^i/C_o^i) = (C_a^i/C_o^i) - 1,$$

$$(\Delta C_a^i/C_o^i) = (\rho_a/\rho_o)(C_a^i/C_o^i) - 1.$$

Dimana massa (m), perubahan massa suatu unsur (Δm_i), faktor volume (fv), densitas batuan awal (ρ_a), densitas batuan berubah (ρ_o), Konsentrasi unsur awal (C_a), Konsentrasi unsur batuan berubah (C_o).

Metode *isocon* mendeterminasikan perubahan berdasarkan *slope* yang dibentuk oleh perbandingan Co/Ca, kemudian dilakukan *clustering* untuk mencari slope yang mendekati satu. Pada perhitungan *slope* conto batuan Godean diperoleh unsur-unsur yang dianggap *immobile* adalah Ga, Y, Dy, Tm, Th dengan *slope isocon* adalah 1.01 (lihat tabel 2).

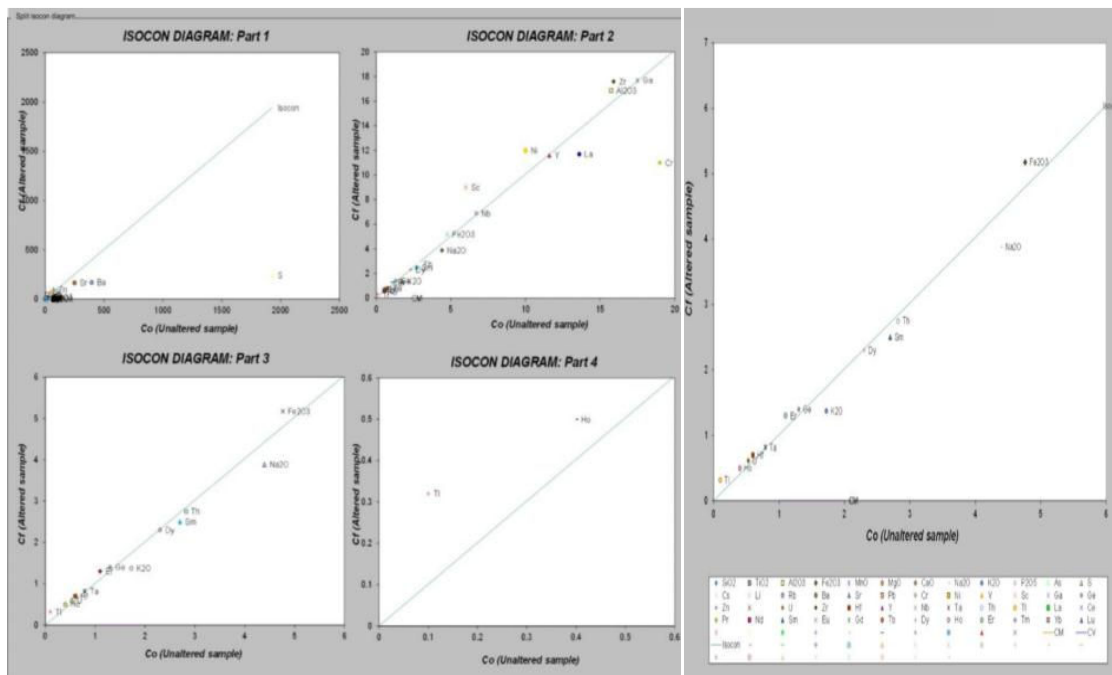
Tabel 2. *Clustering slope* untuk penentuan *immobile elements* pada perhitungan *isocon*.

No	Unsur	Slope	No	Unsur	Slope	No	Unsur	Slope	No	Unsur	Slope	Unsur yang dipakai dalam penentuan slope		
1	Pb	3.27	12	Yb	1.20	24	Y	1.00	36	Pr	0.87	No	Unsur	Slope
2	Tl	3.20	13	Er	1.18	25	Eu	1.00	37	La	0.86	1	Ga	1.01
3	As	2.29	14	TiO ₂	1.18	26	Dy	1.00	38	K ₂ O	0.80	2	Y	1.00
4	Cs	2.00	15	Hf	1.17	27	Tm	1.00	39	MnO	0.71	3	Eu	1.00
5	V	1.58	16	U	1.15	28	Th	0.98	40	Li	0.70	4	Dy	1.00
6	Sc	1.50	17	Zr	1.11	29	Tb	0.97	41	Sr	0.67	5	Tm	1.00
7	Zn	1.43	18	Fe ₂ O ₃	1.09	30	Gd	0.96	42	MgO	0.62	6	Th	0.98
8	P ₂ O ₅	1.25	19	Ge	1.08	31	Rb	0.95	43	Cr	0.58			
9	Lu	1.25	20	Al ₂ O ₃	1.07	32	Sm	0.93	44	Ba	0.43			
10	Ho	1.25	21	Ta	1.04	33	Ce	0.91	45	CaO	0.35	Isocon slope = 1.01		
11	Ni	1.20	22	Nb	1.03	34	Nd	0.90	46	S	0.12			
			23	Ga	1.01	35	Na ₂ O	0.88						

Berdasarkan perhitungan *isocon*, dengan *slope* 1.01 maka diperoleh beberapa kenaikan dan penurunan konsentrasi unsur (Tabel 3, dan Gambar 3) dimana perubahan-perubahan akan diuraikan sebagai berikut :

Tabel 3. Hasil perhitungan *isocon* untuk mengetahui perubahan masa, volum, dan konsentrasi unsur kimia dari batuan teralterasi lemahmenuju batuan teralterasi kaolinit-smektit (argilik).

			Overall volume change (%)	13.29
			Overall mass change (%)	-0.76
			Slope	1.01
Sample	Unaltered GD09RO	Altered GD04RO	Gain/Loss relative to C _i ⁰ $\Delta C_i / C_i^0$	Gain/Loss in wt.% or ppm ΔC_i
SiO ₂	66.94			
TiO ₂	0.39	0.45	0.17	0.06
Al ₂ O ₃	15.74	16.87	0.06	1.00
Fe ₂ O ₃	4.76	5.18	0.08	0.38
MnO	0.09	0.07	-0.29	-0.03
MgO	1.76	1.09	-0.38	-0.68
CaO	3.05	1.07	-0.65	-1.98
Na ₂ O	4.39	3.88	-0.12	-0.54
K ₂ O	1.72	1.37	-0.21	-0.36
P ₂ O ₅	0.14	0.18	0.24	0.04
As	7.00	16.00	1.27	8.88
S	1930.00	240.00	-0.88	-1691.83
Cs	1.30	2.60	0.98	1.28
Li	25.70	18.00	-0.30	-7.84
Rb	27.70	26.20	-0.06	-1.70
Ba	394.00	170.00	-0.57	-225.30
Sr	247.00	165.00	-0.34	-83.26
Pb	15.00	49.00	2.24	33.63
Cr	19.00	11.00	-0.43	-8.08
Ni	10.00	12.00	0.19	1.91
V	48.00	76.00	0.57	27.42
Sc	6.00	9.00	0.49	2.93
Ga	17.50	17.70	0.00	0.07
Ge	1.30	1.40	0.07	0.09
Zn	70.00	100.00	0.42	29.24
U	0.53	0.61	0.14	0.08
Zr	15.90	17.60	0.10	1.57
Hf	0.60	0.70	0.16	0.09
Y	11.60	11.60	-0.01	-0.09
Nb	6.70	6.90	0.02	0.15
Ta	0.79	0.82	0.03	0.02
Th	2.82	2.75	-0.03	-0.09
Tl	0.10	0.32	2.18	0.22
La	13.60	11.70	-0.15	-1.99
Ce	26.60	24.20	-0.10	-2.58
Pr	3.47	3.01	-0.14	-0.48
Nd	13.20	11.90	-0.11	-1.39
Sm	2.70	2.50	-0.08	-0.22
Eu	0.80	0.80	-0.01	-0.01
Gd	2.50	2.40	-0.05	-0.12
Tb	0.38	0.37	-0.03	-0.01
Dy	2.30	2.30	-0.01	-0.02
Ho	0.40	0.50	0.24	0.10
Er	1.10	1.30	0.17	0.19
Tm	0.20	0.20	-0.01	0.00
Yb	1.00	1.20	0.19	0.19
Lu	0.16	0.20	0.24	0.04



Gambar 3. Grafik Isocon untuk menentukan perubahan unsur dari batuan terlaterasi lemah (GD_09_RO) menuju batuan alterasi kaolinit-smektit (GD_04_RO).

3.3.1. Unsur oksida utama

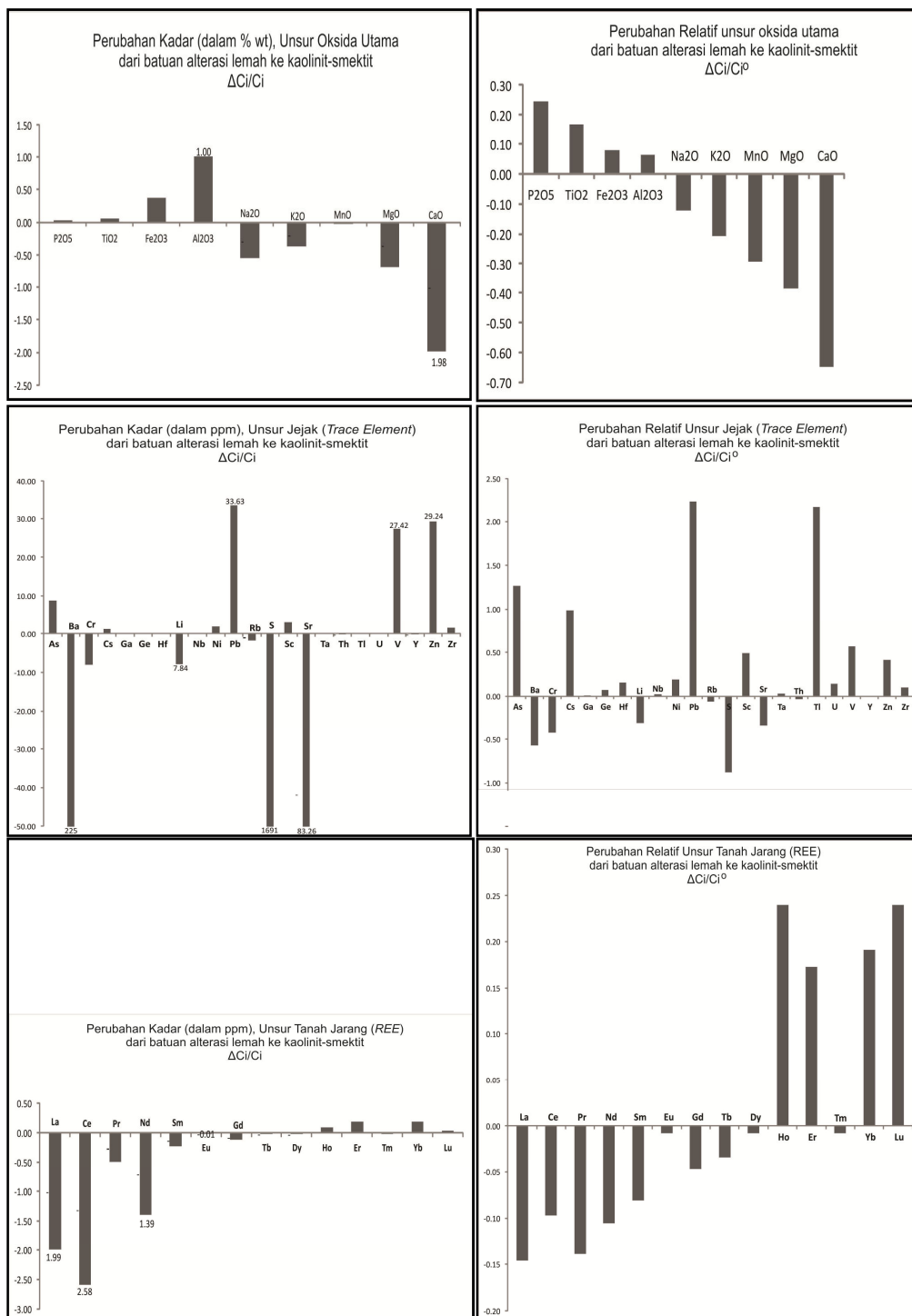
Oksida utama yang mengalami peningkatan signifikan yaitu TiO_2 sebesar 0.17 kali atau 0.06% unsur, Al_2O_3 sebesar 0.06 kali atau 1 % unsur dan Fe_2O_3 sebesar 0.08 kali atau penambahan 0.38% unsumnya. Perubahan ini terlihat dari perubahan mineralogi pada batuan teralterasi argilik dengan adanya mineral kaolinit, halloysit, dan limonit (gutit, hematit) yang terdeteksi secara megaskopik dan dengan pengamatan Terraspektral (ASD-PIMA).

Oksida utama yang mengalami penurunan signifikan adalah CaO sebesar 0.65 kali atau 1.98% unsur, MgO sebesar 0.38 kali atau 0.68 % unsumnya, Na_2O sebesar 0.12 kali atau 0.54% unsumnya, K_2O sebesar 0.21 kali atau 0.36% unsumnya, dan MnO sebesar 0.29 kali atau 0.03% unsumnya. Perubahan ini diinterpretasi sebagai penghilangan ion atau unsur akibat alterasi hidrotermal dan pelapukan, dimana unsur alkali (Na, K, Ca) merupakan unsur yang aktif dalam proses metasomatisme pada mineral feldspar (sanidin dan plagioklas) dan pelepasan dari mineral hornblenda (Ca, Mg, Silikat) dan biotit (K, Fe, Mg silikat) membentuk mineral kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5\text{OH}_2$) sehingga unsur ini pun terlarutkan, namun beberapa membentuk Fe-Mn oksihidrat pada retakan akibat pelapukan. Grafik perubahan relatif konsentrasi unsur dapat dilihat pada Gambar 4.

3.3.2. Unsur jejak

Unsur jejak yang mengalami peningkatan signifikan adalah Pb sebesar 2.24 kali atau sebesar 33.6 ppm unsumnya, Tl sebesar 2.18 kali atau 0.22 ppm, As sebesar 1,27 kali atau sebesar 8.8 ppm, Cs sebesar 0.98 kali atau 1.28 ppm unsur. Unsur Pb mengalami peningkatan seiring penambahan logam dasar relatif pada batuan alterasi seperti Seng (Zn) sebesar 0.42 kali atau 29.2 ppm. Hal ini menandakan pada alterasi argilik peningkatan intensitas hidrotermal semakin menguat dan berada lebih dekat dengan *pathway* hidrotermal, dimana terjadi juga peningkatan Arsenik (As) sebesar 1.27 kali atau 8.9 ppm.

Unsur jejak yang mengalami penurunan signifikan adalah belerang (S) sebesar 0.88 kali atau 1.69% unsur, dimana ini terlihat dari berubahnya sulfida seperti pirit (FeS_2) menjadi Limonit (FeO.OH) pada kondisi batuan argilik terlapukan. Grafik perubahan relatif konsentrasi unsur dapat dilihat pada Gambar 4.

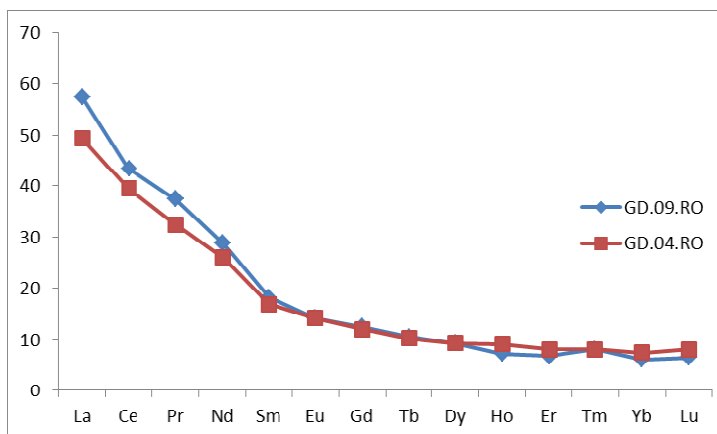


Gambar 5. Perubahan relatif unsur kimia batuan dari alterasi lemah menuju kaolinit – smektit.

3.3.3. Unsur tanah jarang

Unsur tanah jarang (REE) pada batuan terlihat mengalami peningkatan adalah Ho, Lu, Yb, Er, dan yang mengalami penurunan adalah Tb, Gd, Sm, Ce, Nd, Pr, La. Unsur tanah jarang yang dominan mengalami peningkatan adalah Ho sebesar 0.24 kali atau 0.14 ppm, Lu sebesar 0.24 kali atau 0.04 ppm.

Unsur tanah jarang merupakan unsur yang *immobile* sehingga perubahannya dalam konsentrasi (ppm) tidak terlihat besar, yang juga terlihat pada grafik laba-laba antara batuan teralterasi lemah dan argilik mempunyai pola yang sama (Gambar 6).



Gambar 5. Grafik konsentrasi unsur tanah jarang (REE) dalam ppm, setelah normalisasi Chondrite

4. Kesimpulan

Perubahan unsur – unsur diinterpretasi sebagai faktor adanya perubahan mineralogi dari peningkatan pengaruh hidrotermal yang diikuti pelapukan dengan bukti keberadaan sulfida (pirit) yang teroksidasi menjadi limonit, pengkayaan mineral lempung berupa kaolinit dan halloysit pada daerah Godean. Hasil penelitian ini dapat dipakai sebagai pembuktian adanya alterasi hidrotermal, serta dapat digunakan untuk penelitian mengenai hal terkait lebih lanjut pada daerah Godean, ataupun daerah setipe lainnya.

Daftar Pustaka

- [1] Bronto, S., Ratdomopurbo, A., Asmoro, P., Adityarini, M., 2014, *Longsor Raksasa Gunung Api Merapi Yogyakarta - Jawa Tengah Gigantic Landslides Of Merapi Volcano, Yogyakarta - Central Java*, Jurnal Geologi Sumberdaya Mineral, vol. 15, hal 165 – 183, No.4.
- [2] Bronto, S., *Petrologi Bahan Galian di Daerah Godean, Yogyakarta*, Laporan penelitian STTNAS, 1999, tidak dipublikasikan
- [3] Grant, J.A., 1986. *The isocon diagram—a simple solution to Gresens equation for metasomatic alteration*. Economic Geology 81, 1976– 1982.
- [4] Grant, J. A., 2005, *Isocon Analysis : A Brief review of the method and applications*, Journal Physics and chemistry of the earth 30 (2005), p. 997-1004.
- [5] Gresens, R.L., 1967. *Composition–volume relationships of metasomatism*. Chemical Geology 2, 47–55.
- [6] Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. & Zanettin, B., 1986. *A Chemical Classification Of Volcanic Rocks Based On The Total Alkali – Silica Diagram*. Journal Of Petrology. Oxford. Vol.27, p.745–750.
- [7] Lopez-Moro, F., J., 2012, *EASYGRESGRANT – A Microsoft Rxccl spreadsheet to quantity volume change and to perform mass-balance modeling in metasomatic systems*, Journal Computers & Geosciences 39 (2012), p. 191 – 195.
- [8] Mullen, E.D., 1983, *MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis*. Earth and Planetary Science Letters, v. 62, p. 53-62.
- [9] Sudarno, Ign., *Kendali tektonik terhadap pembentukan struktur pada batuan Paleogen dan Neogen di Pegunungan Selatan, Daerah Istimewa Yogyakarta dan sekitarnya.*, Thesis S2, Intitut Teknologi Bandung, 1999.
- [10] Verdiansyah, O., *Studi Karakteristik dan Genesa Mineral Lempung Gunung Wungkal, Godean, Yogyakarta*, Laporan penelitian STTNAS, 2016, tidak dipublikasikan.
- [11] *Whole rock database*, download at www.earthchem.org/petdb