

Tinjauan Kemungkinan Sebaran Unsur Tanah Jarang (REE) di Lingkungan Panas Bumi (Contoh kasus lapangan panas bumi Dieng, Jawa Tengah)

DANNY ZULKIFLI HERMAN

Museum Geologi, Pusat Survei Geologi, Badan Geologi
Jl. Diponegoro No.57 Bandung

SARI

Wilayah-wilayah panas bumi terutama terjadi di lingkungan busur vulkanik/magmatik tempat bilik-bilik magma di bawahnya berperan sebagai sumber panas. Lingkungan tersebut berada pada wilayah batas lempeng konvergen tempat terbentuknya aneka komposisi magma yang berkisar dari basal (gabbro) hingga riolit (granit), tetapi andesit biasanya yang paling dominan. Penampakan yang paling nyata tentang keberadaan panas bumi ditunjukkan oleh manifestasi permukaan antara lain berupa rembesan air panas, fumarol, mata air panas, geiser, dan zona ubahan hidrotermal. Semua hal tersebut merupakan bukti adanya sistem hidrotermal aktif di bawah permukaan sebagai bagian dari kegiatan vulkanisme.

Di samping sebagai penyebab terjadinya ubahan pada batuan sampling, kebanyakan fluida hidrotermal dapat mengubah pola distribusi dan kandungan unsur-unsur tanah jarang (REE antara lain Ce, Eu, La, Lu, Nd, Sm, dan Y), terutama selama proses reaksi. Proses tersebut diduga erat kaitannya dengan perkembangan tingkat mobilitas unsur-unsur tersebut; sementara karakteristik pola REE dalam fluida hidrotermal akan tinggi variabelnya karena bergantung pada sumber magma asalnya.

Mengingat pentingnya peran fluida hidrotermal dalam perkembangan mobilitas unsur-unsur tanah jarang (REE) maka terinspirasi untuk meninjau kemungkinan kaitan sistem hidrotermal aktif dengan potensi sebaran unsur-unsur dimaksud di daerah-daerah manifestasi panas bumi.

Kata kunci: unsur tanah jarang, panas bumi, sistem hidrotermal

ABSTRACT

Geothermal areas occur mainly in an environment of volcanic/magmatic arc where magma chambers play a role as heat sources. The environment is situated within the convergent plate boundaries. A variety of igneous rocks is associated with this environment ranging from basalt (gabbro) to rhyolite (granite) but andesite is normally the most abundant igneous rock. The most obvious geothermal indications are exhibited by some surface manifestations comprising hot water seepage, fumaroles, hot spring, geysers, and hydrothermal alteration zones which are being evidences of an active hydrothermal system beneath the surface as a part of volcanism.

Despite being a causal factor for alteration of country rocks, most hydrothermal fluids enable to change distribution pattern and content of rare earth elements (REE for instance Ce, Eu, La, Lu, Sm, Nd, and Y) particularly during a reaction process. This may have a connection with development of element mobility rates, whilst the characteristics of REE pattern within hydrothermal fluid would have a high variable due to dependency of their original magma source.

Considering the important role of hydrothermal fluid in REE mobility development, it is inspired to review the possible relationship of active hydrothermal system and potency of REE distribution pattern in areas of geothermal manifestation.

Keywords: rare earth elements, geothermal, hydrothermal system

PENDAHULUAN

Unsur-unsur tanah jarang (REE = *rare earth element*) cenderung terbentuk secara alamiah sebagai gabungan dari sebagian unsur-unsur tanah jarang tertentu. Unsur-unsur ini termasuk ke dalam kelompok litofil, yang terkonsentrasi terutama dalam fase silikat dibandingkan dengan fase logam atau sulfida, tetapi juga mempunyai kecenderungan terdispersi sejak pembentukannya sebagai jejak (*trace*) di dalam mineral. Permintaan unsur-unsur tanah jarang didasarkan pada pertimbangan kebutuhan sektor industri yang terdiri atas: katalis minyak bumi dan pemecah kompleks susunan kimia (*cracking*), metalurgi, keramik dan gelas; pengembangan magnet, listrik, dan penelitian lainnya.

Karya tulis ini dibuat sebagai tinjauan terhadap kemungkinan sebaran unsur-unsur tanah jarang di wilayah-wilayah manifestasi panas bumi, dalam upaya membangun pemahaman tentang keterjadiannya dan kaitannya dengan proses hidrotermal pada suatu sistem panas bumi. Pemahaman terhadap mula jadi fluida hidrotermal mencakup tentang potensi kimiawi dan pergerakannya melalui sesar-sesar, kekar-kekar, rekahan-rekahan; bahkan mikro permeabilitas bukaan-bukaan miarolitik, ruang antarbutir, dan belahan-belahan pada/antara mineral-mineral di dalam batuan.

Di dalam semua jenis magma, air merupakan bahan utama (berkisar 1 – 15 %) yang jumlahnya meningkat sesuai peningkatan diferensiasi dan berperan penting di dalam transportasi komponen-komponen bijih. Selain air, terdapat juga unsur-unsur lain dan ion-ion sulfur, klorin, fluorin, boron, fosfor, CO₂, serta arsen. Perkembangan fluida-fluida residual atau disebut juga *mineralizers* atau fluida hidrotermal mengalami peningkatan sesuai diferensiasi progresif, sementara tekanan dan pelarutan padatan berpengaruh kecil terhadap pembentukan fluida hidrotermal.

Terdapat beberapa jenis fluida yang berperan dalam proses ubahan, namun pembahasan pada karya tulis ini ditekankan kepada fluida-fluida hidrotermal dan metasomatik yang terlibat dalam proses ubahan pada suhu di atas suhu permukaan; termasuk fluida-fluida pasca magmatik yang menyebabkan metasomatisme pada batuan-batuan benua, atau yang menghasilkan mineral-mineral ubahan dan cebakan-cebakan bijih hidrotermal.

Hubungan Komposisi Magma dan Sebaran REE

Di dalam sebagian besar proses pembentukan batuan, unsur-unsur logam tanah jarang (REE) tersebar dalam jumlah sedikit atau sebagai jejak, dalam hal ini bukan merupakan komponen utama pembentuk batuan. Namun, semua mineral dapat ditempati oleh salah satu dari tiga kelompok unsur bergantung pada total kandungannya:

- (1) Kelompok mineral dengan kandungan konsentrasi REE sangat kecil, termasuk sebagian besar mineral pembentuk batuan. Tingkat konsentrasi relatifnya terkait dengan variasi pola distribusi unsur-unsur tanah jarang ringan (*Light Rare Earth Elements/LREE*) dan berat (*Heavy Rare Earth Elements/HREE*) di dalam mineral-mineral tersebut.
- (2) Kelompok mineral dengan sedikit kandungan REE tetapi merupakan bahan inti, terdiri atas mineral-mineral mengandung > 0,01 wt.% REE (Herrmann, di dalam Wedepohl, 1970); besar kemungkinan memperlihatkan tren khusus distribusi unsur-unsur tersebut.
- (3) Kelompok mineral dengan kandungan terutama REE yang termasuk ke dalam kategori kaya kandungan lantanida, serupa dengan mineral-mineral mengandung kadar REE rendah, seperti alanit (salah satu mineral dari kelompok epidot yang mengandung Ce) dan ytrofluorit (fluorit mengandung Y).

Batuan beku dapat mengandung beberapa ratus ppm lantanida, yang tersebar di dalam mineral utama dan asesori. Tabel 1 menunjukkan kisaran kandungan unsur-unsur tanah jarang (Σ REE) di dalam batu-batuan beku menengah hingga silikaan yang kemungkinan ditemukan di lingkungan busur vulkanik/magmatik atau batas lempeng konvergen (Henderson, 1982).

Sistem Panas Bumi di Lingkungan Busur Vulkanik/Magmatik

Selama pergerakan ke arah permukaan, magma kemungkinan akan berinteraksi dengan air tanah, air *connate*, air laut, air sungai atau danau, es atau air hujan. Lingkungan air di bawah permukaan meliputi semua kegiatan tubuh air dan hasil-hasil dari kegiatan air tersebut. Vulkanisme yang memanaskan air tanah menghasilkan letusan uap yang tidak mengeluarkan/melemparkan

Tabel 1. Kandungan Unsur-Unsur Tanah Jarang (REE) di dalam Batuan Beku menengah hingga asam (modifikasi dari Henderson, 1982)

Jenis Batuan Beku	Unsur-unsur Tanah Jarang (Σ REE, dalam ppm)
Andesit benua	67 - 341
Anortosit	1,7 - 148
Granitik (Diorit kuarsa, tonalit, granodiorit)	10,5 - 499
Monzogranit dan sienogranit	8 - 1977

fragmen-fragmen *juvenile* magma disebut freatik atau hidrotermal (Muffler dr., 1971; Nairn dan Solia, 1980).

Keadaan geologi tertentu di kedalaman bawah permukaan tempat tekanan fluida hidrotermal melampaui tekanan litostatik, akan menyebabkan pelebaran rekahan-rekahan yang ada atau terpecahnya batuan. Kondisi geologi ini dapat terjadi di sekitar terobosan atau ekstrusi magma. Ketika rekahan-rekahan vulkanik tersebut telah cukup meningkatkan permeabilitas batuan induk di sekitar sumber panas, akan tercipta sirkulasi hidrotermal yang signifikan (Knapp dan Knight, 1977; Norton, 1984) dan peningkatan transport uap secara konvektif. Sesuai perjalanan waktu suatu sistem panas bumi dapat terbentuk. Dalam hal ini proses pembentukannya ditentukan oleh faktor-faktor kendali geologi, seperti: umur dan ukuran terobosan batuan beku di bawah permukaan, keberadaan akuifer, batuan induk berporositas-berpermeabilitas sebagai reservoir, serta batuan penudung yang tidak permeabel.

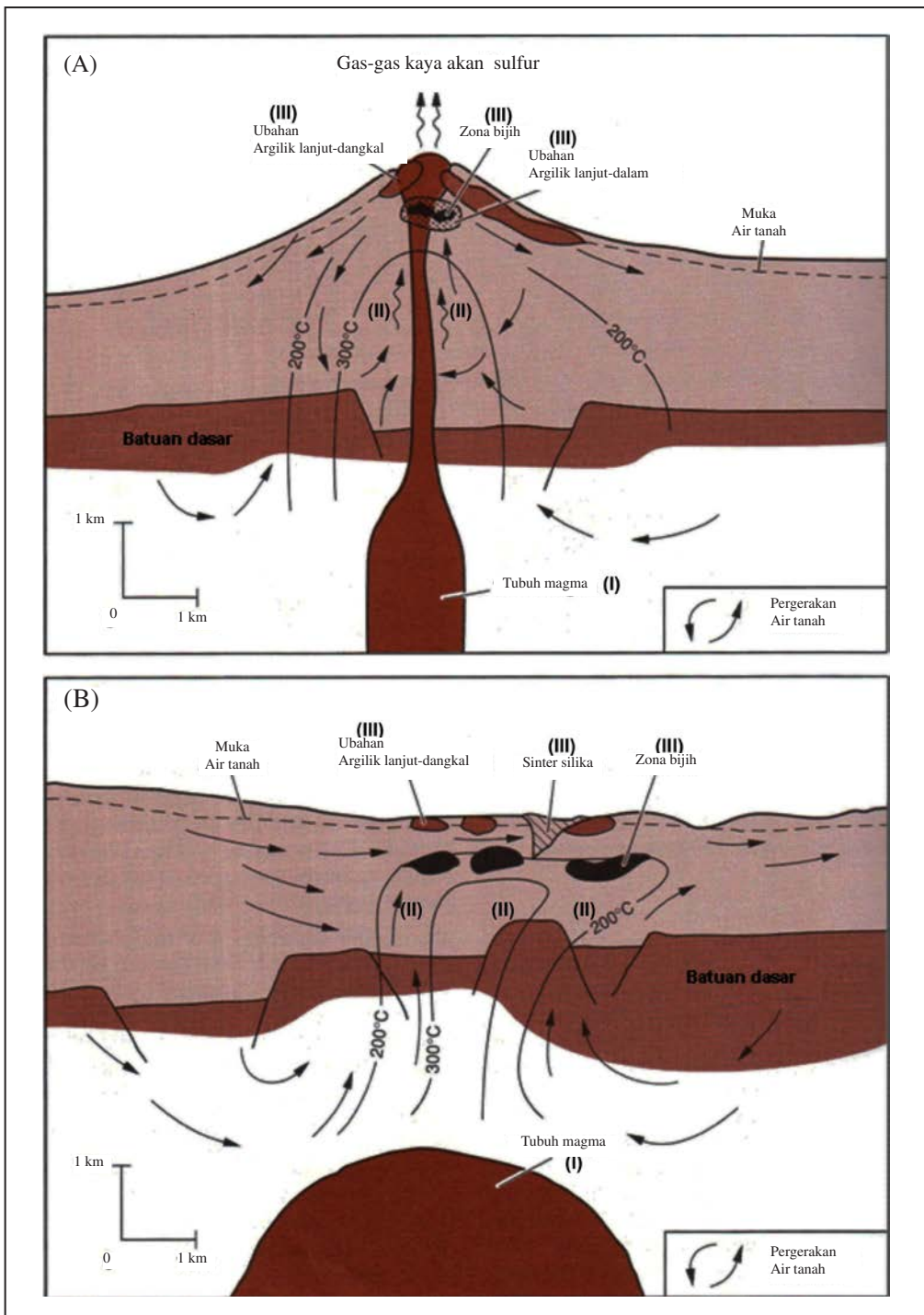
Penampakan yang paling nyata dari keberadaan reservoir panas bumi diperlihatkan ketika fluida hidrotermal keluar sebagai rembesan di permukaan melalui sesar-sesar dan rekahan atau satuan-satuan batuan berpermeabilitas. Bergantung pada suhu reservoir dan tingkat pasokan fluidanya, maka manifestasi permukaan yang terbentuk akan bervariasi, antara lain berupa: rembesan air panas, mata air panas, geiser, fumarol, kawah-kawah letusan freatik, dan zona ubahan hidrotermal. Semuanya merupakan bukti adanya kegiatan hidrotermal aktif di bawah permukaan sebagai bagian dari kegiatan vulkanisme. Lebih jauh lagi di sekitar kawah letusan freatik dapat terbentuk manifestasi lainnya, seperti endapan-endapan sinter silika, travertin, dan/atau breksi berlapis.

Ubahan Hidrotermal dan Sebaran Unsur Tanah Jarang di Lingkungan Panas Bumi

Jenis-jenis fluida yang termasuk dalam kategori ini adalah yang terlibat dalam reaksi ubahan pada suhu di atas suhu permukaan, yaitu fluida-fluida magmatik dan pasca magmatik yang terlibat dalam metasomatisme batuan benua (Mineyev, 1963) atau pembentukan cebakan bijih (Graf, 1977) khususnya di lingkungan busur vulkanik/magmatik. Telah dikenal dua model sistem hidrotermal pada wilayah-wilayah panas bumi di lingkungan busur vulkanik/magmatik, yaitu sistem yang melibatkan kerja fluida hidrotermal bersifat asam dan alkali-klorida (Gambar 1).

Ubahan hidrotermal yang dibentuk oleh fluida asam sulfat ditemukan di beberapa bagian atas gunung api atau sekitar rekahan-rekahan cincin kaldera, pada tempat terjadinya pencampuran air tanah dengan gas-gas magmatik yang naik ke permukaan. Sementara ubahan yang dihasilkan oleh fluida lainnya terbentuk pada suatu rezim aliran jauh di atas atau sekitar sumber panas (magma) di kedalaman bawah permukaan. Mineral-mineral ubahan yang terbentuk akan bervariasi karena dikendalikan oleh suhu, tekanan, jenis batuan asal, permeabilitas batuan, lamanya aktifitas hidrotermal, dan yang terpenting komposisi fluida hidrotermal. Batuan terubah hidrotermal dapat terbentuk sebagai zona-zona sempit hingga luas karena bergantung pada tingkat permeabilitas batuan induk yang dilewati fluida hidrotermal. Karena melibatkan suhu, tekanan, jenis batuan asal, permeabilitas batuan, lamanya aktifitas hidrotermal, dan yang terpenting komposisi fluida hidrotermal, maka reaksi fisika-kimiawi yang terjadi dimungkinkan menghasilkan aneka mineral ubahan, di antaranya sebagai berikut:

- Pada batuan termineralisasi oleh proses hidrotermal, mineral-mineral ubahan tertentu



Gambar 1. Dua model sistem hidrotermal pada lingkungan panas bumi: (A) Berkarakteristik ubahan asam sulfat, memperlihatkan sumber panas (*heat source*) magma mengandung gas yang kaya akan sulfur; gas-gas ini terkondensasi dan teroksidasi untuk membentuk fluida-fluida asam yang menyebabkan pelindian (*leaching*) dan ubahan argilik pada batuan di sekitar gunung api dan permukaan; (B) Dengan fluida-fluida alkali klorida sebagai penyebab terbentuknya ubahan adularia-serisit pada lingkungan vulkanik (Henley dan Ellis, 1983; Heald dr., 1987); (I) Sumber REE, (II) kemungkinan REE yang dibawa fluida hidrotermal dan dalam batuan terubah, (III) kemungkinan REE di dalam ubahan argilik, sinter silika dan cebakan bijih.

terdeteksi mengandung konsentrasi unsur-unsur tanah jarang (REE). Sebagai contoh, produk mineral ubahan hidrotermal kalsit dan dolomit dapat mengandung pola anomali unsur-unsur tersebut; barit dapat mengandung kisaran lebar rasio Eu (europium)/Sm (samarium) (Moller drr., 1979); sementara urat-urat kuarsa-karbonat dan kuarsa-turmalin dapat mengandung anomali Eu dengan pola *flat* sebaran REE (Kerrick dan Fryer, 1979). Barit memiliki kisaran rasio besar dari Eu/Sm bahkan anomali positif Eu sebagai hasil substitusi terhadap Ba (Morgan dan Wandless, 1980); sedangkan sedimen kimiawi yang berasosiasi dengan aktifitas gunung api mengandung anomali positif Eu dan rasio relatif besar Eu/Sm.

- Sistem hidrotermal yang melibatkan magma granitik dapat menghasilkan mineral ubahan dari kelompok halida (contoh: fluorit) yang mengandung REE, Y dan Ce; dari kelompok karbonat dengan fluorida berupa bastnasit $[(Ce,La)(CO_3)F]$; dari kelompok oksida pada bagian kontak metasomatik berupa pyroklor $[A_2B_2O_6(O,OH,F)]$ dalam hal ini A mengandung atom-atom Na, Ce, REE, K, U dan lain-lain; B mengandung Nb, Ta dan Ti (Henderson, 1982).
- Batuan terubah (contoh: barit-dolomit) yang berasosiasi dengan bastnasit dan parisit $[(Ce,La)_2Ca(CO_3)_3F_2]$ dapat mengandung salah satu mineral kelompok karbonat berupa sahamalit $[(Mg,Fe)(Ce,La)_2(CO_3)_4]$ (Jaffe drr., 1953; Fleischer, 1978a).
- Mineral kelompok oksida berupa cerianit $[(Ce^{4+},Th)O_2]$ yang dihasilkan dari ubahan bastnasit (Van Wambeke, 1977).
- Allanit $[(Ce,Ca,Y)_2(Al,Fe^{2+},Fe^{3+})_3(SiO_4)_3OH]$ yaitu mineral kelompok silikat, merupakan salah satu mineral kaya kandungan Ce yang dapat terbentuk di dalam kelompok epidot (Adams, 1969); kelompok apatit $[A_5(XO_4)_3(F,OH,Cl)_3]$ adalah mineral silikat dengan dominan mengandung kelompok Ce dan tinggi kandungan REE menengah dan berat; yang dapat terbentuk di dalam batuan beku basa, ultrabasa hingga alkalin (Fleischer dan Altschuler, 1969). A = Ca, Be, Ce, Pb dan lain-lain; X = P, As, V dan lain-lain.

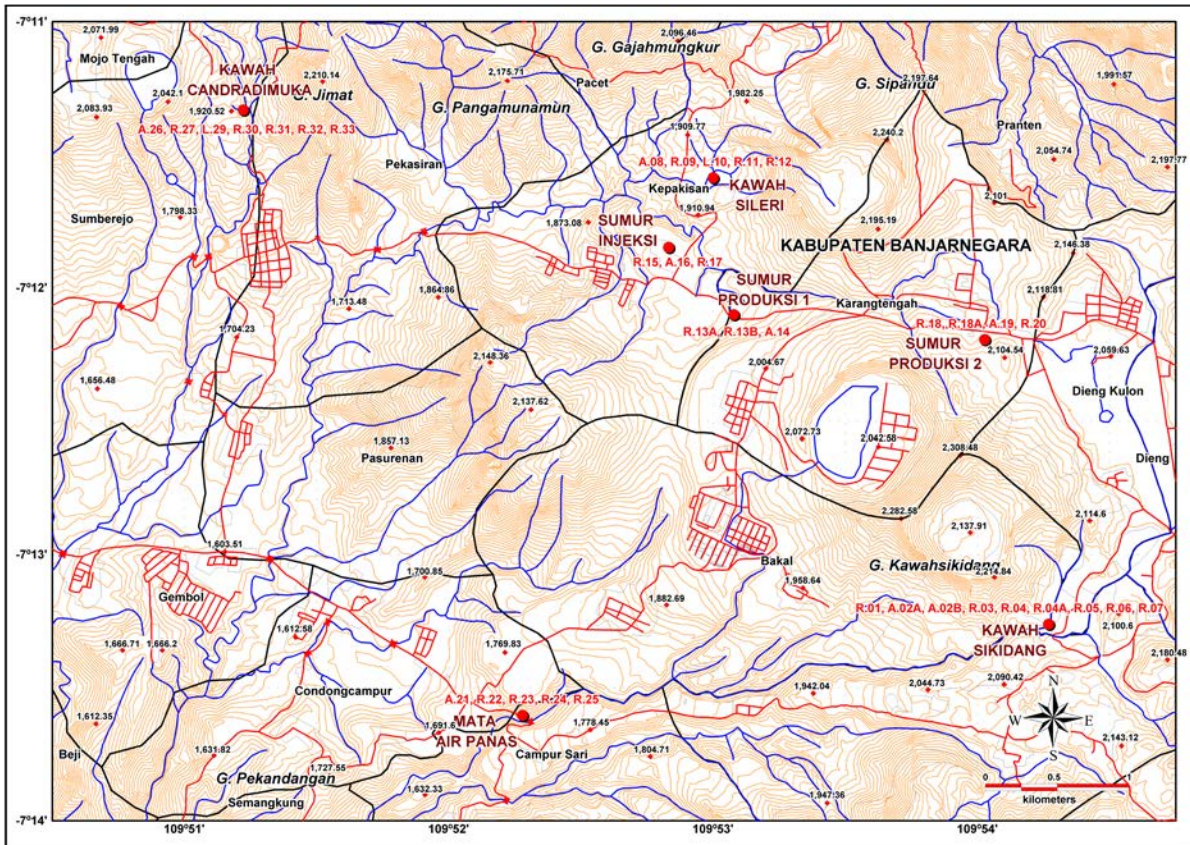
Lingkungan Panas Bumi Dieng dan Indikasi Sebaran Unsur Tanah Jarang

Profil suhu dan tekanan pada sumur-sumur pemboran lapangan panas bumi Dieng menunjukkan bahwa sistem panas bumi lapangan ini termasuk ke dalam kategori lingkungan dominan cairan (*a liquid-dominated field*). Data yang diperoleh dari pemboran dalam menunjukkan suhu yang bervariasi (suhu maksimum 369°C), konsisten dengan suhu di atas zona pendidihan (Bergen drr., 2000).

Kegiatan vulkanisme Kompleks Dieng terbagi atas tiga episode, yaitu: (1) yang menghasilkan kaldera dan batuan vulkanik tak terpisahkan Rogojembangan, (2) yang menghasilkan kerucut-kerucut gunung api dan endapan-endapan piroklastika jatuhan atau tefra Dieng, dan (3) yang ditandai oleh erupsi lava-lava andesit biotit dan piroklastika jatuhan di sekitar kaldera Dieng; tetapi secara umum Kompleks Dieng disusun oleh dominan basal, andesit basaltik, dan andesit piroksen (<http://www.vsi.esdm.go.id/volcanoes/dieng/geology.html>, 2008).

Sehubungan ditemukannya batuan dasitik di lokasi-lokasi sumur bor diduga bahwa sumber panas di lapangan ini berupa magma silikaan (*silicic magma*). Manifestasi permukaan terdiri atas fumarol, mata air panas berkandungan asam sulfat dan sulfat-bikarbonat ber-pH mendekati netral, kolam lumpur (*mud pools*) dan daerah-daerah beruap panas (*steaming ground*) yang luas. Teridentifikasi juga beberapa mata air panas dengan komposisi yang miskin kandungan klorida tetapi kaya Na, Ca, Mg, sulfat, dan bikarbonat; yang kemungkinan berasal dari kondensasi uap dan hasil interaksi dengan batuan samping (Bergen drr., 2000).

Penyelidikan terkini terhadap bahan galian/mineral ikutan di lingkungan panas bumi Dieng oleh Tim Penelitian Konservasi Pusat Sumber Daya Geologi (2008) memperoleh indikasi bahwa percontohan air panas dari beberapa danau kawah dan mata air panas (Gambar 2) mengandung unsur-unsur tanah jarang dengan terdeteksinya jejak-jejak (*traces*) unsur La, Ce, dan Y dengan unsur Nd mencapai maksimum 2,0 ppm. Sementara dari limbah produksi uap panas bumi yang berupa *slurry gel* terdeteksi jejak-jejak unsur La, Ce, Nd, Yb; dengan Lu berkisar $\leq 1,0$ hingga 7 ppm, Sm (samarium) pada kisaran 0,5 hingga 10 ppm dan Y berupa jejak hingga maksimum 26 ppm (Tabel 2).



Gambar 2. Peta lokasi pemercontohan air panas danau kawah mata air panas dan sumber produksi panas bumi wilayah Dieng.

Tabel 2. Kandungan Unsur-Unsur Tanah Jarang (REE) di dalam Air Danau Kawah, Mata Air Panas dan Limbah (*slurry gel*) Sumur Produksi di Lingkungan Panas Bumi Dieng, Jawa Tengah

Unsur-unsur tanah jarang (REE, dalam ppm) dalam air danau kawah dan mata air panas di lingkungan panas bumi Dieng, Jawa Tengah								
No.	Kode Percontoh	La	Ce	Nd	Yb	Lu	Y	Sm
1	A.02A	Jejak	Jejak	Jejak	--	--	Jejak	--
2	A.02B	Jejak	Jejak	Jejak	--	--	Jejak	--
3	A.08	Jejak	Jejak	Jejak	--	--	Jejak	--
4	A.14	Jejak	Jejak	Jejak	--	--	Jejak	--
5	A.16	Jejak	Jejak	Jejak	--	--	Jejak	--
6	A.19	Jejak	Jejak	Jejak	--	--	Jejak	--
7	A.21	Jejak	Jejak	Jejak	--	--	Jejak	--
8	A.26	Jejak	Jejak	2,0	--	--	Jejak	--

Unsur-unsur tanah jarang (REE, dalam ppm) dalam limbah (<i>slurry gel</i> , dalam ppm) Sumur produksi panas bumi lingkungan panas bumi Dieng, Jawa Tengah								
No.	Kode Percontoh	La	Ce	Nd	Yb	Lu	Y	Sm
1	R.13A	Jejak	Jejak	Jejak	Jejak	Jejak	Jejak	0,5
2	R.13B	Jejak	Jejak	Jejak	Jejak	2,0	Jejak	4,0
3	R.15	Jejak	Jejak	Jejak	Jejak	2,0	Jejak	7,0
4	R.17	Jejak	Jejak	Jejak	Jejak	3,0	Jejak	6,0
5	R.18	Jejak	Jejak	Jejak	Jejak	1,0	Jejak	5,0
6	R.18A	Jejak	Jejak	Jejak	Jejak	7,0	26,0	4,0
7	R.20	Jejak	Jejak	Jejak	Jejak	3,0	Jejak	10,0

DISKUSI

Mengingat kepada betapa pentingnya peran fluida hidrotermal sebagai media transportasi unsur-unsur tanah jarang, maka pada wilayah-wilayah panas bumi dengan sistem hidrotermal aktif berkesinambungan diberikan peluang yang besar bagi fluida hidrotermal untuk berperan ganda. Bukan saja hanya sebagai media transportasi tetapi juga berperan sebagai pembawa unsur-unsur tanah jarang yang berasal dari magma asalnya. Bahkan tidak menutup kemungkinan bahwa akibat reaksinya dengan batuan sampling dapat menghasilkan pengayaan unsur-unsur yang telah ada sebelumnya di dalam batuan.

Komposisi fluida hidrotermal merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi kegiatan transportasi unsur-unsur tanah jarang (REE). Transportasi jarak jauh REE di dalam fluida-fluida hidrotermal kemungkinan melibatkan formasi kompleks karbonat, fluorida, atau sulfat. Menjadi menarik untuk diperhatikan bahwa zona-zona manifestasi di setiap wilayah panas bumi akan memiliki perbedaan jenis ubahan hidrotermal karena bergantung pada komposisi fluida hidrotermal yang bekerja dan kondisi geologi yang berbeda pula. Studi terhadap percobaan tentang stabilitas unsur-unsur tersebut di dalam larutan asam yang kaya kandungan Cl^- atau F^- telah mengidentifikasi kompleks $\text{RE}(\text{Cl},\text{F})_2$ yang paling stabil untuk sebagian besar REE dan $\text{RE}(\text{Cl},\text{F})_3$ untuk La. Karena itu, keberadaan khususnya fluorida secara signifikan meningkatkan mobilitas unsur-unsur tanah jarang (Sillen dan Martell, 1964).

Berat jenis fluida hidrotermal berperan penting karena mempengaruhi viskositas, sehingga memiliki dinamika aliran untuk mengendalikan pelarutan komponen-komponen bijih. Ellis (1969) telah membahas tentang daerah-daerah terubah hidrotermal yang berkembang di suatu lingkungan panas bumi dan menemukan konsentrasi logam-logam Pb, Zn, Cu, Mn, dan Fe di dalam air bersuhu tinggi yang berkaitan langsung dengan salinitas. Sementara pada air panas di daerah vulkanik terdeteksi konsentrasi logam dasar Ag dan Au berkadar rendah. Dengan demikian, tidak menutup kemungkinan terbentuk juga konsentrasi REE yang berasosiasi dengan mineral-mineral ubahan atau bijih pada zona-zona manifestasi panas bumi.

Zona-zona manifestasi mata air panas atau geiser merupakan bagian dari fluida hidrotermal yang keluar di permukaan setelah melalui bukaan-bukaan batuan (sesar, rekahan, atau batuan berpermeabilitas), yang mengalir menempuh jarak jauh dari reservoir hidrotermal dan telah menimbulkan reaksi dengan batu-batuan sampling yang dilaluinya. Bergantung pada komposisi magma sumber dan fluida hidrotermalnya maka air panas, batuan terubah, dan mineral-mineral ubahan/bijih pada zona-zona manifestasi ini diduga mengandung konsentrasi REE dalam jumlah tertentu atau bahkan telah mengalami pengayaan kandungan unsur-unsur dimaksud.

Berkaitan dengan air panas di lingkungan panas bumi Dieng yang dominan berkomposisi asam sulfat hingga sulfat-bikarbonat, maka dapat dianggap bahwa air panas tersebut merupakan bagian dari fluida hidrotermal yang berperan sebagai pembawa atau media transportasi unsur-unsur tanah jarang. Terdeteksinya kandungan unsur-unsur La, Ce, Nd, Yb, Y, dan Sm di dalam air panas danau kawah merupakan salah satu bukti penampakan sebarannya pada salah satu manifestasi panas bumi, dan tidak menutup kemungkinan telah tersebar di bagian-bagian manifestasi permukaan lain tempat terjadi reaksi antara fluida hidrotermal (air panas) dengan batuan yang dilewatinya.

KESIMPULAN

Wilayah-wilayah panas bumi terutama terjadi di lingkungan busur vulkanik/magmatik pada lingkungan batas lempeng konvergen (*convergent plate boundaries*), dan bilik-bilik magma (*magma chambers*) di bawahnya berperan sebagai sumber panas. Sistem hidrotermal aktif berkesinambungan memberikan peluang yang besar bagi fluida hidrotermal untuk berperan ganda, bukan saja hanya sebagai pembawa unsur-unsur tanah jarang (REE) yang berasal dari magma asalnya, bahkan akibat reaksinya dengan batuan sampling dapat menghasilkan zona-zona ubahan hidrotermal sebagai manifestasi permukaan yang diperkaya oleh kandungan unsur-unsur tersebut.

Ucapan Terima Kasih—Penghargaan yang tinggi disampaikan kepada Saudara Rohmana atas partisipasinya dalam penyempurnaan ilustrasi pada karya tulis ini.

ACUAN

- Adams, J.W., 1969. Distribution of lanthanides in minerals, *U.S. Geological Survey, Professional Paper*, 650-C, h.38-44.
- Bergen, M.J. van, Bernard., A., Sumarti, S., Sriwana, T., dan Sitorus, K., 2000. Crater lakes of Java: Dieng, Kelud and Ijen. *Excursion Guidebook, IAVCEI General Assembly*, Bali, 9 h.
- Ellis, A.J., 1969. Present day hydrothermal systems and mineral deposition: Commonwealth Mining and Metallurgy Congress, 9th. dalam: Simmon, *et al.*, 1994: Origin of Calcite in boiling geothermal system. *American Journal of Science*, 294, h.361-400.
- Fleischer, M., 1978a. Relative proportions of the lanthanides in the minerals of the bastnasite group. *Canadian Mineralogy*, 63, h.869-873.
- Fleischer, M. dan Altschuler, Z.S., 1969. The relationship of the rare earth composition of minerals to geological environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33, h.725-732.
- Graf, J.L., Jr., 1977. Rare earth elements as hydrothermal tracers during the formation of massive sulphide deposits in volcanic rocks. *Economic Geology*, 72, h.527-548.
- Heald., P., Foley, N.K., dan Hayba, D.O., 1987. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfat and adularia-sericite deposits. *Economic Geology*, 82, h.1-26.
- Henderson, P., 1982. *Rare Earth Element Geochemistry, Developments in Geochemistry 2*, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 510h.
- Henley, R.W. and Ellis, A.J., 1983. Geothermal system ancient and modern: a geothermal review. *Earth Science Revision*, 19, h.1-50.
- <http://www.vsi.esdm.go.id/volcanoes/dieng/geology.html>, 2008. Geology of Dieng Volcanic Complex.
- Jaffe, H.W., Meyrowitz, R., dan Evans, H.T., Jr., 1953. Sahamalite, a new rare earth carbonate mineral. *American Mineral*, 38, h.741-754.
- Kerrick, R. dan Fryer, B.J., 1979. Archaean precious-metal hydrothermal systems, Dome Mine, Abitibi Greenstone Belt, II, REE and oxygen isotope relations. *Canadian Journal Earth Science*, 16, h.440-458.
- Knapp, R.B. dan Knight, J.E., 1977. Differential thermal expansion of pore fluids: fracture propagation and microearthquake production in hot pluton environments, *Journal of Geological Research*, 82, h.2515-2522.
- Mineyev, D.A., 1963. Geochemical differentiation of the rare earths. *Geochemistry (U.S.S.R)*, 12, h.1129-1149.
- Moller, P., Morteani, G., Hoefs, J., dan Parekh, P.P., 1979. The origin of the ore-bearing solution in : Pb-Zn veins of the western Harz, Germany, as deduced from rare-earth element and isotope distributions in calcites. *Chemical Geology*, 26, h.197-215.
- Morgan, J.W. and Wandless, G.A., 1980. Rare earth element distribution in some hydrothermal minerals: evidence for crystallographic control. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, h.973-980.
- Muffler, L.J.P., White, D.E., dan Truesdell, A.H., 1971. Hydrothermal explosion craters in Yellowstone National Park. *Geological Society of American Bulletin*, 82, h. 723-740.
- Nairn, I.A. dan Solia, W., 1980. Late Quaternary hydrothermal explosion breccias at Kawerau geothermal field, New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 43, h.1-13.
- Norton, D.R., 1984. Theory of hydrothermal system. *Annual Revision of Earth Planet Science*, 12, h.155-177.
- Wedepohl, K. H. (ed.), 1970. Handbook of Geochemistry, II/5, Springer-Verlog, Berlin, h.39, 57-71-D-1.
- Sillen, L.G., dan Martell, A.E., 1964. Stability constants of metal-ion complexes. *Chemical Society of London, Special Publication*, 17, 754 h.
- Tim Penelitian Konservasi Dieng, 2008. *Laporan Pendahuluan Penelitian Mineral Ikutan Pada Lapangan Panasbumi Di Daerah Dieng, Kabupaten Banjarnegara, Jawa Tengah*; Kelompok Program Penelitian Konservasi, Pusat Sumber Daya Geologi.
- Van Wambeke, L., 1977. The Karonge rare earth deposits, Republic of Burundi new mineralogical-geochemical data and origin of the mineralization. *Mineral Deposita*, 12, h.373-380.

Naskah diterima : 3 Juli 2008

Revisi terakhir : 10 Desember 2008