

## **Gunung Api purba Watuadeg: Sumber erupsi dan posisi stratigrafi**

S. BRONTO<sup>1</sup>, S. MULYANINGSIH<sup>2</sup>, G. HARTONO<sup>3</sup>, dan B. ASTUTI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pusat Survei Geologi, Jl. Diponegoro 57 Bandung

<sup>2</sup>Teknik Geologi ISTA, Jl. Kalisahak No. 28 Kompleks Balapan, Yogyakarta

<sup>3</sup>Teknik Geologi STTNAS, Jl. Babaksari, Sleman, Yogyakarta

### **SARI**

Aliran lava basal piroksen (50 % berat SiO<sub>2</sub>) berstruktur bantal tersingkap di Kali Opak sebelah barat Dusun Watuadeg, Sleman - Yogyakarta. Lava tersebut mempunyai panjang aliran 2 – 5 m, diameter 0,5 – 1,0 m dan membentuk kulit kaca di permukaannya. Arah aliran berubah secara bertahap dari U70°T di bagian utara menjadi U120°T di tengah dan U150°T di bagian selatan. Lebih kurang 150 m di sebelah barat sungai terdapat sebuah bukit kecil setinggi 15 m, yang mempunyai komposisi sama dengan aliran lava bantal. Keduanya berupa basal piroksen berwarna abu-abu gelap, bertekstur vitrofir – porfir, mengandung fenokris halus terdiri atas piroksen (10 %) dan plagioklas (25 %) yang tertanam di dalam massa dasar gelas. Berdasarkan data tersebut diperkirakan bahwa bukit kecil itu merupakan sumber erupsi aliran lava bantal Watuadeg. Lava bantal itu ditindih oleh batuan klastika gunung api yang terdiri atas tuf, batu lapili, dan breksi pumis yang merupakan bagian Formasi Semilir. Di dekat kontak, batuan klastika gunung api tersebut mengandung fragmen basal piroksen yang berkomposisi sama dengan aliran lava bantal. Hal ini, bersama dengan analisis data petrologi, vulkanologi, dan umur radiometri menunjukkan bahwa aliran lava bantal Watuadeg secara tidak selaras ditindih oleh Formasi Semilir.

**Kata kunci:** lava bantal, sumber erupsi, stratigrafi, Watuadeg

### **ABSTRACT**

*Pillow lava flows of pyroxene basalt containing 50 wt.% SiO<sub>2</sub> are exposed at Opak River, west of Watuadeg Village, Sleman - Yogyakarta. The length of flow structures is between 2 – 10 m, with diameter of 0.5 – 1.0 m and it has a glassy skin at the surface body. Flow directions vary from N70°E in the northern side, through N 120°E in the middle to N 150°E in the southern side. About 150 m away from the river to the west, there is a small hill about 15 m high, that has a similar composition with the pillow lavas. Both lava flows and the small hill are composed of pyroxene basalt, dark grey in color, hypocrySTALLINE vitrophyre to porphyritic texture, with fine-grained phenocrysts of pyroxene (10 %) and plagioclase (25 %) set in glassy groundmass. These data indicate that the small hill was the eruption source of the basaltic pillow lavas. The lavas are overlain by pumice-rich volcanoclastic rocks, composed of tuff, lapillistones and pumice breccias, that are known as the Semilir Formation. Near the contact with lavas, the volcanoclastic rocks contain some fragments of pyroxene basalt, similar composition with the pillow lavas. This fact, together with analyses of petrology, volcanology, and radiometric dating show that the basaltic pillow lavas are unconformably overlain by the Semilir Formation.*

**Keywords:** pillow lava, eruption source, stratigraphy, Watuadeg

## PENDAHULUAN

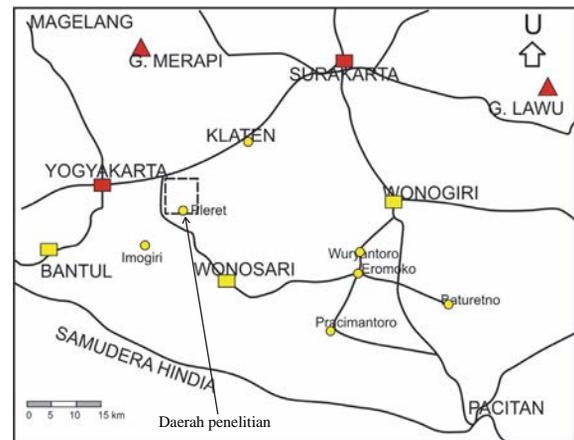
Batuan gunung api Tersier banyak dijumpai di Pegunungan Selatan, baik berupa batuan beku luar (ekstrusi/lava) dan intrusi maupun batuan klastika gunung api fraksi kasar hingga halus. Secara litostratigrafis, batuan gunung api tersebut dibagi menjadi beberapa satuan batuan, mulai dari Formasi Kebo-Butak, Formasi Semilir, Formasi Nglanggeran, dan Formasi Sambipitu (Suroño dr., 1992). Lava basal berstruktur bantal banyak dijumpai di dalam Formasi Kebo-Butak, antara lain terdapat di Bayat, Tegaljrejo, dan Gunung Sepikul (Bronto dr., 2004a). Lava bantal di Watuadeg belum jelas termasuk ke dalam formasi batuan yang mana karena tidak berasosiasi dengan batuan sedimen Formasi Kebo-Butak dan langsung ditindih oleh Formasi Semilir.

Berdasarkan pandangan geologi sedimenter, keberadaan batuan beku luar di dalam suatu formasi batuan sedimen (gunung api) umumnya hanya dipandang sebagai sisipan (Suryono and Setyowiyoto, 2001), yang tidak diperhatikan sumber erupsinya (Bronto dr., 2004b). Lebih lanjut, formasi batuan sedimen itu dinyatakan diendapkan di cekungan busur depan (Suyoto, 2007) yang tidak ada gunung apinya. Pandangan itu menimbulkan gagasan bahwa sisipan lava berasal dari vulkanisme dasar Samudra India dan keberadaannya di Pegunungan Selatan sebagai ofiolit, yang bergeser ke Pulau Jawa bersama-sama dengan pergerakan kerak dasar Samudra Hindia. Kalau pemikiran ini benar, lava tersebut seharusnya sudah mengalami deformasi tektonik sangat kuat dan komposisi geokimianya juga tidak sama dengan batuan gunung api yang berhubungan dengan penunjaman kerak bumi.

Memperhatikan latar belakang permasalahan tersebut, maka penelitian ini ditujukan untuk mengetahui mula jadi lava/batuan beku basal piroksen berstruktur bantal dan posisi stratigrafinya, yang tersingkap di Kali Opak, sebelah barat Dusun Watuadeg. Sementara maksud penelitian adalah untuk mendukung verifikasi geologi Pegunungan Selatan dan upaya pemanfaatan sumber daya yang ada serta potensi bencana yang dapat terjadi di waktu mendatang, serta mengimplementasikan stratigrafi arti luas seperti tertera di dalam Sandi Stratigrafi Indonesia (Martodjojo dan Djuhaeni, 1996). Penelitian ini didasarkan pada pengamatan geologi lapangan yang meliputi pemerian batuan,

pengukuran struktur aliran lava dan membuat penampang stratigrafi dengan batuan penutupnya, serta melakukan analisis data sekunder petrologi-geokimia dan umur radiometri.

Lokasi penelitian yang terletak lebih kurang 10 km sebelah timur kota Yogyakarta berada di Dusun Sumber Kidul, Desa Kalitirto, dan Kali Opak di sebelah barat Dusun Watuadeg, Desa Jogotirto, Kecamatan Berbah, Kabupaten Sleman, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (Gambar 1).

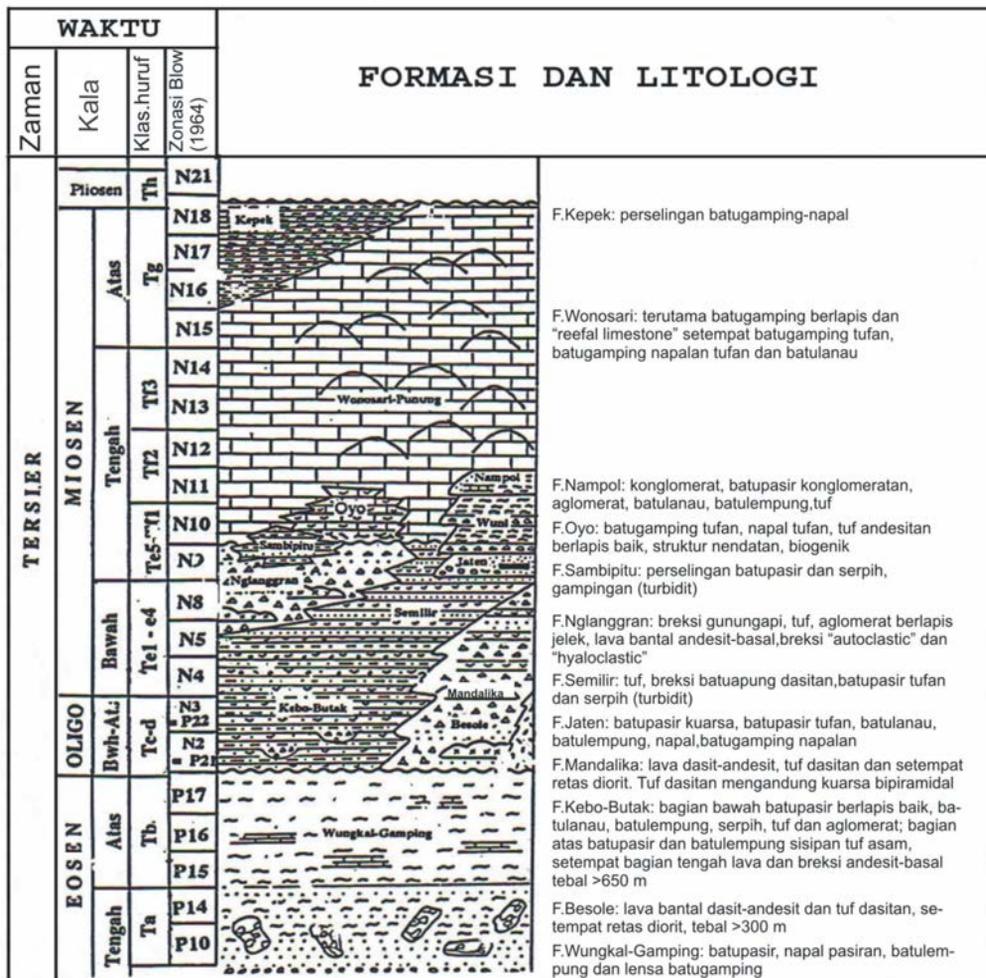


Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian.

## TATAAN GEOLOGI

Secara fisiografis, daerah ini merupakan perbukitan kecil-kecil dengan ketinggian kurang dari 100 m, yang di sekitarnya berupa dataran pesawahan subur. Perbukitan kecil tersebut tersusun oleh batuan gunung api Tersier, yang menjadi penyusun sebagian Pegunungan Selatan. Dataran pesawahan di sekitarnya terdiri atas endapan aluvium sebagai bahan rombakan produk Gunung Api Merapi, yang terletak 30 km di sebelah utara daerah penelitian. Secara umum, aliran sungai di wilayah ini berpola paralel, yang berhulu di Gunung Api Merapi. Sungai utama di daerah penelitian adalah Kali Opak. Sungai itu mempunyai cabang Kali Gendol yang hulunya di bawah Kawah Gendol di puncak Merapi.

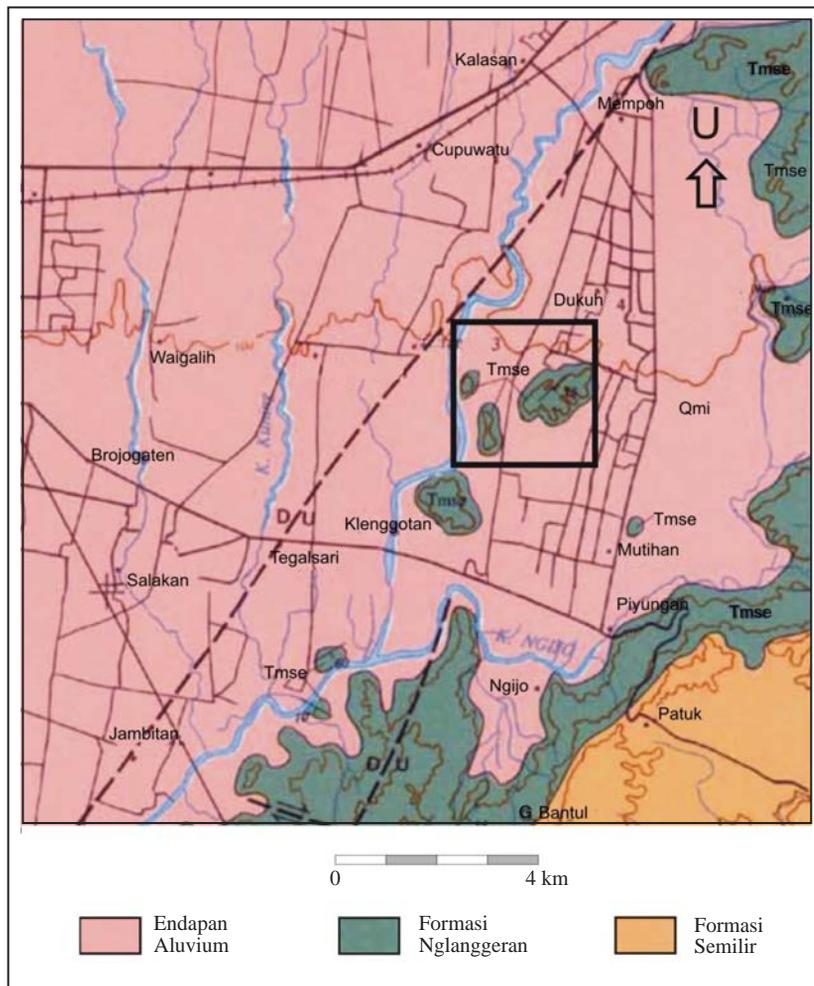
Stratigrafi Pegunungan Selatan, termasuk daerah penelitian, telah dipelajari oleh Rahardjo dr. (1977) serta Suroño dr. (1992) dan hasilnya disajikan pada Gambar 2. Sebagai batuan tertua di Pegunungan Selatan adalah batuan malihan berumur Pratersier,



Gambar 2. Kolom stratigrafi regional daerah Pegunungan Selatan (Rahardjo drr., 1977; Surono drr., 1992). Litologi di daerah penelitian termasuk ke dalam Formasi Semilir.

yang tersingkap di Perbukitan Jiwo, Kecamatan Bayat, Kabupaten Klaten, Provinsi Jawa Tengah. Di Pegunungan Selatan bagian barat, di atas batuan malihan tersebut secara berturut-turut diendapkan Formasi Gamping-Wungkal, Kebo-Butak, Semilir, Nglanggeran, Sambipitu, Oyo, Wonosari, Kepek, dan endapan aluvium. Formasi Gamping-Wungkal tersusun oleh batugamping dan batupasir kuarsa, yang juga tersingkap di Perbukitan Jiwo, Bayat. Litologi penyusun utama Formasi Kebo-Butak sampai dengan Formasi Nglanggeran adalah batuan gunung api, baik berupa bahan piroklastika, epiklastika maupun lava koheren. Secara regional, batuan gunung api Tersier di daerah penelitian dimasukkan ke dalam Formasi Semilir (Gambar 3),

yang terdiri atas breksi dan batulapili kaya akan pumis, serta tuf (Bronto drr., 2005; Bronto dan Mulyaningsih, 2001; Mulyaningsih, 1999, 2005). Formasi Sambipitu bagian bawah masih tersusun oleh batuan klastika gunung api, tetapi semakin ke atas mengandung bahan karbonat, sedangkan Formasi Oyo dan Wonosari hampir seluruhnya tersusun oleh batugamping. Satuan batuan Tersier paling atas adalah Formasi Kepek, yang tersusun oleh napal dan batugamping berlapis. Seluruh batuan Pratersier dan Tersier tersebut ditindih secara tidak selaras oleh endapan aluvium, yang utamanya berasal dari Gunung Api Merapi. Sesar utama di daerah ini adalah Sesar Opak, yang berarah barat daya - timur laut (Gambar 3).



Gambar 3. Lokasi (dalam kotak) dan peta geologi daerah penelitian. Garis putus-putus berarah barat daya - timur laut melalui daerah penelitian adalah Sesar Opak. D: turun; U: naik. (Sumber: Rahardjo dr., 1977).

### LANDASAN PEMIKIRAN

Setiap magma yang muncul ke permukaan bumi, apakah di dasar laut atau di daratan, adalah gunung api (Bronto, 2008). Magma yang muncul di permukaan itu dapat berupa lava koheren atau bahan piroklastika (McPhie dr., 1993). Lava koheren adalah magma yang keluar ke permukaan secara erupsi lelehan (*effusive eruption*); berbentuk sumbat lava, kubah lava atau aliran lava. Jika sudah membeku, lelehan lava membentuk batuan beku luar atau batuan beku ekstrusi. Ke arah dalam atau diatrema, kubah lava dan sumbat lava mempunyai leher gunung api. Diatrema gunung api mempunyai padanan

kata, antara lain *conduit*, *vent*, pipa kepundan, dan korok. Kubah lava, sumbat lava, leher gunung api, dan diatrema ini ke bawah berhubungan dengan kantong magma atau dapur magma. Berdasarkan bukti singkapan batuan beku di lapangan, penghubung antara kantong magma dengan leher gunung api tidak selalu berbentuk pipa/*conduit*, tetapi dapat berupa retas ataupun gang. Magma di dalam kantong bawah gunung api jika sudah membeku dapat berbentuk retas lempeng (*sill*). Pembekuan magma dalam bentuk *sill*, retas, diatrema, dan leher gunung api membentuk batuan beku intrusi (terobosan) dangkal/dekat permukaan (*shallow/low level intrusions*), atau batuan semigunung api (*subvolcanic*

*intrusions*). Batuan beku terobosan, sumbat lava, dan kubah lava pada umumnya terdapat di fasies pusat, sedangkan aliran lava pada fasies proksi suatu kerucut gunung api komposit (Bronto, 2006). Dapur magma yang terletak jauh di dalam bumi dan berukuran sangat besar, bila sudah membeku membentuk batuan beku intrusi dalam atau pluton; secara umum dicirikan dengan tekstur holokristalin. Sementara itu, batuan beku intrusi dangkal dan batuan beku luar mempunyai tekstur afanit, porfiri sampai gelas. Bahan piroklastika adalah magma yang keluar ke permukaan secara erupsi letusan (*explosive eruption*) atau dilontarkan dari dalam kawah/kaldera gunung api pada saat berlangsung letusan (Cas dan Wright, 1987). Jika sudah membatu bahan itu membentuk breksi piroklastika, batulapili, dan tuf, yang sebaran fraksi kasarnya di fasies proksi tetapi fraksi halusanya hingga fasies distal. Untuk mengidentifikasi sumber erupsi gunung api Tersier digunakan pendekatan geologi secara terpadu, mulai dari bentuk bentang alam, fasies gunung api, struktur aliran sampai dengan komposisi litologi atau petrologi-geokimia (Bronto, 2003). Hal yang terakhir juga dapat untuk menjelaskan tataan tektoniknya (Kuno, 1968; Peccerillo dan Taylor, 1976; Nicholls dan Whitford, 1983; Nicholls dr., 1980; Middlemost, 1985; Wilson, 1989). Pada umumnya, batuan gunung api yang pembentukannya berhubungan dengan penunjaman kerak samudra di bawah kerak benua, seperti halnya di Pulau Jawa, termasuk seri kalk-alkali atau kalium menengah, sedangkan basal yang di erupsikan di dasar samudra (*Ocean Floor Basalts*) bercirikan seri toleit atau kalium rendah. Batuan gunung api di belakang busur kebanyakan berkomposisi kalium tinggi - sangat tinggi atau shosonit.

#### KOMPILASI DATA SEKUNDER

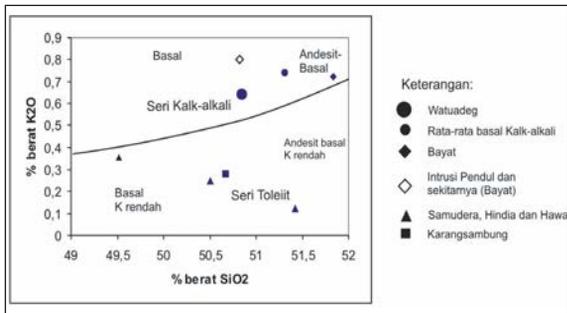
Data petrologi lava bantal Watuadeg dikompilasi dari Bronto dr. (1994 dan 2004a) dan Hartono (2000). Secara megaskopis, batuan beku luar itu berwarna abu-abu gelap dan bertekstur afanit sampai porfiri sangat halus. Bagian permukaan tubuh aliran lava berwarna hitam, bertekstur gelas sampai vitrofir, sehingga mirip dengan obsidian dan dikenal sebagai kulit kaca (*glassy skin*; McPhie dr., 1993). Akibat adanya kulit kaca tersebut struktur lubang bekas keluarnya gas juga sangat halus atau bahkan tidak ada

sama sekali. Fenokris terdiri atas plagioklas dan piroksen, berukuran butir  $\leq 2$  mm, sebaran tidak merata (10 - 20 %), tertanam di dalam massa dasar gelas dan afanit. Plagioklas, dengan kelimpahan sekitar 15 %, tidak berwarna (jernih/transparan), tetapi yang mulai lapuk berwarna putih, berbentuk prisma panjang atau seperti jarum. Piroksen berwarna hitam kehijauan, berbentuk butiran atau prisma pendek, dengan kelimpahan 3 - 5 %.

Secara mikroskopis, lava bantal Watuadeg adalah basal piroksen, bertekstur vitrofir sampai hipokristalin porfiri, dengan fenokris labradorit ( $An_{52-56}$ ) dan piroksen klino, berbentuk *anhedral* - *subhedral*, berukuran butir 0,4 - 2 mm, tertanam di dalam massa dasar gelas dan mikrolit felspar plagioklas, mineral opak, serta piroksen. Kelimpahan plagioklas, baik sebagai fenokris maupun di dalam massa dasar mencapai 25 - 45 %, piroksen 10 - 25 %, dan mineral opak < 5 %.

Data kimia batuan menunjukkan bahwa lava basal Watuadeg adalah basal alumina tinggi (50,85 %  $SiO_2$ , 18,60 %  $Al_2O_3$ ; Kuno, 1960), yang mengandung magnesium rendah (5,84 %  $MgO$ ), dan kalium menengah (0,64 %  $K_2O$ ). Kandungan kalium tersebut dapat disetarakan dengan lava basal dan terobosan gabro mikro di Bayat (Perbukitan Jiwo; 0,72 - 0,80 %  $K_2O$ ), serta rata-rata basal kalk-alkali menurut Nockolds dan Le Bas (1977, di dalam Middlemost, 1985; 0,74 %  $K_2O$ ). Kandungan kalium tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan lava basal ofiolit dari Karangsembung (Bronto dr., 1994; Suparka dan Soeria-Atmadja, 1991; 0,28 %  $K_2O$ ) dan dari dasar Samudra India (0,12-0,25 %  $K_2O$ ; Fleet dr., 1976). Komposisi basal dasar Samudra Hindia ini sedikit lebih rendah daripada rata-rata basal toleit Hawaii (0,4 %  $K_2O$ ; Macdonald, 1968), sedangkan basal alkalin mempunyai kalium paling tinggi (1,30 %  $K_2O$ ; Chayes, 1975). Gambar 4 memperlihatkan bahwa lava basal Watuadeg bersama basal dan gabro mikro di Bayat termasuk basal kalk-alkali, sedangkan lava bantal ofiolit Karangsembung masuk toleit kalium rendah.

Berdasarkan analisis radiometri dengan metode Kalium-Argon, Ngkoimani (2005) melaporkan bahwa umur lava basal Watuadeg adalah  $56 \pm 3,8$  juta tahun. Lebih lanjut, data paleomagnetik hasil studi peneliti tersebut menunjukkan bahwa bulir-bulir lava terindikasikan sangat dekat dengan sumbernya.



Gambar 4. Diagram % berat SiO<sub>2</sub> versus K<sub>2</sub>O (dimodifikasi dari Peccerillo dan Taylor, 1976) lava basal Watuadeg (n: 4 contoh) dibanding dengan lava basal toleit pemekaran dasar samudra dan hot spot (Samudra Hindia dan Hawaii; n: 7 contoh), serta rata-rata basal kalk-alkali daerah penunjaman kerak bumi. Lava basal Watuadeg bersama-sama dengan intrusi gabro mikro Gunung Pendul (n: 3 contoh) dan lava basal Bayat (n: 3 contoh) termasuk magma seri kalk-alkali. Lava basal (ofiolit) Karangsambung (n: 3 contoh) termasuk seri toleit. Sumber: Bronto dr. (1994; 2004), Fleet dr. (1976), Middlemost (1985), dan Suparka dan Soeria-Atmadja (1991).

## HASIL PENELITIAN

Di sebelah timur Dusun Sumberkulon terdapat bukit kecil, yang selanjutnya disebut Bukit Sumberkulon, mempunyai ketinggian sekitar 10 -15 m pada posisi koordinat 7°48'28,8" LS dan 110°27'28,0" BT (Gambar 5). Bentuk Bukit Sumberkulon itu agak memanjang berarah timur - barat, berukuran lebih kurang 75 m x 50 m. Di lereng selatan bukit (tempat makam) terdapat singkapan batuan beku basal berwarna abu-abu gelap, bertekstur afanit sampai porfiri sangat halus, sebagian sudah lapuk dan pecah-pecah (Gambar 6), dengan fenokris plagioklas dan piroksen sangat halus. Di tepi barat Kali Opak, yang terletak 150 m di sebelah timur Bukit Sumberkulon itu (7°48'29,6" LS dan 110°27'34,0" BT), tersingkap aliran lava basal berstruktur bantal (Gambar 7). Berhubung singkapan batuan ini terletak di sebelah barat Dusun Watuadeg dan nama dusun itu sudah banyak dikenal terutama oleh komunitas geologi di Yogyakarta, maka aliran lava berkomposisi basal dan berstruktur bantal ini sering disebut lava bantal Watuadeg. Secara stratigrafis, aliran lava basal itu ditindih oleh perlapisan batupasir tuf dan batulapili pumis, yang tersingkap di sebelah timur aliran Kali Opak dengan kedudukan U<sup>0</sup>T/18° sebagai bagian Formasi Semilir. Dengan demikian, Kali Opak di lokasi ini benar-benar mengalir melalui



Gambar 5. Morfologi Bukit Sumberkulon bersusunan basal; tinggi bukit 15 m dan diameter 60 m. Lokasi ini berjarak 150 m di sebelah barat Kali Opak, tempat terdapat singkapan aliran lava basal berstruktur bantal.



Gambar 6. Singkapan batuan beku basal di lereng selatan Bukit Sumberkulon. Secara litologis, batuan penyusun bukit ini sama dengan aliran lava berstruktur bantal di Kali Opak, yakni basal.

batas kontak antara aliran lava basal berstruktur bantal dengan batuan klastika gunung api kaya akan pumis Formasi Semilir (Gambar 7). Secara petrologis, singkapan batuan beku basal di bukit kecil tersebut di atas mempunyai kesamaan ciri-ciri batuan dengan aliran lava basal berstruktur bantal di tepi barat Kali Opak.

Aliran lava basal berstruktur bantal Watuadeg di Kali Opak ini mempunyai lebar singkapan antara 10 - 15 m dan panjangnya sekitar 50 m. Secara fisis, tubuh lava seperti aliran getah atau berbentuk bantal guling dengan panjang aliran berkisar 3 - 10 m dan diameter 0,5 - 1 m (Gambar 8). Permukaan lava yang belum tererosi berwarna hitam mengkilap, bertekstur



Gambar 7. Aliran lava basal berstruktur bantal (kanan) dan batupasir tuf Formasi Semilir (kiri), yang di tengahnya dialiri Kali Opak. Gambar difoto dari atas jembatan, lensa menghadap ke selatan.

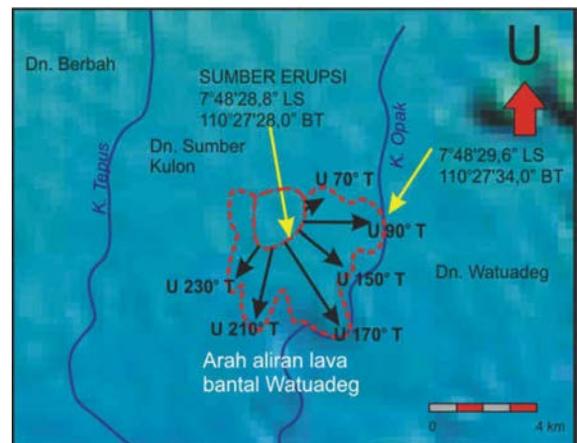


Gambar 8. Aliran lava basal berstruktur bantal di tepi barat Kali Opak. Anak panah menunjukkan arah aliran; palu geologi di ujung aliran sebagai skala.

glas, menyerupai obsidian, dan dikenal sebagai kulit kaca (*glassy skin*). Potongan melintang tegak lurus aliran memperlihatkan bentuk penampang melingkar atau seperti elips, yang di dalamnya terdapat struktur konsentris dan rekahan radier. Kedua struktur itu

diperkirakan terbentuk karena proses pendinginan sangat cepat di bagian permukaan aliran lava dan melambat ke bagian dalam. Proses pendinginan sangat cepat menyebabkan mineral tidak sempat membentuk kristal atau amorf yang proporsi terbanyaknya di permukaan, tetapi menurun ke bagian dalam. Pendinginan sangat cepat, banyaknya gelas gunung api yang mudah pecah, dan pergerakan aliran menyebabkan terjadinya retakan dan rekahan yang intensif di permukaan lava.

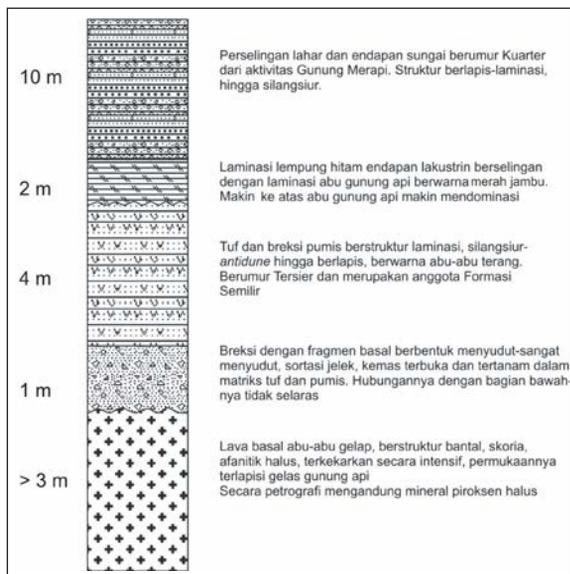
Hasil pengukuran arah aliran lava bantal Watuadeg di tepi barat Kali Opak mulai dari bagian utara adalah  $U70^{\circ}T - U90^{\circ}T$ , di bagian tengah menjadi  $U120^{\circ}T, U150^{\circ}T, U170^{\circ}T$ , sedangkan di selatan  $U210^{\circ}T - U230^{\circ}T$  (Gambar 9). Secara keseluruhan arah aliran itu memperlihatkan pola semi radier ke arah timur - timur laut, timur - tenggara dan selatan - barat daya. Perpanjangan garis arah aliran lava itu ternyata mempunyai titik temu di bukit kecil di sebelah barat Kali Opak yang juga bersusunan basal. Hal tersebut menjadi indikasi yang sangat kuat bahwa aliran lava basal berstruktur bantal di Kali Opak bersumber dari bukit kecil di sebelah baratnya.



Gambar 9. Hasil pengukuran arah-arah aliran lava bantal Watuadeg, mulai dari  $U70^{\circ}T$ , searah jarum jam hingga  $U230^{\circ}T$ . Sebaran aliran lava ini memusat ke Bukit Sumberkulon yang berjarak 150 m di sebelah barat Kali Opak.

Secara geologi regional, batuan gunung api Tersier di daerah Watuadeg ini dimasukkan ke dalam Formasi Semilir. Berdasarkan prinsip litostratigrafi, hanya batupasir tuf dan batulapili pumis yang sesuai menjadi bagian dari Formasi Semilir, sedangkan

keberadaan lava bantal Watuadeg tersebut di atas tidak jelas, apakah dimasukkan ke dalam Formasi Kebo-Butak atau Formasi Semilir. Pada batas kontak antara lava basal dengan batulapili dan tuf Formasi Semilir dilakukan pengukuran stratigrafi rinci (Gambar 10). Dari sini diketahui bahwa di bagian bawah Formasi Semilir terdapat breksi dengan fragmen batuan beku basal (Gambar 11), yang secara litologi sama dengan aliran lava bantal di bawahnya. Breksi



Gambar 10. Stratigrafi terukur pada kontak antara lava basal berstruktur bantal dengan Formasi Semilir di Kali Opak sebelah barat Dusun Watuadeg.



Gambar 11. Breksi dengan fragmen basal menyudut (warna gelap) tertanam di dalam matriks tuf lapili pumis (warna terang), tersingkap di dasar Kali Opak, di sebelah barat Dusun Watuadeg. Posisi stratigrafi breksi ini di atas lava basal berstruktur bantal dan sebagai alas dari Formasi Semilir (Gambar 9).

itu mempunyai tebal sekitar 50 - 60 cm, struktur masif, terpilah buruk, kemas terbuka, tersusun atas fragmen basal dan pumis berukuran 2 - 10 cm, sebagian berbentuk menyudut dan sebagian yang lain agak membundar (terabrasi), tertanam dalam matriks tuf pumis. Secara stratigrafis, breksi itu berada di atas lava basal dan di bagian terbawah perlapisan batupasir tuf dan batulapili pumis Formasi Semilir.

## PEMBAHASAN

Berdasarkan data geokimia, batuan beku basal Watuadeg termasuk seri kalk-alkali, yang mempunyai kandungan kalium lebih tinggi dibandingkan dengan magma seri toleit, seperti halnya di dalam ofiolit Karangsembung dan basal Samudra Hindia. Magma seri kalk-alkali ini sangat umum terbentuk sebagai akibat penunjaman kerak samudra di bawah kerak benua. Lebih lanjut, aliran lava bantal Watuadeg masih tampak utuh, tidak ada tanda-tanda telah mengalami deformasi tektonik sangat kuat, serta tidak berasosiasi dengan sedimen laut dalam, yang disebut *mélange* (batuan bantuh atau campuran aduk). Dengan demikian, secara tektonik lava basal berstruktur bantal di daerah Watuadeg ini diyakini bukan ofiolit, yang berasal dari dasar Samudra Hindia, tetapi merupakan produk penunjaman kerak Samudra Hindia di bawah kerak Benua Eurasia, yang sekarang menjadi Pulau Jawa. Karena bukan berasal dari gunung api tengah Samudra Hindia (*Mid Oceanic Ridge Basalts/MORB*) dan tidak ada struktur sesar besar yang menggeser batuan itu dari tempat semula, maka diperkirakan lava bantal Watuadeg terletak tidak jauh dari sumbernya. Interpretasi ini juga didukung hasil analisis anisotropi (paleomagnetik), yang menunjukkan bahwa bentuk bulir-bulir lava mengalami pemipihan sebagai tanda bahwa sumber erupsi sangat dekat (Ngkoimani, 2005). Lebih lanjut, mengingat diameter aliran lava hanya berkisar 0,5 - 1,0 m, padahal merupakan magma basal ber-temperatur tinggi (1000 - 1200°C), membeku sangat cepat di dasar laut dalam (> 2000 m) yang sangat dingin (temperatur < 1°C), maka wajarlah kalau lava itu tidak mengalir jauh dari sumbernya. Berdasarkan pengamatan di gunung api tengah Samudra Atlantik, pembentukan aliran lava basal berstruktur bantal terjadi pada kedalaman 2600 - 2700 m di bawah permukaan laut (Decker dan Decker, 1981).

Didasarkan pada pengamatan bentang alam, yakni adanya bukit kecil bersusunan basal, pengukuran arah aliran lava basal, dimensi tubuh aliran lava, temperatur magma basal dan lingkungan pembekuan di dasar laut dalam, serta hasil pengukuran paleomagnetik, maka diyakini sumber erupsi lava basal adalah di bukit kecil sebelah barat Kali Opak, pada posisi koordinat  $7^{\circ}48'28,8''$  LS dan  $110^{\circ}27'28,0''$  BT (Gambar 5). Adanya singkapan lava basal di sebelah timur Kali Opak, yang seakan-akan terdapat di atas atau di dalam Formasi Semilir, mungkin hanya tinggian lokal yang mencerminkan permukaan topografi tidak rata aliran lava basal, atau ada sumber erupsi lain di sekitar Watuadeg yang masih tertutup oleh Formasi Semilir. Hal kedua itu sangat umum terjadi di lapangan gunung api lava basal, seperti di Sukabumi selatan Jawa Barat, Bayat Klaten, dan Tawang Sari Sukoharjo, Jawa Tengah (Bronto, 2008; Hartono drr., 2007, 2008).

Secara stratigrafis, posisi lava basal berstruktur bantal di Kali Opak Watuadeg ini terletak di bawah Formasi Semilir. Analisis radiometri dengan metode K-Ar memberikan umur  $56,3 \pm 3,8$  juta tahun (Paleosen Akhir), sedangkan umur Formasi Semilir adalah Miosen Awal – awal Miosen Tengah (Suroño drr., 1992; Rahardjo, 2007) atau sekitar 16 juta tahun. Umur lava bantal itu lebih tua dibanding umur lava bantal di Pacitan ( $42,73 \pm 9,78 - 33,56 \pm 9,69$  jt; Soeria-Atmadja drr., 1994), sehingga diperlukan pengujian ulang. Namun apabila benar, atau setidaknya tidaknya sama dengan umur lava bantal Pacitan, maka telah terjadi tenggang waktu yang sangat lama (17 - 40 juta tahun) antara pembentukan lava bantal Watuadeg dengan pengendapan Formasi Semilir. Tenggang waktu yang sangat lama itu memungkinkan terjadinya deformasi tektonik dan berbagai proses geologi lainnya setelah vulkanisme lava bantal Watuadeg, tetapi sebelum pembentukan Formasi Semilir. Salah satunya adalah kemungkinan telah terjadi ketidakselarasan di antara keduanya. Selain umur, bukti ketidak selarasan dan tenggang waktu sangat lama dapat dipandang dari aspek sedimentologi, magmatisme, dan vulkanisme.

Dari aspek sedimentologi adalah ditemukan lapisan breksi dengan fragmen batuan beku basal (Gambar 11), yang sama dengan lava bantal Watuadeg di bagian bawah Formasi Semilir. Diperkirakan, sebagian lava basal tersebut tererosi dan

kemudian diendapkan bersama-sama pumis dan abu gunung api pada awal pengendapan Formasi Semilir. Analisis ini menyiratkan adanya proses tektonik berupa pengangkatan lava bantal dari dasar laut dalam menjadi daratan sebelum mengalami perombakan. Hal ini tentunya memerlukan waktu geologi sangat lama. Dengan demikian breksi dengan fragmen basal dan pumis itu dapat dipandang sebagai breksi alas Formasi Semilir, di atas lava bantal Watuadeg. Sebagai tambahan, di Dusun Candisari, Desa Wukirharjo (koordinat  $110^{\circ}31'11,1''$  BT dan  $07^{\circ}49'4,7''$  LS) ditemukan bongkah konglomerat (Gambar 12) bergaris tengah 2 m yang mengandung kerakal basal, dan secara litologis sebanding dengan lava basal Watuadeg. Apabila keduanya berasal dari sumber yang sama, maka penemuan konglomerat itu juga mendukung telah terjadinya pengerjaan ulang hingga ke tempat yang cukup jauh dari sumbernya.



Gambar 12. Bongkah konglomerat di Dusun Candisari, Desa Wukirharjo, Prambanan-Sleman. Di dalam bongkah itu dijumpai fragmen basal (seperti lava Watuadeg), andesit basal (seperti lava Candisari), dan batulempung. Garis putih tegak di bagian tengah adalah urat kalsit.

Dari aspek magmatisme, lava bantal Watuadeg berkomposisi basal ( $50,85\% \text{ SiO}_2$ ), sedangkan pumis di dalam Formasi Semilir bersusunan dasit ( $66,30\% \text{ SiO}_2$ , contoh SB-SML setelah dinormalisir 100% bebas volatil; Hartono, 2000). Secara diferensiasi normal, perubahan dari basal ke dasit harus melalui andesit basal dan andesit terlebih dahulu, yang hal ini memerlukan waktu sangat lama. Dari aspek vulkanisme, aliran lava bantal dihasilkan oleh erupsi

lelahan (*effusive eruptions*) magma basal yang miskin gas atau bahan volatilnya masih terlarut di dalam cairan magma. Sebaliknya, breksi dan batulapili kaya pumis serta tuf Formasi Semilir dihasilkan oleh erupsi letusan sangat besar (*very explosive-, cataclysmic-, paroxysmal-* atau *colossal eruptions*; Newhall dan Self, 1982) karena magma bersusunan asam dan mempunyai tekanan gas sangat tinggi. Berdasarkan pengamatan pada kaldera gunung api Kuarter, seperti Gunung Api Krakatau, letusan besar yang menghasilkan bahan piroklastika kaya pumis terjadi lebih dahulu (tahun 1883). Setelah beberapa puluh tahun kemudian (tahun 1927) muncul Gunung Api Anak Krakatau yang batuanya bersusunan andesit basal (Kusumadinata, 1979). Artinya, tenggang waktu geologi sangat pendek justru terjadi antara erupsi letusan sangat besar ke erupsi lelahan. Kalau ini yang terjadi, posisi stratigrafi Formasi Semilir seharusnya di bawah aliran lava bantal. Berhubung lava bantal di bawah Formasi Semilir, jika keduanya berasal dari satu kawasan gunung api, maka dari erupsi lelahan yang menghasilkan lava bantal ke erupsi letusan sangat besar (menghasilkan breksi – tuf kaya pumis) membutuhkan akumulasi energi dan tekanan gas sangat tinggi, sehingga memerlukan waktu sangat panjang.

Berhubung ciri litologi berbeda dan waktu pembentukan terpaut sangat jauh, bahkan di antara keduanya dibatasi bidang ketidakselarasan, maka lava bantal Watuadeg sebaiknya tidak dimasukkan ke dalam Formasi Semilir. Mungkin lava bantal ini dapat dikorelasikan dengan lava bantal lainnya di Pegunungan Selatan, misalnya di wilayah Kecamatan Piyungan Kabupaten Bantul Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, wilayah Kecamatan Bayat Kabupaten Klaten, Kecamatan Tawang Sari Kabupaten Sukoharjo (Bronto, 2008; Hartono dr., 2007; 2008), Kecamatan Karangtengah Kabupaten Wonogiri (Abdissalam, 2006) Provinsi Jawa Tengah, serta Kabupaten Pacitan Provinsi Jawa Timur (Soeria-Atmadja dr., 1994).

#### KESIMPULAN

1. Sumber erupsi aliran lava basal berstruktur bantal Watuadeg terletak di bukit kecil, 150 m di sebelah barat Kali Opak dengan koordinat 7°48'28,8" LS dan 110°27'28,0" BT. Lava basal

ini termasuk magma seri kalk-alkali, yang pembentukannya berhubungan dengan penunjaman kerak bumi pada waktu itu.

2. Kedudukan stratigrafi lava bantal itu tidak selaras di bawah Formasi Semilir.
3. Karena perbedaan ciri litologi, waktu pembentukan, dan di antaranya terjadi ketidakselarasan, maka lava bantal Watuadeg tidak dimasukkan ke dalam Formasi Semilir.
4. Lava bantal Watuadeg ini mungkin dapat dikorelasikan dengan lava bantal lainnya di Pegunungan Selatan.

**Ucapan Terima Kasih**—Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Ir. Wartono Rahardjo, staf pengajar Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada di Yogyakarta dan Dr. Ir. Surono, M.Sc., peneliti di Pusat Survei Geologi Bandung, yang telah memberikan masukan, kritik, dan saran selama melakukan penelitian dan penyusunan makalah ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Ir. Dwi Indah Purnamawati, M.Si., Ketua Jurusan Teknik Geologi, Institut Sains dan Teknologi AKPRIND, dan Ir. Setyo Pambudi, M.T., Ketua Jurusan Teknik Geologi, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta, yang telah mengizinkan staf pengajarnya untuk melakukan penelitian bersama di daerah Pegunungan Selatan, Yogyakarta.

#### ACUAN

- Abdissalam, R., 2006. *Geologi, Fasies Gunung api purba, Alterasi dan Mineralisasi Daerah Purwohardjo dan sekitarnya, Kecamatan Karangtengah, Kabupaten Wonogiri, Jawa Tengah*. Skripsi, Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 111h., tidak terbit.
- Bronto, S., 2003. Gunungapi Tersier Jawa Barat: Identifikasi dan Implikasinya. *Majalah Geologi Indonesia*, 18 (2), h.111-135.
- Bronto, S., 2006. Fasies gunung api dan aplikasinya. *Jurnal Geologi Indonesia*, 2 (1), h.59-71.
- Bronto, S., 2008. Fosil gunung api di Pegunungan Selatan Jawa Tengah. *Prosiding Seminar dan Workshop "Potensi Geologi Pegunungan Selatan dalam Pengembangan Wilayah"*, Kerjasama PSG, UGM, UPN "Veteran", STTNAS dan ISTA, Yogyakarta, 27-29 Nov. 2007, (*in press*).
- Bronto, S. dan Mulyaningsih, S., 2001. Volcanostratigraphic development from Tertiary to Quaternary: A case study at Opak River, Watuadeg-Berbah, Yogyakarta. *Abstract., 30<sup>th</sup> Annual Convention IAGI & 10<sup>th</sup> Geosea Regional Congress*, Sept. 10-12, 2001, Yogyakarta, 158h.
- Bronto, S., Hartono, G., dan Astuti, B., 2004a. Hubungan

- genesanya antara batuan beku intrusi dan batuan beku ekstrusi di Perbukitan Jiwo, Kecamatan Bayat, Klaten Jawa Tengah. *Majalah Geologi Indonesia*, 19 (3), h. 147-163.
- Bronto, S., Budiadi, Ev., dan Hartono, H.G., 2004b. Permasalahan Geologi Gunungapi di Indonesia. *Majalah Geologi Indonesia*, 19 (2), h.91-105.
- Bronto, S., Hartono, H.G., dan Pambudi, S., 2005. Stratigrafi Batuan Gunung Api Di Daerah Wukirharjo, Kecamatan Prambanan, Sleman Yogyakarta. *Majalah Geologi Indonesia*, 20 (1), h.27-40.
- Bronto, S., Misdiyanta, P., dan Hartono, H.G., 1994. Penyelidikan awal lava bantal Watuadeg, Bayat dan Karangsembung, Jawa Tengah. *Seminar Geologi dan Geotektonik Pulau Jawa, sejak akhir Mesozoik hingga Kuarter*, Jur. Teknik Geologi, FT-UGM, Februari, Yogyakarta, h.123-30.
- Cas, R.A.F. dan Wright, J.V., 1987. *Volcanic Successions, Modern and Ancient*. Allen & Unwin, London, 528h.
- Chayes, F., 1975. Statistical Petrology. *Carnegie Institute Washington, Yearbook*, 74, h.542-50.
- Decker, R. dan Decker, B., 1981. *Volcanoes*. W.H. Freeman & Co., San Francisco, 244h.
- Fleet, A.J., Henderson, P., dan Kempe, D.R.C., 1976. Rare earth element and related chemistry of some drilled southern Indian Ocean basalts and volcanogenic sediments. *Journal of Geophysical Research*, 81 (23), h.4257-4268.
- Hartono, G., 2000. *Studi gunung api Tersier: Sebaran pusat erupsi dan petrologi di Pegunungan Selatan, Yogyakarta*. Tesis magister, Program Studi Teknik Geologi, Program Pasca Sarjana, ITB, Bandung, 168 h. (tidak terbit).
- Hartono, G., 2008. Studi batuan gunung api pumis: Mengungkap asal mula Bregada gunung api purba di Pegunungan Selatan, Yogyakarta. *Prosiding Seminar dan Workshop "Potensi Geologi Pegunungan Selatan dalam Pengembangan Wilayah"*, Kerjasama PSG, UGM, UPN "Veteran", STTNAS dan ISTA, Yogyakarta, 27-29 November 2007, (in press).
- Hartono, G., Sudradjat, A., dan Syafri, I., 2007. Gumuk Gunung Api Purba Bawah Laut Di Tawang Sari-Jomboran, Sukoharjo-Wonogiri, Jawa Tengah. *Joint Convention IAGI-HAGI-IATMI*, Nov. 13-16, 2007, Bali.
- Hartono, G., Azhar, Martino, S., dan Arshad, M., 2008. Bentang Alam Gumuk Gunung Api Purba Berarah Baratlaut-Tenggara Di Daerah Karangdowo-Tawang Sari, Jawa Tengah, (in press).
- Kuno, H., 1960. High alumina basalts. *Journal of Petrology*, 1, h.12-145.
- Kuno, H., 1968. Origin of andesite and its bearing on the island arc structure. *Bulletin Volcanology*, 32, h.141-76.
- Kusumadinata, K., 1979. *Data Dasar Gunung Api Indonesia*. Direktorat Vulkanologi, Bandung, 820h.
- McPhie, J., Doyle, M. dan Allen, R., 1993. *Volcanic Texture*. Centre for Ore Deposit and Exploration Studies, University of Tasmania, Hobart, 196h.
- Macdonald, G.A., 1968. Composition and origin of Hawaiian lavas. *Geological Society of America, Memoir*, 116, h. 477-522.
- Martodjojo, S. dan Djuhaeni, 1996. *Sandi Stratigrafi Indonesia*. Komisi Sandi Stratigrafi Indonesia IAGI, Jakarta, 25h.
- Middlemost, E.A.K., 1985. *Magmas and magmatic rocks: an introduction to igneous petrology*. Longman Inc., New York, 266h.
- Mulyaningsih, S., 1999. *Rekonstruksi bencana alam purba di daerah Kalasan dan sekitarnya, Daerah Istimewa Yogyakarta*. Tesis S-2, Jurusan Teknik Geologi, FIKTM-ITB, 157h. (tidak terbit).
- Mulyaningsih, S., 2005. *Geologi lingkungan di daerah lereng selatan Gunung api Merapi, Yogyakarta, pada waktu sejarah*. Disertasi S-3, Program Studi Teknik Geologi, ITB, 365h. (tidak terbit).
- Newhall, C.G. dan Self, S., 1982. The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87, h.1231-1238.
- Ngkoimani, L.O., 2005. *Magnetisasi pada batuan andesit di pulau Jawa serta implikasinya terhadap paleomagnetisme dan evolusi tektonik*. Disertasi S3, ITB, 110h.
- Nicholls, I.A. dan Whitford, D.J., 1983. Potassium-rich volcanic rocks of the Muriah Complex, Java, Indonesia: Products of multiple magma sources? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18, h.337-359.
- Nicholls, I.A., Whitford, D.J., Harris, K.L. dan Taylor, S.R., 1980. Variation in the Geochemistry of Mantle Sources for Toleitic and calc-Alkaline Mafic Magmas, Western Sunda Volcanic Arc, Indonesia. *Chemical Geology*, 30, h.177-199.
- Peccerillo, A. dan Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contribution Mineralogy and Petrology*, 58, h.63-81.
- Rahardjo, W., 2007. Preliminary result of foraminiferal biostratigraphy of Southern Mountains Tertiary rock, Yogyakarta Special Province. *Prosiding Seminar dan Workshop "Potensi Geologi Pegunungan Selatan dalam Pengembangan Wilayah"*, Kerjasama PSG, UGM, UPN "Veteran", STTNAS dan ISTA, Yogyakarta, 27-29 November 2007, (inpress).
- Rahardjo, W., Sukandarrumidi, dan Rosidi, H.M., 1977. *Peta Geologi Lembar Yogyakarta, Jawa, skala 1 : 100.000*. Direktorat Geologi, Bandung.
- Soeria-Atmadja, R., Maury, R.C., Bellon, H., Pringgoprawiro, H., dan Priadi, B., 1994. Tertiary magmatic belts in Java, *Journal of SE Asian Earth Sciences*, 9, h.13-21.
- Suparka, M.E. dan Soeria-Atmadja, R., 1991. Major element chemistry and REE patterns of the Luh Ulo ophiolites, Central Java. *Proceeding The Silver Jubilee, Symposium Dynamics of subduction and its products*, Yogyakarta-Karangsembung, 17-19 Sept., 1991, Research and Development Center for Geotechnology.

- LIPI, h.204 - 18.
- Surono, Toha, B., dan Sudarno, I., 1992. *Peta Geologi Lembar Surakarta – Giritontro, Jawa, skala 1 : 100.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Suryono, S.S. dan Setyowiyoto, J., 2001. Stratigraphics of Kebo-Butak Formation: Deep water clastic sediments model. *Extended Abstract, 30<sup>rd</sup> Annual Convention IAGI & 10<sup>th</sup> Geosea Regional Congress*, h.301-302.
- Suyoto, 2007. Status Cekungan Wonosari dalam kerangka tektonik Indonesia Barat. *Prosiding Seminar dan Workshop “Potensi Geologi Pegunungan Selatan dalam Pengembangan Wilayah”*, Kerjasama PSG, UGM, UPN “Veteran”, STTNAS dan ISTA, Yogyakarta, 27-29 November 2007, (*in press*)
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. 1<sup>st</sup> publ., Unwin Hyman, London, 485h.

Naskah diterima : 12 Februari 2008
Revisi terakhir : 04 Juni 2008