

PENERAPAN STUDI VULKANOLOGI DALAM PENYELIDIKAN PANAS BUMI: STUDI KASUS PADA BEBERAPA LAPANGAN PANAS BUMI DI INDONESIA

Y. Kristiawan^{1*}, M. Adityarani^{1*}, FX. C. Prasetyo^{1*}, D. R. Naafiyanto^{1*},
Agung Harijoko^{1,2}, Pri Utami^{1,2}

¹ Pusat Penelitian Panas Bumi Fakultas Teknik UGM

² Jurusan Teknik Geologi UGM

* alumni, asisten riset

e-mail : yohandichrist23@gmail.com, malia.adityarani@gmail.com, prasetyo.chandra.fx@gmail.com,
danangraafianto@gmail.com, aharijoko@ugm.ac.id, p.utami01@gmail.com

SARI

Tatanan tektonik Indonesia yang berada di sepanjang zona penunjaman menyebabkan Indonesia memiliki banyak gunung api. Keberadaan gunung api tersebut memunculkan sumber daya geologi, salah satunya adalah sumber daya panas bumi. Oleh karena itu, penerapan studi vulkanologi sangat diperlukan dalam penyelidikan di area panas bumi. Prinsip vulkanologi tersebut dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dari suatu sistem panas bumi maupun mengetahui potensi kebencanaan dari gunung api aktif di sekitar sistem panas bumi. Penerapan prinsip vulkanologi meliputi analisis bentuk lahan dan struktur vulkanik, stratigrafi produk gunung api, fases gunung api dan sejarah vulkanisme.

Analisis bentuk lahan dan struktur gunung api dapat digunakan untuk membantu mengarahkan pencarian sistem panas bumi. Bentuk lahan tersebut merupakan impresi struktur geologi, baik struktur yang terbentuk karena tektonik maupun oleh aktivitas kegunungan, yang bila diintegrasikan dengan jenis dan karakter manifestasi panas bumi dapat dipakai untuk memperkirakan struktur hidrologi sistem panas bumi, seperti keberadaan zona-zona *upflow* dan *outflow*. Analisis bentuk lahan dan struktur gunung api dapat juga digunakan untuk menentukan tipe bentuk gunung api sehingga dapat diinterpretasi tingkat kematangan suatu sistem panas bumi. Analisis stratigrafi produk gunung api berperan untuk mengetahui karakter batuan gunung api, termasuk permeabilitas batuan dalam sistem panas bumi, serta riwayat aktivitas gunung api. Analisis stratigrafi produk gunung api ini penting dilakukan baik terhadap singkapan maupun contoh batuan bawah permukaan (inti bor dan serbuk bor). Analisis stratigrafi perlu didukung dengan pentarikhan umur unit-unit batuan kunci untuk mengetahui sejarah vulkanisme. Analisis sejarah vulkanisme sangat membantu dalam memperkirakan tingkat aktivitas gunung api dan tingkat kematangan sistem panas bumi. Hasil analisis di atas juga dapat digunakan untuk menyusun rencana mitigasi bencana kegunungan yang dapat terjadi.

Dalam karya tulis ini akan disampaikan pula beberapa contoh studi vulkanologi di beberapa daerah lapangan panas bumi di Indonesia. Dari studi ini dapat ditarik pelajaran mengenai hubungan gunung api dengan sistem panas bumi yang terbentuk.

ABSTRACT

Indonesian Archipelago that is tectonically controlled by subduction-type plate boundaries has numerous volcanoes. This setting determines the wealth of geologic resources of the country. Volcanological studies are therefore, needed to explore and developed the resources, including the high-temperature, volcano-hosted geothermal reservoirs. Principles of volcanology can be applied to identify and characterize the geothermal systems, and the hazard potential from the active volcanoes in the region. The principles of volcanology are used to identify the volcanic landform and structures, volcanic stratigraphy, and the history of volcanic activities.

The knowledge of volcanic landform and structures is useful to guide the geothermal exploration. A landform is the impression of geological structures, formed by either tectonic and/or volcanic activities. Integration of the result of volcanic landform analysis with the data of geothermal manifestation can be used to help interpret the hydrological structure of the system, i.e., to deduce the upflow and outflow zones. Volcanic stratigraphy analysis is useful to determine the volcanic facies and interpret the primary permeability in geothermal reservoirs, and to determine the eruption centers of historically inactive volcanoes. Volcanic history analyses are needed to interpret the degree of volcanic activity and the maturity of geothermal systems. The results of all the above analysis can also be applied to predict and mitigate the volcanic hazard.

In this paper we present examples of the application of volcanological studies in several volcano-hosted geothermal systems in Indonesia. One of the important lessons learnt from our studies is the time-space relationship between volcanic activity and the occurrence of geothermal systems.

PENDAHULUAN

Indonesia secara umum memiliki tatanan tektonik yang cukup kompleks. Tiga lempeng tektonik besar yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik mengelilingi negara kepulauan ini. Pergerakan tektonik tersebut mengontrol pembentukan gunung-gunung api di Indonesia. Gunung api di Indonesia sebagian besar termasuk di dalam busur gunung api tepi benua. Busur gunung api terbentuk akibat penunjaman kerak samudra (*oceanic crust*) ke bawah kerak benua (*continental crust*). Keberadaan gunung-gunung api tersebut memunculkan potensi sumber daya geologi, antara lain berupa panas bumi sebagai sumber energi.

Penerapan studi vulkanologi sangat diperlukan dalam penyelidikan di area panas bumi. Studi vulkanologi merupakan studi awal atau fondasi untuk mengerti bagaimana sistem panas bumi vulkanogenik dapat terbentuk serta potensi yang dimilikinya. Studi vulkanologi yang dilakukan meliputi analisis **bentuk dan struktur gunung api, stratigrafi gunung api, dan sejarah vulkanisme**.

Saat ini, studi vulkanologi sebagai studi awal eksplorasi panas bumi masih belum berkembang di Indonesia. Penelitian dan publikasi ilmiah mengenai panas bumi yang sudah ada cenderung membahas komponen sistem panas bumi bukan sejarah pembentukan sistem tersebut. Studi vulkanologi tersebut juga dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dari suatu sistem panas bumi maupun mengetahui potensi kebencanaan dari gunung api aktif di sekitar sistem panas bumi. Tulisan ini bertujuan mendorong adanya studi detail vulkanologi untuk eksplorasi panas bumi serta merevisi ulang geologi daerah lapangan panas bumi sesuai dengan konsep gunung api.

ANALISIS BENTUK DAN STRUKTUR GUNUNG API

Analisis bentuk dan struktur gunung api meliputi analisis bentukan morfologi atau bentang alam gunung api. Bentuk dan struktur gunung api merupakan impresi struktur geologi, baik struktur yang terbentuk karena tektonik maupun oleh aktivitas kegunaungapian.

Analisis bentuk dan struktur gunung api dapat digunakan untuk menentukan pusat erupsi dari suatu kerucut gunung api, menentukan bentuk (dimensi) dari suatu gunung api, dan kemunculan struktur geologi (dari proses tektonik maupun aktivitas gunung api).

Pusat erupsi dari suatu gunung api diasumsikan berada di atas dari dapur magma atau intrusi yang membentuk gunung api tersebut. Apabila kita mengetahui posisi *vent* atau pusat erupsi dari suatu gunung api, kita dapat memperkirakan posisi sumber panas dari sistem panas bumi yang terbentuk di area tersebut.

Bentuk atau dimensi gunung api dapat menunjukkan kemenerusan suplai magma dari mantel ke dapur magma gunung tersebut. Bentuk gunung api berdasarkan genesanya dapat dibedakan menjadi 2 kelompok yaitu gunung api monogenesis dan poligenesis (Bronto, 2010).

Gunung api monogenesis

Gunung api monogenesis terbentuk dari satu fase erupsi saja. Gunung api tipe ini mempunyai bentuk yang relatif kecil, volume kecil, waktu hidup pendek, dan energi yang rendah (Bronto, 2010). Gunung api monogenesis meliputi kerucut sinder, cincin tuf, kubah lava hingga *maar*.

Salah satu contoh gunung api monogenesis yaitu kerucut sinder. Kerucut sinder adalah kerucut piroklastika yang tersusun oleh perlapisan bahan lepas (Bronto, 2010). Contoh kerucut sinder di Indonesia yaitu Gunung Tampusu di Sulawesi Utara (Van Padang, 1951).

Gunung api poligenesis

Gunung api poligenesis merupakan gunung api yang terbentuk akibat beberapa kali erupsi. Gunung api poligenesis meliputi gunung api komposit, kaldera, serta gunung api tipe perisai. Gunung api tipe komposit hingga kaldera umum di jumpai di Indonesia. Gunung api tipe perisai yang umumnya dapat dijumpai di kepulauan Hawaii dan Islandia, tidak dijumpai di Indonesia. Contoh gunung api poligenesis di Indonesia misalnya Gunung Salak dan Patuha di Jawa Barat (*stratovolcano*) (Van Padang, 1951).

Gunung api monogenesis tidak mendapat suplai magma yang menerus, sehingga bentuk gunung api yang dihasilkan relatif kecil. Gunung api poligenesis mendapat suplai magma yang menerus dari mantel sehingga dapat membentuk kerucut gunung api yang lebih besar dibandingkan dengan gunung api monogenesis. Suplai magma yang diperoleh gunung api poligenesis menyebabkan terjadinya proses diferensiasi, asimilasi, dan fraksinasi-kristalisasi yang menyebabkan evolusi magma. Magma yang terdiferensiasi (lebih silikik)

cenderung menghasilkan erupsi yang eksplosif sehingga diinterpretasikan mempunyai energi panas di dapur magma yang cukup besar dan matang untuk menjadi sumber panas dari suatu sistem panas bumi (Wohletz and Heiken, 1992).

Struktur geologi yang muncul di daerah gunung api dapat berasal dari aktivitas tektonik maupun aktivitas vulkanik. Aktivitas tektonik membentuk sesar dan kekar yang dapat digunakan sebagai jalan bagi magma untuk naik ke permukaan. Erupsi gunung api eksplosif, terutama yang dapat membentuk kaldera, akan membentuk rekahan-rekahan baru di tubuh gunung api tersebut. Sesar, kekar, dan rekahan ini merupakan jalan bagi fluida hidrotermal pada sistem panas bumi sehingga interpretasi struktur geologi pada daerah gunung api berperan penting dalam karakterisasi sistem panas bumi (Wohletz and Heiken, 1992).

ANALISIS STRATIGRAFI GUNUNG API

Stratigrafi menurut Sandi Stratigrafi Indonesia (Martodjojo dan Djuheni, 1996) dalam arti luas adalah ilmu yang membahas aturan, hubungan, dan kejadian (genesa) macam – macam batuan di alam dalam ruang dan waktu, sedangkan dalam arti sempit adalah ilmu pemerian lapisan-lapisan batuan. Stratigrafi gunung api merunut urutan/proses pembentukan endapan gunung api. Dalam stratigrafi gunung api dikenal istilah fasies gunung api. Fasies gunung api merupakan pembagian kelompok batuan gunung api berdasarkan aspek-aspek tertentu seperti jarak (sumber), jenis gunungapi, dan apakah lubang kawah tersebut tunggal, *multiple vent*, terpusat, atau kawah samping (*flank*) (Fisher and Schmincke, 1984). Fasies gunung api komposit dapat dibagi menjadi 4 berdasarkan morfologi gunung api sesuai kesamaan waktu, yaitu fasies pusat erupsi, fasies proksimal, fasies medial, dan fasies distal (Bogie and MacKenzie, 1998).

Sebelum melakukan analisis stratigrafi, terlebih dahulu dilakukan analisis bentuk dan struktur gunung api serta pengambilan data litologi pembentuk gunung api yang menjadi obyek penelitian. Data litologi yang diperoleh dapat digunakan untuk karakterisasi produk gunung api yang terbentuk. Karakterisasi produk gunung api tersebut meliputi volume endapan piroklastik yang terbentuk dan jenis lava yang dihasilkan. Hal tersebut akan mengarahkan kita kepada interpretasi evolusi magma pada gunung api yang bersangkutan. Magma yang telah berevolusi lanjut cenderung menjadi sumber panas dengan energi yang besar (Wohletz and Heiken, 1992).

Apabila kita ingin mengetahui umur dan karakteristik batuan, kita dapat melakukan analisis geokimia dan penanggalan umur radioaktif.

Analisis geokimia batuan akan menunjukkan komposisi kimia batuan. Komposisi kimia batuan akan berbeda dari erupsi pertama dan selanjutnya. Hal ini akan membantu dalam pengelompokan batuan selain dari aspek petrologinya saja. Penanggalan umur radioaktif akan memberikan umur absolut batuan.

Hasil interpretasi bentuk dan struktur gunung api ditambah data litologi dapat kita gunakan untuk menyusun stratigrafi gunung api daerah penelitian. Stratigrafi gunung api dapat dikembangkan menjadi sejarah vulkanisme.

ANALISIS SEJARAH VULKANISME

Sejarah vulkanisme merupakan reka ulang dari aktivitas vulkanik yang diperoleh dari analisis stratigrafi gunung api. Sejarah vulkanisme menunjukkan urutan peristiwa erupsi maupun proses geologi lain yang terjadi pada suatu kerucut atau kompleks gunung api. Sejarah vulkanisme dapat dikorelasikan dengan data manifestasi panas bumi untuk mengetahui sejarah aktivitas hidrotermal suatu sistem panas bumi.

STUDI VULKANOLOGI UNTUK MITIGASI BENCANA GUNUNG API DI AREA PANAS BUMI

Hasil studi vulkanologi didukung dengan data manifestasi panas bumi dan alterasi batuan dapat digunakan untuk mitigasi bencana gunung api. Pengetahuan akan karakteristik gunung api (bentuk dan struktur, dan tipe erupsi) dapat digunakan dalam mitigasi bencana. Dengan mengetahui tipe erupsi, kita dapat memperkirakan bahaya yang dapat ditimbulkan terhadap lingkungan di sekitar gunung api tersebut. Sebagai contoh, gunung api dengan erupsi eksplosif dapat menyebabkan kerusakan di daerah sekitarnya dan gangguan kesehatan bagi masyarakat di sekitarnya akibat lontaran material vulkaniknya. Analisis ini dapat dibantu dengan data erupsi beberapa dekade terakhir dari gunung api tersebut. Data-data tersebut dapat diperoleh dari catatan di pos pengawasan bahaya kegunungan pada gunung api - gunung api yang masih menunjukkan aktivitas. Integrasi data tersebut dapat digunakan untuk menginterpretasikan kemungkinan zona bahaya dari erupsi yang akan terjadi kemudian (Bronto dan Hadisantono, 2001).

STUDI KASUS

Studi Kasus pada Lapangan Panas Bumi Dieng, Jawa Tengah

Lapangan Panas Bumi Dieng merupakan salah satu lapangan panas bumi di Indonesia yang sudah berkembang. Lapangan panas bumi Dieng terletak pada Kompleks Gunung Api Dieng. Kompleks Gunung Api Dieng merupakan daerah gunung api aktif yang terdiri atas kerucut-kerucut gunung api

berumur Pliosen-Pleistosen. Dengan bantuan penginderaan jauh, kita dapat melihat bahwa di kompleks gunung api ini terdapat struktur melingkar yang diperkirakan merupakan batas kaldera, sebuah *stratovolcano* dengan *sector collapse* dan beberapa *maar* (Bogie *et al.*, 2010). Gambar 1 menunjukkan contoh analisis bentuk dan struktur gunung api menggunakan bantuan citra satelit dari Google Earth. Pada citra tersebut, kita dapat melihat adanya batas kaldera (garis kuning putus-putus) merupakan bagian dari Gunung Prau. Keberadaan batas kaldera ini pada citra tidak didukung dengan adanya endapan piroklastik tebal hasil erupsi pada saat pembentukan kaldera sehingga keberadaan kaldera di Dieng masih sulit dibuktikan kebenarannya. Garis merah putus-putus menunjukkan *stratovolcano* Gunung Bisma yang telah mengalami *sector collapse*. *Sector collapse* yang terbentuk diperkirakan merupakan hasil erupsi yang terjadi pada kerucut ini. Garis ungu putus-putus menunjukkan beberapa *maar* yang terbentuk di Kompleks Gunung Api Dieng. Dapur magma yang menjadi sumber magma *stratovolcano* Gunung Bisma dapat diinterpretasikan sebagai sumber panas dari sistem panas bumi Dieng apabila dilihat dari bentuk dan struktur gunung apinya. Data persebaran batuan teralterasi, geofisika, dan geokimia baik dari permukaan maupun bawah permukaan perlu dikombinasikan dengan hasil interpretasi citra satelit ini untuk dapat mengetahui posisi dari sumber panas dari sistem panas bumi Dieng.

Komposisi lava di kompleks vulkanik Dieng berkisar antara basaltik hingga dasitik. Tekstur batuan yang dijumpai sebagian besar porfiritik dengan fenokris mencapai 3 mm berupa plagioklas, olivin, klinopiroksen, dan ortopiroksen. Hornblenda jarang dijumpai pada batuan di daerah ini. Biotit dijumpai pada batuan dasitik yang ditemukan di Gunung Kendil, Gunung Seroja, dan Gunung Pakuwaja (Harijoko, *et al.*, 2010). Lava basaltik hingga dasitik yang terbentuk di Dieng mengindikasikan adanya diferensiasi magma sudah terjadi di Dieng. Sistem panas bumi vulkanogenik mempunyai tingkat kematangan lebih tinggi pada daerah dengan magma yang sudah terdiferensiasi.

Analisis stratigrafi dipadukan dengan analisis bentuk dan struktur gunung api (dibantu dengan *remote sensing*) dapat diinterpretasi sejarah vulkanisme Dieng. Aktivitas vulkanik di Dieng dapat dibagi menjadi tiga periode, periode pertama pada Pliosen Tengah melibatkan Gunung Prau dan Gunung Jimat. Periode kedua pada Pliosen Akhir yang melibatkan Gunung Nagasari dan Gunung Bisma. Periode ketiga terjadi pada Pleistosen yang melibatkan gunung-gunung api muda seperti Gunung Sipandu, Gunung Pangonan, Gunung Merdada, Gunung Pakuwaja, Gunung Prambanan

dan gunung-gunung muda di sekitar Gunung Pakuwaja. (Savitri, dkk, 2012). Batuan teralterasi dijumpai pertama kali pada batuan di Gunung Sipandu. dari fakta tersebut, dapat disimpulkan bahwa aktivitas sistem panas bumi Dieng dimulai pada saat atau setelah pembentukan Gunung Sipandu.

Studi Kasus pada Lapangan Panas Bumi Ulubelu, Lampung

Lapangan panas bumi Ulubelu terletak di Provinsi Lampung, sekitar 80 km ke arah barat laut dari Bandar Lampung. Area tersebut berada dalam zona sesar Sumatra yang menghasilkan deretan gunung-gunung api tersier hingga kuarter.

Analisis citra satelit yang dilakukan di daerah Ulubelu menghasilkan interpretasi berupa dimensi dan pusat-pusat erupsi pada gunung-gunung api di daerah tersebut (Gambar 2). Pada gambar tersebut terdapat beberapa pusat erupsi dengan bentuk dan struktur yang berbeda-beda. Gunung Tanggamus dan Gunung Rindingan menunjukkan bentuk dan struktur gunung api yang masih jelas. Bentuk kerucut relatif sempurna dengan pusat erupsi di bagian puncaknya menunjukkan bahwa Gunung Tanggamus dan Gunung Rindingan merupakan gunung api komposit. Gunung Rindingan menunjukkan adanya *sector collapse*. Gunung Kabawok menunjukkan kenampakan pusat erupsi yang lebih kecil daripada Gunung Tanggamus dan memiliki torehan yang relatif intensif pada bagian puncaknya. Sebagian besar tubuh Gunung Kabawok ini tertutup oleh endapan Gunung Tanggamus. Pusat-pusat erupsi di sekitar kompleks manifestasi Way Panas juga menunjukkan pusat erupsi yang kecil dengan struktur geologi yang kompleks. Sementara itu, Gunung Tiga dan Gunung Sula menunjukkan pusat erupsi yang besar dan membentuk kenampakan kaldera. Analisis ini berperan dalam membantu interpretasipersebaran produk-produk gunung api di daerah Ulubelu hingga interpretasi mengenai sistem panas bumi di daerah ini.

Masdruk (1990, dalam Suharno and Browne (2000) memetakan daerah tersebut sesuai dengan konsep kegunaugapian. Berdasarkan umur batuan, batuan tersier penyusun daerah prospek panas bumi Ulubelu adalah terobosan granodiorit dan andesit yang berumur Miosen. Pada Pliosen diendapkan lava andesit Gunung Sula, lava andesit Gunung Kukusan, lava andesit Gunung Duduk. Pada zaman kuarter, pada Kala Pleistosen diendapkan batuan-batuhan gunung api. Secara berurutan diawali dengan endapan piroklastik Gunung Kabawok, breksi lahar Gunung Tanggamus, lava dan piroklastik Gunung Rendingan, dan endapan piroklastik Gunung Korupan. Endapan alluvial dan alterasi terbentuk terakhir pada kala Holosen.

Karakter batuan dan komposisinya menunjukkan daerah Ulubelu merupakan kompleks gunung api komposit tingkat lanjut. Perubahan dapat dilihat pada endapan gunung api pada Kala Pliosen dan Pleistosen. Gunung api pada Kala Pliosen menghasilkan lava yang terbentuk akibat letusan yang efusif. Sebaliknya gunung api Kala Pleistosen cenderung menghasilkan batuan piroklastik yang terbentuk akibat letusan gunung api eksplosif. Adanya perubahan tipe letusan dari efusif hingga eksplosif menunjukkan adanya diferensiasi magma yang lebih asam. Magma yang lebih asam akan kaya volatil, dan memicu letusan gunung api yang eksplosif (Wohletz and Heiken, 1992). Diferensiasi magma menunjukkan adanya kemenerusan suplai magma pada gunung api di Ulubelu. Suplai magma yang menerus ini menyebabkan dapur magma selalu panas sehingga potensi energi panas yang dimiliki diperkirakan cukup besar.

Manifestasi panas bumi di Ulubelu terdiri atas fumarol, steaming ground, kolam lumpur, dan mata air panas. Fumarol terletak pada elevasi yang lebih tinggi, dekat dengan Gunung Duduk. Mata air panas muncul pada elevasi yang lebih rendah, sekitar 400 – 700 m dari permukaan laut. Mata air tersebut tersebar dari Sungai Ulubelu hingga lereng selatan Gunung Kukusan. Posisi manifestasi panas bumi Ulubelu merupakan ciri khas sistem panas bumi pada daerah berelief tinggi sesuai dengan model konseptual sistem panas bumi oleh Nicholson (1993). Kemunculan manifestasi panas bumi dikontrol oleh adanya struktur geologi. Sunaryo (1993) menyebutkan bahwa ada 2 pola struktur di Ulubelu. Pola NW yang sejajar dengan sesar Sumatra dan pola NE. Pola kedua ini berdasarasi dengan terbentuknya beberapa fumarol dan batuan teralterasi. Struktur tersebut berperan sebagai pengontrol permeabilitas dalam sistem panas bumi.

Studi Kasus Pada Lapangan Panas Bumi Lahendong, Sulawesi Utara

Lapangan panas bumi Lahendong terletak 30 km ke selatan dari Manado, Sulawesi Utara. Lahendong berada pada lengan utara Pulau Sulawesi dan merupakan busur gunung api yang membentang hingga Kepulauan Sangihe. Busur gunung api tersebut muncul sebagai hasil subduksi Lempeng Laut Maluku ke arah barat (Hamilton, 1979; Hamilton, 1988; Simandjuntak & Barber, 1996; Lumbanbatu *et al.*, 2003 *vide* Utami *et al.*, 2004). Lapangan panas bumi Lahendong menurut Siahaan *et al.* (2005) terbentuk di dalam Kaldera Pangolombian yang berada di sebelah barat laut dari Kaldera Tondano yang lebih besar. Struktur kaldera ini ditunjukkan oleh kenampakan struktur melingkar dari peta geologi daerah tersebut. Ada 3 gunung api yang masih aktif di daerah Lahendong

yaitu Gunung api Klabat, Gunung api Lokon-Mahawu, dan Gunung api Soputan-Riendengan.

Stratigrafi daerah Lahendong (Utami *et al.*, 2004) disusun berdasarkan hasil analisis penanggalan umur menggunakan unsur radioaktif K/Ar (Tabel 1). Batuan tertua adalah batuan vulkanik Pra-Tondano yang meliputi tuff, lava andesit, dan breksi andesit. Batuan tersebut bersisipan dengan batulanau fosilan. Data hasil analisis umur menggunakan unsur radioaktif menunjukkan batuan ini terbentuk pada Pliosen akhir (2.19 ± 0.03 Ma) (P.T. Gondwana, 1988 dalam Utami *et al.*, 2004). Di atas batuan vulkanik Pra-Tondano diendapkan tuff Tondano yang mempunyai kisaran umur 0.871 ± 0.097 Ma atau pada awal Pleistosen (P.T. Gondwana, 1988 dalam Utami *et al.* 2004). Tuff Tondano didominasi oleh lapili tuff, breksi tuff, dan terdapat sisipan lava riolitik pumisan. Batuan vulkanik Pra-Tondano dan tuff Tondano selanjutnya diterobos oleh intrusi diorit yang diinterpretasi sebagai retas (*dike*). Batuan yang terbentuk berikutnya adalah lava andesit dan piroklastik Pangolombian. Batuan ini merupakan hasil dari erupsi besar yang membentuk kaldera dan mengisi sebagian besar dari lapangan panas bumi Lahendong. Tahap berikutnya adalah pembentukan gunung api-gunung api baru di dalam kaldera tersebut.

Aktivitas vulkanik pasca pembentukan kaldera diawali dengan lava dan tuff Gunung Lengkoan. Aktivitas berikutnya berupa pengendapan lava andesit dan tuff Gunung Kasuratan, lava andesit Gunung Tampuso, tuff dan obsidian Gunung Kasuan, serta lava dan breksi andesit Gunung Linau. Lava dan breksi andesit Gunung Linau diketahui berumur 0.458 ± 0.042 Ma atau Pleistosen tengah (P.T. Gondwana, 1988 dalam Utami *et al.* 2004). Aktivitas vulkanik paling muda mengendapkan breksi dan lava andesit Gunung Masarang, kemudian diikuti oleh endapan kolinial. Perkembangan vulkanisme daerah Lahendong dapat diketahui berdasarkan karakter batuan dan urutan stratigrafi gunung apinya.

Manifestasi panas bumi Lahendong terdapat di bagian barat dan utara danau Linau, Leliem, Lahendong, dan Kasuratan. Manifestasi ini dikontrol oleh sesar berarah NE – SW (Utami *et al.*, 2004). Manifestasi panas bumi terdiri atas *steaming ground*, fumarol, mata air panas asam, kolam lumpur, dan *discharge* gas H_2S . Kemunculan gas tersebut menunjukkan adanya suplai fluida magmatik.

Penerapan studi vulkanologi untuk mitigasi bencana kegungungan dapat diterapkan di lapangan panas bumi Lahendong. Keberadaan Gunung Lokon, yang berjarak sekitar 11 km di

barat laut dari lapangan panas bumi Lahendong, menimbulkan bahaya tersendiri. Erupsi Gunung Lokon dapat berbahaya apabila letusannya eksplosif dan menghasilkan jatuh piroklastik, mengingat jatuh piroklastik dapat diendapkan jauh dari sumbernya. Studi vulkanologi dan monitoring gunung api dapat berperan untuk perencanaan mitigasi, seperti perencanaan evakuasi, penentuan jalur yang aman, serta penempatan infrastruktur panas bumi.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

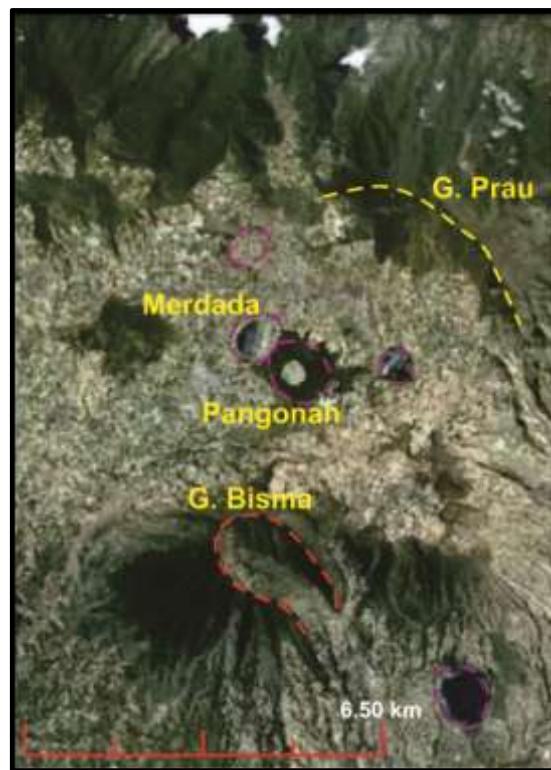
Studi vulkanologi sangat vital dalam penyelidikan sumber daya panas bumi. Pemahaman yang baik terhadap karakter gunung api akan membantu dalam memahami karakter lapangan panas bumi, sehingga pengelolaan lapangan panas bumi dan mitigasi bencana kegungungapian dapat berjalan secara efektif dan efisien.

Studi vulkanologi berperan dalam 1). Prioritasi pengembangan daerah prospek panas bumi. 2). Membantu dalam penyusunan sejarah geologi sistem panas bumi. 3). Mitigasi bencana gunung api pada lapangan panas bumi.

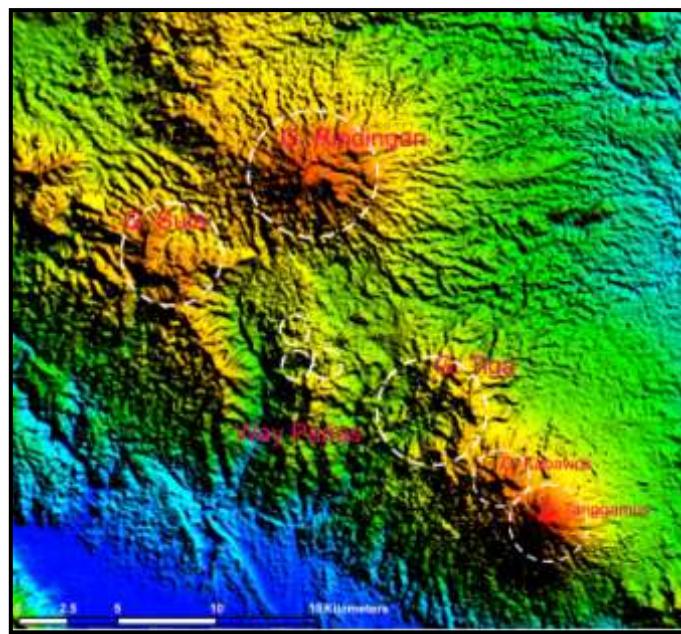
Peta-peta geologi dan laporan yang berkaitan dengan gunung api di area panas bumi belum dibuat dengan menerapkan konsep kegungungapian. Oleh karena itu, koreksi ulang terhadap peta-peta gunung api yang sudah ada perlu dipertimbangkan untuk pengembangan penelitian panas bumi di Indonesia.

REFERENSI

- Bogie, I. and Mackenzie, K.M., 1998. "The Application Of A Volcanic Facies Models To An Andesitic Stratovolcano Hosted Geothermal Sistem At Wayang Windu, Java, Indonesia". *Proceedings of 20th NZ Geothermal Workshop*.
- Bogie, I., Sugiono, S.R.A., Malik, D., 2010. "Volcanic Landforms that Mark Succesfully Developed Geothermal Sistem of Java, Indonesia Identified from ASTER Satellite Imagenary", *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, p.265-276
- Bronto, S., and, Haadisantono, R.D., 2001, Volcanic Hazard Assessment in Geothermal Area, *Proceeding of the 5th INAGA Scientific Conference & Exhibitions*, p. 7-15.
- Bronto, S., 2010, *Publikasi Khusus Geologi Gunung api Purba*, Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung.
- Harijoko, A., Uruma, R., Wibowo, H.E., Setijadji, L.D., Imai, A., Watanabe, K., 2010, "Long-Term Volcanic Evolution Surrounding Dieng Geothermal Area, Indonesia", *World Geothermal Congress 2010*.
- Martodjojo, S. dan Djuhaeni, 1996, *Sandi Stratigrafi Indonesia*, Komisi Sandi Stratigrafi Indonesia IAGI, Jakarta, 25h.
- Nicholson, K, 1993, *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*, Springer Verlag, Michigan, 263 pp.
- Savitri, K. P., Naafianto, D. R., Prasetyo, FX. C., Utami, P., Harijoko, A., Nurpratama, M. I., dan Kusumo, M., 2012, "Geologi dan Alterasi Hidrotermal Kompleks Gunung Api Dieng", *The 12th Annual Indonesian Geothermal Association Meeting & Conference*.
- Siahaan, E. E., Soemarinda, S., Fauzi, A., Silitonga, T., Azimudin, T., dan Raharjo, I. B., 2005, "Tectonism and Volcanism Study in the Minahasa Compartment of the North Arm of Sulawesi Related to Lahendong Geothermal Field, Indonesia", *Proceedings World Geothermal Congress 2005*.
- Suharno and Browne, P.R.L., 2000, Subsurface Hydrothermal at the Ulubelu Geothermal Field, Lampung, Southern Sumatra, *Proceeding 25th Workshop on Geothermal reservoir Engineering Stanford University*, Stanford, California
- Sunaryo, Hantono, D., Ganda, S., and Nugroho, 1993, "Exploration Results of The Ulubelu Geothermal Prospect, South Sumatra, Indonesia", *Proceedings 15th NZ Geothermal Workshop 1993*, p. 103 – 106.
- Utami, P., Siahaan, E.E., Azimudin, T., Suroto., Browne, P.R.L., and Simmons, S.F., 2004, Overview of the Lahendong Geothermal Field, North Sulawesi, Indonesia: A Progress Report, *proceeding 26th NZ Geothermal Workshop 2004*.
- Wohletz, K and Heiken, G., 1992, *Volcanology and Geothermal Energy*, University of California Press, California, pp 432.



Gambar 1: Hasil analisis bentuk dan struktur gunung api melalui citra satelit Google Earth. Garis putus-putus warna kuning menunjukkan batas kaldera; garis putus-putus warna merah menunjukkan kawah kerucut stratovolcano yang mempunyai sector collapse; dan garis putus-putus warna ungu menunjukkan maar.



Gambar 2: Identifikasi pusat-pusat erupsi gunung api pada citra satelit daerah lapangan panas bumi Ulubelu.

Tabel 1: Stratigrafi daerah panas bumi Lahendong (Utami et al, 2004)

Colluvium		
Masarang andesite lava & breccia		
Linau andesite lava & breccia (0.458 ± 0.042 Ma)		
Kasuratan andesite lava & tuff	Tampusu andesite lava	Kasuan obsidian & tuff
Lengkoan lava and tuff (0.586 ± 0.051 Ma)		
Pangolombian andesite lava & pyroclastics		
Tondano	Diorite intrusion	tuff (0.871 ± 0.097 Ma)
Pre-Tondano		volcanic & sedimentary rocks (2.19 ± 0.03 Ma)