

**GUNUNG API, SUMBER KEMAKMURAN DI BALIK  
ANCAMAN BAHAYA**



**UNIVERSITAS GADJAH MADA**

**Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar  
Dalam Bidang Vulkanologi  
pada Fakultas Teknik  
Universitas Gadjah Mada**

**Disampaikan pada Pengukuhan Guru Besar  
Universitas Gadjah Mada  
pada tanggal 20 Februari 2024  
di Yogyakarta**

**Oleh:  
Prof. Dr. Ir. Agung Harijoko, S.T., M.Eng, IPM**

Bismillaahirrohmaannirrahiim.

Assalaamu'alaikum Warohmatullaahi Wabarokaatuh

*Yang terhormat:*

*Ketua, Sekretaris, dan Anggota Majelis Wali Amanat,*

*Rektor dan Wakil Rektor Universitas Gadjah Mada,*

*Ketua, Sekretaris, dan Anggota Dewan Guru Besar,*

*Ketua, Sekretaris, dan Anggota Senat Akademik,*

*Dekan dan Wakil Dekan, Ketua, dan Sekretaris Senat Fakultas Teknik,*

*Dekan dan Wakil Dekan di lingkungan Universitas Gadjah Mada*

*Rekan-rekan sejawat dosen dan segenap civitas akademika Universitas*

*Gadjah Mada,*

*Para tamu undangan, keluarga yang saya cintai, serta hadirin sekalian yang saya hormati.*

Saya panjatkan puji syukur kehadiran Allah Swt yang telah melimpahkan rahmat, karunia dan hidayah-Nya, sehingga kita dapat hadir di ruang Balai Senat ini. Saya ucapkan terima kasih dan selamat datang kepada hadirin semua yang telah berkenan hadir dan mendengarkan pidato pengukuhan saya sebagai Guru Besar dalam bidang ilmu Vulkanologi pada Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Pada hari ini, ijinkan saya menyampaikan pidato pengukuhan sebagai guru besar dengan judul: **Gunung api, sumber kemakmuran di balik ancaman bahaya.**

*Hadirin yang saya muliakan*

Indonesia mendapat karunia Allah Swt berupa suatu wilayah kepulauan yang terbentuk oleh interaksi antara 3 lempeng tektonik, yaitu: kerak Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik (Hamilton, 1979). Oleh karena itu Indonesia berada di suatu wilayah yang kompleks dari sudut pandang ilmu geologi. Interaksi antar tiga kerak tersebut menjadikan Indonesia mempunyai banyak gunung api. Indonesia mempunyai 127 gunung api aktif (Badan Geologi, 2011; PVMBG, 2021) yang membentuk jalur vulkanik yang panjang mulai dari ujung Aceh, sampai

ke Nusa Tenggara Timur, disambung ke arah Pulau Banda yang dikenal dengan Sabuk gunung api Sunda-Banda. Ditambah dengan jalur yang ada di Halmahera dan Sangihe.

Dengan jumlah gunung api yang tersebar hampir merata di seluruh Indonesia, tidak mengherankan kalau kehidupan masyarakat Indonesia sangat dipengaruhi oleh aktivitas gunung api. Fenomena ini menjadikan masyarakat Indonesia mempunyai ikatan jiwa dengan gunung api. Banyak upacara tradisi yang menghadirkan gunung api seperti pada pagelaran wayang purwa, grebeg, dan lain-lain.

Di kalangan masyarakat awam, berkembang mitos bahwa gunung api mempunyai kekuatan supranatural yang dahsyat. Hal ini dirasakan terutama ketika gunung api erupsi. Oleh karena itu banyak anggapan dan pandangan bahwa gunung api adalah ancaman bahaya. Kalau kita sadari, gunung api menyediakan lahan yang subur dan pemandangan alam yang sangat indah. Lebih jauh lagi gunung api menyediakan sumber daya alam yang sangat besar yang dapat dimanfaatkan untuk kesejahteraan masyarakat, seperti: energi panas bumi dan tambang mineral. Bahkan, di beberapa tempat erupsi gunung api tersebut ditunggu karena akan menyediakan material konstruksi bangunan dengan kualitas bagus.

Dengan pertumbuhan jumlah penduduk di Indonesia yang tinggi, menjadi sekitar 278,8 juta jiwa pada tahun 2023 (BPS, 2023), maka terjadi perubahan tata guna lahan di mana semakin banyak masyarakat tinggal di lereng gunung api. Hal ini menyebabkan masyarakat Indonesia dihadapkan pada risiko bahaya gunung api beserta bahaya-bahaya ikutannya (Cottrell, 2015), terutama masyarakat yang tinggal di Pulau Jawa, karena banyaknya gunung api aktif dan kepadatan penduduk.

Selain itu, pertumbuhan jumlah penduduk juga meningkatkan kebutuhan energi terutama energi listrik. Saat ini pemenuhan kebutuhan di Indonesia masih didominasi oleh sumber energi fosil sehingga akan berpengaruh terhadap emisi gas rumah kaca yang berdampak pada perubahan iklim yang memicu terjadinya bencana hidrometeorologi. Oleh karena itu, pengurangan jumlah emisi gas rumah kaca adalah hal yang penting untuk dilakukan.

Salah satu usaha mengurangi emisi gas rumah kaca adalah dengan memberlakukan bauran energi dengan memanfaatkan energi yang lebih ramah lingkungan. Sebagai sumber energi terbarukan, energi panas bumi bisa dijadikan salah satu sumber energi utama untuk menggantikan pembangkit listrik berbahan bakar fosil.

Dari uraian di atas, pemahaman tentang gunung api mempunyai peranan penting dalam kehidupan masyarakat Indonesia, baik untuk mengurangi risiko bahaya gunung api maupun membantu dalam pengembangan sumber daya energi panas bumi, di mana gunung api adalah rumah bagi sistem panas bumi.

*Hadirin yang saya muliakan,*

### **Teknik Geologi, vulkanologi di Indonesia**

Pada bagian pertama ini saya akan menyampaikan tentang keilmuan geologi terutama Teknik Geologi secara singkat. Geologi adalah ilmu yang mempelajari bumi, material pembentuknya, struktur material tersebut, dan proses-proses yang terjadi pada material tersebut. Geologi juga mempelajari proses pembentukan sumber daya geologi seperti mineral logam (emas, tembaga, dan yang sekarang sedang banyak dibicarakan adalah logam tanah jarang) maupun mineral industri, sumber daya energi seperti minyak dan gas bumi, batu bara dan panas bumi, serta sumber daya air. Selain sumber daya, geologi juga mempelajari dampak lingkungan yang terjadi baik dampak akibat proses alami berupa bencana geologi maupun dampak lingkungan akibat aktivitas manusia.

Di Indonesia, ilmu geologi berkembang sebagai salah satu bagian dari ilmu keteknikan yang dikenal dengan Teknik Geologi. Teknik Geologi adalah salah satu bidang keteknikan yang menerapkan ilmu geologi dan prinsip-prinsip teknik ke berbagai bidang seperti teknik sipil, pertambangan mineral, energi seperti minyak dan gas bumi, panas bumi, teknik lingkungan dan kebencanaan. Oleh karena itu, seorang insinyur geologi harus mempunyai kemampuan dan pengetahuan geologi yang kuat selain juga desain keteknikan untuk mendukung pekerjaannya.

Ilmu geologi sangat luas, maka banyak cabang keilmuannya yang berkembang karena fenomena alam yang telah terjadi kemudian membawa kita menemukan sumber daya maupun bahaya yang ditimbulkan oleh fenomena tersebut. Salah satu fenomena tersebut adalah keberadaan gunung api.

Gunung api pada awalnya lebih dikenal secara mistis karena kekuatan erupsi yang sangat besar dan menyimpan bahaya bagi manusia. Dengan perkembangan keilmuan di zaman modern ini diketahui bahwa gunung api membawa sumber daya yang bisa manusia manfaatkan untuk mencukupi hajat hidupnya.

Vulkanologi adalah studi ilmiah tentang gunung berapi. Istilah "vulkanologi" berasal dari kata Latin "*vulcan*", yang merupakan dewa api Romawi kuno. Vulkanologi telah berkembang menjadi multi disiplin. Vulkanologi dipelajari di berbagai cabang ilmu kebumiharian seperti geografi, geologi dan geofisika. Hingga pertengahan tahun 1970-an, vulkanologi pada dasarnya merupakan upaya deskriptif, yang ditujukan terutama pada geomorfologi bentang alam gunung berapi, geografi wilayah gunung berapi, dan kronologi erupsi.

Pada saat ini, vulkanologi sudah berkembang lebih luas sebagai vulkanologi modern. Ruang lingkup ilmu ini berkembang mulai dari pembentukan magma, pengangkutannya, dan proses di permukaan atau di permukaan dangkal yang diakibatkan oleh intrusi dan erupsinya. Vulkanologi modern bersifat sangat interdisipliner dan banyak memanfaatkan beragam subspecialisasi geosains (Sigurdsson, 2015). Selama beberapa dekade terakhir, vulkanologi telah berkembang pesat dari cabang spesialis ilmu pengetahuan alam yang didasarkan pada observasi dan deskripsi, menjadi bidang studi multidisiplin kuantitatif (Shroder dan Papale., 2015).

Seorang ahli vulkanologi bisa mempunyai latar belakang keilmuan yang berbeda-beda, salah satunya adalah latar belakang keilmuan geologi. Seorang ahli vulkano-geologi adalah ahli geologi yang mempelajari aktivitas erupsi dan pembentukan gunung berapi serta erupsinya saat ini dan masa lalu. Salah satu fokus utama penyelidikan adalah prediksi erupsi. Saat ini belum ada cara akurat

untuk melakukan hal ini, namun memprediksi erupsi, seperti memprediksi gempa bumi, dapat menyelamatkan banyak nyawa.

Vulkanologi modern melibatkan pemantauan gunung berapi menggunakan berbagai teknik seperti pengamatan seismik, pemantauan deformasi permukaan, pemantauan emisi gas, pemantauan perubahan suhu, dan pemantauan satelit. Selain diaplikasikan untuk mitigasi bencana, pemahaman tentang geologi gunung api bisa diterapkan dalam eksplorasi sumber daya bumi terkait sistem hidrotermal, salah satunya adalah sistem panas bumi.

## **Struktur Gunung api**

Struktur gunung api secara garis besar dibedakan menjadi bagian permukaan dan bagian bawah permukaan. Bagian gunung api yang muncul di permukaan disebut tubuh gunung api, sedangkan bagian bawah permukaan yang paling utama adalah dapur magma. Gunung api dibedakan dengan gunung karena keterdapatannya magma di dalam gunung api.

Tubuh gunung api yang kita lihat di permukaan adalah tumpukan material hasil erupsi gunung api. Pada umumnya gunung api yang masih aktif mempunyai bentuk kerucut, namun ada juga dalam bentuk cekungan besar (kaldera) yang menandakan bahwa gunung api tersebut sudah pernah erupsi dahsyat (seperti Kaldera Bromo Tengger, Kaldera Ijen di Jawa Timur; Kaldera Batur di Bali). Bentuk yang lain berupa area vulkanik dengan banyak kerucut-kerucut yang lebih kecil yang tersebar di sekitar tubuh gunung api utama, misalnya Gunung Lamongan di Jawa Timur dan Gunung Slamet di Jawa Tengah. Ada juga yang mempunyai bentuk seperti perisai, seperti gunung api di Hawaii.

Berbagai bentuk gunung api tersebut mencerminkan kondisi lempeng tektonik, cara gunung berapi tersebut meletus, dan jumlah erupsinya. Tataan tektonik mempengaruhi jenis magma yang terbentuk. Jenis magma akan mempengaruhi tipe erupsi yang terjadi. Bentuk lahan vulkanik terus berubah melalui interaksi antara proses konstruktif seperti erupsi dan intrusi, serta modifikasi akibat tektonik, iklim, dan erosi. Oleh karena itu, dengan mempelajari arsitektur, stratigrafi dan struktur gunung berapi akan menghasilkan informasi

penting mengenai sejarah erupsi dan proses yang terjadi di dalam gunung berapi, dan evolusi jenis magma.

Magma adalah lelehan batuan yang terdiri dari tiga fasa: padat, cair, dan uap. Padatan berbentuk kristal dan gas berupa gelembung yang tersuspensi dalam media lelehan silikat yang cair. Magma menjadi batuan karena membeku baik di permukaan bumi hasil dari erupsi gunung api, maupun di kedalaman (Rogers, 2015).

Magma pada umumnya dikelompokkan berdasarkan pada komposisi kimianya, terutama konsentrasi  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  dan  $\text{K}_2\text{O}$ . Setelah menjadi batuan, maka pengelompokan bisa dilakukan berdasarkan komposisi mineral penyusun batuan tersebut. Secara umum, magma dikelompokkan menjadi 3, yaitu magma basa/mafik memiliki  $\text{SiO}_2$  kurang dari 52%, *intermediate* memiliki  $\text{SiO}_2$  52 – 63%, dan asam/felsik memiliki  $\text{SiO}_2$  lebih besar dari 63%. Berdasarkan komposisi kimia/mineral penyusunnya, magma/batuan beku dikelompokkan menjadi magma basaltik, andesitik dan riolitik (Le Maitre., 2002).

Komposisi magma terutama konsentrasi  $\text{SiO}_2$  mempengaruhi sifat fisik magma seperti densitas, viskositas, dan temperatur. Sifat fisik magma ini mempengaruhi perilaku erupsi gunung api. Semakin tinggi konsentrasi  $\text{SiO}_2$ , magma akan mempunyai viskositas tinggi tetapi mempunyai densitas rendah. Magma yang mempunyai viskositas tinggi akan cenderung mempunyai erupsi eksplosif dibanding yang viskositas rendah.

Magma tersimpan di kedalaman tertentu di dalam kerak bumi yang disebut dengan dapur magma. Magma yang bergerak naik dari tempat pelelehan di mantel bumi pada umumnya mempunyai komposisi basalt. Dapur magma terbentuk sebagai persinggahan ketika magma sudah tidak mampu naik karena sudah kehilangan daya apungnya. Pada banyak kasus, kedalaman dapur magma bervariasi di kedalaman sekitar 4-6 km dari permukaan. Magma selama singgah di dapur magma akan mengalami proses diferensiasi, di mana komposisi magma berubah menjadi lebih kaya silika dengan densitas yang lebih ringan, sehingga memungkinkan untuk mempunyai daya apung

kembali untuk bisa bergerak naik menuju permukaan (Lockwood and Hazlett, 2010).

Proses lain yang terjadi di dalam dapur magma adalah pertukaran panas antara magma dengan batuan dinding dapur magma. Semakin lama magma berada di dalam dapur magma, jika tidak mendapatkan suplai magma baru, maka magma tersebut akan mengalami pendinginan dan membeku. Jika sudah membeku, maka magma tidak bisa lagi bergerak sehingga tidak terjadi erupsi. Erupsi akan terjadi jika dapur magma selalu mendapat imbuhan magma baru sehingga bisa mempertahankan anomali panas dan masih dalam kondisi fluida. Penambahan magma baru ini juga akan meningkatkan tekanan di dapur magma dan memicu magma bergerak naik menuju permukaan dan erupsi.

Keberadaan anomali panas yang bertahan lama inilah yang akan menjadi sumber panas pembentukan sistem hidrotermal. Sistem hidrotermal ini terbentuk pada kedalaman 2-3 km dari permukaan bumi. Pada gunung api aktif, sistem hidrotermal mungkin mendapat imbuhan gas magmatik.

Identifikasi tingkat dan kekuatan aktivitas hidrotermal pada gunung api penting untuk dilakukan karena: (1) sebagian besar kondisi *unrest* gunung berapi terjadi pada sistem hidrotermal, sehingga memahami interaksi sistem hidrotermal dan magmatik dapat digunakan untuk prakiraan aktivitas gunung api; (2) akumulasi tekanan hidrotermal dapat menyebabkan erupsi freatik secara tiba-tiba dan berpotensi mematikan (seperti yang terjadi di Ontake, Jepang, pada tahun 2014), (3) sistem hidrotermal pada kedalaman dangkal ini jika masih aktif dikenal sebagai sistem geotermal yang merupakan sumber energi, dan jika sudah mati bisa membentuk suatu deposit bijih logam yang dikenal sebagai sistem epitermal (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2017).

### **Bahaya gunung api dan jangkauannya**

Bahaya gunung api mempunyai dampak lokal maupun global. Aliran piroklastik adalah salah satu bahaya yang mematikan namun bersifat lokal, sedangkan abu vulkanik bisa menjangkau daerah yang

lebih jauh bahkan berpengaruh pada skala global. Walaupun sifatnya kurang mematikan, namun abu vulkanik bisa berdampak pada penerbangan dan menyebabkan kerugian ekonomi yang besar karena tertundanya penerbangan. Dengan pertimbangan bahwa sekitar 800 juta orang di seluruh dunia tinggal cukup dekat dengan gunung berapi aktif, sehingga sangat memungkinkan bagi banyak orang untuk terkena dampak besar dari aktivitas gunung api. Oleh karena itu, ancaman bahaya gunung berapi merupakan salah satu ancaman bahaya yang paling relevan di Bumi.

Gunung berapi mempunyai berbagai bahaya yang masing-masing harus dikenali untuk memitigasi dampaknya (Blong, 1984; Shroder dan Papale, 2015). Bahaya gunung berapi secara umum disebabkan karena aktivitas gunung api, terutama terkait dengan proses erupsi. Selain itu, bahaya gunung api bisa juga disebabkan karena proses non-erupsi, seperti adanya *sector collapse* yang dapat membentuk bahaya susulan berupa tsunami.

Erupsi gunung api sangat dipengaruhi oleh komposisi magma dan gaya tektonik yang bekerja di gunung api tersebut, sehingga akan menghasilkan bermacam-macam tipe dan kekuatan erupsi. Oleh karena itu, bahaya-bahaya yang mungkin terjadi memiliki karakteristik yang berbeda-beda di tiap-tiap gunung api. Gunung api bisa dikatakan sebagai individu yang unik, sehingga untuk mitigasi kita perlu mengenali karakter masing-masing gunung api.

Berikut ini adalah uraian singkat tentang jenis-jenis bahaya gunung berapi yang menimbulkan risiko bagi masyarakat beserta contoh-contoh yang menggambarkan dampaknya. Bahaya tersebut dikelompokkan sebagai bahaya primer, yaitu bahaya yang terkait dengan proses erupsi; dan bahaya sekunder atau tidak langsung, yaitu bahaya yang terkait dengan dampak ikutan bahaya primer tersebut atau proses non-erupsi. Berikut adalah bahaya gunung api yang disarikan dari Loughlin dkk., (2015).

### *Balistik*

Balistik adalah pecahan batuan yang dilontarkan oleh erupsi gunung berapi dengan lintasan seperti bola meriam. Balistik biasanya

berukuran > 6 cm hingga beberapa meter dengan bentuk meruncing maupun membulat. Balistik mempunyai jangkauan beberapa ratus meter hingga beberapa kilometer tergantung kekuatan erupsinya (Blong, 1984). Balistik ini mempunyai efek mematikan maupun cedera berat, di samping kerusakan struktural akibat benturan langsung. Balistik yang sangat panas juga dapat memicu kebakaran.

### *Tefra dan abu vulkanik*

Erupsi gunung api yang bersifat eksplosif melontarkan pecahan batuan ke atmosfer yang dikenal secara umum dengan istilah tefra. Pecahan batuan tersebut dihasilkan ketika magma atau batuan yang sudah ada sebelumnya hancur karena ledakan. Tefra yang berukuran halus disebut sebagai abu vulkanik (diameter <2 mm), terlontar ke atas secara konveksi dalam sebuah kolom erupsi, dan terbawa arah angin. Abu ini kemudian keluar dari suspensi sebagai hujan abu dan berpotensi berdampak pada masyarakat di ratusan bahkan ribuan kilometer persegi.

### *Aliran dan serukan piroklastik, erupsi terarah*

Erupsi gunung api yang bersifat eksplosif melontarkan material padat bercampur dengan gas dengan kekuatan yang besar, sehingga dapat melontarkan material sampai ketinggian beberapa sampai puluhan kilometer. Ketika energi lontaran yang menjaga kolom erupsi habis, maka kolom erupsi akan runtuh dan membentuk aliran dengan fluida pembawa berupa gas panas yang dikenal sebagai aliran piroklastik. Aliran ini lebih dikenal dengan aliran awan panas, atau di daerah sekitar G. Merapi dikenal dengan aliran *wedus gembel*. Aliran piroklastik juga bisa terbentuk ketika kubah lava runtuh. Aliran piroklastik biasanya mengalir terbatas pada lembah sungai.

Seruakan piroklastik merupakan awan turbulen yang lebih encer dapat melampaui lembah sehingga menyebar luas ke seluruh lanskap. Aliran dan serukan piroklastik ini disebut sebagai arus densitas piroklastik (*Pyroclastic Density Current*) yang mengalir dengan kecepatan yang sangat tinggi (dalam beberapa kasus lebih dari 100 m/detik) (Jenkins dkk., 2013). Selain kecepatan alirannya yang

tinggi, aliran piroklastik mempunyai suhu tinggi. Suhu aliran piroklastik ini sangat berbahaya dan sulit untuk diukur secara langsung, sehingga suhu aliran piroklastik ini diduga berdasarkan titik leleh material yang terkena dampak. Pendugaan suhu bisa juga dilakukan menggunakan reflektan arang yang ditemukan dalam endapan aliran piroklastik, seperti yang dilakukan oleh Harijoko dkk., 2016 pada arang yang diambil dari Gunung Sindoro menghasilkan suhu aliran piroklastik sekitar 400°C.

### *Lahar dan banjir*

Lahar dan banjir merupakan salah satu penyebab utama hilangnya nyawa akibat erupsi gunung api, yang menyumbang 15% dari seluruh korban jiwa dalam sejarah (Auker et al., 2013). Lahar (dalam bahasa Indonesia) adalah campuran puing-puing vulkanik dan air yang bergerak cepat, kadang-kadang disebut sebagai semburan lumpur vulkanik. Ada banyak penyebab terjadinya lahar, namun umumnya terjadi ketika hujan deras menggerakkan endapan vulkanik lepas yang terbentuk selama erupsi. Lahar dapat bertahan dan terus mengancam suatu wilayah selama bertahun-tahun atau bahkan puluhan tahun setelah erupsi jika terdapat ketebalan abu yang tidak terkonsolidasi secara signifikan, seperti yang terjadi setelah erupsi gunung berapi Pinatubo di Filipina pada tahun 1991.

### *Debris avalanches, longsor, dan tsunami*

Tubuh gunung api merupakan pegunungan dengan sisi curam, dibangun dari endapan vulkanik yang belum terkonsolidasi dengan baik, dan batuan yang mengalami alterasi hidrotermal. Oleh karena itu, tubuh gunung api rentan terhadap ketidakstabilan (Siebert, 1984; Voight, 2000). Kondisi ini menyebabkan sering terjadi tanah longsor di gunung api, baik yang sedang aktif maupun yang sudah tidak aktif. *Debris avalanche* adalah aliran puing-puing batuan yang sangat besar dan sangat mudah bergerak yang terbentuk selama runtuhnya bangunan gunung berapi, dan umumnya berhubungan dengan erupsi gunung berapi atau intrusi magmatik.

Longsor dan aliran piroklastik yang terjadi di gunung api pesisir dapat menimbulkan tsunami ketika memasuki laut (Siebert, 1984). Pada tahun 1792, longsor dari Gunung Unzen, Jepang, menyebabkan tsunami dengan lebih dari 14.500 korban jiwa. Sebagian besar dari 36.000 korban jiwa yang dilaporkan selama erupsi Krakatau tahun 1883 disebabkan oleh tsunami mematikan yang dihasilkan oleh aliran piroklastik yang memasuki laut (Mandeville dkk., 1996). Longsor di Gunung Anak Krakatau kembali terjadi di penghujung tahun 2018 menimbulkan tsunami dan memakan banyak korban jiwa.

### *Gas vulkanik*

Gas vulkanik dapat secara langsung menyebabkan kematian, dampak kesehatan, dan kerusakan pada vegetasi, ternak, infrastruktur, dan properti. Meskipun gas vulkanik utama adalah uap air (60-99%), terdapat banyak jenis gas vulkanik lainnya, termasuk karbon dioksida (hingga 10%), sulfur dioksida dan gas sulfur lainnya (hingga 15%), halogen (termasuk fluor dan klor, hingga 5%), berbagai logam seperti merkuri dan timbal (dalam jumlah kecil), serta sejumlah kecil karbon monoksida.

Pada tahun 1979, erupsi berupa pelepasan gas CO<sub>2</sub> dari kawah Sinila di Dieng merenggut korban jiwa dalam jumlah banyak. Erupsi gas kembali terjadi di kompleks gunung api Dieng di tahun 2011, yang berasal dari kawah Sitimbang. Gas belerang, terutama belerang dioksida, bersifat racun dalam konsentrasi tinggi dan diubah di atmosfer menjadi partikel sulfat, yang merupakan penyebab utama polusi udara (Schmidt et al., 2011).

### *Lava*

Aliran lava biasanya mengalir cukup lambat sehingga manusia dan hewan dapat melakukan evakuasi mandiri. Namun infrastruktur yang berada di jalur aliran lava akan rusak atau hancur, termasuk bangunan, tumbuh-tumbuhan.

## Energi panas bumi

Energi panas bumi adalah energi panas yang tersimpan di bawah permukaan bumi (Arnorsson dkk., 2015). Energi ini terbentuk di dalam sistem panas bumi yang terdiri dari batuan reservoir, air sebagai media pembawa panas, dan sumber panas. Ada 5 tipe sistem panas bumi: sistem magmatik muda (Yung Igneous System) yang pada umumnya berupa gunung api Kuarter dan intrusi magma, sistem tektonik terkait dengan sesar regional, sistem cekungan sedimen, *hot dry rock* dan tubuh magma (Goff dan Janik, 2000).

Sistem panas bumi yang dimanfaatkan untuk pembangkit listrik pada umumnya adalah sistem panas bumi yang mempunyai suhu reservoir di atas 225°C. Dengan pengembangan teknologi pembangkit listrik siklus biner, pembangkitan listrik bisa dilakukan dengan air panas bumi dengan suhu lebih rendah, yaitu sekitar 170°C. Di Indonesia, pengembangan energi panas bumi masih dominan memanfaatkan sistem panas bumi suhu tinggi untuk pembangkit listrik. Sistem panas bumi suhu tinggi pada umumnya terbentuk di daerah dengan anomali suhu tinggi. Daerah tersebut adalah daerah yang mempunyai aktivitas magmatik yang ditandai dengan kemunculan gunung api. Indonesia, yang kaya gunung api, mempunyai potensi energi panas bumi terbesar di dunia, yaitu sebesar 23 GW (Direktorat Jenderal EBTKE Kementerian ESDM, 2022).

Potensi panas bumi sebesar 23 GW tersebar di hampir seluruh pulau utama Indonesia, terutama pulau-pulau yang mempunyai gunung api seperti Sumatra, Jawa, Bali hingga Flores, serta di daerah Halmahera dan bagian ujung utara dari Lengan Utara pulau Sulawesi. Energi panas bumi digolongkan sebagai energi bersih karena dalam membangkitkan listrik menghasilkan emisi gas CO<sub>2</sub> yang jauh lebih kecil dibanding dengan pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil. Oleh karena itu, energi panas bumi menjadi solusi dalam pemenuhan energi bersih sesuai dengan program Pemerintah RI dalam pengurangan emisi gas rumah kaca hingga 29 persen pada tahun 2030 dan mencapai *net zero emission* pada tahun 2060.

Untuk mencapai target tersebut, pemerintah bersama dengan BUMN dan swasta bekerja keras untuk menambah kapasitas pembangkit listrik dari sumber energi panas bumi. Pemerintah menargetkan pengembangan energi panas bumi dioptimalkan hingga 22 GW dari total sumber daya panas bumi sebesar 23 GW. Saat ini, kapasitas pembangkit listrik tenaga panas bumi terpasang baru mencapai 2.4 GW (~10%). Sekitar 85% (2.021 MW) kapasitas terpasang disumbangkan oleh proyek-proyek Badan Usaha Milik Negara (PT PGE, PT PLN dan PT GDE), di mana saat ini PT Pertamina Geothermal Energy merupakan perusahaan panas bumi terbesar.

Dengan rencana pengembangan energi panas bumi yang masif, maka geologi sangat berperan di dalam tahap eksplorasi terutama pemahaman vulkanologi karena gunung api adalah rumah bagi sistem panas bumi suhu tinggi.

## **Kontribusi vulkanologi dalam penurunan risiko bencana gunung api**

*Hadirin yang saya muliakan*

Tujuan utama dalam mitigasi bencana adalah mengurangi risiko bencana. Mengacu ke Sendai Framework dalam pengurangan risiko bencana, ada tiga hal yang harus dipahami dalam pengurangan risiko bencana, yaitu: paparan terhadap bahaya, kerentanan dan kapasitas, serta karakteristik bahaya. Dengan mempelajari vulkanologi akan meningkatkan pemahaman terhadap karakteristik dan paparan terhadap bahaya gunung api. Sedangkan kapasitas dan kerentanan masyarakat dalam menghadapi bahaya bisa ditingkatkan dengan pelatihan.

Sebagian besar gunung berapi tidak terus-menerus aktif, tetapi menghabiskan sebagian besar masa hidupnya dalam keadaan dormansi atau tidur, terkadang selama ribuan tahun sebelum meletus lagi. Sebelum terjadi erupsi, pada umumnya gunung api memberi tanda kenaikan aktivitas berupa gempa bumi vulkanik di bawah gunung berapi yang disebabkan pergerakan magma, emisi gas ke atmosfer atau akuifer, dan deformasi permukaan tanah.

Namun, tanda-tanda kenaikan aktivitas gunung berapi tersebut tidak selalu berlanjut menjadi erupsi. Demikian pula beberapa erupsi terjadi tanpa adanya kenaikan aktivitas pendahuluan yang dapat dideteksi dengan metode yang ada saat ini. Banyak kasus di mana kita masih belum tahu bagaimana menafsirkan tanda-tanda kenaikan aktivitas pada suatu gunung api dengan jelas, terutama jika tidak mengetahui perilaku erupsi gunung api tersebut. Kita bisa mengetahui aktivitas yang merupakan penanda awal terjadinya erupsi jika memahami perilaku erupsi gunung api tersebut. Karena perilaku erupsi tiap gunung api itu unik, maka penting untuk memahami perilaku dari tiap-tiap gunung api.

Erupsi pada umumnya dimulai ketika magma bergerak naik dari dapur magma, baik melalui konduit lama atau membuka jalan baru melalui proses terobosan. Pada gunung api yang sedang istirahat, umumnya erupsi dimulai ketika terjadi kenaikan tekanan pada dapur magma. Kenaikan ini disebabkan karena adanya penambahan magma baru dari tempat pembentukan magma, atau terjadi perubahan pada *volatile budget*. Perubahan tekanan di dapur magma ini memerlukan waktu dalam hitungan tahun, dekade, atau bahkan abad untuk menginisiasi erupsi (Druitt dkk, 2012). Namun tanda kenaikan aktivitas yang mendahului erupsi mungkin muncul dalam hitungan jam sampai tahun.

### *Hadirin yang saya hormati*

Tantangan terbesar dalam mitigasi bencana gunung api yaituantisipasi kapan erupsi akan dimulai, bagaimana erupsi akan berkembang seiring berjalannya waktu, dan kapan serta mengapa erupsi akan berakhir. Jawaban pertanyaan tersebut bisa didekati dengan melakukan penelitian perilaku erupsi masa lalu dan masa kini. Pemahaman ini kemudian digunakan untuk membuat prakiraan erupsi jangka panjang maupun jangka pendek.

Prakiraan jangka panjang dilakukan dengan menggunakan data geologi gunung api yang diperoleh dengan mempelajari endapan

produk erupsi, sedangkan prakiraan jangka pendek dilakukan berdasarkan data pemantauan aktivitas saat ini.

Perilaku erupsi masa lalu sudah tidak bisa disaksikan lagi, namun masih bisa dipahami dengan mempelajari endapan produk erupsi. Dengan mempelajari stratigrafi maka kita bisa mengungkap jumlah dan tipe erupsi yang pernah terjadi dan juga jangka waktu perulangannya dan panjang waktu istirahat gunung api tersebut (Harijoko dkk., 2021).

Selain itu dengan mengidentifikasi sebaran dan ketebalan endapan kita bisa menghitung volume material erupsi dan juga area terdampak erupsi masa lalu (Newhall and Self, 1982; Harijoko dkk., 2024). Volume material hasil erupsi inilah yang digunakan untuk menentukan ukuran erupsi.

Penelitian terkait proses erupsi yang terjadi di dapur magma bisa dipahami dengan meneliti material atau fragmen batuan hasil erupsi. Penelitian terkait dengan *micro texture* seperti *crystal size distribution*, *bubble size distribution* (Toramaru, 1990; Suhendro dkk., 2022; Bunga-Naen dkk., 2023) membantu kita dalam memahami proses di dalam dapur magma dan di konduit ketika terjadi erupsi.

Endapan hasil erupsi gunung api memungkinkan kita untuk memahami perubahan komposisi magma dan tipe erupsi yang terjadi pada gunung api tersebut. Bahaya gunung api pada umumnya dikaitkan dengan proses erupsi. Akan tetapi, bahkan dalam keadaan diam, gunung berapi merupakan bentang alam yang tidak stabil, rentan terhadap erosi dan keruntuhan yang cepat. Sehingga bahaya gunung api dapat terjadi bahkan tanpa adanya erupsi.

## **Pengembangan energi panas bumi**

Pengembangan suatu area panas bumi mempunyai risiko tertinggi, salah satunya adalah kepastian sumber daya. Sebelum dilakukan pemboran, status sumber daya di suatu area prospek panas bumi masih digolongkan sebagai sumber daya terukur. Status sumber daya akan meningkat menjadi sumber daya terbukti, jika pemboran sudah dilakukan dan berhasil membuktikan keberadaan reservoir panas bumi.

Analisis statistika yang dilakukan oleh Sanyal dkk., (2011) mengungkapkan bahwa berdasarkan kapasitasnya, sumur produksi panas bumi di Indonesia dikelompokkan menjadi 4, yaitu: kelompok 1 dengan kapasitas 3 – 5 MW, kelompok 2 dengan kapasitas 7 – 9 MW, kelompok 3 dengan kapasitas 15 – 19 MW, dan kelompok 4 dengan kapasitas >27 MW. Kelompok 2 merupakan tipikal sumur yang ada di Indonesia, sedangkan sumur dengan kapasitas < 3 MW dianggap gagal. Faktor lain yang menghambat pertumbuhan pengembangan panas bumi adalah harga yang dipatok oleh pemerintah. Menurut Peraturan Presiden Nomor 112 tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik, harga patokan tertinggi untuk kapasitas 10 MW adalah 9,76 senUSD/kWh x F (lokasi) pada tahun pertama sampai ke-10. Sementara harga tahun ke-11 sampai ke-30 mencapai 8,30 senUSD/kWh. Untuk kapasitas 10 - 50 MW, harga patokan tertinggi adalah 9,41 senUSD/kWh x F di tahun pertama sampai ke-10, kemudian tahun ke-11 sampai ke-30 menjadi 8,00 senUSD/kWh. Bagi pengembang, harga yang ditawarkan pemerintah ini merupakan tantangan untuk bisa menurunkan besaran Biaya Penyediaan Dasar Listrik.

Pembiayaan pengembangan area panas bumi secara garis besar dibagi menjadi 2 bagian, yaitu pembangunan pembangkit (*power plant*) dan sumber daya dengan porsi pembiayaan masing-masing 60 % dan 40% dari total biaya. Porsi terbesar dari pembuktian sumber daya adalah untuk pembiayaan pemboran, sedangkan sisanya adalah untuk survei G5 yang meliputi geologi, geofisika, geokimia, *geohazards*, dan geoteknik. Porsi pembiayaan survei G5 tergolong kecil, namun risiko kepastiannya sampai ini belum bisa diukur karena ketidakpastian alam. Keberhasilan dalam survei G5 ini sangat berarti karena data yang dihasilkan akan menentukan keberhasilan pemboran yang memakan pembiayaan sangat besar.

Rata-rata tingkat keberhasilan pengeboran dan kapasitas sumur di Indonesia menunjukkan efek “kurva pembelajaran” yang jelas; tingkat keberhasilan dan kapasitas sumur cenderung meningkat seiring dengan jumlah sumur yang dibor. Sumur panas bumi di Indonesia sebagian besar pada kedalaman 1.000 hingga 2.800 m dan tingkat

keberhasilan pengeboran berkisar antara 63% hingga 73%. Angka tingkat keberhasilan ini juga umum terjadi di sebagian besar negara.

Biaya per MW kapasitas sumur di Indonesia secara statistik lebih kecil dibandingkan yang terlihat di banyak negara. Perkiraan biaya pemboran yang paling mungkin adalah berkisar antara US\$300.000 hingga US\$400.000 per MW (Sanyal dkk., 2011). Dengan mempertimbangkan harga pemboran tersebut, maka tingkat kesuksesan pemboran bisa menurunkan besaran Biaya Penyediaan Dasar Listrik secara signifikan. Oleh karena itu, data survei geologi, geofisika dan geokimia sangat penting untuk mendukung keberhasilan pemboran.

Salah satu komponen penting pembentuk sistem panas bumi adalah sumber panas. Dalam sistem panas bumi suhu tinggi, yang sampai saat ini merupakan sumber daya utama untuk pembangkit listrik, sumber panas adalah magma baik berupa batuan intrusi atau dapur magma. Oleh karena itu, sistem panas bumi suhu tinggi selalu berada di lingkungan vulkanik. Gunung api adalah rumah sistem panas bumi. Pada umumnya, batuan reservoir panas bumi adalah batuan vulkanik. Pemahaman tentang sistem gunung api akan membantu dalam eksplorasi panas bumi. Oleh karena itu, eksplorasi panas bumi yang efisien di daerah vulkanik harus didasarkan pada pemetaan geologi, geokronologi, dan petrologi yang bersama-sama menentukan karakteristik Komposisi Volume Ruang-Waktu (TSVC) dari batuan vulkanik muda (Muffler and Duffield, 1995).

Penentuan umur gunung api yang potensial menjadi sumber panas sangat penting karena magma di dapur magma akan mengalami pendinginan. Anomali panas suatu dapur magma bertahan pada kisaran  $10^5 - 10^6$  tahun untuk gunung api tipe strato. Sehingga gunung api yang optimal untuk membentuk sistem panas bumi mestinya berumur kurang dari 1 juta tahun. Beberapa laporan umur gunung api terkait sistem panas bumi yang sudah dikembangkan di Indonesia berkisar 0,3-0,4 juta tahun seperti di G. Salak (Stimac dkk., 2008) dan Dieng (Harijoko dkk., 2016).

Studi petrogenesis pada kompleks gunung api Dieng menunjukkan bahwa dapur magma bukanlah satu ruangan besar yang terisi oleh magma, melainkan terdiri dari beberapa dapur magma kecil,

sehingga peranan mereka sebagai sumber panas sistem panas bumi yang ada di daerah tersebut bisa diinterpretasi (Harijoko dkk., 2016). Studi lebih lanjut dengan mempelajari geothermobarometri berdasarkan komposisi kimia mineral dapat menginterpretasi kedalaman dan suhu dapur magma, yang selanjutnya bisa digunakan untuk menggambarkan sistem saluran magma. Sementara batuan yang potensial menjadi batuan reservoir panas bumi bisa dipelajari dengan konsep stratigrafi batuan vulkanik.

## **Penutup**

Gunung api mempunyai dampak bencana yang hebat, namun dibalik ancaman bahaya tersebut terdapat sumber daya alam yang bisa dimanfaatkan untuk kesejahteraan masyarakat.

Untuk memitigasi bahaya gunung api, penelitian geologi gunung api akan berkontribusi dalam memahami perilaku erupsi masa lalu, sedangkan pemantauan gunung api membantu memahami perilaku erupsi masa kini. Pemahaman perilaku ini yang akan digunakan dalam melakukan prakiraan erupsi.

Dengan mempelajari gunung api juga bisa digunakan untuk membantu eksplorasi panas bumi, terutama dalam menilai potensi sumber panas yang membentuk sistem panas bumi. Penelitian stratigrafi vulkanik membantu memperkirakan potensi batuan reservoir. Dengan penelitian vulkanologi yang digabung dengan survei geologi diharapkan akan dapat menurunkan risiko eksplorasi dan mengurangi biaya penyediaan listrik. Sehingga pengembang panas bumi masih bisa mendapat keuntungan yang menarik dari harga jual yang ditawarkan pemerintah.

*Hadirin yang saya muliakan dan saya hormati*

Sebagai akhir kata, perkenankan saya mengucapkan syukur Alhamdulillah ke hadirat Allah Swt atas rahmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat mencapai jabatan Guru Besar pada Fakultas Teknik UGM, dan atas karunia kesehatan sehingga hari ini saya bisa menyampaikan pidato pengukuhan Guru Besar. Semoga saya diberi

kekuatan untuk memegang amanah dalam jabatan baru ini, mampu berbagi ilmu yang saya miliki walaupun sedikit dan bisa berdampak lebih luas.

Penyusunan naskah pidato ini, membuat saya lebih merasakan bahwa capaian dan pengetahuan saya di bidang ilmu Teknik Geologi ini bagaikan buih di lautan. Sehingga terasa bahwa capaian ini adalah kehendak Gusti Allah Swt, yang telah mengatur sehingga saya bertemu dengan orang-orang mulia dan hebat yang telah mendidik saya dari kecil, serta para sahabat budiman yang telah mengulurkan tangan beserta pemikiran untuk menolong saya dalam perjalanan hidup saya sampai hari ini. Pada kesempatan ini saya mohon izin untuk mengucapkan penghargaan dan terima kasih kepada berbagai pihak berikut ini.

Rektor dan Senat Akademik Universitas Gadjah Mada, Dekan dan Senat Fakultas Teknik, Ketua dan pengurus Departemen Teknik Geologi FT UGM beserta seluruh unsur pimpinan dan/atau anggota di dalamnya, yang telah membantu mengusulkan, mendampingi, dan menyetujui usulan saya sebagai Guru Besar dalam bidang Vulkanologi. Selanjutnya, saya ucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada guru-guru di SD Negeri Ngandang, Kec. Sale, Kab. Rembang dan SD Negeri Wulung 1 Randublatung, Kab Blora; SMP Negeri Randublatung, SMP Negeri 9 Semarang dan SMA Negeri 2 Semarang. Saya mohon maaf karena tidak mampu menyebut semuanya satu persatu. Saya berbahagia karena salah satu guru SMA saya Ibu Kustiyati bisa rawuh di ruangan ini untuk mengikuti prosesi pengukuhan saya.

Penghargaan tiada henti dan ucapan syukur terima kasih yang setinggi-tingginya saya haturkan kepada guru guru saya di Departemen Teknik Geologi FT UGM. Melalui beliau lah pengetahuan tentang ilmu geologi saya peroleh ketika menempuh jenjang pendidikan S1, baik yang sudah mendahului kita ditimbali Gusti Allah: alm. Ir. Aryono Suwarno, Alm. Ir. Mulyadi., alm. Ir. Almuhran Kaderie, alm. Ir. Sudarno SU., alm. Ir. Bambang Wijaya Hariadi, maupun yang sudah purna tugas (Ir. Soekardi, Ir. Wartono Rahardjo, Ir. Marno Datun, Ir. Suharyadi, M.S., Ir. Soetoto, S.U., Ir. Widiasmoro, M.T., Ir Djabar

Soepomo Ir. Sugeng Wiyono, M.S., Ir. Budianto Toha, M.Sc, Ir. Djoko Wintolo, DEA dan Prof. Dr. Ir. Subagyo Pramumijoyo, DEA) dan yang masih aktif (Prof. Heru Hendrayana, Dr. Jarot Setyowiyoto, Prof, Dwikorita Karnawati, Dr. Anastasia Dewi Titisari, dan Dr. Pri Utami). Pemahaman dan ketertarikan di bidang vulkanologi saya peroleh dari Alm. Pak Bambang Wijaya ketika menjadi pembimbing tugas akhir Tipe 2B pemetaan geologi di daerah Suruh Kabupaten Semarang di mana batuanannya merupakan produk erupsi gunung api. Sedangkan untuk pemahaman stratigrafi saya mendapat bimbingan dari Pak Ton sebagai dosen pembimbing tugas Tipe 2A, menerapkan konsep rantai Markov di dalam analisis stratigrafi.

Pemahaman geologi yang saya peroleh sangat bermanfaat ketika saya mendapatkan kesempatan belajar tentang Geothermal Energy Technology di Geothermal Institute, University of Auckland NZ. Belajar tentang panas bumi di NZ membuka jalan saya lebih lebar untuk belajar sumber daya alam terkait gunung api. Saya mengucapkan terima kasih kepada para guru di Geothermal Institute: Prof Manfred Hochstein, Prof. P.R.L Browne, Dr. Stuart Simmons, Dr. Supriyadi Sungkono. Saya bisa belajar di NZ tidak lepas dari budi baik pemerintah NZ yang telah memberi beasiswa penuh. Terima kasih dan penghargaan tertinggi juga saya haturkan kepada Prof Ryuichi Itoi yang telah memperkenalkan saya sehingga bertemu dengan pembimbing di Kyushu University. Kemudian para pembimbing S2 saya dari Kyushu University, Prof Eiji Izawa dan Prof. Koichiro Watanabe, serta Prof Akira Imai yang telah membimbing saya pada saat studi tingkat S3 juga di Kyushu University Jepang. Terima kasih juga saya sampaikan kepada pemerintah Jepang yang telah membiayai studi saya pada jenjang S2-S3 dengan beasiswa Monbusho. Kolaborasi dengan Prof Watanabe berlanjut ketika Departemen Teknik Geologi menjadi Host Institution dalam program AUN Seed Net 2003 – 2018 dan di antara waktu tersebut beliau menjadi host Professor saya pada program Hitachi Fellowship tahun 2013. Melalui Prof Watanabe selanjutnya maka saya bisa mendapatkan jejaring penelitian dengan Prof Sachihoro Taguchi, Prof. Okuno dari Fukuoka University, Prof. Hasenaka dari Kumamoto University; Prof. Toramaru dari Kyushu University. Saya

juga mengucapkan terimakasih kepada Bp. Ir. Adi Maryono MSc. Atas segala dukungannya.

Terima kasih yang tulus juga saya sampaikan kepada teman-teman SD, SMP, SMA dan Teknik Geologi UGM lintas angkatan, Alumni Geothermal Institute the University of Auckland, Alumni Kyushu University.

Saya mengucapkan terima kasih kepada kolega di Departemen Teknik Geologi FT UGM, khususnya Prof. Ferian Anggara dan Dr. Haryo Edi Wibowo yang telah bersama-sama mengelola Lab. Geokimia, sehingga banyak penelitian, pembimbingan maupun pengabdian masyarakat bisa kita kerjakan bersama-sama. Terima kasih dukungan Prof Himawan Tri Bayu Murti Petrus, dengan ide segar beliau maka kita bisa mendapatkan Hibah internasional Bilateral JSPS-Dikti, dan mendaftar Paten. Penelitian dan pengabdian kepada masyarakat dengan pembiayaan dari berbagai sumber terutama dengan hibah PUPT Dikti berhasil kami raih atas kerjasama Dr. Nugroho Imam Setiawan, dan Dr. Esti Handini. Terima kasih juga kepada Dr. Pri Utami, Dr. Agung Setianto, Dr. Salahudin, Dr. Moch. Nukman, Dr. Gayatri Indah Marliyani atas kerjasama yang telah diberikan dalam kegiatan terkait dengan industri.

Saya menghaturkan terima kasih kepada teman teman di Pusat Studi Bencana Alam (PSBA) UGM atas pengalaman berinteraksi dan memahami manajemen bencana, Prof. Jati Mardiyatno, Dr.Sc. Andung Bayu Sekaranom, S.Si., M.Sc., Dr. Ngadisih, Dr. Anggri Setiawan, Bu Rini, mas Jangka, mbak Mayang, Pak Wal. Selain teman teman di PSBA saya juga mengaturkan banyak terima kasih kepada segenap staff dan tenaga ahli di Pusat Studi Energi: Prof. Sarjiya, Ardyanto Fitrady, Ph.D, Prof Deendarlianto, Prof Tumiran, Prof. Indarto, Prof Bambang Riyanto, Prof. Marsudi Triatmojo, Dr. Khasani, Dr. Johan Syafri, Dr. Agustina Merdekawati, Dr. Irine Handika, Dr. Sito Ismanti. Ucapan terima kasih saya haturkan kepada Prof. Dr. Joko Sujono dan Prof. Dr. Sugeng Sapto Surjono yang telah mereview dan memberi masukan terhadap naskah ini.

Penghargaan dan rasa terima kasih juga saya sampaikan kepada manajemen PT. Pertamina Geothermal Energy, PT. Geo Dipa Energy,

PT. Hitay, PT. Medco Cahaya, PT. Supreme Energy, PT. PLN, PT. Star Energy atas kerja sama dan kepercayaan yang diberikan kepada kami sehingga memberikan pengalaman pengembangan energi panas bumi. Kepada seluruh staf Kependidikan Departemen Teknik Geologi yang telah membantu semua proses administrasi kepegawaian dan membantu dalam melaksanakan tugas sehari hari saya yang dikoordinasi: mbak Suci Dandi Pertiwi, S.Fil, MSc., mas Pentatok Kuncoro ST., MSc., mbak Muslikah Kurniawati S.E.

Terima kasih banyak kepada asisten bidang pendidikan maupun penelitian, mahasiswa bimbingan maupun mahasiswa dan anak didik pada umumnya telah membantu banyak dalam pencapaian ini dan kerjasama yang telah diberikan setelah berkarir. Semoga Gusti Allah menganugerahkan kesuksesan dan kesehatan pada kalian semua saat ini dan masa yang akan datang.

*Hadirin yang mulia,*

Ijinkan saya mempersembahkan anugrah dan amanah sebagai guru besar ini kepada orang tua saya alm. Bapak Djoemari Doelnjono dan alm. Ibu Siti Aminah yang telah membesarkan dan mendidik saya dengan segenap kasih sayang, tanggung jawab dan visi pentingnya pendidikan bagi putranya. Hal terbesar adalah doa yang Bapak dan Ibu panjatkan siang malam untuk keselamatan dan keberhasilan kami putra-putranya. Demikian juga kepada bapak ibu mertua, alm. Bapak Soegito Atmohoetomo dan alm. Ibu Moertini Imanboechari yang senantiasa memberikan dukungan dan doa terbaiknya sejak saya menjadi bagian dari kehidupan beliau.

Terima kasih juga saya haturkan kepada saudara saudara saya yang telah tumbuh bersama dan banyak bantuan yang telah saya terima, Mas A.S.E. Wahyu Widodo, Mbak Enung Rina Haruniany, Mas Gondo Puspito, Mbak Dita Anggerina Pramesti, alm. Mas Setiadi Aryanto, Mbak Tjioe Lie In, Mas Doni Wisnu Barata, Mbak Nurita Aqsowati, Mbak Dina Saktyari Welastimur, alm. Mas Aris Munandar, Mbak Detty Juanita Damayanti, Kukuh Prasetyo, Kusti Yuliani, Mas Arifin dan Mbak Wiwik beserta keluarga. Rasa terima kasih juga saya haturkan

kepada keluarga besar simbah Pawiro Sastra, keluarga besar simbah Soekamto, khususnya paklik, bulik, yang menjadi pengganti orang tua kami, serta adik adik dan keponakan semuanya. Ucapan terimakasih mendalam juga saya haturkan kepada segenap keluarga besar Atmohoetomo dan keluarga besar Notohadisuryo.

Kepada isteri saya tercinta Diananta Pramitasari dan anak-anak terkasih Lintang Sekaringati dan Gilang Bagaskoro, terima kasih atas kasih sayang, dukungan dan pengorbanannya. Semoga Allah selalu meridhoi dan memberikan hidayah-Nya untuk masa depan yang terbaik bagi anak-anak kami, agar berguna bagi sesama.

Kepada hadirin sekalian, baik yang berada di ruang Balai Senat Universitas Gadjah Mada, maupun yang mengikuti secara daring via YouTube di manapun berada. saya mengucapkan terima kasih atas kehadiran, keikhlasan dan kesabarannya untuk mengikuti acara pidato pengukuhan guru besar ini.

*Wassalamu'alaikum Warahmatullaahi Wa Barakaatuh.*

## DAFTAR PUSTAKA

- Arnorrsson, S., Thorhallsson, S., Stefansson, A. (2015). *Utilization of Geothermal Resources*. Dalam H. Sigurdsson (ed), *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition). Elsevier, p. 1235-1252
- Auker, M.R., Sparks, R.S.J., Siebert, L. et al. (2013). *A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record*. *Journal of Applied Volcanology* 2, 2. <https://doi.org/10.1186/2191-5040-2-2>
- Badan Geologi. (2011). *Data Dasar Gunung api Indonesia, edisi kedua*. Bandung: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia
- Blong, R.J. (1984). *Volcanic Hazard: A Sourcebook on the Effects of Eruptions*. Academic Press.
- Bunga Naen, G.B.R., Toramaru, A., Juhri, S., Yonezu, K., Wibowo, H.E., Gunawan, R.M.P.P., Disando, P. (2023). *Distinct pumice populations in the 74 ka Youngest Toba Tuff: Evidence for eruptions from multiple magma chambers*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 437, 107804. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107804>
- Cahyani, S. M., Wibowo, H.E, Muktikanana, M.L.A., Harijoko, A., Kristianto. (2022). *Estimation of Volume and Column Height from Pumiceous Tephra-Fall Deposits of Mt. Raung, East Java, Indonesia*. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1071, 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1071/1/012015>
- Cotrell, E. (2015). *Global Distribution of Active Volcanoes*. Dalam J.F. Shroder dan P. Papale. (ed.) *Hazard and Disaster Series: Volcanic Hazard, Risks, and Disaster*. Elsevier, p. 1-16. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00001-0>
- Direktorat Jenderal EBTKE Kementerian ESDM. 2022. *Laporan Kinerja Ditjen EBTKE Tahun 2022*. Diakses dari <https://ebtke.esdm.go.id/post/2023/05/05/3473/laporan.kinerja.ditjen.ebtke.tahun.2022>

- Druitt, T., Costa, F., Deloule, E., Dungan, M., Scaillet, B. (2012). *Decadal to monthly timescales of magma transfer and reservoir growth at a caldera volcano*. *Nature* 482, 77–80. <https://doi.org/10.1038/nature10706>
- Goff, F., & Janik, C. J. (2000). *Geothermal systems*. Dalam H. Sigurdsson (ed), *The Encyclopedia of Volcanoes* (First Edition). Academic Press, p. 817-834
- Hamilton, W. B. (1979). *Tectonics of the Indonesian Region*. Professional Paper 1078, U. S. Geol. Surv., Washington, DC, 345p
- Harijoko, A., Mariska, N.A.S, Anggara, F. (2016). *Estimated emplacement temperature for a pyroclastic deposits from the Sundoro Volcano, Indonesia, using charcoal reflectance analysis*. *Indonesian Journal of Geoscience* 5 (1), p. 1-11. <https://doi.org/10.17014/ijog.5.1.1-11>
- Harijoko, A., Uruma, R., Wibowo, H.E., Setijadji, L.D., Imai, A., Yonezu, K., Watanabe, K. (2016). *Geochronology and magmatic evolution of the Dieng Volcanic Complex, Central Java, Indonesia and their relationships to geothermal resources*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 310, 209-224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.12.010>
- Harijoko, A., Sari, S.A., Wibowo, H. E., Setiawan, N.I., Muktikanana, M.L.A. (2021) *Stratigraphy, chronology, and magma evolution of Holocene volcanic products from Mt. Slamet deposited in the Guci Valley, Central Java, Indonesia*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 418, 107341. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107341>
- Harijoko, A., Cahyani, S.M., Muktikanana, M.L.A., Wibowo, H.E., Sari, S.H.P. (2023). *Volume Estimation of the Thickest Scoriaceous Tephra-Fall Deposits on the South-Southeastern Flank of Mt. Raung*. *Journal of Applied Geology* 8 (2)
- Jenkins, S., Komorowski, J.C., Baxter, P.J., Spence, R., Picquout, A., Lavigne, F., Suroño. (2013). *The Merapi 2010 eruption: An interdisciplinary impact assessment methodology for studying pyroclastic density current dynamics*. *Journal of Volcanology and*

Geothermal Research 261, p. 316-329.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.02.012>

- Le Maitre, R.W (ed), et al. (2002). *Igneous Rocks: A Classification and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the systematics of igneous rocks*. University Press Cambridge
- Lockwood, J. dan Hazlett, R. W. (2010). *Volcanoes – Global Perspective*. Wiley-Blackwell.
- Loughlin, S.C., Sparks, R.S.J., Brown, S.K., Jenkins, S.F. and Vye-Brown, C. eds., 2015. *Global volcanic hazards and risk*. Cambridge University Press.
- Mandeville, C.W., Carey, S., dan Sigurdsson, H. (1996). *Sedimentology of the Krakatau 1883 submarine pyroclastic deposits*. Bulletin Volcanology 57, 512–529. <https://doi.org/10.1007/BF00304436>
- Muffler, L.J.P., Duffield, W.A., (1995). *The role of volcanic geology in the exploration for geothermal energy*.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2017. *Volcanic eruptions and their repose, unrest, precursors, and timing*. National Academies Press.
- Newhall, C.G., Self, S. (1982). *The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism*. Journal of Geophysical Research 87, 1231–1238. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>
- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. (2021). *Tipe Gunung Api di Indonesia (A, B, dan C)*. Diakses dari <https://magma.esdm.go.id/v1/edukasi/tipe-gunung-api-di-indonesia-a-b-dan-c>
- Rogers, S. (2015). *The Composition and Origin of Magmas*. Dalam H. Sigurdsson (ed), *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)*. Elsevier, p. 93-112
- Sanyal, S.K., Morrow, J.W., Jayawardena, M.S., Berrah, N., Li, S. F., Suryadarma. (2011). *Geothermal Resource Risk in Indonesia – A Statistical Inquiry*. Proceeding of Thirty Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Standford University, California.

- Schmidt, A., Thordarson, T., Oman, L.D., Robock, A., dan Self, S. (2012). *Climatic impact of the long-lasting 1783 Laki eruption: inapplicability of mass-independent sulfur isotopic composition measurements*. *Journal of Geophysical Research* 117, D23116. <https://doi.org/10.1029/2012JD018414>
- Shroder, J.F. dan Papale, P. (ed.) (2015). *Hazard and Disaster Series: Volcanic Hazard, Risks, and Disaster*. Elsevier.
- Siebert, L. (1984). *Large Volcanic Debris Avalanches: Characteristics of Source Areas, Deposits, and Associated Eruptions*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 22 (3–4), 163–197. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90002-7)
- Sigurdsson, H. (2015). *The History of Volcanology*. Dalam H. Sigurdsson (ed), *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition). Elsevier, p. 13-32
- Stimac, J., Nordquist, G., Suminar, A., Sirad-Azwar, L. 2008. *An overview of the Awibengkok geothermal system, Indonesia*. *Geothermics* 37 (2), p. 300-331. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.04.004>
- Suhendro, I., Toramaru, A., Harijoko, A., Wibowo, H.E. (2022) *The origins of transparent and non-transparent white pumice: A case study of the 52 ka Maninjau caldera-forming eruption, Indonesia*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 431, 107643. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107643>
- Toramaru, A. (1990). *Measurement of bubble size distributions in vesiculated rocks with implications for quantitative estimation of eruption processes*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 43 (1-4), p. 71 – 90. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90045-H](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90045-H)
- Voight, B., Janda, R. J., Glicken, H., & Douglas, P. M. (1981). *Catastrophic Rockslide Avalanche of May 18*. Dalam P. W. Lipman & D. R. Mullineaux (eds) *The 1980 Eruption of Mount St. Helens, Washington* (p. 347-377). Washington DC: USGS Professional Papers.

## BIODATA



Nama : Prof. Dr. Ir. Agung Harijoko,  
S.T., M.Eng, IPM  
Tempat, : Kendal,  
Tgl Lahir : 6 Desember 1968  
NIP : 196812062002121001  
Pangkat : Pembina Tk. 1  
Golongan : IVb  
Jabatan : Guru Besar

Unit Kerja : Fakultas Teknik, Departemen Teknik Geologi  
Alamat Kantor : Departemen Teknik Geologi, FT UGM, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281  
Alamat Rumah : Jl. Purwodadi 1 no 82, Krapyak RT 5 RW 55, Wedomartani, Ngemplak Sleman  
Keluarga : Diananta Pramitasari, ST., Meng., Ph.D. (istri)  
Lintang Sekaringati (anak)  
Gilang Bagaskoro (anak)

### **Riwayat Pendidikan:**

1974 – 1980 SD Negeri Wulung 1, Randublatung, Kab. Blora  
1980 – 1983 SMP Negeri 9 Semarang  
1983 – 1986 SMA Negeri 2 Semarang  
1986 – 1993 Jurusan Teknik Geologi, FT UGM (S.T.)  
1997 – 1998 Geothermal Institute, University of Auckland, New Zealand  
1999 – 2001 Dept. of Earth Resources Engineering, Kyushu University, Fukuoka, Japan (M.Eng.)  
2001 – 2004 Dept. of Earth Resources Engineering, Kyushu University, Fukuoka, Japan (Dr.Eng.)

2019 Ir. (*Professional Engineer*), PSPPI FT-UGM,  
Universitas Gadjah Mada

### **Riwayat Pekerjaan:**

1. Dosen dan Peneliti di Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada (2002 – sekarang)
2. Kepala Laboratorium Pusat, DTGL FT UGM (2015- sekarang)

### **Anggota Profesi:**

- 2008 – sekarang International Association of Volcanology and  
Chemical of Earth Interior
- 2015 – sekarang International Geothermal Association
- 2018 – sekarang Persatuan Insinyur Indonesia (PII)
- 2004 – sekarang Ikatan Ahli Geologi Indonesia (IAGI)
- 2019 – sekarang Ikatan Ahli Kebencanaan Indonesia (IABI)

### **Publikasi terpilih dalam 5 tahun terakhir**

1. Esti Handini, Toshiaki Hasenaka, Nicholas D Barber, Tomoyuki Shibata, Yasushi Mori, **Agung Harijoko** (2024) Systematics of slab-derived components in Central Java, Sunda Arc: Evidence for differential material transfer across the Southeast Asian convergent margin. *Tectonophysics*. Vol. 873, p. 230229.
2. Nicholas D Barber, Sophie L Baldwin, Marie Edmonds, Felix O Boschetty, Haryo Edi Wibowo, **Agung Harijoko** (2023) Monogenetic volcanoes as windows into transcrustal mush: A case study of Slamet and Loyang volcanoes, Central Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 444, p. 107945.
3. Muhammad Andriansyah Gurusinga, Tsukasa Ohba, **Agung Harijoko**, Takashi Hoshide (2023) Characteristics of ash particles from the maar complex of Lamongan Volcanic Field (LVF), East Java, Indonesia: How textural features and magma composition control ash morphology. *Volcanica*, Vol. 6. 415-436

4. Eti Rahayu, Haryo Edi Wibowo, Mradipta Lintang Alifcanta Muktikanana, Agung Setianto, **Agung Harijoko** (2023) Source Determination of Debris Avalanche Deposit based on the Morphology and Distribution of Hummocky Hills on the Northeastern Flank of G. Sundoro and G. Sumbing, Central Java. *Indonesian Journal of Geography*, Vol. 55, issue 3.
5. Abimanyu Bondan Wicaksono Setiaji, Iman Satyarno, **Agung Harijoko** (2023) Volcanic Ash Fall Hazard of Mount Merapi on Yogyakarta Nuclear Area. *Eksplorium*, Vol. 43, Issue 2, p. 59-70.
6. Saefudin Juhri, Kotaro Yonezu, **Agung Harijoko**, Muhammad Istiawan Nurpratama, Takushi Yokoyama (2023) Diverse scale deposition in response to the change in chemical properties of geothermal water at the Dieng geothermal power plant, Indonesia. *Geothermics*, Vol. 111, p. 102717.
7. Tyto Baskara Adimedha, **Agung Harijoko**, Esti Handini, I Gde Sukadana, Heri Syaeful, Roni Cahya Ciputra, Ilsa Rosianna, Frederikus Dian Indrastomo, Fadiyah Pratiwi, Yoshi Rachael (2023) Magmatic Evolution of Dago Volcano, West Java, Indonesia. *Eksplorium* 44 (1), 13-24
8. Arif Fadillah, **Agung Harijoko**, Heru Hendrayana, Haryo Edi Wibowo, Benjamin Baud, Patrick Lachassagne, Azwar Satria Muhammad, Nathalie Dörfliger (2023) Hydrogeological interpretation using electrical resistivity tomography: methodology and conceptual model in andesitic volcanic context. *Geomate Journal*, Vol. 24, Issue 106, p. 25-36.
9. H Hendrayana, **A Harijoko**, IA Riyanto, A Nuha, R Ruslisan (2023) Groundwater Chemistry Characterization in the South and Southeast Merapi Volcano, Indonesia. *Indonesian Journal of Geography* 55 (1), 10-29.
10. I Suhendro, A Toramaru, **A Harijoko**, HE Wibowo (2022) The origins of transparent and non-transparent white pumice: A case study of the 52 ka Maninjau caldera-forming eruption, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 431, 107643.
11. T Okumura, C Takashima, K Yanagawa, **A Harijoko**, A Kano (2022) Stromatolite formation by Anaerolineae-dominated

microbial communities in hot spring travertine in North Sumatra, Indonesia. *Sedimentary Geology* 440, 106263.

12. Haryo Edi Wibowo, Mitsuhiro Nakagawa, Takeshi Kuritani, Ryuta Furukawa, Oktory Prambada, **Agung Harijoko** (2022) Petrological and Geochemical Study of Sundoro Volcano, Central Java, Indonesia: Temporal Variations in Differentiation and Source Processes During the Growth of an Individual Volcano. *Journal of Petrology* 63 (9), egac083.
13. IG Sukadana, IW Warmada, F Pratiwi, **A Harijoko**, TB Adimedha, AW Yogatama (2022) Elemental Mapping for Characterizing of Thorium and Rare Earth Elements (REE) Bearing Minerals Using  $\mu$ XRF. *Atom Indonesia* 48 (2), 87-98
14. **A Harijoko**, HE Wibowo, MLA Muktikanana, MY Abdillah (2022) Magma Evolution of Lasem and Senjong Volcanic Complex: High-K Magmatism in Sunda Arc, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience* 9 (1).
15. **A Harijoko**, SA Sari, HE Wibowo, NI Setiawan, MLA Muktikanana (2021) Stratigraphy, chronology, and magma evolution of Holocene volcanic products from Mt. Slamet deposited in the Guci Valley, Central Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 418, 107341.
16. Herlan Darmawan, Bachtiar Wahyu Mutaqin, Wahyudi Wahyudi, **Agung Harijoko**, Haryo Edi Wibowo, Nia Haerani, Mamay Surmayadi, Syarifudin Syarifudin, Raditya Jati, Suratman Suratman, Wikanti Asriningrum (2020) Topography and structural changes of Anak Krakatau due to the December 2018 catastrophic events. *Indonesian Journal of Geography* 52 (3), 402-410.
17. Williams G.T., Jenkins S.F., Biass S., Wibowo H.E., **Harijoko A.** (2020) Remotely assessing tephra fall building damage and vulnerability: Kelud Volcano, Indonesia. *Journal of Applied Volcanology*, 9 (1), art. no. 10.

**Book chapter:**

1. **Harijoko, A.**, Marliyani, G.I., Wibowo, H.E., Freski, Y.R., Handini, E. (2023). The Geodynamic Setting and Geological Context of Merapi Volcano in Central Java, Indonesia. In: Gertisser, R., Troll, V.R., Walter, T.R., Nandaka, I.G.M.A., Ratdomopurbo, A. (eds) Merapi Volcano. Active Volcanoes of the World. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15040-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15040-1_4).
2. **Harijoko, A.**, Wibowo, H.E., Handini, E. (2023) Magmatisme Kuartar dan Tektonik Busun Sunda, Indonesia. Dalam: Pramumijoyo, S., Harijoko, A., Marliyani, G. I., Setiawan, N, I., Freski, Y, R. (eds) Geologi Gempa Bumi Indonesia. Gadjah Mada University Press.