



SERI KALDERA NUSANTARA NON-PLINIAN

Tenggger



BADAN GEOLOGI
KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL



SERI KALDERA NUSANTARA NON-PLINIAN

Tenggger

Penulis :

A. Ratdomopurbo,
Verry

Diterbitkan Oleh :

BADAN GEOLOGI
KEMENTRIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL
Cetakan Pertama, Desember 2023



SERI KALDERA NUSANTARA NON-PLINIAN

Tenggger

Penulis :

**A. Ratdomopurbo,
Verry**

Penyunting:

Ayu Sulistyowati

Design Sampul & Tata Letak :

Locca Chandra

Diterbitkan Oleh :

**BADAN GEOLOGI
KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL**

Cetakan Pertama, Desember 2023

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Sanksi Pelanggaran Pasal 172

Undang-Undang Nomor 19 Tahun 2002 - Tentang Hak Cipta

1. Barangsiapa dengan sengaja melanggar dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam pasal 2 Ayat (1) atau Pasal 49 Ayat (1) dan Ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp.1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lambat 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.5.000.000.000,00 (lima milyar rupiah).
2. Barangsiapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta atau hak terkait sebagaimana dimaksud pada Ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).



Prolog

Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral



Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Pusat Survei Geologi (PSG) sebagai unit teknis di bawah Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, terus berkomitmen meningkatkan dan mendukung upaya-upaya kolaborasi dengan berbagai pihak dalam bidang kegeologian. Salah satu wujud kolaborasi tersebut adalah penyusunan buku

Seri Kaldera Nusantara edisi Ijen, ini bersama Pemerintah Kabupaten Bondowoso, Provinsi Jawa Timur. Dengan berlatarbelakang dari akumulasi pengetahuan dan pengalaman ahli-ahli geologi PSG dalam kancah survei geologi di Indonesia.

Sejarah panjang mengukir jengkal demi jengkal ahli geologi yang memetakan dan mengkaji berbagai fenomena geologi yang dijumpai. Hingga akhirnya dapat dimanfaatkan oleh masyarakat secara langsung. Selanjutnya, hasilnya pun menyesuaikan perkembangan zaman dan teknologi yang semakin cepat selaras dengan perkembangan kebutuhan data dan informasi kegeologian yang ada.

Informasi-informasi dari sudut-sudut terpencil wilayah Nusantara pun seiring berjalannya waktu semakin terkuak. Banyak orang ingin berkunjung ke wilayah-wilayah yang sebelumnya tidak pernah diketahui dan tidak pernah diberitakan.

Kesadaran betapa wilayah Indonesia sangat luas dengan beragam budayanya menjadikan mobilitas fisik antardaerah juga berkembang. Tentu saja mobilitas tinggi penduduk juga memberikan dampak yang baik bagi perekonomian masyarakat. Kedatangan tamu-tamu bermuara pada kesadaran pentingnya informasi tentang bumi yang mereka miliki.

Warisan geologi yang semula hanya diperuntukkan bagi kalangan terbatas masyarakat geologi, menjadi sebuah konsep sajian bagi masyarakat luas. Mereka semakin mencintai buminya.

Buku Seri Kaldera Nusantara Ijen ini menjadi salah satu bentuk dukungan nyata PSG kepada Pemerintah Kabupaten Bondowoso, guna menambah khasanah informasi kebumian. Salah satunya adalah proses pembentukan Kaldera Ijen yang mewarnai sejarah geologi di wilayah ini. Buku ini disusun berdasarkan kajian lapangan yang detail. Kajian geologi disampaikan dengan gaya penulisan bahasa semi populer, bahasa masyarakat umum.

Akhir kata, semoga informasi yang ada di buku ini dapat memberikan pencerahan tentang sejarah geologi Kaldera Ijen. Selain sebagai acuan pembahasan selanjutnya bagi para ahli, kami berharap buku ini dapat menjadi acuan bagi pengelola wilayah di daerah dalam menyajikan buminya secara arif dan memberi manfaat seluas-luasnya bagi masyarakat.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Jakarta, Desember 2023

ARIFIN TASRIF



Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Pusat Survei Geologi (PSG) sebagai unit teknis di bawah Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, terus berkomitmen meningkatkan dan mendukung upaya-upaya kolaborasi dengan berbagai pihak dalam bidang kegeologian. Salah satu wujud kolaborasi tersebut adalah penyusunan buku

Seri Kaldera Nusantara edisi Ijen, ini bersama Pemerintah Kabupaten Bondowoso, Provinsi Jawa Timur. Dengan berlatarbelakang dari akumulasi pengetahuan dan pengalaman ahli-ahli geologi PSG dalam kanvas survei geologi di Indonesia.

Sejarah panjang mengukir jengkal demi jengkal ahli geologi yang memetakan dan mengkaji berbagai fenomena geologi yang dijumpai. Hingga akhirnya dapat dimanfaatkan oleh masyarakat secara langsung. Selanjutnya, hasilnya pun menyesuaikan perkembangan zaman dan teknologi yang semakin cepat selaras dengan perkembangan kebutuhan data dan informasi kegeologian yang ada.

Informasi-informasi dari sudut-sudut terpencil wilayah Nusantara pun seiring berjalannya waktu semakin terkuak. Banyak orang ingin berkunjung ke wilayah-wilayah yang sebelumnya tidak pernah diketahui dan tidak pernah diberitakan.

Kesadaran betapa wilayah Indonesia sangat luas dengan beragam budayanya menjadikan mobilitas fisik antardaerah juga berkembang. Tentu saja mobilitas tinggi penduduk juga memberikan dampak yang baik bagi perekonomian masyarakat. Kedatangan tamu-tamu bermuara pada kesadaran pentingnya informasi tentang bumi yang mereka miliki.

Warisan geologi yang semula hanya diperuntukkan bagi kalangan terbatas masyarakat geologi, menjadi sebuah konsep sajian bagi masyarakat luas. Mereka semakin mencintai buminya.

Buku Seri Kaldera Nusantara Ijen ini menjadi salah satu bentuk dukungan nyata PSG kepada Pemerintah Kabupaten Bondowoso, guna menambah khasanah informasi kebumian. Salah satunya adalah proses pembentukan Kaldera Ijen yang mewarnai sejarah geologi di wilayah ini. Buku ini disusun berdasarkan kajian lapangan yang detail. Kajian geologi disampaikan dengan gaya penulisan bahasa semi populer, bahasa masyarakat umum.

Akhir kata, semoga informasi yang ada di buku ini dapat memberikan pencerahan tentang sejarah geologi Kaldera Ijen. Selain sebagai acuan pembahasan selanjutnya bagi para ahli, kami berharap buku ini dapat menjadi acuan bagi pengelola wilayah di daerah dalam menyajikan buminya secara arif dan memberi manfaat seluas-luasnya bagi masyarakat.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandung, Desember 2023

Dr.Ir.Muhammad Wafid A.N., M.Sc.



Prolog

**Plt. Kepala
Badan Geologi**

**Sambutan Kepala
Badan Geologi**

hal vii

**Sambutan Kepala Pusat
Badan Geologi**

hal 4

**Selayang Pandang
Kaldera Tengger**

hal 6

Peta Tengger

hal 8

**Ikhtiar Rekonstruksi
Tektonik Jawa**

hal 12

Fisiografi Tengger

hal 12

Gunung Tugel

hal 34

Gunung Lamongan

hal 48

Perdebatan Ahli Belanda

hal 46

**Kompleksitas Tengger
Dalam Ilmu Modern**

hal 56

**Analogi Collapse
Sectoral Arjuna**

hal 56

Lava Hasil Ikutannya

hal 64

**Ignimbrite Sukapura,
Karakter Dan Fragmen**

hal 70



Jejak Gunungapi Jawa

hal 26



Gunung Tengger Tua

hal 36

10 De Vulkanen van de Tengger.
Oost Java.



Lembah Sapikerep

hal 2



Sketsa Subsidence dan Cemorolawang

hal 50



Batu Poleng, Keunikan Tengger

hal 44



Lautan Pasir, Ganesa

hal 58



Adat Suku Tengger

hal 71

Bagi suku Jawa Tengger, Gunung Bromo atau Gunung Brahma dipercaya sebagai gunung suci. Setahun sekali masyarakat Tengger mengadakan upacara Yadnya Kasada atau Kasodo. Upacara ini bertempat di sebuah pura yang berada di bawah kaki Gunung Bromo utara yakni Pura Luhur Poten Bromo dan dilan-



Sosial & Ekonomi Suku Tengger

hal 80

Luasan Deposit Dan Volume

hal 80

Kipas Ngepung, Efek Laut

hal 80

Air Terjun Umbulan, Jurang Poleng

hal 82

Tuff Putih+ljen Caldera

hal 80

Stratigafi Komposit

hal 78

Kaldera Tanpa Batu Apung

hal 82

Dem Kelurusan Tengger-Lamongan

hal 82

Kompleks Garu, Profil Erupsi Samping

hal 82

Perbandingan Dengan Kaldera Lainnya, Dem

hal 82

Widodaren, Batok

hal 82

Bromo dan Lava Poleng

hal 82

Lautan Pasir, Ganesa

hal 82

Adat Suku Tengger

hal 82

Apendiks

hal 84

Daftar Pustaka

hal 99

Terima kasih

hal 82

Selayang Pandang

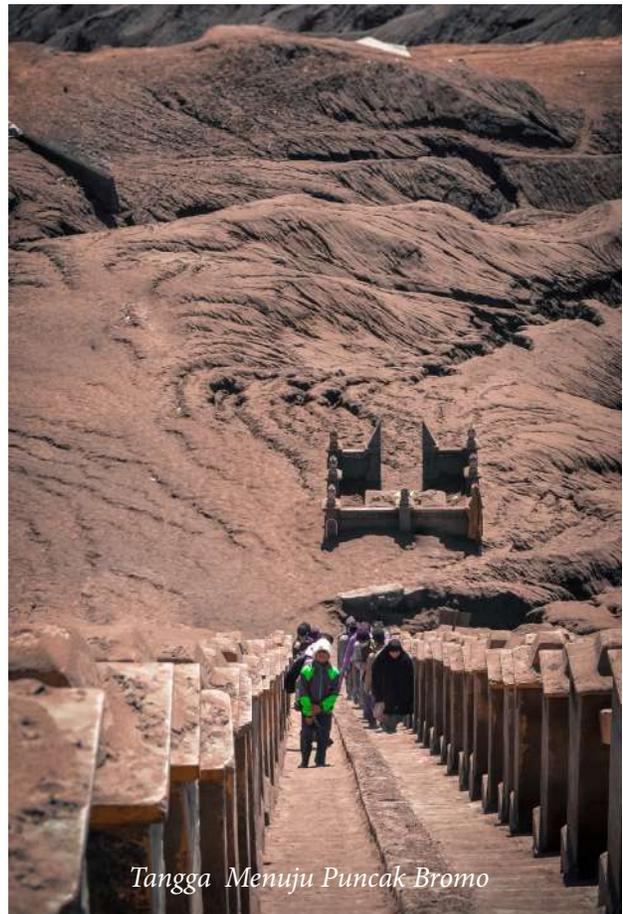
Panorama di dalam kaldera

Bromo Tengger: Pesona Alam dan Budaya yang Memikat

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nullam in tristique nisi. Cras eget lectus et lectus condimentum volutpat. Nunc nec odio justo. Fusce id dui sit amet velit pharetra malesuada. Aenean felis nibh, sagittis sit amet leo non, tristique mattis felis. Morbi vel purus ut purus euismod placerat vel sed neque. Aliquam lobortis auctor cursus. Quisque a mollis enim, in laoreet tellus. Donec ultricies nisi quis scelerisque ullamcorper. Vivamus sollicitudin, justo eu mattis



Bertualang menggunakan Jeep



Tangga Menuju Puncak Bromo



Sunset dari Probolinggo



Menunggang Kuda di Lautan Pasir

hendrerit, felis est blandit erat, quis tempor metus libero eu libero. Nunc ornare eget ligula quis sagittis. Nunc vestibulum nisl dui. Pellentesque dignissim sem vel sem iaculis, sit amet finibus augue dictum. Pellentesque luctus faucibus urna, quis feugiat metus aliquet in. Vestibulum congue pretium magna, sit amet interdum velit ullamcorper sed.

Etiam interdum magna mauris. Etiam quis dui tincidunt sapien ultrices scelerisque. Vestibulum imperdiet tempor tellus id rhoncus. Mauris ultricies velit ut lorem lobortis, eu eleifend nisi vestibulum. Phasellus consectetur dui vel dui mattis, condimentum euismod magna dignissim. Donec maximus sem non sapien tempus varius. Pellentesque id facilisis justo, sed laoreet libero. Morbi et leo mollis, ornare neque quis, aliquam libero. Nulla quis accumsan ante. Vestibulum fermentum vestibulum pulvinar. Phasellus semper sem scelerisque, facilisis justo non, tristique lorem.

Praesent porttitor efficitur lacus eget fringilla. Ut molestie suscipit dictum. In ut tincidunt ligula, vel venenatis sem. Mauris aliquet dui sit amet pharetra mollis. Duis dictum imperdiet semper. Cras iaculis nulla eget magna lacinia, in faucibus enim eleifend. Etiam

cursus ex sit amet arcu congue, sed condimentum nunc iaculis. Integer sit amet feugiat orci, sed venenatis nunc. Aliquam ac semper sem. Aenean sodales purus dolor, ut egestas nulla dapibus venenatis.

Aenean posuere viverra ex ac rhoncus. Phasellus sed dui vitae enim elementum accumsan eu vel ligula. Nullam molestie magna in rhoncus aliquet. Pellentesque rutrum neque id pretium facilisis. Phasellus ut justo quis ligula tincidunt auctor at vel dolor. Suspendisse viverra vitae ipsum vel lacinia. Morbi ac ante a leo rutrum varius. Ut tortor odio, feugiat quis ullamcorper sed, volutpat eu magna. Praesent finibus nulla at orci ornare, nec accumsan turpis auctor. Vivamus vitae posuere lectus. Curabitur pretium porta orci, in blandit leo suscipit vitae. Pellentesque bibendum et enim nec malesuada. Vivamus non erat id augue gravida pulvinar. Aenean eu augue finibus, varius turpis vel, ornare ligula. Cras pretium sapien purus, sodales pulvinar neque tempus eget. Aliquam rutrum augue ut metus auctor, non fringilla magna varius.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Quisque consequat et arcu

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nullam in tristique nisi. Cras egetas lectus et lectus condimentum volutpat. Nunc nec odio justo. Fusce id dui sit amet velit pharetra malesuada. Aenean felis nibh, sagittis sit amet leo non, tristique mattis felis. Morbi vel purus ut purus euismod placerat vel sed neque. Aliquam lobortis auctor cursus. Quisque a mollis enim, in laoreet tellus. Donec ultricies nisi quis scelerisque ullamcorper. Vivamus sollicitudin, justo eu mattis hendrerit, felis est blandit erat, quis tempor metus libero eu libero. Nunc ornare eget ligula quis sagittis. Nunc vestibulum nisl dui. Pellentesque dignissim sem vel sem iaculis, sit amet finibus augue dictum. Pel-

lentesque luctus faucibus urna, quis feugiat metus aliquet in. Vestibulum congue pretium magna, sit amet interdum velit ullamcorper sed.

Etiam interdum magna mauris. Etiam quis dui tincidunt sapien ultrices scelerisque. Vestibulum imperdiet tempor tellus id rhoncus. Mauris ultricies velit ut lorem lobortis, eu eleifend nisi vestibulum. Phasellus consectetur dui vel dui mattis, condimentum euismod magna dignissim. Donec maximus sem non sapien tempus varius. Pellentesque id facilisis justo, sed laoreet libero. Morbi et leo mollis, ornare neque quis, aliquam libero. Nulla quis accumsan ante. Vestibulum fermentum vesti-



Menuju Tengger

bulum pulvinar. Phasellus semper sem scelerisque, facilisis justo non, tristique lorem.

Praesent porttitor efficitur lacus eget fringilla. Ut molestie suscipit dictum. In ut tincidunt ligula, vel venenatis sem. Mauris aliquet dui sit amet pharetra mollis. Duis dictum imperdiet semper. Cras iaculis nulla eget magna lacinia, in faucibus enim eleifend. Etiam cursus ex sit amet arcu congue, sed condimentum nunc iaculis. Integer sit amet feugiat orci, sed venenatis nunc. Aliquam ac semper sem. Aenean sodales purus dolor, ut egestas nulla dapibus venenatis.

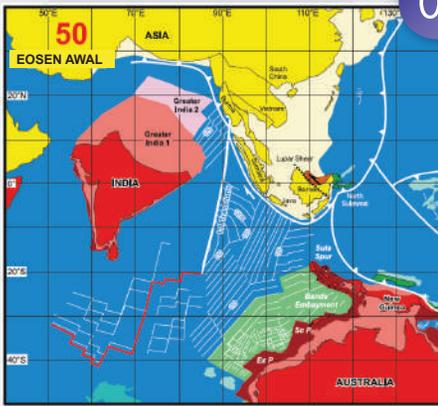
Aenean posuere viverra ex ac rhoncus. Phasellus sed dui vitae enim elementum ac-

cumsan eu vel ligula. Nullam molestie magna in rhoncus aliquet. Pellentesque rutrum neque id pretium facilisis. Phasellus ut justo quis ligula tincidunt auctor at vel dolor. Suspendisse viverra vitae ipsum vel lacinia. Morbi ac ante a leo rutrum varius. Ut tortor odio, feugiat quis ullamcorper sed, volutpat eu magna. Praesent finibus nulla at orci ornare, nec accumsan turpis auctor. Vivamus vitae posuere lectus. Curabitur pretium porta orci, in blandit leo suscipit vitae. Pellentesque bibendum et enim nec malesuada. Vivamus non erat id augue gravida pulvinar. Aenean eu augue finibus, varius turpis vel, ornare ligula. Cras pretium sapien purus, sodales pulvinar neque tempus eget. Aliquam rutrum augue ut



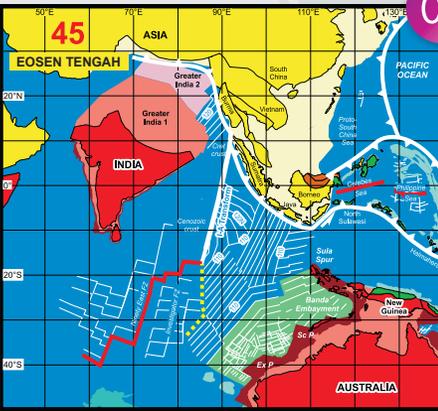
Ikhtisar Rekonstruksi Tektonik Jawa

Layaknya cerita babad Tanah Jawa yang selalu menarik untuk dikaji, cerita pembentukan Pulau Jawa juga tidak kalah dramatisnya untuk ditelusuri. Berdasarkan kajian dan pemodelan ilmiah para penelisik bumi, proses yang rumit pembentukan pulau ini telah berlangsung selama jutaan tahun silam hingga kini. Namun cerita babad geologi Jawa dapat disederhanakan menjadi beberapa tahapan dalam cerita berikut ini.



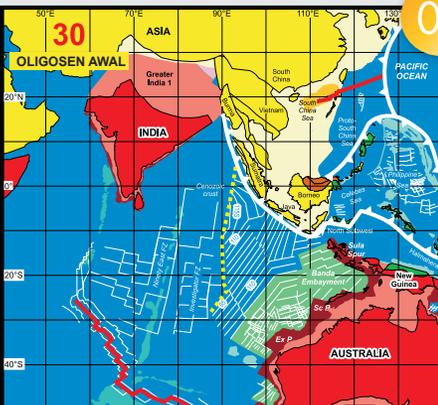
01

Pada periode antara 80-45 juta tahun lalu, Pulau Jawa belum benar-benar terbentuk sempurna, hanya bagian barat saja bersama dengan Sumatra yang telah menunjukkan bentuknya. Ketiadaan batuan gunung api misalnya, menjadi salah satu bukti daerah ini belum menunjukkan keaktifan batas tektoniknya.



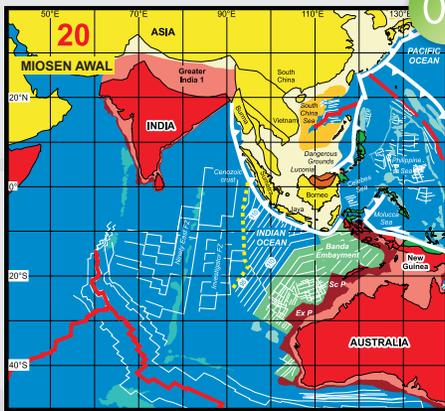
02

Kira-kira sekitar Eosen Tengah (45 juta tahun lalu), cerita pembentukan Pulau Jawa yang membentang dari bagian barat hingga bagian timur dimulai. Pada zaman ini mikro lempeng Jawa bagian timur bergabung dengan lempeng tepian Sundaland penyusun Jawa bagian barat. Selanjutnya, lingkungan tektonik aktif mulai berkembang yang ditandai dengan terjadinya proses penunjaman lempeng samudera Indo-Australia di bawah tepian lempeng Eurasia (Sundaland). Ya, proses tersebut menghasilkan aktivitas kegunungapian di beberapa titik sebagai buktinya.

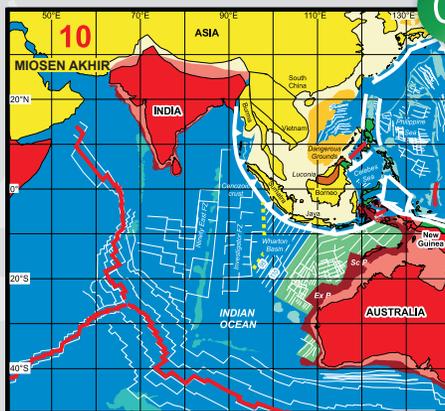


03

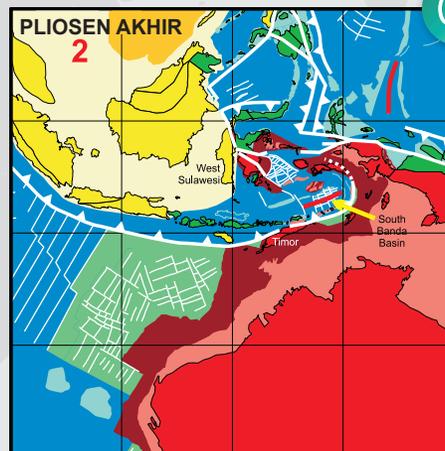
Kala Oligosen Awal (30 juta tahun lalu) menjadi periode kejayaan gunung api di Pulau Jawa hingga Sumatra. Hal tersebut terjadi seiring berkembangnya proses penunjaman atau subduksi di selatan Jawa menghasilkan deretan busur gunung api di Pulau Jawa. Sebagai buktinya, ditemukan batuan gunung api yang berumur setara dengan periode ini. Namun, Pulau Jawa belum sesempurna bentuknya seperti saat ini.



Pada periode awal subduksi hingga kejayaan gunung api (sekitar 45 hingga 30 juta tahun lalu), subduksi Pulau Jawa masih relatif memanjang berarah barat laut-tenggara. Selanjutnya, pada kala Miosen Awal (20 juta tahun lalu), secara bertahap proses subduksi Pulau Jawa mulai berubah arah menjadi relatif barat-timur. Hal tersebut dipengaruhi oleh pergerakan lempeng tektonik utara Australia yang sangat aktif bergerak ke utara di wilayah timur Indonesia.



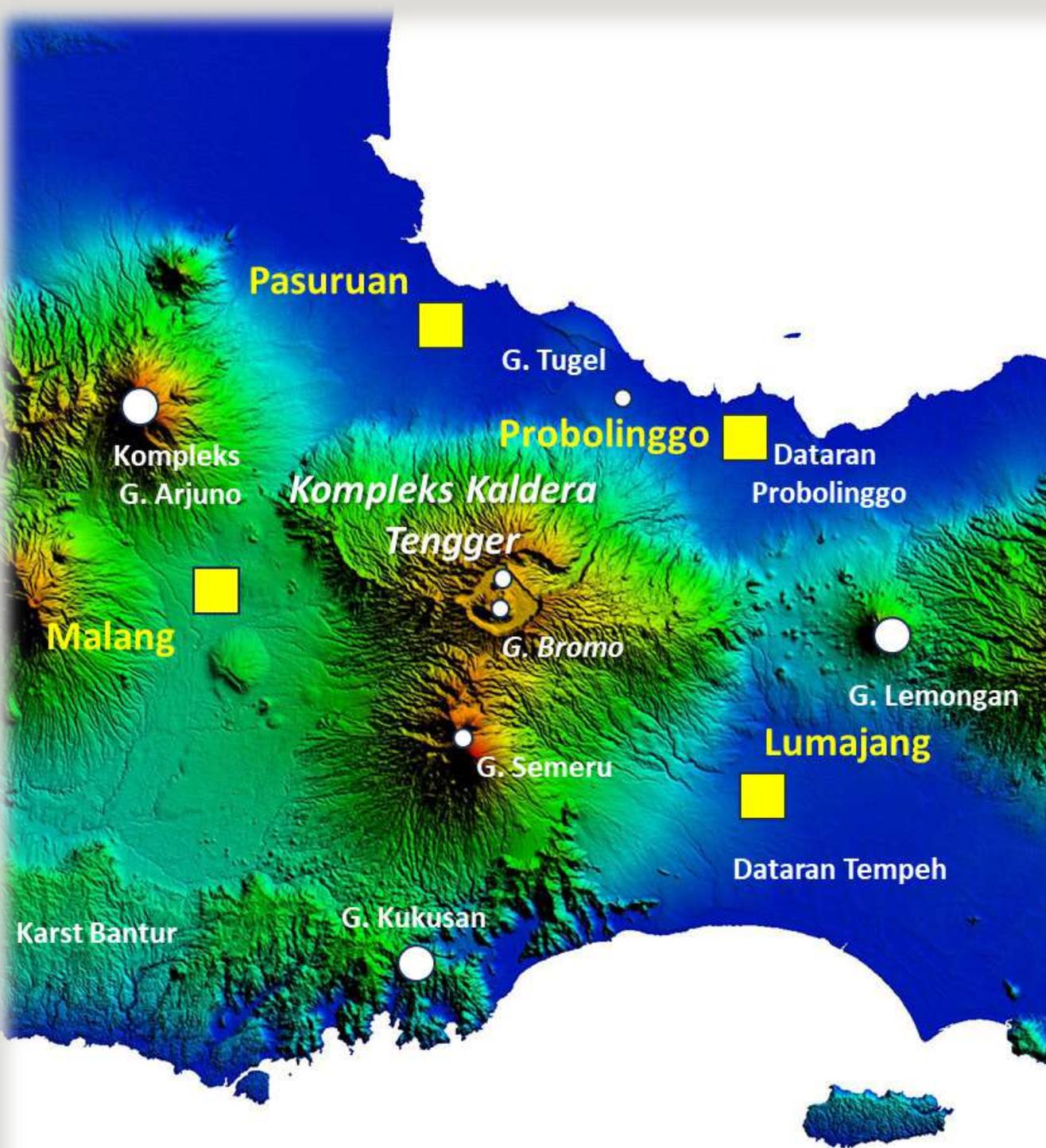
Lalu, tunjaman lempeng Indo Australia ke utara menghasilkan subduksi selatan Pulau Jawa menjadi memanjang berarah relatif barat laut pada sekitar 10 juta tahun lalu (Miosen Akhir). Selain itu, subduksi tersebut terus memanjang hingga wilayah Bali, Lombok, hingga Nusa Tenggara sehingga jajaran gunung api berkembang dari Jawa hingga Nusa Tenggara.



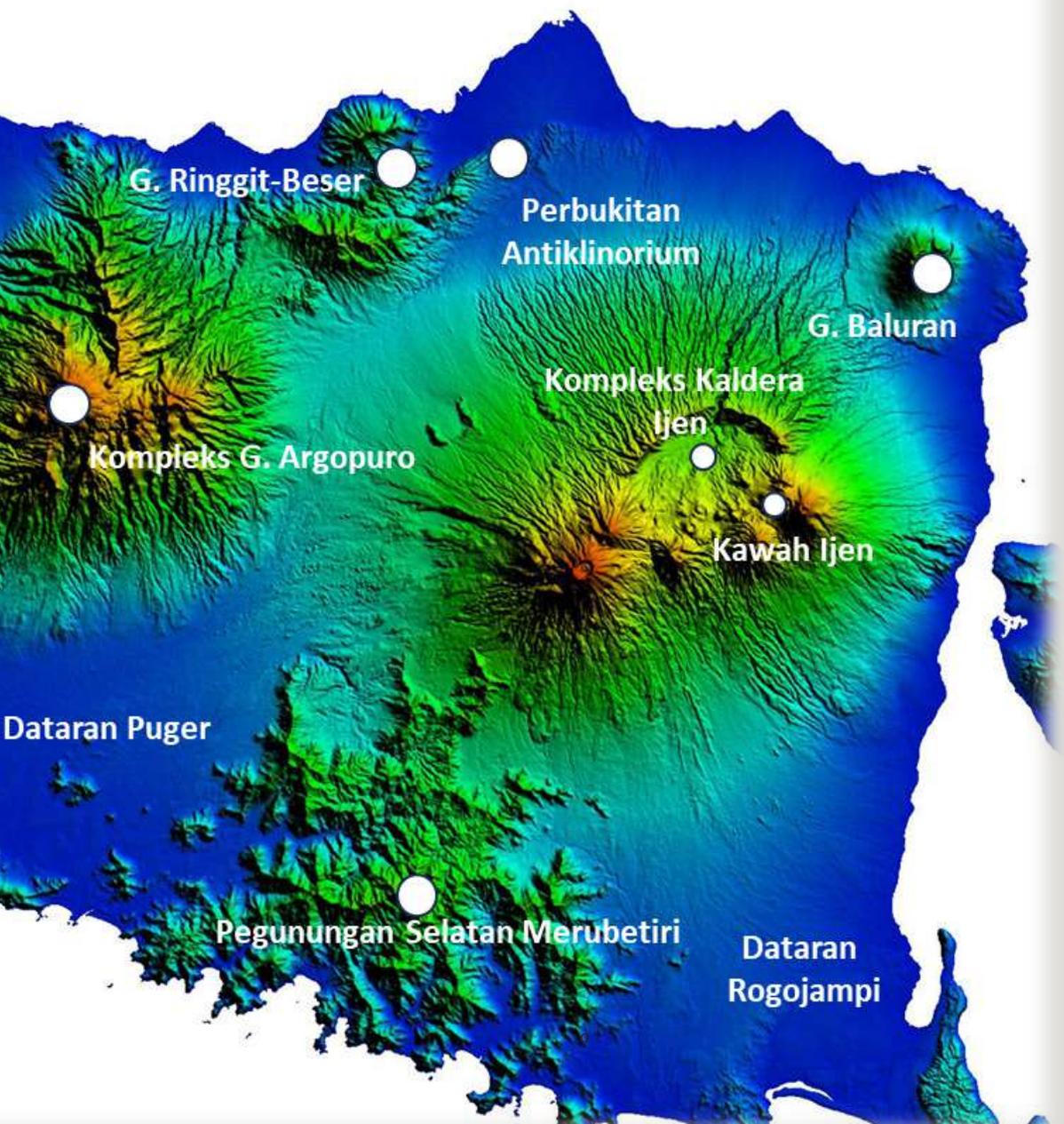
Pada kisaran 2 juta tahun lalu (Neogen-Kuarter), tatanan tektonik Pulau Jawa secara khusus dan Indonesia secara umum telah terbentuk menjadi seperti sekarang ini. Subduksi di selatan Jawa (Busur Sunda) yang memanjang hingga ke Nusa Tenggara berhenti di sekitar Pulau Timor. Keberadaan banyak gunung api aktif pada kala ini menandai kejayaan gunung api Kuarter di sepanjang Jawa hingga Nusa Tenggara.

Apakah semua berhenti di proses ini saja? Tidak. Proses dinamika bumi ini akan berkembang terus menerus dalam skala ruang dan waktu geologi dari puluhan, ratusan hingga jutaan tahun mendatang, kemungkinan.

Bentukan Bumi di Ujung Timur Jawa



Mari kita amati bentang alam bagian timur Pulau Jawa melalui citra satelit, kita dapat melihat di wilayah tersebut tersusun dari beragam bentukan bumi yaitu pegunungan, perbukitan, pedataran, dan pantai akibat dari beragam fenomena geologi sejak 33 juta tahun yang lalu.

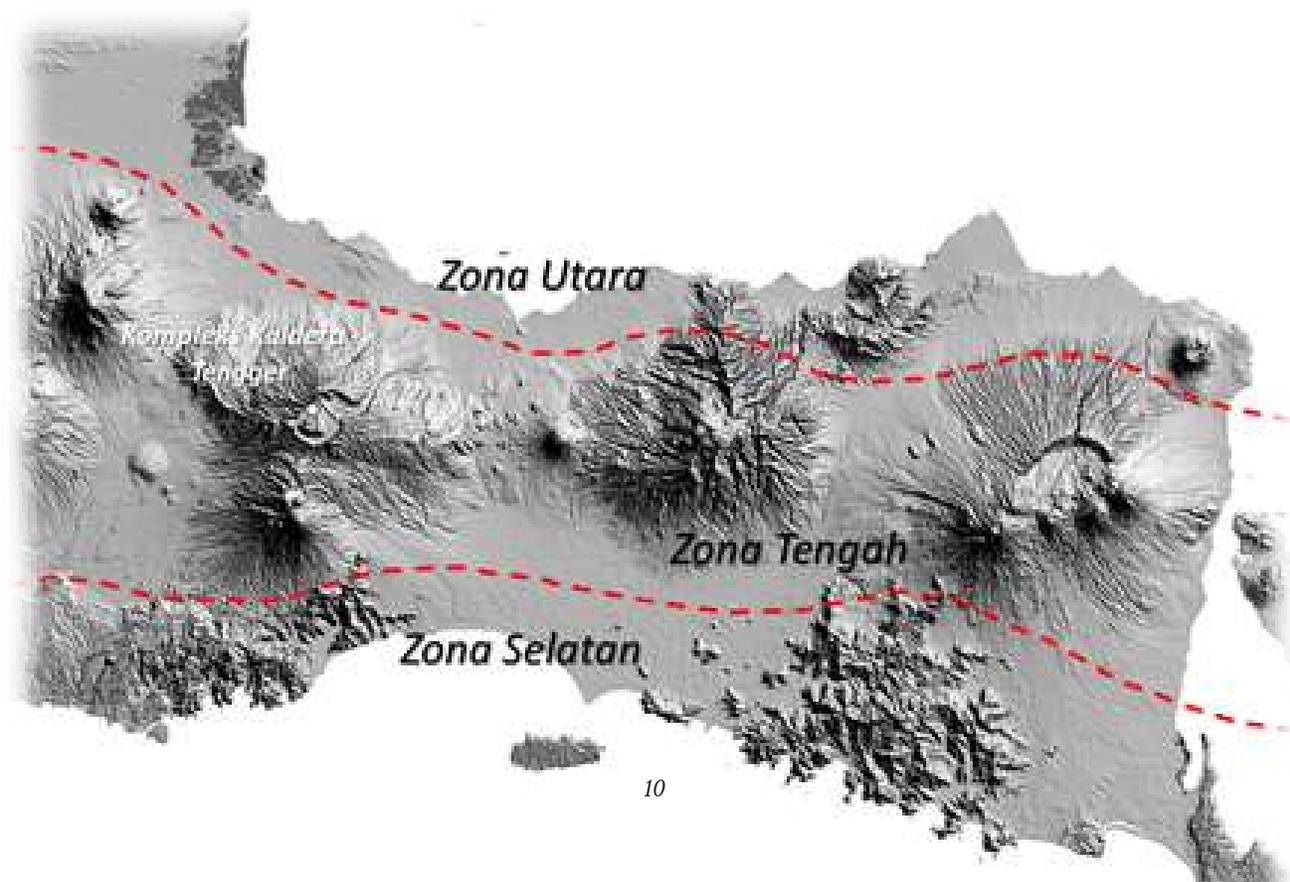


Fisiografi Jawa

BAGIAN TIMUR

Proses pembentukan hingga terwujudnya Pulau Jawa bagian timur sekarang ini bagi geolog itu menarik untuk dikaji. Karena daratannya jika kita lihat dari atas itu membentang ragam gunungapi aktif dan non aktif, lalu bentuk pulaunya semakin dari Barat ke Timur itu menyempit.

Daratan sebelah Barat berbatasan dengan daratan Jawa bagian tengah, sebelah Utara berbatasan dengan Selat Madura, sebelah Timur berbatasan dengan Selat Bali, dan sebelah Selatan berbatasan dengan Samudera Hindia. Menurut ahli geologi Van Bemmelen (1949) dan Smyth (2005), mereka memebagi tiga zona sesuai dengan urutannya berdasarkan tahun pembentukan Pulau Jawa bagian Timur ini dari yang tua menuju ke tahun lebih muda, yaitu zona Selatan, zona Tengah, dan zona Utara. Mari kita menyusurinya...





Zona Tengah

Zona Tengah merupakan zona busur gunungapi kuarter dengan cekungan atau lembah antargunung yang memanjang relatif Barat-Timur Pulau Jawa. Kompleks pegunungan di zona ini tersebar gunungapi aktif maupun tidak aktif, bentang alam kaldera, serta kerucut sisa vulkanik.

Kompleks gunungapi di Zona Tengah Jawa Timur ini memiliki ketinggian kisaran 2.000 mdpl-3.000 mdpl. Gunung-gunung tersebut, antara lain Kompleks Arjuna Welirang, Kompleks Gunung Bromo-Tengger-Semeru, Kompleks Gunung Lemongan, Kompleks Argopuro, dan Kompleks Gunung Ijen.

Namun, diantara Kompleks Gunung Bromo-Tengger-Semeru dan Kompleks Gunung Argopuro, ada pula kompleks gunung yang ketinggiannya tidak lebih dari 2.000 mdpl. Gunung tersebut adalah Kompleks Gunung Lemongan. Gunung ini menarik bagi kacamata geolog karena kandungan magma yang kaya unsur Fe dan Mg, sehingga magmanya bersifat basa. Kondisi ini berhubungan dengan robeknya lempeng subduksi, sehingga magma yang berasal dari mantel terdorong naik ke permukaan.

Di antara kompleks pegunungan di Zona

Tengah Jawa Timur ini terdapat dua kaldera, Kaldera Tengger dan Kaldera Ijen. Kaldera Tengger memiliki diameter sekitar 8 km, dengan bagian tengahnya terdiri dari Gunung Bromo, Gunung Widodare, dan Gunung Batok.

Kaldera Ijen berdiamter 15 km. Bagian selatannya berjajar gunungapi muda terdiri dari Gunung Raung, Gunung Jampit, Gunung Rante, dan Gunung Merapi. Di antara kompleks pegunungan tersebut terdapat sebuah cekungan antara gunung, Cekungan Malang, Cekungan Lumajang, Cekungan Bondowoso. Cekungan-cekungan tersebut menjadi tempat akumulasi dari beberapa material vulkanik yang ada disekitarnya.

Cekungan Malang menjadi tempat akumulasi material vulkanik dari Kompleks Gunung Arjuno Welirang dan Kompleks Gunung Bromo-Tengger-Semeru. Cekungan Lumajang menjadi tempat akumulasi material vulkanik dari Kompleks Bromo Tengger Semeru dan Kompleks Gunung Argopuro. Cekungan Bondowoso merupakan tempat akumulasi dari material vulkanik dari Kompleks Gunung Argopuro dan Kompleks Gunung Ijen.

Zona Selatan

Pada zona ini terdapat jajaran pegunungan vulkanik, dataran aluvial, perbukitan kars, dan pantai membentang di sebelah Selatan kompleks Bromo-Tengger-Semeru.

Pemandangan perbukitan kars Bantur, di Kecamatan Malang. Batuan ini bagian dari Formasi Wonosari. Selanjutnya pegunungan vulkaniknya merupakan Formasi Mandalika, dengan titik tertingginya pada Gunung Kukusan (1.115 mdpl) dan dataran aluvial Tempeh di Selatan Kabupaten Lumajang.

Batuan utama penyusun zona Selatan Jawa, khususnya di Selatan Kompleks Bromo Tengger Semeru tersusun atas batuan gunung api berumur Oligosen-Miosen Awal (sekitar 30 juta – 15 juta tahun). Jenis batumannya bervariasi dari basal, andesit, dasit. Susunan batuan ini menandai terjadinya peningkatan aktivitas magmatisme dan vulkanisme. Magma yang berisfat asam membeku membentuk batuan granodiorite–diorite menerobos bebatuan tersebut.

Selain batuan gunungapi, zona pegunungan selatan juga tersusun oleh batuan sedimen berumur Miosen Tengah (15 juta tahun). Unsur sedimennya, seperti batu pasir, batu lempung, dan juga batu gamping, yang diendapkan saat berada di lingkungan laut. Batuan tersebut termasuk Formasi Wuni dan Formasi Nampol.

Menuju daerah selatan Kabupaten Malang, berkembang batuan karbonat yang membentuk bentang alam karst. Batuan karbonat ini merupakan Formasi Wonosari berumur Miosen Akhir (12 Juta tahun). Batu gamping Formasi Wonosari ini memanjang dimulai dari Gunung Kidul, Yogyakarta. Dan ada satu pulau yang penuh dengan batu gamping terkenal di Selatan Kabupaten Malang, ini yang dinamakan Pulau Sempu.

Memasuki Pliosen-Plistosen (sekitar 1 – 5 juta tahun lalu) terdapat peristiwa tektonik pengangkatan. Hal ini menyebabkan batuan sedimen di selatan Pulau Jawa ini memiliki kemiringan lapisan batuan ke arah Selatan.



Zona Utara

Memasuki zona bagian utara, merupakan proses pembentukan di tahun termuda, ini memiliki beragam bentang alam berupa perbukitan sisa vulkanik, danau vulkanik Grati, Gunung Tugel, Gunung Lurus, Gunung Ringgit-Beser, perbukitan bergelombang rendah sampai dengan pedataran Probolinggo dan pedataran Situbondo, serta pantai.

Dibagian Utara ini, kita menjumpai gunung-gunung yang tersusun atas breksi dan lava dengan kandungan lava yang berjenis ultrapotasik. Yakni, Gunung Tugel di daerah Probolinggo, Gunung Lurus, dan Gunung Ringgit-Beser di daerah Situbondo. Lava jenis ultrapotasik ini komposisi mineralnya didominasi oleh kandungan Feldspatoid dan rendah silika dan ini diperkirakan terbentuk pada Pleistosen Akhir (1,2 juta -0,6 juta tahun).

Sebelah timur tepatnya di Situbondo, terdapat bentang alam perbukitan yang tersusun atas batu pasir, konglomerat, batuan vulkaniklastik, dan batu gamping Formasi Menuran. Formasi ini diperkirakan berumur Miosen Akhir – Pliosen (11 juta-3 juta tahun) yang terbentuk pada lingkungan laut. Proses sedimentasi ini terus berlanjut menghasilkan pengendapan batuan sedimen batu pasir tufaan dan karbonatan Formasi Leprak yang berumur Pliosen awal-akhir (5 juta – 2,6 juta tahun). Kemudian batuan tersebut

membentuk perbukitan antiklinorium akibat dari proses deformasi pada umur Pliosen-Plistosen.

Kondisi ini jauh berbeda dengan yang terdapat di daerah Probolinggo dimana endapan sedimen tidak berkembang dengan baik pada daerah ini. Dibagian timur Probolinggo kita hanya menemukan sedikit endapan sedimen dari Formasi Leprak. Kondisi geologi ini berhubungan dengan tidak adanya pasokan material sedimen hasil erosi batuan di Zona Selatan. Namun pasokan bagian utara dari probolinggo dan malang berasal dari rombakan gunungapi maupun endapan piroklastik pada zaman Kuartar yang membentuk daratan.

Pada bagian Barat Probolinggo, kita menemukan danau vulkanik, Danau Grati. Susunan materialnya berupa endapan vulkaniklastik, breksi, dan konglomerat. Danau ini merupakan kurucut parasit yang diduga berhubungan dengan sistem vulkanisme dengan Kompleks Gunung Tengger.

Demikian dinamika pembentukan Pulau Jawa bagian Timur. Bentangan panorama bergunung-gunung yang menarik. Mari lanjut perjalanan kita, untuk lebih jauh menilik bagaimana dengan Kaldera Tengger dihalaman-halaman selanjutnya, ya...



JEJAK GUNUNG GEMUNUNG API PULAU JAWA

Daratan Pulau Jawa, membentang 1.000 kilometer (km) dari barat ke timur. Daratan ini sangat dipengaruhi oleh jajaran banyak gunung api yang ada. Proses penyempurnaan hingga berwujud seperti sekarang ini, para ahli memperkirakan mulainya sejak 45 juta tahun lalu, ketika itu masa Eosen.

Berasal dari batuan-batuan hasil aktivitas kegunungapian itulah para ahli meneliti dan mengkaji karakteristik, komposisi hingga penanggalan umur radiometri. Hasil penelitian menyingkap jawaban asal usul dan umur jajaran gunung api dari batuan-batunya. Siap-siap, mari meniti jejak gunung-gunung api Pulau Jawa!

Proses subduksi

Dinamika bentangan Pulau Jawa, berawal dari proses subduksi saat 80 juta-140 juta tahun lalu. Ketika itu lempeng Samudera Indo-Australia menyusup ke bawah tepian tenggara lempeng Benua Eurasia atau yang dikenal sebagai Sundaland.

Proses subduksi ini menginisiasi lahirnya jajaran gunung api. Hasil kajian Setijadji, dkk (2006), jejak-jejak aktivitas magmatisme dan vulkanisme (kegunungapian) di Jawa dapat ditelusuri.

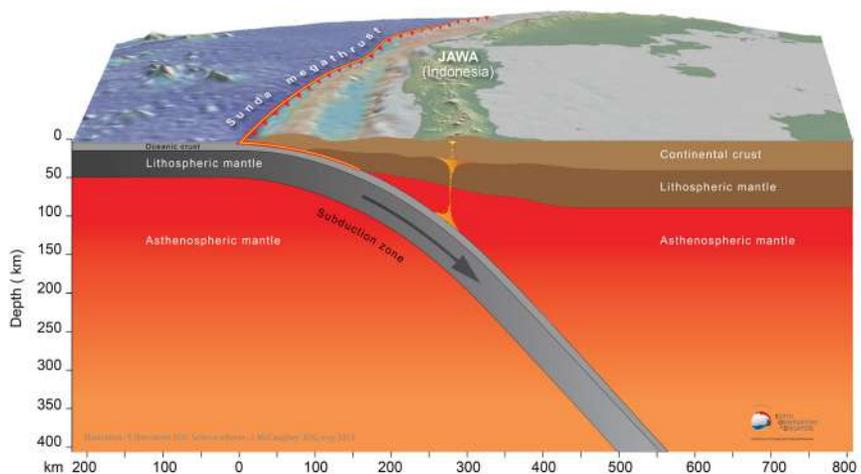
Pada awal proses subduksi

Jawa sekitar 45 hingga 30 juta tahun (Eosen Awal-Akhir), jajaran gunung api yang lahir berbeda dengan saat ini. Bentangan subduksi yang relatif berarah barat daya-tenggara pada periode ini terhitung sebagai subduksi yang belum begitu dewasa.

Tinggalan batuan gunung api tersebut dapat dijumpai di daerah Bayah (Lebak), Ciletuh (Sukabumi), Jatibarang (Indramayu), Karangasambung (Kebumen), dan Pacitan (Jawa Timur). Terbatasnya lokasi yang menyingkapkan jejak-jejak batuan ini menyebabkan diskusi dan perdebatan bagi para ahli geologi untuk mempertahankan teori masing-masing. Karena kajian dari tiga orang ahli geologi mampu menghasilkan lebih dari tiga teori. Ya, begitulah para ahli menggeluti pekerjaannya dengan segala kemungkinan-kemungkinan teori yang bakal didapat.

Kejayaan gunung api purba

Kembali kita meniti proses subduksi yang semakin berkembang. Memasuki periode se-



Gambaran tiga dimensi proses penyusupan lempeng Samudera Indo-Australia di bawah Pulau Jawa pada saat ini. Sumber: Earth Observatory Singapore



Sebaran lokasi yang memiliki rekaman jejak batuan gunung api pada periode awal pembentukan Pulau Jawa sekitar 45 juta tahun lalu

kitar 30 juta-15 juta tahun lalu (Oligosen-Miosen Awal) ini aktivitas magmatisme-vulkanisme semakin intens. Intensitas kegiatan kegunungapian yang tinggi pada masa ini digadang-gadang sebagai masa kejayaan gunung api purba di Jawa. Bukti jejaknya dapat ditemukan di wilayah selatan hingga bagian tengah daratan pulau.

Secara umum, batuan yang terbentuk di wilayah tersebut memiliki karakteristik saling mirip berupa batuan basal hingga andesit. Batuan dengan warna gelap sampai abu-abu, oleh Van Bemmelen (1949), dikenal sebagai Formasi Andesit Tua (*Old Andesite Formation*).

Jejak-jejaknya dapat dijumpai di wilayah selatan daratan Pulau Jawa. Runtunan dari barat ke timur Jawa yaitu : Bayah, Ciletuh-Ciemas, Jampang, Tasikmalaya, Pangandaran, Karangsambung, Kulon Progo, Parangtritis, Bayat, Pacitan, Tulungagung, Blitar, Lumajang, dan Merubetiri.

Fenomena kegunungapian yang intensif terus berlanjut sampai masa sekitar 10 juta tahun lalu (Miosen Akhir). Pada periode ini, sebaran gunung api tidak hanya berkembang di wilayah selatan, namun berkembang di bagian tengah, seperti di daerah Cianjur (Jawa Barat) dan Majenang (Jawa Tengah).

O... ya, sebelum lebih jauh, sebaran runtunan gunung api di Pulau Jawa terbagi menjadi beberapa lajur busur gunung api.

Ada jajaran gunung api yang ditemukan di wilayah selatan, tengah, hingga utara pulau, sehingga terkesan jalurnya berpindah-pindah. Banyak faktor yang memunculkan kesan itu, di antaranya aspek ketebalan dan berat jenis kerak Samudera Indo-Australia yang menyusup ke dalam bumi (mantel) dari barat ke timur Jawa sangat bervariasi.

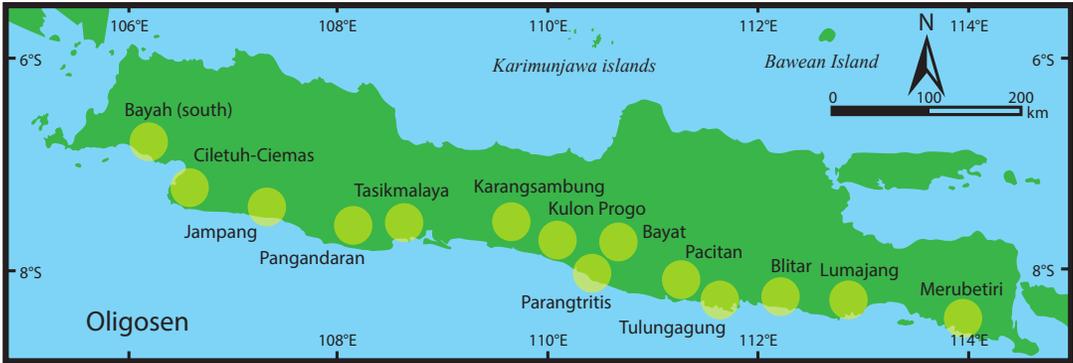
Pergerakan lempeng samudra ini memiliki kecepatan bervariasi sejak awal subduksi Jawa hingga kini. Saat ini diperkirakan kecepatan lempeng Indo-Australia bergerak ke utara dengan kecepatan sekitar 6 sentimeter (cm)-7 cm setiap tahunnya.

Kecepatan gerakan lempeng ini mempengaruhi sudut penunjamannya. Variasi sudutnya tercatat dari 60 derajat-75 derajat.

Jawa bervariasi dari 60 derajat -75 derajat dan menyusup ke arah perut bumi dengan kedalaman mencapai 600 km. Dinamis, *kan*, proses subduksi Pulau Jawa ini?

Mari kita melanjutkan meniti jejak-jejak gunung api ini. Sekitar 5 juta tahun yang lalu, di periode Pliosen, intensitas kegunungapian berkurang di bagian tengah hingga selatan. Akan tetapi, tetap aktif berkembang di bagian utara pulau. Ahli menemukan contoh jejak batuan di daerah Karimunjawa (Jawa Tengah) dan Ringgit-Beser-Lurus (Jawa Timur).

Bila membandingkan batuan dari Formasi Andesit Tua yang dominan basal-andesit,



Jejak aktivitas magmatisme-vulkanisme pada Oligosen atau sekitar 30-15 juta tahun lalu yang membentang di wilayah selatan Pulau Jawa

batuan jenis ultra potasik mendominasi batuan gunung api dari Karimunjawa dan Ringgit-Beser-Lurus. Batuan jenis ultra potasik ini merupakan penanda terjadinya proses peleburan magma di kedalaman 200 km. Lalu bergerak menembus lapis-lapis bumi hingga mencapai permukaan bumi. Sungguh rumit membayangkannya...

Mangkuk kawah besar

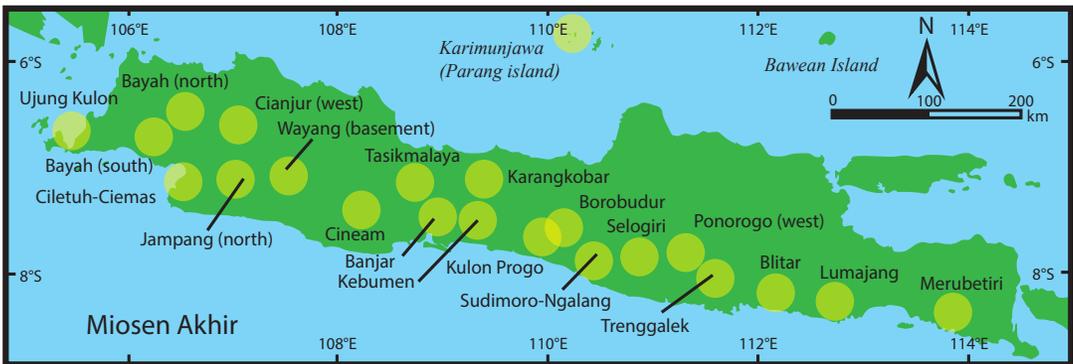
Nah, pada masa sekarang ini kita berada pada zaman Kuartar. Lagi-lagi, proses subduksinya dinamis dan berbeda dengan zaman sebelumnya.

Pada zaman Kuartar ini runtunan gunung api di daratan Jawa kembali intens. Aktivitas kegunungapian mengisi bagian tengah pulau

yang membentang dari barat hingga timur, mulai Krakatau hingga Kompleks Ijen-Raung.

Setidaknya selama zaman Kuartar ini, ahli mampu mengidentifikasi sekitar 50 gunung aktif dan tidak aktif, termasuk kompleks gunung (kumpulan beberapa gunung yang jaraknya berdekatan). Beberapa diantaranya meninggalkan morfologi sisa mangkuk kawah yang sangat besar mencapai sejauh beberapa kilometer yang dikenal sebagai kaldera. Mangkuk kaldera besar inilah yang menandai adanya letusan yang sungguh besar kekuatannya (baca Apendiks).

Keberadaan tatanan geologi berupa kegiatan subduksi dan jajaran gunung api aktif ini memiliki dampak positif dan negatif. Dampak positifnya, Pulau Jawa memiliki sumber daya alam melimpah, tanah yang su-



Jejak-jejak kegunungapian dominan berada di wilayah selatan dan tengah Pulau Jawa pada kala Miosen Akhir atau sekitar 10 juta tahun lalu

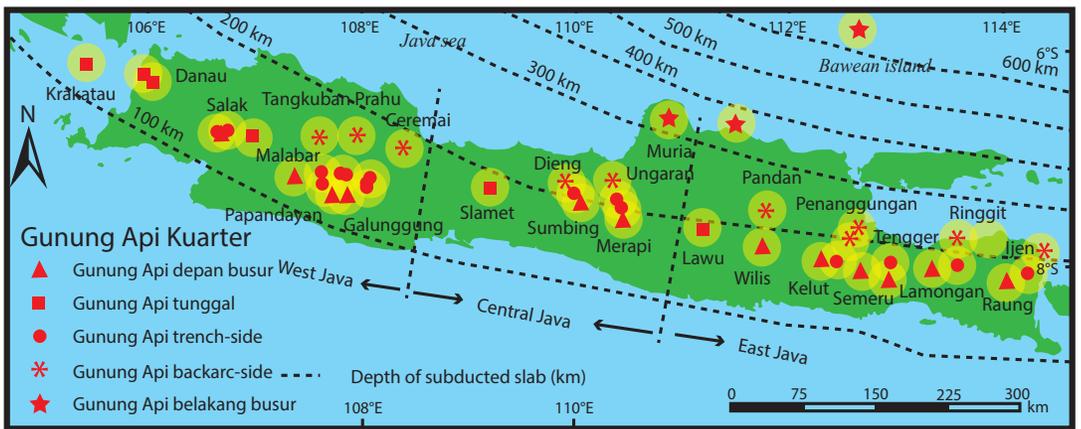
bur, sumber air pegunungan yang bersih guna mendukung kehidupan manusia di dalamnya.

Negatifnya, kita harus menyadari betapa potensi ancaman kebencanaan bisa muncul setiap saat. Maka masyarakat harus memahami pentingnya mitigasi bencana.

Mari kita bijak memanfaatkan alam untuk kesejahteraan dan sigap melindungi diri bersama-sama untuk selamat dari ancaman bencana geologi kapan pun terjadi.



Perkembangan jejak kegunungpian di Pulau Jawa dominan berada di bagian utara pulau pada kala Pliosen atau sekitar 5 juta tahun lalu



Keberadaan sebaran gunung api Pulau Jawa pada zaman Kuartar baik yang aktif maupun tidak aktif umumnya berada di bagian tengah pulau

Sumber gambar: Dimodifikasi dari "Cenozoic Island Arc Magmatism in Java Island (Sunda Arc, Indonesia): Clues on Relationships between Geodynamics of Volcanic Centers and Ore Mineralization," oleh L.D. Setijadji dan S. Kajino, 2006, Resource Geology, vol. 56, no. 3, p. 273-274. Hak Cipta 2006 oleh The Society of Resource Geology.

Gunung Tugel



Jika melewati jalan tol dari arah Situbondo menuju Probolinggo sebelum gerbang tol Tongas, kita akan melihat sebuah bukit yang berada disebelah utara jalan tol. Bukit tersebut dinamai oleh warga sekitar sebagai Gunung Tugel. Kata “Tugel” dalam Bahasa Jawa berarti “patah”, sama seperti kenampakan gunung tersebut yang terlihat patah atau terpisah menjadi dua bagian. Tidak ada warga yang dapat menjelaskan kenapa gunung tersebut seperti patah atau terbelah menjadi dua bagian.



Gunung Lamongan

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Pellentesque condimentum lorem vel magna feugiat, eu tincidunt risus tincidunt. Nunc sed magna quis augue varius sodales. Nam sagittis, risus id ornare mollis, neque risus euismod felis, quis egestas augue dui eu tellus. Nunc mauris leo, auctor ut mattis egestas, scelerisque non nulla. Donec mollis ipsum vel risus mollis, at ultrices ex placerat. Fusce lacinia gravida sem, ultrices vestibulum sapien eleifend eu. Nunc ultrices sem nulla, ornare posuere massa suscipit mollis.



Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Pellentesque condimentum lorem vel magna feugiat, eu tincidunt risus tincidunt. Nunc sed magna quis augue varius sodales. Nam sagittis, risus id ornare mollis, neque risus euismod felis, quis egestas augue dui eu tellus. Nunc mauris leo, auctor ut mattis egestas, scelerisque non nulla. Donec mollis ipsum vel risus mollis, at ultrices ex placerat. Fusce lacinia gravida sem, ultrices vestibulum sapien eleifend eu. Nunc ultrices sem nulla, ornare posuere massa suscipit mollis.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Pellentesque condimentum lorem vel magna feugiat, eu tincidunt risus tincidunt. Nunc sed magna quis augue varius sodales. Nam sagittis, risus id ornare mollis, neque risus euismod felis, quis egestas augue dui eu tellus. Nunc mauris leo, auctor ut mattis egestas, scelerisque non nulla. Donec mollis ipsum vel risus mollis, at ultrices ex placerat. Fusce lacinia gravida sem, ultrices vestibulum sapien eleifend eu. Nunc ultrices sem nulla, ornare posuere massa suscipit mollis.





VERBEEK EN FENNEMA

GEOLOGISCHE BESCHRIJVING

VAN

JAVA EN MADOERA



Koleksi: T. Hindarto



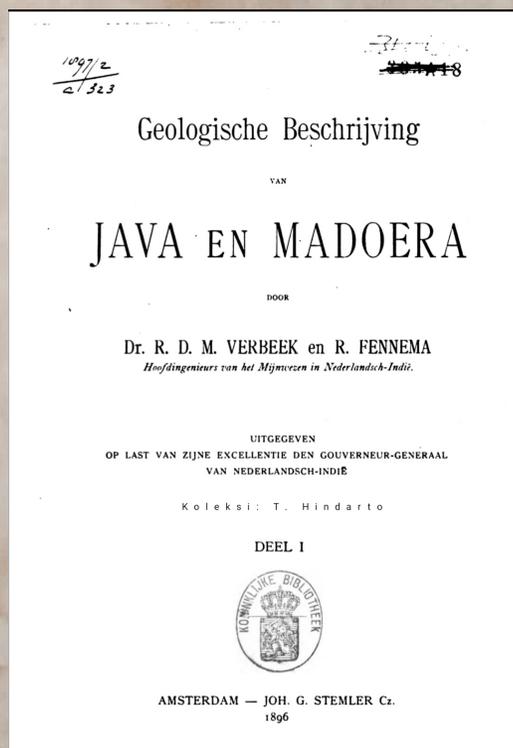
TENGGER DALAM RAGAM PANDANG AHLI GEOLOG MANCANEgara -DARI VERBEEK HINGGA BEMMELEN

Kaldera Tengger, seakan menjadi “mangkuk” laboratorium alam yang menarik dikaji para geologi, khususnya membahas asal mula pembentukannya. Ragam teori pun bermunculan dari pandangan ahli geolog mancanegara sejak tahun 1896. Bahkan, 34 tahun setelahnya, beberapa ahli geolog justru memperdebatkan model serta proses pembentukan Kaldera Tengger. Mulai dari kronologi letusannya sampai berapa awal mulanya tinggi Gunung Tengger.

Penelitian pertama kali terkait dengan Kaldera Tengger itu pada tahun 1896 oleh dua ahli geolog asal Belanda, R.D.M. Verbeek dan R. Fennema. Penelitian



Gambar 2. Foto R.D.M Verbeek (kiri) dan R. Fennema (kanan)



Gambar 1. Sampul buku “Beschrijving Geologische Van Java en Madoera” sebuah karya R.D.M Verbeek dan R. Fennema tahun 1896

mengenai Tengger termuat dalam buku mereka yang berjudul “Beschrijving Geologische Van Java en Madoera”.

Lebih dari 30 tahun kemudian, para geolog yang juga berasal dari Belanda, Escher (1928), Akkersdijk (1928), Van den Bosch (1929), dan Bemmelen (1930), tertarik membahas teori bagaimana asal mula Kaldera Tengger. Dan dari mereka inilah muncul ragam teori hingga buku Kaldera Tengger dari Badan Geologi Kementerian ESDM ini diterbitkan.

Sebelum membahas mengenai penelitian awal Tengger dari Verbeek dan Fennema, mari kita menilik sejarah penelitian mereka di Indonesia. Penelitian pertama Verbeek dan Fennema mengawali penelitian geologi di Kawasan Karangsambung dan Kebumen Utara (1845 – 1926). Berbagai karyanya terdapat satu yang terkenal, “Krakatau”, salah satu judul dalam jurnal editan tahun 1884 dan 1885, atas perintah Gubernur Jenderal Hindia Belanda.

Nah, penelitian Kaldera Tengger mereka memang tak sfenomenal “Krakatau”. Akan tetapi, cukup menggeli tik untuk menjadi sebuah referensi geolog yang tertarik mengkaji Tengger sejak Escher hingga saat buku ini terbit.

Verbeek dan Fennema mengemukakan teori mekanisme pembentukan Kaldera Tengger yang terjadi dalam tiga periode. Periode pertama, diawali oleh terdapatnya gunung berapi kembar dengan perkiraan ketinggian mencapai 4.000 mdpl dengan beberapa gunung

parasit.

Kemudian kedua gunung berapi kembar tersebut mengalami erupsi sangat hebat. Lalu, prosesnya dikombinasikan dengan runtuhnya sebagian puncak dari dua titik letusan dan membentuk dua kaldera, yaitu "Kaldera Ngadisari" dan "Kaldera Lautan Pasir". Kedua kaldera tersebut dibatasi oleh dinding punggung yang berarah relatif Barat Laut-Tenggara yang kita kenal saat ini sebagai dinding Tjemoro Lawang.

Selanjutnya, lava keluar di sisi Timur kawah. Lava tersebut melewati titik terlemah pada bagian puncak kawah yang tersisa. Materialnya membentuk lembah dengan lebar 3.700 m dan kedalaman 1.000 m. Lembah ini dikenal sebagai Lembah Sapikerep.

Pada periode kedua, aktivitas vulkanisme kaldera sebelah Timur terhenti setelah lava mengalir dan memadat. Sebaliknya aktivitas vulkanisme kaldera sebelah Barat masih terus berlanjut. Aktivitas vulkanisme tersebut berlanjut sampai terjadi suatu letusan besar yang menghasilkan produk yang tidak terkonsolidasi dan terendapkan di Lembah Sukapura. Kemudian lava yang memadat di kaldera sebelah barat menjadi alas dari Kaldera Lautan Pasir.

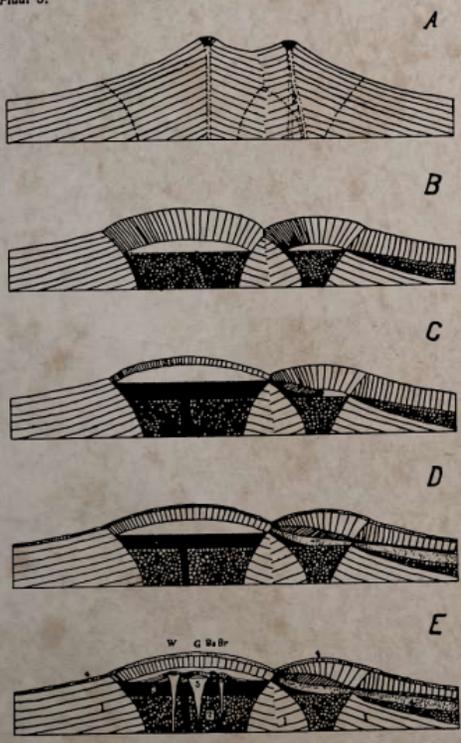
Lanjut di periode ketiga, terjadi letusan yang berulang dan berturut-turut membentuk lima gunung di dalam kaldera lautan pasir, yakni Gunung Widodaren, Gunung Guiri, Gunung Kembang, Gunung Batok, dan Gunung Bromo. Aktivitas vulkanisme gunung-gunung yang berada dalam kaldera menghasilkan abu vulkanik yang menjadi material pada kaldera lautan pasir.

Pada titik-titik tertentu di zona lemah lautan pasir terbentuk lava yang memadat di permukaan lautan pasir. Aktivitas Gunung Bromo menjadi proses vulkanisme yang masih aktif sampai dengan saat ini dan dari waktu ke waktu gunung tersebut menyemburkan abu serta batu dari pusat erupsinya.

Ketiga periode mekanisme pembentukan Kaldera Tengger Verbeek dan Fennema ini pun ternyata memantik pertanyaan serta perdebatan di antara para ahli geolog Belanda. Ketika itu Escher (1928), Akkersdijk (1928), Van den Bosch (1929), dan Bemmelen (1930).

Pembahasan tersebut mengenai model Gunung Tengger Tua, pembentukan Lembah Sapikerep, Kaldera Ngadisari, Kaldera Lautan Pasir, serta Dinding Tjemoro Lawang. Hasil perdebatan di antara mereka ini dapat dikelompokkan menjadi dua teori yang berbeda.

PIKAT 3.



- A. Gunungapi kembar yang saling berhimpitan.
- B. Pembentukan dua kaldera yang diisi oleh aliran lava dan pembentukan Lembah Sapikerep akibat dari aliran lava yang menerobos dinding kaldera bagian timur.
- C. Lava meluap di atas dinding Tjemoro Lawang
- D. Abu dan Lapili diendapkan di atas lava pada kaldera sebelah timur dan pada Lembah Sapikerep.
- E. Tahap akhir vulkanisme dengan terbentuknya gunungapi dalam kaldera sebelah barat berupa : G. Widodaren, G. Giri, G. Batok, dan G. Bromo

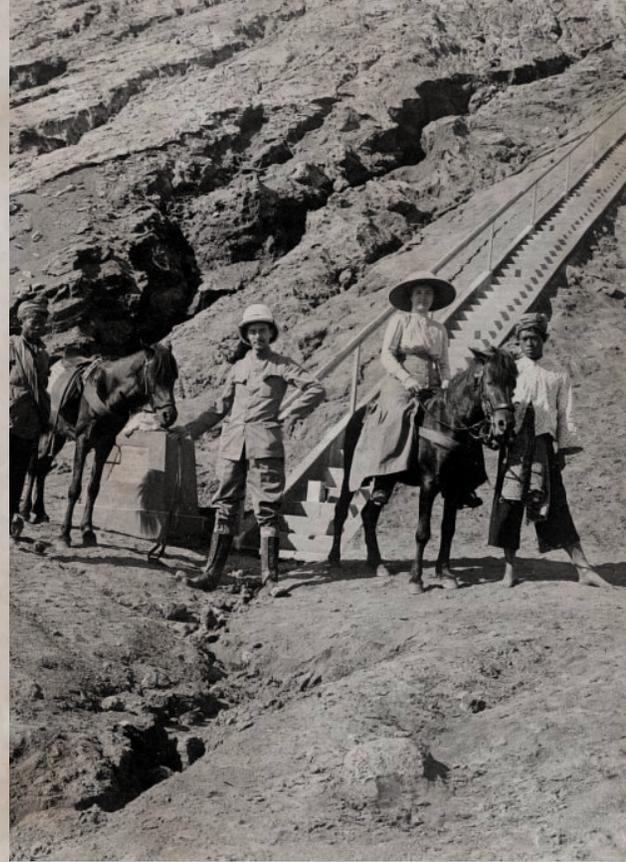
Gambar 3. Model pembentukan Kaldera Tengger menurut Verbeek dan Fennema

Kelompok Verbeek-Fennema-Escher-Van den Bosch menganalogikan Gunung Tengger terbentuk dari gunungapi kembar yang berhimpitan dengan ketinggian mencapai 4.000 mdpl.

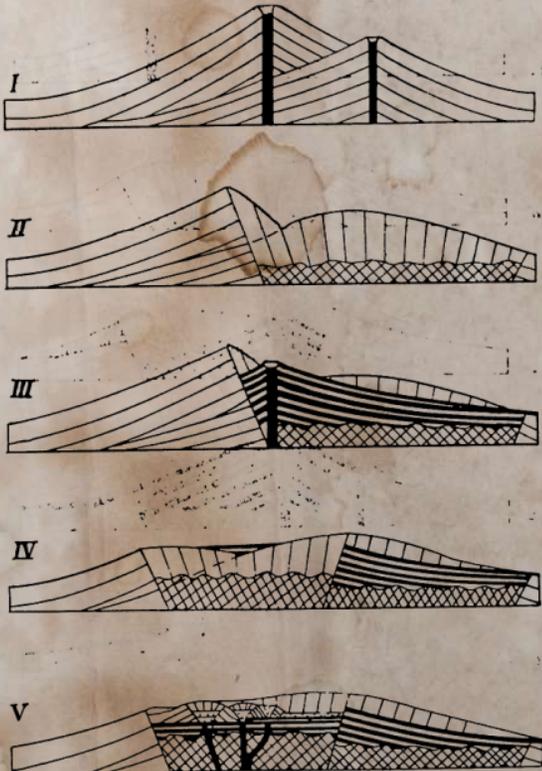
Kemudian, Kelompok Akkersdijk-Bemmelen yang menganalogikan Gunung Tengger merupakan sebuah gunungapi aktif dengan ketinggian mencapai 4.500 mdpl. Tanpa adanya gunungapi kembar yang berhimpitan.

Betapa fenomena bentang alam Tengger sangat menarik perhatian ahli geolog mancanegara. Setelah lebih dari 90 tahun perdebatan kedua kelompok ini masih belum selesai, kami dari Badan Geologi pun tergelitik untuk turut meneliti dan mengkaji Kaldera Tengger yang dimulai dari tahun 2020 hingga tahun 2023. Bagaimana hasilnya? Yuk, tetaplh lanjut ke halaman-halaman berikutnya...

Gambar 5. Europees echtpaar en twee Javanen onder aan de trap die leidt naar de kraterrand van de Bromo Unknown date



Plaat 5.



- A. Terdapat Gunung Berapi dengan satu kerucut tunggal (4500 mdpl) dan beberapa gunung parasite di sekitar.
- B. Tahap pertama terjadi erupsi yang menyebabkan runtuhnya tubuh gunungapi bagian atas disertai pembentukan Lembah Sapikerep.
- C. Terbentuk kembali kerucut gunungapi pada bagian Tengah kaldera yang telah runtuh dan Lembah Sapikerep
- D. Terjadi erupsi kembali yang menyebabkan terbentuknya kaldera dibagian baratdaya dan dinding Tjemara Lawang.
- E. Terbentuknya kerucut gunung pada bagian Tengah kaldera berupa G. Widodaren, G. Kursi, G. Bromo, dan G. Batok yang akan menjadi sumber material pada Kaldera Lautan Pasir. Selain itu terjadi juga erosi pada Lembah Sapikerep dan Cekungan Ngadisari.

Gambar 4. Model pembentukan Kaldera Tengger menurut Akkersdijk, yang Digambar ulang oleh Bemmelen

Kompleksitas "MANGKOK" Gunung Tengger

Keruwetan para ahli dalam menginterpretasikan mekanisme pembentukan Kaldera Tengger muncul karena secara morfologi nampak kompleks. Perkembangan ilmu Kaldera, khususnya "collapse caldera" memberikan berbagai contoh pembentukan kaldera mulai dengan letusan Plinian yang mengosongkan dapur magma dan memicu amblesnya badan gunung dan membentuk mangkok kaldera. Deposit dari ignimbritnya banyak memiliki fragmen lithic dan batu apung dan secara umum bersifat asam, bisa dasitik atau andesitik.



Gambar 1. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Pellentesque condimentum lorem vel magna feugiat,



Di Tengger, **problem pertama**, dikenal adanya Ignimbrite Sukapura dan selama ini diinterpretasikan sebagai hasil dari Kaldera Ngadisari. Anehnya, ignimbrite Sukapura ini tersusun atas fragmen lava juvenile segar basalt dan di atasnya tidak ditemukan endapan tephra/falls. Justu penampakkannya langsung ditumpuki oleh aliran lava, kita sebut saja Lava Umbulan.

Tidak adanya endapan tephra tebal tepat di atas Ignimbrite Sukapura ini menandakan tidak terjadi letusan Plinian, tidak ada letusan super besar yang mengosongkan dapur magma. Sehingga, muncul pertanyaan, apa yang dapat menyebabkan amblesnya Gunung Tengger Tua dan membentuk Kaldera Ngadisari ataupun Kaldera Lautan Pasir.

Problem kedua, apakah memang ada yang namanya Kaldera Ngadisari? Karena interpretasi ini dipakai untuk menjelaskan keberadaan Ignimbrite Sukapura. Bisa jadi yang disebut Kaldera Ngadisari

adalah bekas "sector-collapse" saja..

Problem ketiga, ignimbrite Sukapura bersifat basalt/basaltic andesit. Ini aneh bagi produk dari sebuah proses pembentukan kaldera. Biasanya, magma yang lebih asam dan kental, seperti di Kaldera Batur, Kaldera Ijen, dan Kaldera Masurai, termasuk juga di Toba, kaldera-kaldera tersebut menghasilkan produk endapan yang bersifat asam bisa andesitik ataupun dasitik.

Nah, membahas ini saja, Tengger telah menunjukkan keanehan, ada kaldera tapi produknya bersifat basa. Magma basa.., tapi bisa membuat kaldera.

Solusi untuk menjelaskan mekanisme dari Tengger ini dimulai dengan mengingat bahwa dalam sistem magma basalt, dapur magma dengan ukuran besar



Gambar 1. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Pellentesque condimentum lorem vel magna feugiat, eu tincidunt risus tincidunt. Nunc sed magna quis augue varius sodales. Nam sagittis, risus id ornare mollis, neque risus euismod felis, quis egestas augue dui eu tellus. Nunc

dianggap tidak terbentuk tetapi lebih pada model pengembangan pipa-pipa magma. Sehingga untuk terjadi

amblesan yang membentuk Kaldera Lautan Pasir, diperlukan dekomposisi pada reservoir magmanya. Ignimbrite Sukapura, menjelaskan, dekomposisi ini tidak terjadi melalui letusan super Plinian.

Dalam model reservoir magma basalt, misalnya di Hawaii, dekomposisi mendadak, yaitu berkurangnya tekanan reservoir magma secara tiba-tiba dapat terjadi ketika terjadi erupsi samping dengan volume besar, sehingga mengosongkan reservoir magma dan memicu amblesan tubuh gunung secara bertahap dan membentuk kaldera.

Dari sini berarti bahwa kejadian yang menghasilkan Ignimbrite Sukapura tidak ada hubungannya, secara langsung, dengan pembentukan Kaldera Lautan Pasir. Namun, bocoran magma ke samping yang mengosongkan reservoir magma perlu mempunyai volume yang cukup besar dan kondisi magma juga harus encer.

Untuk menjawab hal tersebut, penyelidikan geologi diarahkan untuk melihat bocoran-bocoran samping. Pada langkah ini adanya Gunung Lemongan yang diteliti oleh Carn, et al (2000,2001) menjadi penting.

Pertanyaan lanjutannya, apakah lava primer Tengger dan lava primer Lemongan kira-kira sama. Karena posisi kedua gunung ini berada pada "sobekan" subduksi Jawa Timur. Mari kita mencari tahu jawabannya...

"Cryptodome"

Gunung Tengger Tua

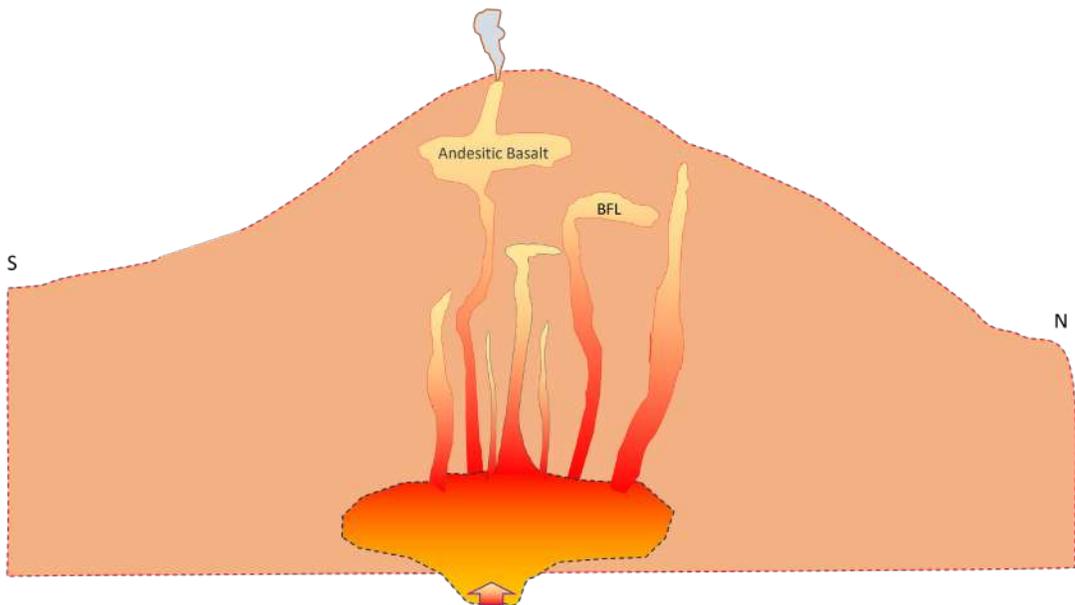
Sebelum adanya Kaldera Tengger, tentunya sudah ada Gunung Tengger Tua, masih berupa gunungapi dengan bentuk yang relatif satu kerucut besar utuh, atau mungkin juga dengan beberapa kawah aktif. Tinggi puncaknya, sebagaimana gunungapi lain di Jawa, kira-kira 3.500 mdpl.

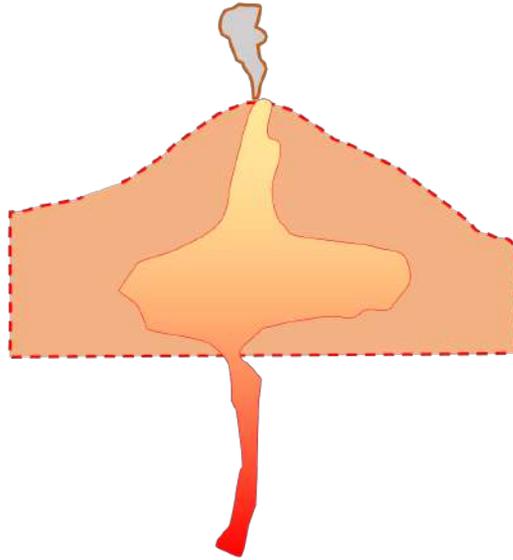
Diperkirakan magma asalnya berupa magma basalt, seperti magma yang ada di Lamongan karena kedua gunungapi ini, Lemongan dan Tengger memang sangat

berdekatan dan menempati zona subduksi yang sama. Hasil-hasil survei lapangan juga memang menunjukkan bahwa magma Tengger ini cukup encer dan basaltic. Semakin bersifat basaltic magma semakin encer dan dengan karakter encer, magma

mudah menyusup dan merambat di antara retakan-retakan.

Gambaran umum ilustrasi dapur magma dalam magma andesitic biasanya berupa dapur magma, dan dari dapur tersebut, magma naik ke atas menuju permukaan melalui pipa kepundan. Demikian juga ketika terjadi letusan, magma mengalir secara cepat keluar melalui puncaknya. Karena proses differensiasi dan kristalisasi di dalam dapur magma, magma akan semakin bersifat asam dan semakin mengandung gas pada fluida magmanya dan makin bertekanan tinggi dengan berjalannya waktu. Tekanan tinggi gas menyebabkan pada saatnya gunungapi akan meletus.





Dalam gunungapi yang magmanya berjenis basa atau sangat basa, magma akan bersifat encer. Karena encer, maka mudah menyusup dan membentuk pola-pola aliran dalam tubuh gunung, baik ketika menuju ke atas maupun sering juga ke arah samping dan membentuk kerucut-kerucut vulkanik parasite di lereng atau di kaki gunung.

Berbeda dengan model gunung andesit, di dalam tubuh gunung basaltic, dapur magma tidak dalam wujud reservoir besar, namun dalam pola pipa-pipa magma. Baru jauh di kedalaman, dapur magma basaltic bisa terbentuk.

Demikian juga Gunung Tengger Tua, magma asalnya, atau disebut magma primernya (magma yang belum banyak mengalami proses diferensiasi) berjenis magma basalt yang diperkirakan sama dengan jenis magma Gunung Lemongan yang sangat encer dan mungkin magma terencer di wilayah Indonesia.

Di dalam tubuh Gunung Tengger Tua, banyak sulur-sulur pipa magma yang mengalirkan magma dari dapur magma di kedalaman ke bagian tubuh gunung yang lebih

dangkal. Ada sulur pipa magma yang sampai ke permukaan sehingga menjadi kawah yang aktif, dan ada juga yang tidak sampai keluar ke permukaan dan magma akan tetap berada dalam tubuh gunung.

Dengan berjalannya waktu, magma yang tidak sampai ke permukaan bisa tetap encer karena mungkin volumenya cukup besar, atau bisa juga menjadi semakin kental dan lebih bersifat asam dan ada pula yang membeku dan menjadi tubuh lava di dalam tubuh gunung yang kadang disebut dengan istilah "cryptodome".

Gunung Tengger Tua merupakan gunungapi aktif, banyak menghasilkan aliran-aliran lava yang menyusun tubuh gunung itu sendiri sehingga memang Gunung Tengger Tua ini ukurannya cukup besar.

Ya..bisa dibandingkan dengan Gunung Argopuro atau Gunung Ijen Tua di sebelah timurnya. Batuan lava yang ada di lokasi Madakaripura, misalnya, adalah hasil dari aktivitas Gn Tengger Tua, demikian pula aliran lava dan kerucut-kerucut vulkanik yang ada di lereng sebelah barat, barat daya maupun selatan.



Belajar dari Kerucut-Kerucut Lemongan

The origin of the high-K cinder cones in the western LVF is unclear, but given their parental relationship to lavas from Bromo, it is possible that they represent the products of volcanism on the periphery of the Bromo-Tengger complex. These cones are amongst the oldest in the LVF and hence may not be temporally associated with activity in the rest of the field. However, geochronological work is needed to fully establish the age relationships between the various groups of vents identified in this study.

Di Lemongan, banyak terdapat kerucut cinder, spatter dan ranu yang menunjukkan magmanya sangat encer, basalt serta bisa keluar di mana saja. Carn menyebut, magma Lamongan merupakan magma paling primitif di Jawa dengan silika sangat rendah $\text{SiO}_2 \sim 43$ persen.

Karena posisinya pada sobekan “slab” keduanya, Lamongan dan Tengger dapat mempunyai magma “parents” sama dengan ciri kandungan K yang tinggi.

Pernyataan Carn ini membawa kita kepada kerucut-kerucut cinder parasite yang ada lereng timur Tengger. Kerucut ini jumlahnya cukup banyak ada sekitar 10-an yang teridentifikasi. DEM Tengger yang dilihat dari Lemongan, mampu memberikan gambaran zona bocoran magma Tengger. Bocoran inilah yang membuat Kaldera Tengger

Jadi, ini yang mengarah pada pikiran bahwa Ignimbrite Suka-pura bukanlah pemicu dari terbentuk Kaldera Tengger yang kemudian juga disebut sebagai Kaldera Lautan Pasir. Kalau



Gambar 1. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Pellentesque condimentum lorem vel magna feugiat, eu tincidunt risus tincidunt. Nunc sed magna quis augue varius sodales. Nam sagittis, risus id ornare mollis,



Gambar 1. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Pellentesque condimentum lorem vel magna feugiat, eu tincidunt risus tincidunt. Nunc sed magna quis augue varius sodales. Nam sagittis, risus id ornare mollis, neque risus euismod felis, quis egestas

Kaldera Tengger munculnya terpicu oleh bocoran magma di lereng timur nya,

Lalu... dari mana Ignimbrite Sukapura ini?? Kejadian apa yang menimbulkan ignimbrite Sukapura?? Apa betul ada Kaldera Ngadisari ??

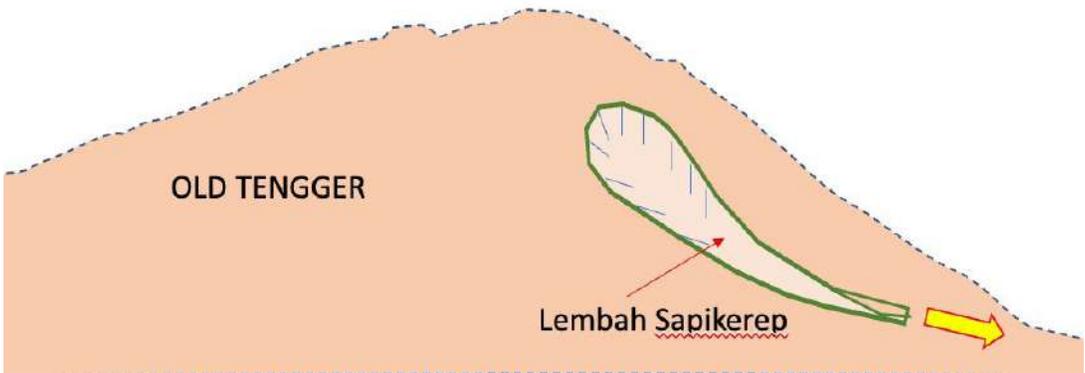
Diluar perdebatan para ahli Belanda di masa lalu dan kesimpulan kesimpulan dari penelitian-penelitian sebelumnya, perkembangan ilmu kaldera modern perlu menjawab genesa dari Ignimbrite mafic Sukapura.

Namun, pikiran bisa dimulai dari pertanyaan,, Lembah Sapikerep itu terbentuknya bagaimana? Ini yang semestinya menjadi awal untuk memahami bentukan morfologi yang kita amati sekarang ini di Kawasan Tengger-Bromo.

Asumsi pertama adalah Lembah ini terbentuk oleh 'sector-collapse'. Longsoran atau runtuh lereng. Kejadian ini memang lumrah terjadi di gunungapi dan pegunungan dengan lereng curam. Misanya di G. Arjuna... terdapat lembah yang terbentuk oleh "Runtuhan Lereng".

Kalau memang runtuh besar, endapannya perlu dicari. Penyelidikan di arahkan ke daerah Boto, Palangbesi dan Ngepung di lereng timurlaut Tengger. Hasilnya...berlanjut di bagian berikutnya.

LEMBAH SAPIKEREP



Kurang lebih berjarak 2 km dari Patalan ke arah Tengger, di jalan raya Boto Sukapura, di dasar sungai dijumpai adanya batuan breksi dan tersusun atas fragmen pecahan batuan beku, geolog menyebutnya sebagai fragmen "lithic".

Pada batuan ini tidak terdapat fragmen lava baru, yang dimaknai fragmen-fragmen yang ada berasal dari tubuh batuan beku, ...yaaa... tubuh Gunung Tengger itu sendiri. Batuan breksi lithic ini juga dapat dijumpai di Desa Muneng dan Purut, serta bisa juga terlihat dilokasi lain karena batuan ini sebarannya luas sampai ke Probolinggo.

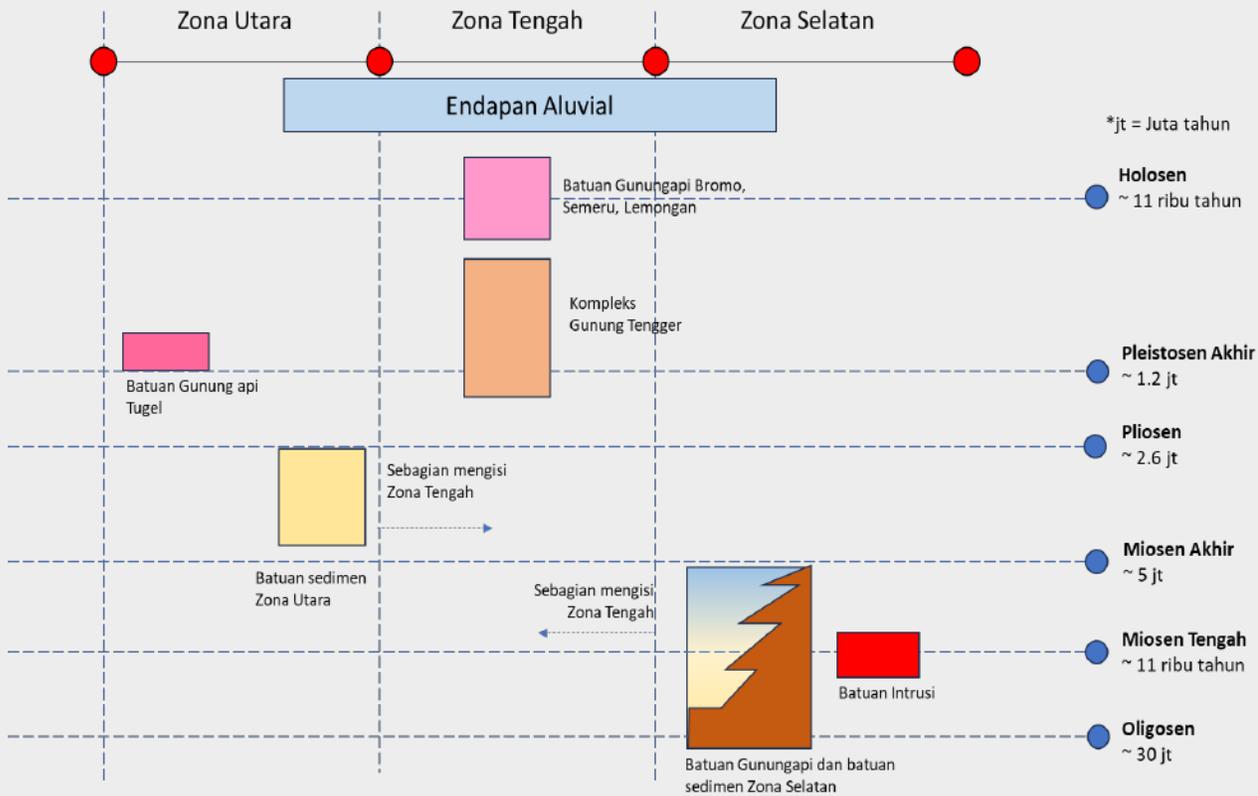
Batuan ini merupakan hasil dari proses longsoran yang kemudian membentuk Lembah Sapikerep. Longsoran besar ini merupakan hal lumrah di pegunungan, memang biasanya hanya kecil-kecil saja.

Kondisi Tengger saat itu masih berupa gunung besar, yaitu Gunung Tengger Tua... Lahh.. Kan memang Gunung Tengger Tua ini merupakan gunung besar dengan ketinggian kira-kira 3.500 mdpl.

Longsoran ini tidak sampai membentuk sistem magma yang ada di pusat Gunung Tengger Tua, sehingga endapannya hanya tersusun atas hancuran batuan beku tubuh lereng gunung Tengger Tua itu sendiri. Tidak ada lava yang keluar. Dan.. Pada tahap ini..Lembah Sapikerep terbentuk.. Belum sampai ke bagian puncak dari Gunung Tengger Tua.....bagian atas longsoran kemungkinan sampai di elevasi 2.200 mdpl, masih sekitar 1.000 mdpl, di bawah puncak Tengger Tua. Pada saat itu belum terjadi Ignimbrite Sukapura.



Stratigrafi Regional



Periode 4

Periode keempat ini ditandai dengan aktifnya kembali proses magmatisme-vulkanisme gunungapi pada Plistosen – Holosen. Aktifitas gunungapi ini menempati bagian busur api yang memanjang barat – timur Pulau Jawa. Hal tersebut ditandai dengan hadirnya beberapa gunungapi (G. Bromo, G. Semeru, G. Lemongan, dan G. Tugel), morfologi kaldera (Kaldera Tengger), dan perbukitan sisa vulkanisme. Selanjutnya, sepanjang aliran Sungai – Sungai besar yang mengalir ke utara berkembang endapan fluvial dan alluvial.

Periode 3

Periode ketiga terjadi pada Pliosen – Plistosen, dimana proses ini terjadi deformasi yang sangat kuat akibat dari gaya kompresi di Selatan Pulau Jawa. Proses ini menyebabkan batuan – batuan sebelumnya mengalami pensesaran dan pelipatan membentuk sebuah antiklinorium yang dapat diamati di Zona Utara.

Periode 2

Pada periode kedua ini terjadi pada Miosen – Pliosen, dimana terjadi penurunan aktifitas magmatisme-vulkanisme Oligosen – Miosen secara masif dan menjadi awal pengendapan batuan sedimen karbonat dan sedimen silisiklastik. Selain itu, proses tektonik menyebabkan deformasi dan erosi batuan – batuan sebelumnya.

Periode 1

Periode pertama dikenal sebagai masa kejayaan dari gunungapi pada Oligosen – Miosen. Periode ini ditandai dengan aktifnya proses magmatisme-vulkanisme yang terjadi di laut, menghasilkan batuan gunungapi dan batuan terobosan yang menempati Sebagian besar Selatan Pulau Jawa.



“Watu Poleng”

Lava Bintik Putih Kunci Pahami Gunung Tengger

Aneh tapi nyatanya ada. Batuan lava berbintik-bintik putih yang jarang ditemui di gunungapi, ternyata kita dapat melihatnya di Tengger. Dan, batu ini menjadi kunci memahami Gunung Tengger.

Ya, “Watu Poleng”, demikian warga Tengger menyebutnya untuk batu bintik-bintik putih ini, batuan lava yang aneh dan jarang ini. Teksturnya unik, berwarna abu-abu dengan bintik-bintik putih. Kristal putih adalah “plagioklas” berukuran sampai 5 mm. Lava ini merupakan lava basalt.

Lava ini ketika terjadi keluar dari rekahan di dinding utara Ngadisari, sebelah Ngadas, dan terus mengalir ke bawah sampai hampir sampai di Jurang Prahau, dengan jarak sekitar 2 km. Bagian atasnya tertutup oleh produk letusan Gunung Tengger yang baru sehingga lava Poleng hanya dapat ditemui di dasar-dasar jurang. Di lokasi Air Terjun Poleng, lava ini menjadi bagian permukaan dari atas air terjun.

Lebih aneh lagi, kita dapat menjumpai pecahan-pecahan fragmen lava poleng di pelataran Lautan Pasir. Artinya, Ketika Bromo meletus, kadang membawa pecahan lava Poleng yang masih ada di dalam di tubuh Gunung Bromo.

Lava Poleng Tengger keluar dari rekahan lereng pada masa yang sama dengan terjadinya Ignimbrite Sukapura. Maka itu bisa dimaknai ketika longsoran besar terjadi, yang memotong tubuh Gunung Tengger Tua, bidang longsornya memotong pipa magma yang menghasilkan Ignimbrite Sukapura. Lalu juga mengeluarkan aliran lava Poleng di tepian bidang longsor.

Keberadaan Lava Poleng ini menjadi keunikan tersendiri bagi Tengger. Dan memang Tengger ini kaldera yang tidak mengikuti kaidah pembentukan kaldera seperti kaldera pada umumnya di Indonesia.

Lokasi Air Terjun Umbulan, Jembatan Jurang Prahau dan Jurang Poleng menjadi tiga lokasi penting. Ketiganya saling berkaitan dan aliran-aliran lavanya terjadi kurang lebih pada periode yang sama, yaitu sekitar 150 ribu tahun lalu.

Watu Poleng pun penguak tabir lava-lava Gunung Tengger.



Jurang Poleng



Air Terjun Umbulan







Apendiks

TENTANG KALDERA

Semua berawal dari letusan dahsyat Gunung Krakatau di bulan Agustus tahun 1883 dan meninggalkan diameter kaldera 8 kilometer. Setelah letusan mereda, Pemerintah Hindia Belanda mengirim ahli geologinya, RDM Verbeek, untuk meneliti dan menganalisis bagaimana letusan besar itu terjadi. Melalui terbitan "Nature", majalah ilmiah pada 22 Oktober 1885, hasil kajian Verbeek dimuat berjudul "Krakatau". Tulisannya berhasil memenuhi harapan banyak pihak, terutama munculnya konsep collapse caldera (kaldera runtuhan atau amblesan). Sejak itu, kajian kaldera dari ahli seluruh dunia pun berkembang pesat.

Waktu menunjukkan jam satu siang, tanggal 26 Agustus 1883. Krakatau yang berada di Selat Sunda, meletus. Gelegarnya seperti geluduk terdengar sampai di Bogor, Jawa Barat, Indonesia, yang berjarak sekitar 400 kilometer (km) dari Krakatau. Kolom letusan berwarna gelap membumbung setinggi 27 km.

Letusan berlanjut hingga keesokan harinya. Pukul 10 pagi. Abu vulkanik naik setinggi kira-kira 80 km. Kali ini dentumannya lebih dahsyat dan sampai lintas ke Benua Australia. Lalu, 30 menit kemudian, gelombang pasang setinggi 40 meter (m) menghempas serta menelan pantai-pantai di sepanjang Banten (Jawa Barat) dan Lampung (Sumatera). Tsunami datang. Sapuan gelombang pasang pun menelan korban meninggal sekitar 36.000 jiwa. Dan, letusan terus bertubi-tubi, meski tak lagi diiringi tsunami.

Besarnya letusan Krakatau di hari itu, Verbeek menghitung total material yang keluar adalah 18 km^3 . Sebanyak 95 per-sen dari total

material tersebut merupakan material magma. Sisanya atau $0,9 \text{ km}^3$, berupa bahan-bahan hancuran bagian Pulau Rakata, Danan dan Perbuwatan. Artinya, hilangnya ketiga pulau (Rakata runtuh sebagian) itu bukan karena terlempar bersama kolom letusan, melainkan runtuh atau amblas. Setelah amblas kemudian kembali mendapat tekanan, lalu meletus dan hancuran mulai terlontar keluar.

Mengapa runtuh? Karena volume kerucut-kerucut dari pulau yang runtuh tersebut yang berada di atas permukaan laut saja ada terhitung sekitar lebih dari 25 km^3 . Maka, Verbeek yakin, kaldera Krakatau terbentuk karena proses amblasan. Klimaks proses amblasan berlangsung ketika terjadi gelombang pasang tertinggi di tanggal 27 Agustus 1883, pukul setengah sebelas pagi.

Proses amblasan atau runtuhan dari kajian Verbeek dari letusan Krakatau menjadi pijakan betapa terjadinya kaldera menjadi penting bagi ilmu geologi. Betapa dapur magma yang besar itu memicu adanya pemahaman bagaimana proses magma di dalam bumi, khususnya konsentrasi-konsentrasi magma dalam jumlah yang sangat besar.

Terdapat tiga pulau berimpitan. Pulau-pulau itu berderet dari ara tenggara ke arah barat laut. Pulau itu bernama, Pulau Rakata dan Pulau Danan dengan tinggi kerucut vulkanik 450 meter dari permukaan laut (mdpl), serta Pulau Perbuwatan dengan tinggi kerucut vulkanik 120 mdpl.

Lepas dari deretan tiga pulau tersebut, terdapat dua pulau lagi. Pulau Verlaten terletak di sebelah barat laut dan Pulau Lang di timur laut.

Pulau-pulau ini semua ada sebelum adanya letusan dahsyat di area yang saat ini ditempati oleh Gunung Anak Krakatau. Sebelum tahun 1883, Pulau Rakata, Danan dan Perbuwatan adalah kerucut-kerucut vulkanik aktif. Ketika itu, batuan di Rakata tersusun dari produk magma basaltic. Pada tahun 1680, kerucut Perbuwatan terjadi letusan dengan komposisi andesitic (lebih asam dari yang di Rakata). Setelah itu, Gunung Krakatau tidak menunjukkan kegiatan selama 200 tahun hingga menjelang letusan besar di tahun 1883.

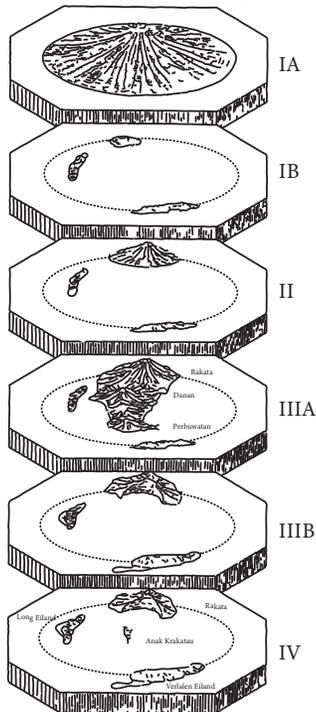
Krakatau memulai letusannya pada 20 Mei 1883. Puncak erupsi hebat tercatat pada 26-28 Agustus 2018.

Pada bulan Mei 1883 itu, kerucut Perbuwatan ikut meletus dengan skala kecil. Saat diteliti, pada 27 Mei 1883, sebagian pulau-pulau tertutup abu dan terjadi vegetasi. Tidak terbakar tetapi tanaman di lingkungan sekitarnya mati atau layu.

Sementara, beberapa bagian di Pulau Lang (timur laut) ditemui batu apung dan hancuran dari lava tua. Selanjutnya tidak ada aktivitas yang berarti sampai tanggal 19 Juni 1883.

Memasuki bulan Juli 1883, aktivitas vulkanik kembali stabil. Tak ada petunjuk bakal meletus besar di tanggal 26-28 Agustus 1883. Data visual yang diperoleh pada tanggal 11 Agustus 1883, hanya menunjukkan adanya pusat-pusat erupsi yang berderet mulai dari kerucut Perbuwatan ke kerucut Danan. Mari kita pelajari kejadian pembentukan kaldera Krakatau.

Kronologi letusan Krakatau ini menjadi menarik karena menjadi cikal bakal proses pembentukan kaldera terbaru di muka bumi di tahun 1883. Bisa jadi, Krakatau pernah meletus dan membentuk kaldera di tahun 416AD. Hanya saja, penjelasan untuk itu hampir minim informasi. Sedangkan kejadian pembentukan kaldera Krakatau pada tahun 1883, relatif sangat rinci. Secara umum diketahui bahwa letusan Krakatau terjadi pada tanggal 27 Agustus 1883. Namun, prosesnya sendiri berlangsung sejak Mei 1883.



- I.A. Awalnya, Krakatau dianggap sebuah kerucut gunungapi besar.
- I.B. Terjadi letusan besar yang membentuk kaldera (sekitar Abad ke-5). Dan dari proses pembentukan kaldera ini, tersisa beberapa tiga pulau, yaitu Verlatern, Lang dan Rakata.
- II. Di tempat Rakata berada, muncul kerucut gunungapi baru yang juga disebut Gunung Rakata, dengan susunan atas batuan basaltik.
- III.A. Di tengah-tengah cekungan kaldera tersebut, muncul dua kerucut gunungapi baru Perbuwatan dan Danan, yang semakin besar dan akhirnya, menyatu dengan Rakata disebut Krakatau. Tercatat dari Gunung Krakatau pernah terjadi letusan dengan komposisi andesitik pada tahun 1680.
- III.B. Pada tanggal 20 Mei 1883, sesudah tenang selama dua abad letusan besar terjadi yang mengalami puncaknya pada 26 dan 28 Agustus 1883. Yang mengalami puncaknya pada diperkirakan menghasilkan batu apung dan abu sebanyak 18 km³. Gunungapi Perbuwatan, Danan dan setengah dari Rakata hilang amblas. Meninggalkan sebuah cekungan baru dengan kedalaman 250 m dan diameter 70 km.
- IV. Proses amblasnya Krakatau tersebut menimbulkan gelombang pasang 20 meter menyapu pantai-pantai di Selat Sunda, Jawa bagian barat, dan mengakibatkan 36.417 orang tewas.
- V. Selanjutnya, munculah kerucut gunungapi baru yang disebut Anak Krakatau. Gunung Anak Krakatau lahir pada Bulan Desember 1927.

Kronologi Letusan Krakatau

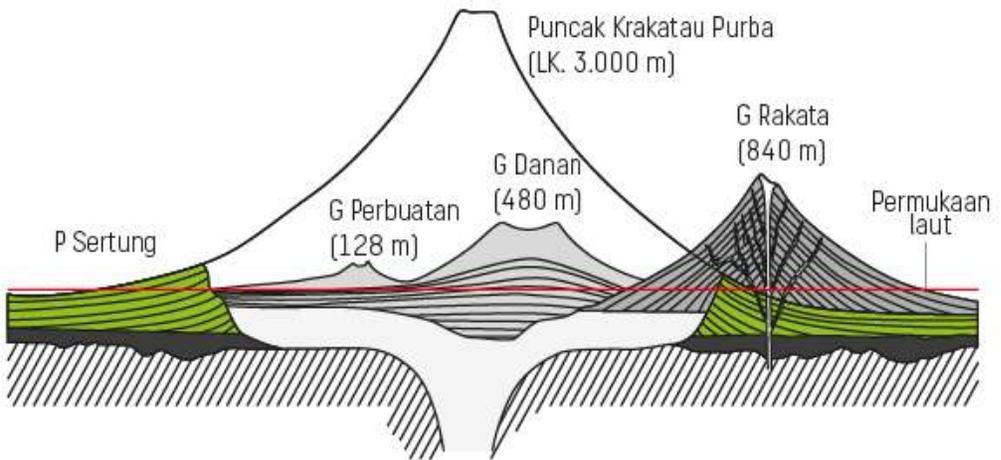
Mei 1883	Terjadi tremor/ getaran yang dirasakan di Anyer, Jakarta. Waktu itu belum ada seismograf. Beberapa kapal yang lewat di sekitar Krakatau, melihat asap dan uap keluar dari puncaknya.
20 Mei 1883	Mulai pukul 6-10 pagi, terjadi letusan dan hujan abu lebat. Suara letusan terdengar sampai Jakarta, hingga Bogor (Jawa Barat). Letusan berulang terjadi sampai dengan 22 Mei disertai petir serta suara dentuman keras. Batuapung teramati berserakan mengambang di laut pada 22 Mei. Sampai tanggal 24 Mei masih ada yang melapor terjadi hujan abu (artinya letusan masih terjadi).
27 Mei 1883	Gempa besar terasa di Pandeglang, Jawa Barat. Pemerintah Batavia (Jakarta sekarang) mengirim tim untuk cek ke Krakatau. Tim melaporkan bahwa terjadi letusan tiap 5-10 menit di Gunung Perbuwatan dengan kolom sekitar 3 km. Beberapa hari kemudian, situasi menjadi lebih tenang.
19 Juni 1883	Letusan dengan kolom letusan membumbung tinggi berwarna hitam terlihat dari Anyer. Pada kejadian ini tim menduga puncak Perbuwatan hilang dan hancur karena letusan
28 Juni 1883	Letusan besar kembali terlihat dari Anyer
09 Juli 1883	Kapal Quetta melintasi Selat Sunda dan melaporkan seperti mengarungi lautan batu apung.
01 Agustus 1883	Kapal Siam juga melaporkan mengarungi lautan batu apung.
11 Agustus 1883	Kapten Ferzenaar (Komandan Brigade Kartografi Banten) pergi ke Krakatau untuk memetakan peristiwa letusan itu. Dan dia pun menjadi orang terakhir yang menginjakkan kaki di Krakatau sebelum kejadian 27 Agustus 1883. Dilaporkan bahwa pusat letusan ada tiga, yaitu sepanjang celah Gunung Perbuwatan dan Gunung Danan. Gunung Rakata, Danan, dan Perbuwatan merupakan kerucut-kerucut gunungapi yang posisinya berderet di Krakatau. Dilaporkan juga oleh kapal yang lewat tanggal 12 Agustus, terdapat lobang aktif hanya beberapa jengkal dari permukaan laut. Ahli memperkirakan kejadian letusan kaldera pada 27 Agustus, dan letusan-letusan terus terjadi.
25 Agustus 1883	Hujan abu dan batu apung terjadi di Teluk Betun di malam hari.
26 Agustus 1883	Letusan besar berlangsung. Langit pun gelap sekitar jam 2 siang. Pada jam 5 sore, terjadi hujan batu apung (hangat) dengan ukuran lebih besar. Memang mulai jam 5 sore letusan semakin dahsyat. Semalaman, suara letusan terus menggelegar. Hujan abu tidak berhenti.
27 Agustus 1883	Letusan besar tercatat pada dini hari, pukul 2.38 Wib. Pukul 4-5 pagi, terjadi hujan abu basah dan gelombang udaranya terasa di Batavia, pukul 04.56 Wib. Letusannya dahsyatnya berlangsung empat kali, yaitu pukul 05.43 Wib, 08.20 Wib, 09.59 Wib, dan 10.52 Wib. Erupsi paling puncaknya, pukul 09.59 Wib dan memicu bencana tsunami dengan menghantam Caringin dan Merak, pukul 10.30 Wib. Tsunami menelan korban jiwa sekitar 10 ribu orang. Letusan semakin berkurang kekuatannya dan berhenti pada 28 Agustus, pagi.
17 Sept 1883	Beberapa letusan yang lebih kecil masih terjadi hingga tanggal 10 Oktober.

Sumber: Simkin dan Fiske, 1983.

Tabel kronologi di atas menunjukkan, letusan yang membentuk kaldera dan menghasilkan ignimbrite, yang terjadi secara bersamaan. Banyak titik letusan dalam area luas sepanjang rekahan yang membelah Krakatau. Maka dapat disimpulkan, letusan-letusan gunungapi yang terjadinya dari hanya pada satu titik letusan dari kerucutnya, mempunyai kemungkinan kecil untuk membentuk kaldera.

Hal kedua yang dapat disarikan dari kronologi tersebut adalah proses runtuh (collapse) yang membentuk kaldera terjadi sangat singkat. Pembentukannya terekam dari jam 05.43 Wib sampai dengan jam 10.00 Wib atau sekitar empat jam. Letusan ini diikuti dengan tsunami.

Lalu, erupsi lanjutannya yang cukup besar juga yang terjadi pada jam 10.59 Wib. Hanya saja, erupsi susulan ini tidak disertai dengan tsunami. Artinya, letusan susulan tersebut terjadi setelah proses amblesan selesai.



(Atas) Sketsa ilustrasi Kaldera Krakatau. (Bawah) Situasi Pulau Rakata yang tersisa, sementara Gunung Danan dan Gunung Perbuwatan tidak nampak lagi karena ambles. Posisi antara Gunung Danan dan Gunung Perbuwatan saat ini ditempati oleh kerucut aktif Gunung Anak Krakatau.

Menimbun Peradaban

Bagi Indonesia, yang terletak di busur subduksi Sumatra-Jawa-Nusa Tenggara serta busur subduksi Sulawesi-Halmahera, keberadaan kaldera menjadi morfologi yang banyak ditemui di sepanjang pulau-pulau tersebut.

Pertanyaannya: Apakah kita siap menghadapi peristiwa sebesar letusan Krakatau seperti di tahun 1883?. Karenanya, kajian, pengetahuan dan mitigasi menjadi penting sebagai antisipasi jika terjadi letusan sedahsyat itu kedepannya.

Kaldera, secara teknis disebut sebagai kaldera runtunan (collapse caldera), merupakan sebuah struktur permukaan bumi yang penting bukan hanya sisi ilmiah kegeologian. Tidak hanya juga dari sisi ancaman kebencanaan. Namun, kaldera runtunan tersebut memiliki potensi sumber daya alam luar biasa. Yakni, menjadi sumber potensi energi geothermal yang besar dan sering berasosiasi dengan deposit mineral yang tentunya bernilai ekonomi.

Meskipun kejadian runtunan dahsyat sangat jarang terjadi dalam era sejarah manusia, rekaman geologi menunjukkan pembentukan kaldera menjadi salah satu kejadian yang paling katastrofik di muka bumi ini. Dan, peristiwanya berpengaruh besar pada iklim dan kehidupan manusia, seperti disarikan Geyer dan Marti (2008).

Lokasi dari aktivitas geothermal yang kuat sehingga merupakan daerah yang potensial untuk memenuhi kebutuhan listrik biasanya berada di wilayah kaldera. Tak hanya itu, *Cole et al, Calderas and caldera structures: a review (2005)*, menyarikan adanya lokasi kaldera juga sering menjadi tempat berlangsungnya proses mineralisasi. Selanjutnya, area itu memiliki potensial bagi pemenuhan kebutuhan bahan mineral/tambang.

Letusan Gunung Krakatau di tahun 1883, memberikan gambaran penting proses menyemburkan fragment bubuk magma jauh hingga mencapai ketinggian udara dalam bentuk scoria, pasir dan abu. Hanya saja, material-material dari semburan tersebut tidak banyak ditemukan material padat seperti hancuran tubuh gunungapi sebelumnya (minim lithic). Hal ini menunjukkan terbentuknya kaldera Krakatau melalui proses amblesan tubuh gunungapi. Lalu, mengisi kekosongan yang terbentuk di bagian atas dari dapur magma karena material yang semula mengisi bagian tersebut terlempar keluar dalam letusan besar (*emptied-out*).

Sebenarnya memasuki zaman sekitar dekade 1920-an, terminologi kaldera ini masih menjadi perdebatan. Lalu apa yang diperdebatkan? Ahli geologi menilai perdebatan kala itu hanya terbentur permasalahan bahasa. Sederhana. Meski sederhana tetapi hal ini disayangkan. Ketika ahli-ahli asal Jerman, Belanda dan Jepang bertemu dan membahas kaldera bersama, mereka jarang menuliskan diskusinya dalam bahasa Inggris. Hal ini berdampak kepada wacana tentang kaldera tidak banyak menyebar ke negara-negara yang berbahasa Inggris.

Penggunaan terminologi kaldera lebih terdefinisi secara luas dan mulai terformulasikan setelah Howel William mengupas kaldera dalam bukunya "Calderas dan Their Origin" yang diterbitkan oleh University of California pada tahun 1941. Awal ketertarikan William pada kaldera dimulai sekitar tahun 1929. Ahli ini mengawalinya dengan mengunjungi Gunung Kilauea di Hawaii.

Perjalanan penelitiannya pun berlanjut ke kaldera Brokeoff di California. Penasarannya bertambah mengarahkannya datang ke kaldera Batur, Kintamani (Bali), **Ijen di Bondowoso**, Tengger di Probolinggo (Jawa Timur), dan

tentu juga pergi ke Krakatau.

Permasalahan terminologi kaldera ini dalam perdebatannya terfokus pada : apakah kaldera adalah produk langsung letusan gunungapi atau hasil dari proses amblesan? Bagi Van Bemmelen dan Neumann van Padang, kedua ahli ini tegas menggunakan terminologi kaldera untuk morfologi depresi yang diakibatkan oleh amblesan (runtuhan atap dapur magma).

Berdasarkan proses, Van Bemmelen membedakan depresi (morfologi cerukan) dari letusan gunungapi menjadi dua, yaitu :

1. Depresi karena puncak gunung hancur dan terlontar oleh proses letusan itu sendiri. Proses ini menghasilkan kawah.
2. Depresi karena amblesan yang terjadi karena letusan besar mengosongkan sebagian isi dapur magma sehingga terjadi amblesan atap dapur magma. Proses ini menghasilkan kaldera.

Ada ahli lain, Walker, menyebut apabila letusan sangat besar dan puncak gunung han-

cur terlontar sehingga membentuk kawah yang sangat besar lebih dari 1 mil (>1 mil) dan lebih dari 1,6 km (>1,6 km). Itulah kaldera. Sudut pandang ini berdasar pada ukuran. Hanya saja pemahaman kualitatif, kaldera adalah kawah yang besar. Tentunya batasan ukuran besar untuk membedakan kawah dan kaldera terletak pada ukuran diameternya lebih dari 1,6 km.

Di era modern saat ini, penggunaan istilah kaldera lebih banyak dipakai untuk menyebut kaldera amblesan (collapse caldera). Mengapa? Karena jarang ada letusan sangat besar yang langsung dapat membentuk kawah lebih dari 1,6 km.

Bentuk kaldera amblesan ini pada awalnya sering disebut sebagai kaldera tipe Krakatau. Berjalannya waktu dan berkembangnya pengetahuan tentang kaldera, serta semakin populer orang dengan apa itu kaldera, penggunaan istilah kaldera tipe Krakatau pun semakin jarang dipakai. Selanjutnya, kembali memakai istilah kaldera amblesan.

Peristiwa Beberapa Kaldera Dunia

Kaldera	Ukuran km	Volume yg diletuskan km ³	Waktu terjadi
Tambora	6	>33	1815
Krakatau	8	12.5	1883, 416
Samalas	6	>40	1257
Taupo	35	35	232
Vesuvius	3.5	3	79
Santorini	10x7	60	1600 SM
Batur	12x10	20	29 ribu thn lalu
Masurai	7	14	33 ribu thn lalu
Maninjau	20x8	~150	52 ribu thn lalu
Toba	100x30	>2000	74 ribu thn lalu
Ijen	15x12	~90	294 ribu - 50 ribu thn lalu

Sumber : berbagai sumber diolah Badan Geologi.

Sebaran dan Aktivitas

Di atas bumi, berdasarkan data sementara yang diketahui, ahli mencatat sebanyak 283 kaldera. Indonesia memiliki 19 kaldera.

Kaldera Toba dikenal sebagai kaldera berukuran terluas yang ada di dunia, terbentuk kurang dari 100.000 tahun lalu. Ukurannya, 100 km x 30 km dengan bentuk lonjong. Di New Zealand terdapat kaldera Taupo yang diameternya sekitar 35 km. Amerika Serikat juga terdapat adanya kaldera Yellowstone dengan diameter 60 km. Kawasan Yellowstone populer dengan Yellowstone National Park.

Kembali ke aktivitas kaldera, keberadaannya tidak bisa dipisahkan dari proses-proses vulkanik. Karena letaknya yang berada di busur-busur vulkanik yang ada di bumi. Karenanya, sistem subkaldera bersifat dinamis

dalam keseimbangan antara tenang dan aktif. Keaktifannya tidak membutuhkan pemicu yang besar, termasuk proses-proses geologi seperti gempa bumi, intrusi magma.

Pada umumnya keaktifan kaldera tidak berujung pada letusan. Karena, keaktifan merupakan dinamika normal dari kaldera itu sendiri.

Ukuran dan bentuk kaldera bervariasi. Beberapa kaldera berbentuk relatif lingkaran dan mempunyai sejarah pembentukan yang simple (sekali collapse). Tetapi beberapa kaldera berbentuk lebih persegi atau lonjong. Struktur tektonik skala besar mempengaruhi bentuk secara tidak langsung. Begitu pula berperan di dalam tahap perkembangan bentuk dan volume dapur magma.

Proses Pembentukan

Secara keilmuan, proses pembentukan kaldera melalui beberapa tahap. Tahapan ini berlaku pada kaldera-kaldera bermagma asam, andesitic-dacitic, dasitic ataupun rhyolitic, termasuk tahapan pembentukan kaldera di Indonesia. Proses tersebut berdasarkan Cole et al, *Calderas and Caldera Structures: A Review*, (2005), sebagai berikut :

1. Sebelum terbentuk kaldera terdapat kompleks gunungapi dan terjadi pembungkungan (deformasi vertikal) yang signifikan dari keseluruhan tubuhnya. Tekanan magma yang sangat besar di seluruh bagian dapur magma menyebabkan deformasi tersebut.
2. Proses runtuh (collapse) terjadi karena adanya erupsi magma dalam skala besar dalam waktu yang relatif singkat. Volume magma yang diletuskan lebih dari 10 km³. Contohnya, kaldera di Mazama, volume diletuskan mencapai

59 km³. Jika tebal endapannya 100 m, maka luasnya dapat dibayangkan setara dengan sekitar 30x20 km. Angka itu termasuk volume yang besar terambil dari dapur magma. Proses erupsi besar-besaran tersebut terjadi baik di pipa magma sentralnya kemudian disusul dengan erupsi-erupsi yang terjadi di ring-nya. Runtuhan atap dapur magma pun terjadi. Jika disimulasikan, runtuhannya tidak terjadi secara utuh serentak, melainkan dalam blok-blok bagian dari badan runtuhannya.

Proses collapse atau runtuhannya badan atap dapur magma merupakan bagian terpenting dari proses pembentukan kaldera. Proses reruntuhannya sering di analogi kan dalam skala yang lebih kecil mirip dengan runtuhannya yang terjadi pada tambang bawah tanah. Kejadian runtuhnya itu sendiri dapat bersa-

maan ataupun bertahap. Jika bertahap biasanya dimulai dari bagian yang paling dekat dengan dapur magma, lalu, semakin mengikuti ke bagian yang lebih atas menuju ke permukaan.

3. Sesudah terjadinya runtuh, aktivitas vulkanik terjadi di lokasi-lokasi struktur geologi, seperti struktur patahan regional. Proses resurgence, yaitu terangkatnya kembali bagian tengah kaldera. Hal tersebut biasa terjadi hampir di semua kaldera. Resurgence ini dapat berupa proses yang pengangkatan serentak (Pulau Samosir), atau tersentral dalam wujud aktivitas vulkanik (kaldera Batur). Aktivitas baru muncul kemudian di lokasi tertentu sebagai pusat gunungapi baru, bisa di tengah kaldera, bisa juga di pinggir (ring) kaldera.
4. Karena ukurannya yang besar dan kompleks, proses hidrothermal terjadi dan mengarah pada pembentukan potensi geothermal. Meskipun demikian, hal itu tidak selalu diikuti dengan proses mineralisasi (pembentukan mineral/bahan tambang, seperti bahan logam) karena proses mineralisasi memerlukan waktu yg jauh lebih lama.
5. Bentuk dan struktur kaldera dipengaruhi oleh beberapa variabel seperti pola tektonik di area terjadinya kaldera, komposisi magma, geometri (bentuk

dapur magma, kedalaman dapur magma, ukuran volume erupsi (besarnya magma yang tercerabut dari dapur magma), proses collapse (tunggal atau multiple blocks; simetris atau asimetris) dan resurgence (proses terangkatnya kembali bagian yang runtuh)

Secara statistik, erupsi super besar dengan volume lebih dari 1.000 km³ yang membentuk kaldera terjadi sekali dalam 50 ribu tahun. Hasil lain memberikan angka 14 kali dalam 1 juta tahun.

Letusan yang melontarkan material bervolume lebih dari 1000 km³, tentunya, berlangsung sehari-hari. Meletus secara sehari-hari diperlukan tekanan dapur magma yang sangat tinggi sampai dengan selesainya erupsi super besar tersebut.

Kaldera bisa terbentuk di kompleks gunungapi atau gunungapi dengan diameter yang lebar. Artinya, gunungapi kerucut tunggal dengan ukuran diameter yang tidak terlalu lebar tidak dapat membentuk kaldera.

Semakin lebar dan rendah gunungapi dari permukaan air laut (semakin dekat ke dapur magma), semakin mudah terbentuk kaldera. Kaldera yang terbentuk tentunya akan lebih kecil ukurannya dari pada dapur magma yang ada di bawahnya. Semakin runcing ke rucut, maka erupsinya semakin kecil kemungkinannya membentuk kaldera.

$$|\Delta P_{(-)}| = \tau \frac{2H}{R}$$

Model yang dikembangkan oleh Roche dan Druitt tahun 2001 yang menggambarkan salah satu proses amblesan kaldera model 'piston'. Diumpamakan bahwa bagian atas reservoir magma yang mengalami amblesan berbentuk silinder dengan radius 'R' dan tinggi silinder 'H'. Di bawah silinder tersebut terdapat 'underpressure' sebesar |dP(-)| yang sebanding dengan gaya gesek tepian silinder 's'. Persamaan ini berarti bahwa semakin kecil 'H' yaitu semakin dangkal reservoir magma, semakin mudah terbentuk kaldera. Demikian juga, semakin besar 'R' atau semakin lebar (besar) reservoir magma, semakin mudah ambles.

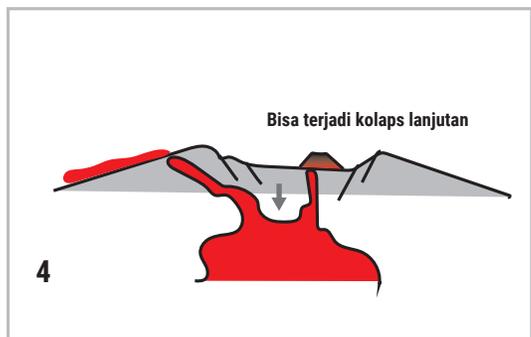
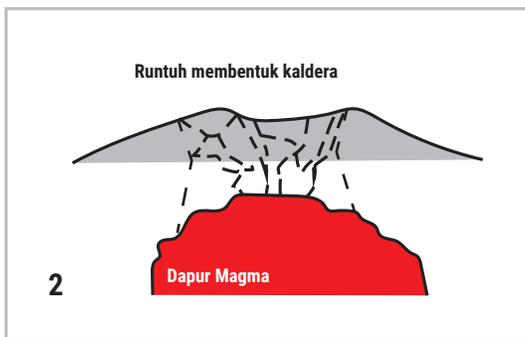
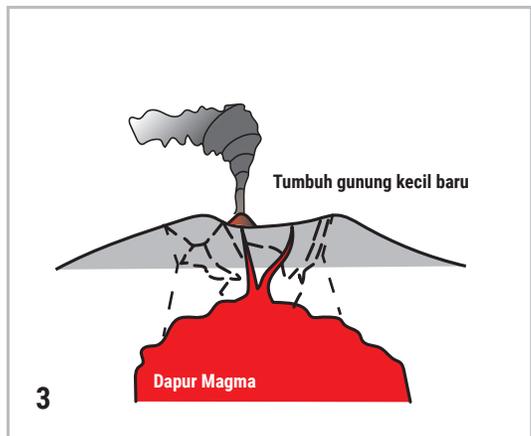
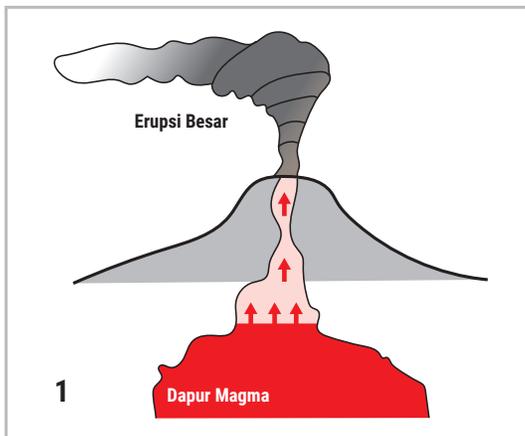
Pembentukan magma atau terjadinya magma sebenarnya berjalan dengan sangat pelan. Karenanya, proses untuk membangun dapur magma besar yang akhirnya melahirkan kaldera memerlukan waktu yang panjang dan diperkirakan minimal diperlukan waktu 100 ribu tahun.

Referensi dari Holohan, van Wyk de Vries, Troll (2007), area-area vital dengan struktur sesar mendatar, terdapat pengaruh besar struktur pada pembentukan kaldera,. Dalam proses pembentukan kaldera, terutama yang dikendalikan oleh struktur geologi, terdapat kegiatan tektonik pre-kaldera yang menyebabkan fragmentasi dari area yang terletak

di atas dapur magma dan selanjutnya diikuti dengan subsidence (amblesan)

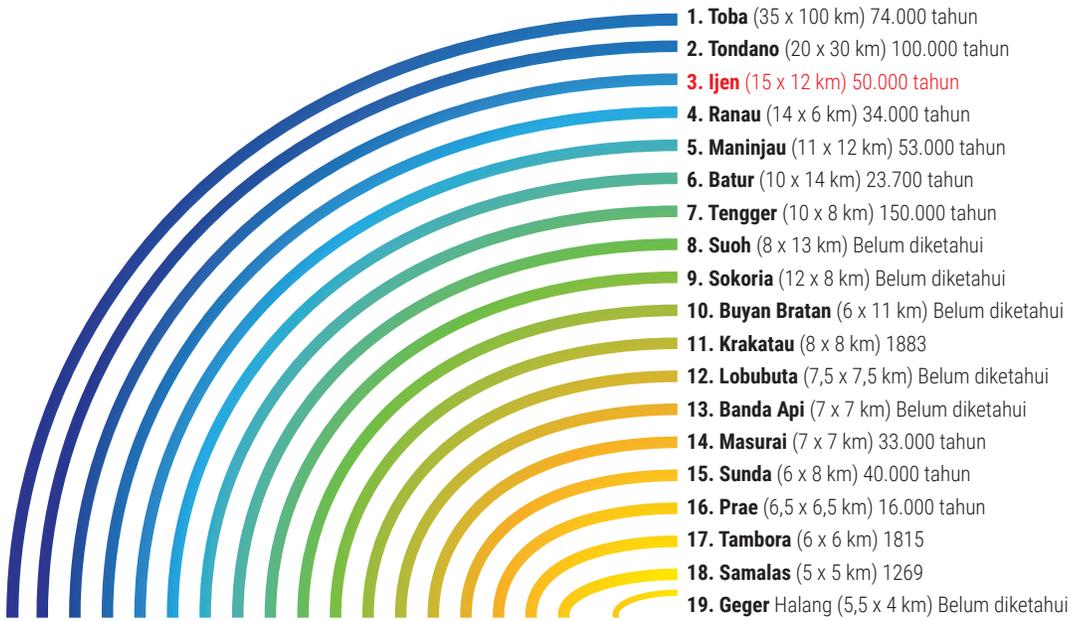
Analog model juga menunjukkan, runtuhannya yang terjadi dalam proses kaldera, bersifat outward (seperti mangkuk terbalik). Hal ini sesuai dengan referensi dari Kennedy, Stix, Vallance, Lavallee, Longpre (2004) dan Accella (2006).

Tahap pertama dalam proses kaldera adalah sagging yang menyertai outward collapse circular faulting (reverse fault). Pada tahap akhir terjadi normal fault yang kurang lebih vertikal (ring fault) atau bisa mendekati inward faulting.



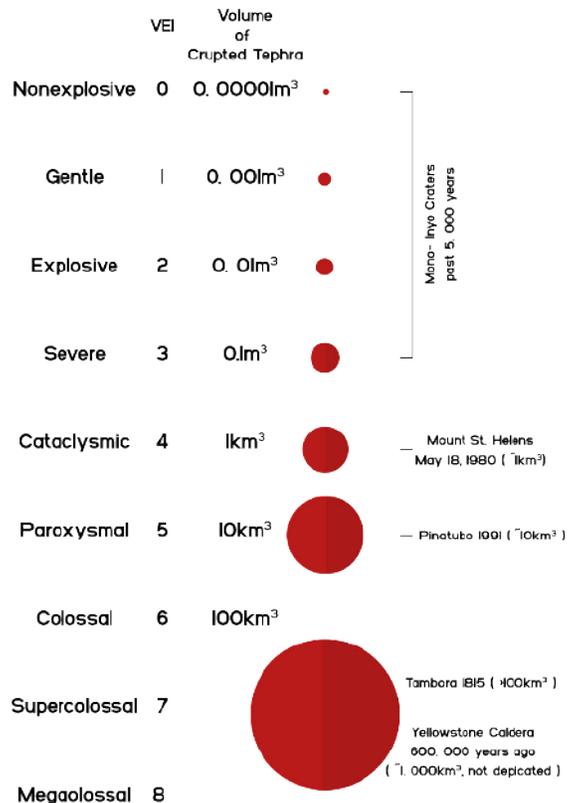
Ilustrasi Proses Pembentukan Amblesan Kaldera

19 Kaldera Indonesia Berdasarkan Diameter



Konsep VEI:

Volume yang dikeluarkan dalam erupsi dalam proses erupsi pembentukan kaldera diperkirakan beberapa puluh persen saja dari volume total magma dalam dapur magma. (Hildreth and Wilson, 2007). Artinya, volume dapur magma yang berkurang sekitar 20-30 persen, menyebabkan tekanan di dapur magma menjadi sangat kecil dan tidak mampu lagi menopang badan atap dapur magma.



Deposit Penciri Kaldera

Ciri khas dari deposit proses erupsi besar yang diikuti pembentukan kaldera, yaitu adanya plinian fall deposit (endapan hasil letusan eksplosif besar) yang kemudian terjadi/terdapat ignimbrite (endapan piroklastik dari campuran berbagai komponen bahan batuan-pung, lithic dan magma) menyusul disusul di atasnya.

Plini atau Plini junior, istilah yang diambil dari nama seorang ahli, Gaius Plinius Caecilius Secundus, yang waktu itu mendeskripsikan dahsyatnya letusan Gunung Vesuvius (Italia). Ia mendeskripsikan letusan besar yang (paling tidak) sama besar dan karakternya serupa dengan letusan Vesuvius disebut jenis letusan plinian.

Tentunya letusan yang membentuk kaldera jauh lebih besar lagi dari sekedar letusan yang dideskripsikan oleh Plini di Vesuvius. Volume letusan Vesuvius tersebut hanya setara dengan sepersepuluh dari produk letusan Gunung Masurai, Jambi (Indonesia).

Transisi dari fall ke pyroclastic flow (awan panas) ini disertai dengan naiknya debit erupsi eksplosif yang sekaligus membawa sejumlah besar lithic kasar yang membentuk perlapisan breksi kasar. Transisi ini terjadi karena adanya proses pembuatan/pembesaran vent baru sebagai bagian dari awal proses runtuhnya kaldera.

Referensi Legros, Kelfoun, Marti (2000) menyatakan ketika terjadi letusan plinian, tekanan di dapur magma secara drastis atau tiba-tiba menurun, sehingga apabila batuan atap dapur magma tetap kuat dan tidak runtuh maka proses letusan secara otomatis akan berhenti. Namun, jika besarnya penurunan tekanan dapur magma tersebut menjadikan batuan atap dapur tidak kuat bertahan dan runtuh, maka tekanan dapur magma yang semula turun drastis dapat naik kembali sam-

pai level tekanan lithostatics. Proses letusan terus berlanjut (sustained). Tahap ini menjelaskan kenapa di Krakatau terjadi letusan besar, terakhir di pagi itu, yang jam 10.52 Wib, tapi tanpa tsunami.

Menurut Van Bemmelen (1969) pada "Kongres Ilmiah Gunung Thera (Santorini), menyebutkan sebenarnya ada dua tipe letusan besar yang sering dipakai dalam deskripsi. Yaitu: tipe plinian dan ignimbrite.

Ada satu istilah lagi yang sering dipakai, yaitu fase Perret. Fase Perret menggunakan terminologi yang diuraikan oleh Frank A Perret dari Universitas Carnegie Washington yang pada tahun 1924, mengeluarkan artikel tentang letusan Gunung Vesuvius (1906), bukan letusan yang terjadi di tahun 79. Perret menjelaskan, ketika letusan besar terjadi maka yang dilontarkan pertama adalah gas tekanan tinggi yang ada dibagian atas dari dapur magma. Gas tersebut berbentuk buih (foam) hasil fragmentasi magma. Proses dari lepasnya gelembung gas dari fluida magma. Hasilnya, berupa batu apung.

Ketika semua bagian yang kaya gas telah dikeluarkan melalui letusan, maka sebenarnya di dalam dapur magma mengalami penurunan tekanan secara mendadak. Selanjutnya, fluida magma yang ada di dalam dapur magma mengalami kondisi oversaturated. Dalam kondisi oversaturated, magma dengan sendirinya meletus dan menjadi fase paroxysmal (fase puncak) dari proses letusan itu sendiri. Nah, tahap proses letusan tersebut adalah fase Perret.

Produk yang dihasilkan merupakan suspensi bahan jatuhnya yang kaya akan gas. Letusan akan bersifat vertikal karena masih melalui pipa kepundan yang sama. Dalam letusan yang besar ini, terjadi penghancuran puncak kerucut gunungapi. Penjelasan ini

sesuai dengan deskripsi Plini Junior, ketika menjelaskan letusan Gunung Vesuvius di tahun 79 AD. Oleh karena itu, terminologi letusan tipe plinian dipakai untuk jenis letusan besar yang menghancurkan sebagian puncak gunungapi. Lalu apa bedanya antara letusan plinian dengan letusan ignimbrite? Sebenarnya tidak ada bedanya secara proses. Perbedaannya berada dalam hal ukuran atau volume yang diletuskan.

Perbedaan volume tersebut hanya bisa diakomodir atau terjadi, jika letusan yang membentuk kaldera dengan volume yang sangat besar tidak melalui pipa gunung-api existing. Akan tetapi, terjadi dari rekahan-rekahan (fissure) yang terbentuk ketika batuan per-

mukaan, termasuk badan gunungnya sendiri mulai runtuh.

Istilah ignimbrite juga dipakai untuk menunjukkan adanya proses runtuh kolom letusan. Selain itu, proses tersebut mungkin dapat menjelaskan asal muasal dari penggunaan istilah hujan api atau ignimbrite.

Untuk proses ignimbrite ini, Van Bemmelen (1969), menggunakan istilah *cooking-over the rim* atau dalam bahasa Italia, *trabocare*. Gambarnya, material yang terlontar masih seperti awan yang berhenti di atas gunung. Lalu, proses itu terus ter-over-flow atau tumpah keluar ke lereng di sekitarnya. Penggambaran ini yang sampai sekarang dipakai untuk menjelaskan proses ignimbrite.

Komponen Ignimbrite

• Litik

Endapan produk dari pembentukan kaldera terdapat dua proses, yaitu *plinian falls* yang berupa endapan abu-pasir-kerikil dan bahan lontaran lain yang merupakan hasil dari pengendapan kolom letusan. Proses lainnya, proses ignimbrite yang merupakan endapan proses aliran piroklastik besar.

Ignimbrite secara terminologi sama dengan aliran piroklastik (*pyroclastic flow*). Terdapat tiga unsur utama dalam ignimbrite. Yaitu : litik, batupung dan gelas.

Istilah aliran piroklastik mengacu pada proses atau bentuk dari cara mengalirnya. Dalam letusan-letusan superbesar, ignimbrite terbentuk karena kolom letusan sangat tinggi dan padat. Selanjutnya, kolom letusan tersebut runtuh kembali dan menimbulkan aliran piroklastik ke lereng-lereng nya. Maka, ignimbrite sering digambarkan sebagai ambruknya kolom letusan besar.

Litik sebenarnya unsur yang selalu ada dalam aliran piroklastik ignimbrite, yaitu pecahan/ hancuran dari batuan beku 'existing' : dari batuan yang ada di atas dapur magma atau di dalam atau di sekitar pipa erupsi/letusan, bahkan, juga bisa hancuran dari puncak gunungapi itu sendiri.

Litik hanya dapat terjadi di letusan-letusan besar karena apabila kecil tidak ada kekuatan untuk proses penghancuran batuan beku yang 'existing'. Proses penghancuran batuan 'existing' ini tentunya menghasilkan pecahan dalam berbagai ukuran, dari ukuran abu sampai ukuran bongkah. Dalam proses 'aliran' nya, ukuran yang lebih besar akan terendapkan lebih awal dan paling bawah. Sehingga dapat dilihat di endapan hasil pembentukan kaldera, yaitu bahwa lapisan paling bawah berupa batuan breksi dengan ukuran bongkah relatif besar. Dan semakin jauh, endapan akan tersusun dari ukuran butir yang semakin halus.

• Batu Apung

Keberadaan batu apung tidak bisa dipisahkan dalam proses pembentukan kaldera, artinya kalau terjadi proses pembentukan kaldera, semestinya dapat ditemukan endapan-endapan batu apung. Tapi bukan berarti jika ditemukan batu apung pasti ada pembentukan kaldera. Alasannya, batu apung hanya menjadi penanda adanya proses pembangunan tekanan besar didalam dapur magma. Terbentuknya batu apung juga menandakan, sebuah sistem vulkanik (gunungapi aktif atau bisa juga kelihatan tidak aktif) telah cukup beristirahat lama (puluhan, ratusan atau bahkan ribuan tahun).

Batu apung menjadi pembeda dari gunungapi-gunungapi yang sering meletus seperti Merapi, yang tidak mempunyai batu apung dalam produk letusannya. Ya, karena istirahatnya belum cukup panjang. Semakin lama beristirahat, semakin banyak produk letusan akan menghasilkan batuapung.

Batuapung terbentuk sebagaimana busa di dapur magma dan menempati bagian paling atas dari dapur magma. Lalu, ketika diendapkan posisinya berada diatas (setelah) endapan lithic (atau sering disebut breksi lithic) karena batu apung relatif jauh lebih ringan dari lithic.

Dalam proses pengendapannya, batu apung (atau buih) ketika diendapkan akan paling mengalami pemampatan paling besar dan kadang bahkan me-cair kembali menjadi luquid (magma), sehingga dalam batuan hasilnya terlihat sebagai komponen berwarna hitam tipis memanjang (fiamme). Lithic berperilaku berbeda, karena asalnya dari pecahan batuan beku padat (dan dingin).

Oleh karena itu, tidak mudah mengalami proses pencairan saat terlontarkan. Butir-butir lithic selalu asli bentuknya ketika terpecah dari batu aslinya.

Komponen utama dalam letusan besar tentunya, dari magmanya itu sendiri. Magma

tersebut ketika diletuskan, tentu masih dalam keadaan cair, sehingga mudah tercabik ketika diletuskan/terlontarkan. Hal ini biasa disebut juga sebagai proses fragmentasi, sehingga berukuran abu/pasir. Pembekuan yang mendadak menyebabkan berbentuk serpihan/butiran seperti serat gelas (bening).

Dalam letusan-letusan super besar yang membentuk kaldera, terdapat prasyarat agar letusan tersebut terjadi. Syarat itu, yaitu :

- (1) tersedianya magma dengan volume besar;
- (2) terjadi letusan awal melalui pipa kepundan;
- (3) terjadi pengurangan tekanan dapur magma secara drastis;
- (4) runtuhnya atap dapur magma sambil membentuk beberapa pipa kepundan baru di bibir kaldera.

Beberapa letusan besar di Indonesia disebutkan yaitu Samalas (Rinjani) pada tahun 1257, dengan volume letusan lebih dari 40 km³, Tambora pada tahun 1815, dengan volume letusan sebesar lebih 33 km³ dan Krakatau tahun 1883 dengan volume letusan sebesar 12,5 km³. Dari data ini terlihat bahwa letusan Krakatau tahun 1883, masih jauh lebih kecil dari volume letusan Samalas (Rinjani) tahun 1257.

Kandungan Material Tanah

Mengenai manfaat, salah satu yang paling nyata memberikan hasil, utamanya bidang ekonomi terhadap masyarakat adalah kesuburan tanahnya. Tentu saja ini selain manfaat pemandangan yang tiada tara dan menguntungkan dibidang pariwisata jika dikelola dengan baik.

Bidang ekonomi yang hampir secara langsung memberikan kehidupan dan penghidupan bagi masyarakat sekitar kaldera adalah dampak dari kesuburan tanahnya. Material yang berasal dari letusan kaldera atau

gunungapi memiliki kandungan menyuburkan tanah.

Menurut Raymond R Weil dan N.C. Brady dalam bukunya *The Nature And Properties Of Soils*, Edisi ke-15, April 2016, Penerbit Pearson Education, menuliskan tanah adalah suatu tubuh alam atau gabungan beberapa tubuh alam sebagai hasil perpaduan proses. Yaitu, gaya perusakan dan pembangunan. Proses perusakan terjadi saat pelapukan dan pembusukan bahan-bahan organik. Sedangkan proses pembangunan meliputi pembentukan mineral-mineral baru dari hasil pelapukan itu.

Secara umum, tanah tersusun dari lima komponen, yakni unsur mineral, organik, air, udara, dan makhluk renik. Kualitas kesuburan tanah ditentukan oleh paduan komposisi kelima hal tersebut. Komposisi yang paling ideal untuk pertumbuhan tanaman adalah 45 persen fraksi unsur mineral (anorganik), 20-30 persen untuk masing-masing air dan udara, serta 5 persen unsur organik.

Komposisi unsur mineral merupakan faktor yang berperan penting dalam memberikan kesuburan tanah di suatu area. Unsur mineral pada tanah berasal dari proses vulkanisme gunungapi di sekitarnya.

Berdasarkan material penyusunnya, setidaknya ada dua jenis tanah subur yang cocok untuk tumbuh kembang tanaman. Pertama, tanah andosol yang berasal dari aktivitas magmatik gunung api. Tanahnya berwarna hitam kecokelatan dan kaya mineral sehingga cocok untuk berkembangnya jenis tanaman apapun. Kedua, tanah entisol yang merupakan hasil pelapukan material letusan gunung api yang berupa pasir, debu, dan lapili.

Meskipun baru berupa permukaan tanah tipis dan belum matang, tanah jenis ini juga bersifat subur. Kedua jenis tanah tersebut bila mengalami pelapukan lanjutan setelah serangkaian proses yang mengubahnya menjadi batuan sedimen atau batuan metamorf,

akan menghasilkan jenis-jenis tanah lainnya. Sebagian dari tanah tersebut tetap subur dan sebagian lagi tidak.

Indikator kesuburan tanah tersebut terhadap tumbuh kembang tanaman adalah komposisi unsur mineralnya yang tinggi, seperti boron (B), klorin (Cl), kobalt (Co), besi (Fe), mangan (Mn), magnesium (Mg), molibdenum (Mo), seng (Zn), dan sulfur (S). Semua unsur tersebut berasal dari material erupsi gunungapi.

Begitu pula abu vulkanik. Meskipun menutupi sedikitnya 1 persen dari tanah di bumi, perannya tetap penting untuk kesuburan. Pada buku *Encyclopedia of Volcanoes*, dari Academic Press, juga menyebutkan tanah abu vulkanik mendukung berbagai tanaman termasuk tebu dan buah-buahan tropis dan tanah penggembalaan produktif untuk hewan.

Kopi-kopi pun tumbuh subur dan nikmat bijinya ketika diolah sebagai minuman. Begitu pula selama berabad-abad kebun anggur telah berkembang di tanah abu vulkanik di Italia selatan dan memelihara budaya mediterania di selatan Alaska dan di sepanjang wilayah pesisir barat laut pasifik dari Amerika Serikat.

Hanya saja tetap memerlukan penelitian lebih lanjut mengenai material kesuburan tanah ini. Apakah menjadi efisien ketika tanah tersebut mendapatkan nutrisi baru seperti pupuk pabrikan maupun herbal. Perlu adanya penelitian lanjut apa dan bagaimana cara yang direkomendasikan untuk mempertahankan kesuburan tanah dari material letusan gunungapi.



“**R**arenanya, informasi kaldera diharapkan menjadi penting bagi kita semua guna memahami keberadaan gunungapi, bagaimana erupsi dengan letusan super besar bisa terjadi, prosesnya dan membedakan antara kawah dan kaldera. Berusaha memahami apa saja produknya. Letusan dahsyat yang membentuk kaldera memang mampu melumpuhkan aktivitas bumi. Menelan ratusan ribu korban jiwa. Tapi, dibalik kekuatan itu, peradaban manusia justru menjadi berkembang. Manusia menjadi kreatif untuk lebih tangguh menghadapi bencana. Jika kita mampu mengenali, bencana dapat dikelola, meskipun bahaya geologi (bencana erupsi gunungapi, gempa bumi, tsunami, dan gerakan tanah) tidak dapat dihentikan oleh manusia. Itu kehendak alam dan belum ada satupun ahli geologi yang dapat memprediksi secara tepat kapan terjadi.”

Mari Berkenalan...

Dalam buku edisi Ijen, kami memperkenalkan diri. Kami bertiga, A. Ratdomopurbo, Arief Prabowo, dan Dipowiguno adalah Tim Peneliti Badan Geologi sekaligus Tim Penulis.

Saat buku ini diterbitkan, kami merupakan pegawai aktif di Kelompok Kerja Geosains, Pusat Survei Geologi (PSG), Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Berbekal pengalaman yang panjang dalam ranah ilmu geologi gunungapi yang dikolaborasikan dengan ranah ilmu geologi lainnya, menjadikan kami dapat menyelesaikan beberapa buku Seri Kaldera Nusantara di Indonesia.

Sebelum terbit buku Seri Kaldera Nusantara Ijen ini, melalui Badan Geologi, kami telah menerbitkan buku Seri Kaldera Nusantara “Masurai” (2018), Seri Kaldera Nusantara “Batur” (2018), dan Seri Kaldera Nusantara “Toba” (2019). Selain itu pada tahun 2020, kami juga telah menerbitkan buku Seri Gunungapi Purba “Nglanggeran: Antara Prambanan dan Wediombo”.

Dalam proses penyusunannya, tim melibatkan Ayu Sulistyowati dengan pengalaman yang panjang di Harian KOMPAS sebagai penyunting buku ini, dan juga tim penulis di seri Kaldera Toba. Kekuatan buku ini juga tak lepas dari tata letak narasi, gambar ilustrasi yang indah dan menarik di dalam buku ini hasil karya Locca Chandra (PT. Asanka), Junita Tiah Pasaka, dan tim. Ya, tim penyusun ini terbangun sejak buku Seri Kaldera Nusantara pertama diterbitkan.

Buku ini seri Kaldera Ijen, merupakan buah karya kolaborasi antara Pemerintah Kabupaten (Pemkab) Bondowoso dan PSG, serta tim penyusun. Dukungan penuh Pemkab Bondowoso menjadikan buku ini terwujud. Harapan kami, melalui buku ini informasi mengenai seluk-beluk Kaldera Ijen dapat memberikan sebaik-baiknya manfaat bagi pembaca dan masyarakat luas.

Salam dari kami,

A Ratdomopurbo, Arief Prabowo, Dipowiguno

Tim Penulis



Ucapan Terima Kasih.

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, selesai sudah buku Seri Kaldera Nusantara “Ijen”. Tim penyusun mengucapkan terima kasih kepada Pemerintah Kabupaten Bondowoso, Provinsi Jawa Timur, khususnya Kepala Badan Perencanaan Pembangunan, Penelitian dan Pengembangan Daerah (BP4D) Ibu Hj. Farida, M.Si. dan jajarannya, atas prakarsa dan dukungan terhadap penyusunan buku Kaldera Ijen ini.

Kami ucapkan terima kasih kepada Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, atas dukungannya, khususnya Pusat Survei Geologi (PSG), sehingga tim yang sekaligus sebagai penulis dapat berkolaborasi dengan Pemkab Bondowoso dalam penulisan buku ini. Tentu, semangat dan praktik kolaborasi berbagai pihak yang berkepentingan menjadi modal utama sehingga buku ini dapat diselesaikan dengan baik.

Selanjutnya, terima kasih kepada masyarakat Bondowoso, khususnya kepada Mas Slamet pegiat Paralayang Sulek yang selalu semangat mendampingi kami di lapangan; Mbak Yuli Tlogosari, seorang guru yang sangat antusias dan tertarik pada ilmu kebumian; Pak Ir Megasari yang telah mendampingi tim selama kegiatan pengambilan data lapangan; dan Mas Yus, yang senantiasa mengantarkan kami ke setiap sudut daerah di Bondowoso beserta tim Pengurus Harian Ijen Geopark (PHIG).

Ucapan terimakasih tak terlupakan kami sampaikan kepada Mas Tinggal S. Pamular, S.T. dari BP4D Bondowoso, yang mendampingi secara teknis dan non-teknis, dari awal hingga akhir penyusunan buku ini. Kepada seluruh tim dan pihak-pihak yang belum dapat kami sebutkan satu persatu, terima kasih. Semoga kerja sama dan kolaborasi ini dapat terus berjalan harmonis serta tetap terjaga pada kesempatan perjumpaan di lain waktu.

Terimakasih

Penyusun

Daftar Pustaka

1. Acocella, V. (2006). *Caldera types: How end-members relate to evolutionary stages of collapse*. *Geophysical Research Letters*, 33(18).
2. Acocella, V. (2007). *Understanding caldera structure and development: An overview of analogue models compared to natural calderas*. *Earth-Science Reviews*, 85(3–4), 125–160.
3. Aprianto, T. C. (2019). *Panarukan: Pelabuhan “Internasional” yang Terlupakan*. *Historia*, 1(2), 138–153.
4. Aris, M., & Pratama, A. B. (2022). *Geological and Isothermal 3-D Model of Blawan-Ijen Geothermal System*. 1031(1), 012009.
5. Arofah, N., & Swastika, K. (2020). *The megalitic site in Pandan village Bondowoso as learning sources for historical learning*. 485(1), 012134.
6. Ayuningtyas, T. R. (2021). *Situs Jebung Kidul: Peninggalan Era Klasik di Bondowoso*. [Unpublished manuscript].
7. Barbier, E. (2002). *Geothermal energy technology and current status: An overview*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1–2), 3–65.
8. Brady, N. C., Weil, R. R., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils (Vol. 13)*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
9. Caudron, C., Syahbana, D. K., Lecocq, T., Van Hinsberg, V., McCausland, W., Triantafyllou, A., Camelbeeck, T., & Bernard, A. (2015). *Kawah Ijen volcanic activity: A review*. *Bulletin of Volcanology*, 77(3), 1–39.
10. Cole, J., Milner, D., & Spinks, K. (2005). *Calderas and caldera structures: A review*. *Earth-Science Reviews*, 69(1–2), 1–26.
11. Costa, A., J Suzuki, Y., & Koyaguchi, T. (2018). *Understanding the plume dynamics of explosive super-eruptions*. *Nature Communications*, 9(1), 1–6.
12. Cotton, C. A. (1944). *Volcanoes as landscape forms*.
13. Daud, Y., Arafat, Y., Kumara, D. A., Fortuna, D. A., Yunus, F. M., & Avicienna, H. F. (2018). *An updated study of discovering blawan-ijen geothermal prospect area using gravity and magnetic methods*. 73, 01007.
14. Delmelle, P., & Bernard, A. (2000). *Downstream composition changes of acidic volcanic waters discharged into the Banyupahit stream, Ijen caldera, Indonesia*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97(1–4), 55–75.
15. Giordano, G., & Cas, R. A. (2021). *Classification of ignimbrites and their eruptions*. *Earth-Science Reviews*, 220, 103697.
16. Hall, R. (2012). *Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean*. *Tectonophysics*, 570, 1–41.
17. Hammer, C. U., Clausen, H. B., & Dansgaard, W. (1980). *Greenland ice sheet evidence of post-glacial volcanism and its climatic impact*. *Nature*, 288(5788), 230–235.
18. Handley, H., Macpherson, C., Davidson, J., Berlo, K., & Lowry, D. (2007). *Constraining fluid and sediment contributions to subduction-related magmatism in Indonesia: Ijen Volcanic Complex*. *Journal of Petrology*, 48(6), 1155–1183.
19. Harsolumakso, A. H., Noeradi, D., Rudyawan, A., Amiarsa, D., Wicaksono, S., & Nurfarhan, A. A. (2019). *Geology of the Eastern Part of the Volcanic-Kendeng Zone of East Java: Stratigraphy, Structures and Sedimentation Review from Besuki and Situbondo Areas*. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 20(3), 143–152.
20. Hidayat, M. (2007). *Menengok Kembali Budaya dan Masyarakat Megalitik Bondowoso*. *Berkala Arkeologi*, 27(1), 19–30.
21. Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2015). *Indonesian volcanic geothermal systems*. 19–25.

22. Holohan, E. P., van Wyk de Vries, B., & Troll, V. R. (2008). Analogue models of caldera collapse in strike-slip tectonic regimes. *Bulletin of Volcanology*, 70(7), 773–796.
23. Junghuhn, F., (1853). In: van Kampen PN (ed) *Java, deszelfs gedaante, bekleeding en inwendige structuur*, vol 1-4, Amsterdam
24. Kennedy, B., Stix, J., Vallance, J. W., Lavallée, Y., & Longpré, M.-A. (2004). Controls on caldera structure: Results from analogue sandbox modeling. *Geological Society of America Bulletin*, 116(5–6), 515–524.
25. Leschenault, (de la Tour), J., (1811). Notice sur un lac d'acide sulfurique qui se trouve au fond d'un volcan du Mont-Idienne, situ'e dans la province de Bagnia-Vangni, c'ot'e orientale de l'ile de Java. *Annales Du Muséum National D'histoire Naturelle* 18:425–446
26. Pertiwi, H., Swastika, K., Na'im, M., & Pratama, A. (2021). Megalithic culture at the Suco Lor site Bondowoso. 747(1), 012069.
27. Setijadji, L. D., Kajino, S., Imai, A., & Watanabe, K. (2006). Cenozoic island arc magmatism in Java Island (Sunda Arc, Indonesia): Clues on relationships between geodynamics of volcanic centers and ore mineralization. *Resource Geology*, 56(3), 267–292.
28. Simkin, T. (1983). *Krakatau, 1883: The volcanic eruption and its effects*.
29. Sitorus, K. (1990). *Volcanic stratigraphy and geochemistry of the Idjen Caldera Complex, East-Java, Indonesia*.
30. Smyth, H., Hall, R., Hamilton, J., & Kinny, P. (2005). East Java: Cenozoic basins, volcanoes and ancient basement. 251–266.
31. Soeria-Atmadja, R., Maury, R., Bellon, H., Pringgoprawiro, H., Polve, M., & Priadi, B. (1994). Tertiary magmatic belts in Java. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(1–2), 13–27.
32. Sulistyarto, P. H. (2003). Pola Permukiman Megalitik di Situs Kodedek, Bondowoso. *Berkala Arkeologi*, 23(1), 28–41.
33. Takano, B., Suzuki, K., Sugimori, K., Ohba, T., Fazlullin, S., Bernard, A., Sumarti, S., Sukhyar, R., & Hirabayashi, M. (2004). Bathymetric and geochemical investigation of Kawah Ijen crater lake, East Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135(4), 299–329.
34. Van Bemmelen, R. van. (1949). *The geology of Indonesia, vol. IA: General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes*, The Hague, Martinus Nijhoff, 1.
35. Verbeek, R.D.M., (1886). *Krakatau. Publie par ordre de son excellence Le Gouverneur-General des Indes Neerlandaises*. Batavia (Jakarta).
36. Wijayanti, L., Swastika, K., Na'im, M., & Pratama, A. (2021). Megalithic Culture at the Maskuning Kulon Site Pujer Bondowoso. 747(1), 012065.
37. Williams, H. (1941). *Calderas and their origin*. *Bull. Geol. Sci. Dep.*, 25, 239–346.



SERI KALDERA NUSANTARA NON-PLINIAN



Tengger



Gunung Bromo, berdasarkan cerita sejarah dan legenda bahwasanya Gunung Bromo berasal dari nama Brahma yaitu Gunung yang dianggap Suci oleh masyarakat suku tengger. Masyarakat percaya bahwa Gunung Bromo meninggalkan jejak Dewa Brahma, selain itu mereka percaya bahwa Gunung Bromo adalah tempat bersemayam dewa yang melindungi mereka yaitu Dewa Brahma, Dewa Wisnu, dan Dewa Siwa. Kemudian orang Jawa menyebutnya Gunung Bromo.

Suku tengger adalah masyarakat asli yang berada di kawasan kaki gunung bromo semeru yang berasal dari penduduk pribumi kerajaan Majapahit. Gunung ini tergolong gunung yang masih aktif dengan aktifitas letusan 30 tahun sekali sejak abad 20. Informasi yang dihimpun dari berbagai sumber, dahulu gunung ini konon terbentuk dari letusan Gunung Tengger.

Gunung Bromo memiliki ketinggian 2.329 mdpl dan berada di empat wilayah sekaligus yaitu, Probolinggo, Pasuruan, Malang, Lumajang Jawa Timur.



BADAN GEOLOGI
KEMENTERIAN ESDM

