



## Gunung Api Lumpur di Daerah Cengklik dan Sekitarnya, Kabupaten Boyolali Provinsi Jawa Tengah

### *Mud Volcanoes in Cengklik and Surrounding Area, Boyolali Districts Central Java Province*

Sutikno Bronto, Pudjo Asmoro dan Mutiara Efendi

Pusat Survei Geologi

Jl. Diponegoro No. 57 Bandung, Indonesia – 40122

E-mail : [sutiknobronto@gmail.com](mailto:sutiknobronto@gmail.com)

Naskah diterima : 27 April 2017, Revisi terakhir : 22 Agustus 2017, Disetujui : 25 Agustus 2017, Online : 30 Agustus 2017

**Abstrak** - Di Kabupaten Boyolali dan sekitarnya terdapat endapan gunung api lumpur tua yang tersingkap secara lokal memanjang ke arah barat-timur (+ 20 km) selebar 3–5 km mulai dari sekitar Danau Cengklik sampai tepi barat Bengawan Solo. Endapan gunung api lumpur itu berukuran butir lanau–lempung sampai pasir-kerakal andesit basal skoria di Dusun Gununglondo. Di bawah permukaan endapan lumpur itu berupa sisipan atau terobosan di antara perlapisan sedimen, serta mengisi struktur rekahan, membentuk struktur diapir dan bola lumpur, sedangkan yang mampu keluar meninggalkan jejak diatrema dan endapan permukaan. Data yang ditunjukkan dalam penelitian ini menggambarkan proses pergerakan lumpur dari dalam hingga permukaan bumi, yang dapat dibandingkan dengan erupsi gunung api. Setelah mencapai permukaan, endapan lumpur membentuk perlapisan yang sebagian terlipat lemah dan tersesarkan. Bentang alam cekungan Danau Cengklik diperkirakan sebagai bekas kawah gunung api lumpur. Daerah Cengklik dan sekitarnya berkembang cepat dikarenakan terdapat bandara internasional Adisumarmo dan sedang dibangun jalan tol Solo-Semarang-Surabaya. Berhubung sebagian batuan penyusun adalah endapan gunung api lumpur dan banyak mengalami rekahan maka daerah ini dipandang sebagai zona lemah. Potensi bahaya geologi utama yang mengancam adalah deformasi muka tanah di jalan tol karena tidak kuat menahan beban berat bangunan jalan serta kendaraan yang melewatinya. Potensi bahaya lainnya adalah pencemaran air tanah, gempa bumi, serta reaktivasi gunung api lumpur. Oleh sebab itu penelitian dan mitigasi bahaya geologi tersebut agar dilakukan secara berkesinambungan.

**Kata Kunci** : gunung api lumpur, Cengklik, Boyolali, bahaya geologi, mitigasi

**Abstract** - District of Boyolali and surrounding area have manifestation of an old mud volcano deposits which is locally exposed in E-W direction, about 20 km length and 3-5 km wide, start from Cengklik Lake until western side of Solo River. The mud volcano deposits have clay-silt size and sand-gravel of scoriaceous basaltic andesite in Gununglondo village. Materials below the mud deposits are composed by dike or sills-like rocks which penetrate within the sediment layer and fill the fracture formed a diapiric and mud ball structure, whereas the loss materials tend to leave diatremal traces and surficial deposits. Data showed in this research illustrate the mud movement from subsurface to the earth surface which is comparable with volcanic eruptions. After reaching the surface, mud deposits form layers with some slight folded and faulted structure. Cengklik Lake depression is presumed to be paleo mud volcano crater. Cengklik and surrounding areas are rapidly develop due to the existence of Adisumarmo international airport and construction of Solo-Semarang-Surabaya toll road. Considering the geological condition below Cengklik and surrounding area, which is composed by mud volcano deposits and experienced many fracture, they assumed to be a weak zone. The main potential geological hazard is the surface deformation along the toll road because of its low capability to endure the road construction and vehicle weight. Other potential hazards are groundwater pollution, earthquake, and mud volcano reactivation. Therefore, sustainable research and geological hazard mitigation of Cengklik and surrounding areas are necessary to do.

**Keywords:** mud volcano, Cengklik, Boyolali, geological hazards, mitigation

## PENDAHULUAN

Gunung api lumpur (*mud volcanoes*) sudah lama dikenal di Indonesia. Ada beberapa gunung api lumpur yang masih aktif, antara lain di Bledug Kuwu dan Sangiran, Provinsi Jawa Tengah (van Bemmelen, 1949). Istilah itu menjadi lebih mengemuka dengan munculnya gunung api lumpur baru di Kabupaten Sidoarjo Jawa Timur pada 2006 (Zaennudin dr., 2010), yang terkenal dengan nama Lumpur Sidoarjo (LUSI). Penyelidik itu juga melaporkan bahwa sebelum munculnya gunung api lumpur baru tersebut di daerah Jawa Timur ini sampai Madura sudah ada gunung api lumpur tua, yakni Gunung Anyar dan Kalang Anyar di sebelah utara LUSI dan Tasek Laki di Pulau Madura. Lebih daripada itu Satyana (2008) melaporkan kejadian gunung api lumpur tua di daerah aliran Sungai Brantas yang menyebabkan keruntuhan kerajaan Jenggala (1116 Masehi) dan Majapahit (1478 Masehi) di Jawa Timur. Dengan demikian munculnya gunung api lumpur di daerah Jawa Timur telah terjadi di beberapa tempat. Makalah ini melaporkan adanya temuan baru gunung api lumpur tua di daerah Kabupaten Boyolali dan Karanganyar, Jawa Tengah, yang terletak di sebelah selatan Sangiran dan tepi utara kota Solo. Mulai dari barat ke timur gunung api lumpur itu tersebar di sekitar Danau Cengklik hingga tepi barat aliran Bengawan Solo, sepanjang  $\pm 20$  km dan lebar 3-5 km. Adanya gunung api lumpur aktif di Bledug Kuwu dan Sangiran, serta gunung api lumpur tua di daerah penelitian juga menunjukkan bahwa di Jawa Tengah gunung api lumpur telah terjadi di beberapa tempat.

Selama ini publikasi gunung api lumpur hanya sebatas menunjukkan penampakan di permukaan saja. Makalah ini bertujuan untuk mengetahui penampakan endapan gunung api lumpur tua, baik yang di endapkan di permukaan maupun di bawah permukaan. Penemuan baru gunung api lumpur tua ini perlu mendapat perhatian dalam rangka untuk mengantisipasi dampak buruk yang dapat terjadi pada waktu mendatang, apalagi daerah ini sedang berkembang sangat cepat. Perkembangan yang sangat cepat itu ditunjukkan oleh adanya lapangan terbang internasional Adisumarmo, waduk irigasi Cengklik telah menjadi obyek wisata, dan di daerah ini sedang dibangun jalan tol Solo – Surabaya. Jalan tol itu ke depan akan dihubungkan dengan jalan tol Solo – Semarang. Lebih daripada itu ciri litologi endapan gunung api lumpur dan struktur geologi yang ada diharapkan dapat membantu penyelidikan geologi bawah permukaan dalam rangka penanggulangan bencana yang sedang berlangsung, seperti halnya terjadi di Sidoarjo, Jawa Timur.

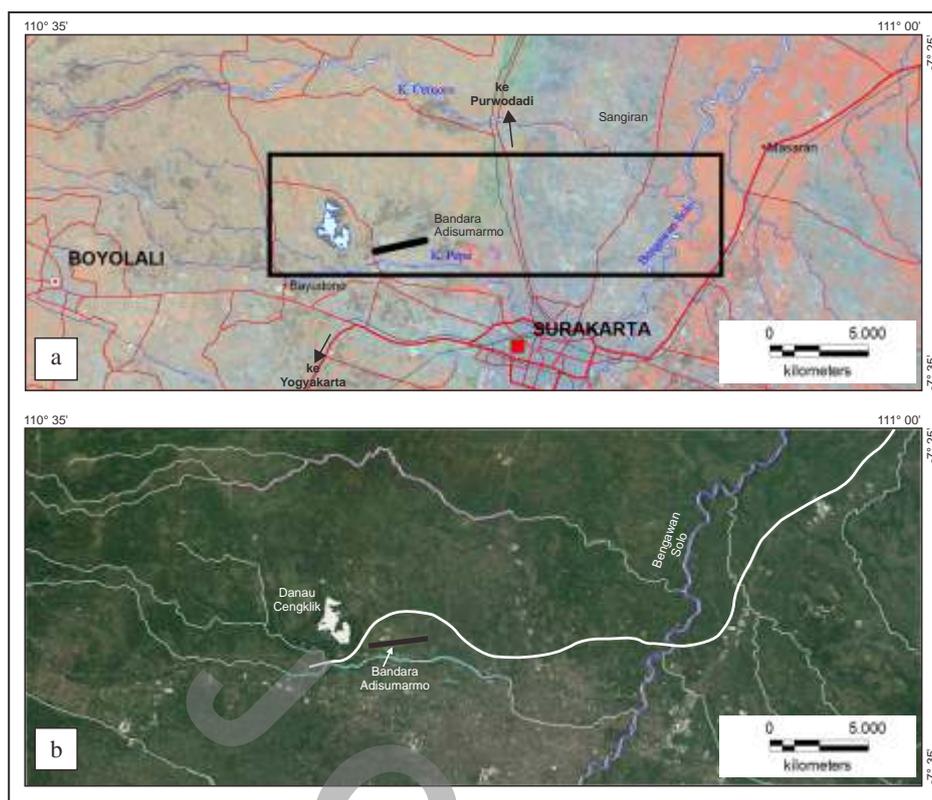
Di dalam penelitian ini metoda yang dilakukan adalah penyelidikan geologi di lapangan, yang dibantu dengan pengkajian data literatur dan analisis indera jauh, serta analisis kimia oksida mayor dengan metoda XRF. Analisis kimia itu dilaksanakan di laboratorium Pusat Survei Geologi Bandung. Lokasi penelitian di bagian barat, yakni di sekitar Danau Cengklik, termasuk daerah Kabupaten Boyolali dan di bagian timur merupakan wilayah Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah (Gambar 1).

## Landasan Teori

Mengacu batasan gunung api dari Macdonald (1972), maka gunung api lumpur (*mud volcanoes*) dapat didefinisikan sebagai tempat, lubang atau bukaan dimana bahan lumpur keluar dari dalam bumi ke permukaan, dan endapan lumpur yang terakumulasi di sekeliling lubang itu lama-kelamaan membentuk bukit kecil. Purbo-Hadiwidjojo (2013) menterjemahkan *mud volcanoes* sebagai *poton*, yakni longgokan lumpur dengan kepingan batuan, yang terlontar oleh tekanan gas. Kata '*poton*' berasal dari bahasa Timor karena di Pulau Timor itu terdapat banyak gunung api lumpur. Garis tengah lubang beragam mulai dari 1-2 m sampai maksimum 10 km, sedangkan tingginya akumulasi endapan lumpur berkisar dari 1-2 m sampai 700 m (Planke dr., 2003).

Secara genesa proses keluarnya lumpur tersebut dapat disebabkan oleh kegiatan tektonik, kegiatan magmatisme, atau kombinasi keduanya (Satyana, 2008). Kegiatan tektonik di bawah permukaan menyebabkan terjadinya tekanan berlebih (*over pressure*) sehingga batuan sedimen berikut air di dalamnya terdorong keluar ke permukaan bumi. Kegiatan magmatisme memancarkan gas sangat panas sehingga air meteorik di sekitarnya berubah menjadi uap air, yang lama kelamaan juga dapat menghasilkan tekanan berlebih. Proses erupsi gunung api lumpur itu dapat dibandingkan dengan kegiatan vulkanisme jenis erupsi *non magmatik*, hidrotermal atau hidroklastika (Bronto, 2013).

Penamaan sebagai 'gunung api lumpur' diterjemahkan dari istilah *mud volcano*. Digunakannya kata *volcano* atau 'gunung api' ini karena proses keluarnya lumpur ke permukaan bumi dan akumulasi endapan yang dihasilkannya sebanding dengan erupsi gunung api. Perbedaannya, erupsi gunung api menghasilkan lava pijar dan atau bahan piroklastika (*magmatic material*), sedangkan gunung api lumpur hanya mengeluarkan bahan lumpur, yang tersusun secara dominan oleh campuran klastika silikat alam berukuran butir lempung–lanau dengan air (*non magmatic material*).



**Gambar 1.** (a) Citra satelit daerah penelitian (dalam kotak hitam) terletak antara Kota Solo dan Sangiran, serta Danau Cengklik dan Bengawan Solo. (b) Peta Google yang memperlihatkan jalan tol Solo-Surabaya (garis putih) mulai dari utara Bandara Adisumarmo ke timur menuju Sragen dan Jawa Timur.

Untuk membedakan apakah gunung api lumpur disebabkan oleh kegiatan tektonika atau kegiatan magmatisme digunakan analisis rasio isotop  $^3\text{He}/^4\text{He}$ . Secara umum gas magma gunung api mempunyai rasio isotop  $^3\text{He}/^4\text{He}$  sekitar 6 dan khusus di Pulau Jawa berkisar antara 3,7 – 7,5 sedangkan gas non magmatik bernilai 1,65 – 2,63 (Wirakusumah dr., 2000). Berhubung di Semenanjung Muria gas mempunyai rasio isotop  $^3\text{He}/^4\text{He}$  6,19 – 7,13, maka peneliti tersebut menyatakan bahwa gas di Semenanjung Muria itu bersumber dari kegiatan magmatisme.

Di dunia, gunung api lumpur yang masih aktif pada masa kini banyak dijumpai. Sebagai contoh gunung api lumpur Hormozgan di Iran selatan, Gobustan di Azerbaijan (Planke dr., 2003), Glenblair di California dan Mississippi Amerika Serikat (Neurauter dan Bryant, 1990), serta Delta Nigeria (Graue, 2000). Di Indonesia sendiri gunung api lumpur aktif antara lain terdapat di Bledug Kuwu dan Sangiran Provinsi Jawa Tengah, di Sidoarjo yang dikenal dengan nama Lumpur Sidoarjo, dan Pulau Madura Provinsi Jawa Timur (Zaennudin dr., 2010). Di luar Jawa, sesuai dengan asal kata poton, gunung api lumpur terdapat di Pulau Timor,

Provinsi Nusa Tenggara Timur. Bronto (2008) juga melaporkan kemungkinan adanya gunung api lumpur tua pada zona kontak antara deretan gunung api dengan dataran pantai utara Banten – Jawa Barat.

Meskipun sudah ada peristiwa bencana gunung api lumpur, seperti terjadi di Sidoarjo Jawa Timur, peraturan perundang-undangan tentang Penanggulangan Bencana di Indonesia belum memasukkan jenis bencana ini sebagai akibat erupsi gunung api lumpur. Peraturan perundang-undangan itu adalah 1. Undang Undang nomor 24 tahun 2007, tentang Penanggulangan Bencana, 2. Peraturan Pemerintah nomor 21 tahun 2008 tentang Manajemen Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana, 3. Peraturan Pemerintah nomor 64 tahun 2010 tentang Mitigasi Bencana di Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil, dan 4. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral nomor 15 tahun 2011 tentang Pedoman Mitigasi Bencana Gunung Api, Gerakan Tanah, Gempa Bumi, dan Tsunami. Agar kejadian bencana gunung api lumpur pada masa mendatang dapat ditanggulangi setara dengan bencana geologi lainnya, maka hal itu perlu dimasukkan ke dalam peraturan penanggulangan bencana.

## STRATIGRAFI REGIONAL

Daerah penelitian terletak di perbatasan antara peta geologi lembar Salatiga (di bagian utara; Sukardi dan Budhitrisona, 1992) dengan peta geologi lembar Surakarta-Giritontro (di bagian selatan; Surono drr., 1992). Mengacu para penyelidik terdahulu itu daerah penelitian dan sekitarnya tersusun oleh batuan/endapan berumur Kuarter, yang dibagi menjadi Formasi Notopuro, Endapan Undak (Aluvium Tua), dan Batuan Gunung api Merapi. Satuan batuan tersebut masing-masing tersebar di bagian utara, timur dan barat, sedangkan ke arah selatan (Kota Solo) ditutupi oleh Endapan Aluvium. Formasi Notopuro bagian bawah terdiri atas breksi lahar sedang di bagian atas berupa perselingan tuf dengan batupasir tufan. Endapan Undak (Sukardi dan Budhitrisona, 1992) atau Aluvium Tua (Surono drr., 1992) tersusun oleh konglomerat, batupasir, dan batulempung. Batuan Gunung api Merapi terdiri atas breksi gunung api, aliran lava, dan tuf. Endapan aluvium tersusun oleh bahan lepas berukuran lempung sampai berangkal.

Berhubung daerah penelitian berada di tepi selatan Sangiran maka tataan stratigrafinya mengacu stratigrafi Sangiran, yang menumpang di atas batuan dasar (Tabel 1). Dari tua ke muda satuan batuan di Sangiran dibagi menjadi Formasi Kalibeng, Pucangan, Kabuh dan Formasi Notopuro. Penamaan satuan batuan itu mengikuti tatanama stratigrafi Pegunungan Kendeng yang disusun oleh Duyfjes (1936). Satuan batuan di Sangiran tersebut kemudian diterobos oleh satuan Gunung Api Lumpur. Secara berturut-turut Formasi

Notopuro dan Gunung Api Lumpur ditutupi oleh Endapan Teras dan Endapan Aluvium Resen.

Formasi Kalibeng tersusun oleh sedimen marin berupa endapan lempung abu-abu kebiruan, lempung lanauan, pasir lanauan, batugamping balanus serta endapan lempung-lanau (Itihara drr., 1985). Sedimen penyusun utama Formasi Pucangan adalah lempung hitam dengan sisipan tuf dan lahar, yang di bagian bawah diendapkan di lingkungan laut dan air payau kemudian berubah secara bertahap menjadi lingkungan air tawar di bagian atas. Formasi Kabuh terdiri atas endapan lempung, lanau, pasir dan kerikil air tawar dengan sisipan tuf. Formasi Notopuro tersusun oleh endapan kerikil, pasir, lanau dan lempung air tawar dengan sisipan lahar, pumis dan tuf. Satuan Gunung Api Lumpur tersusun oleh bahan lumpur yang mengandung fragmen napal, serpih, batupasir, konglomerat, batugamping Numulites, andesit, monzonit, dan filit. Fragmen batuan tersebut diyakini berasal dari batuan dasar berumur Eosen-Pliosen serta batuan beku. Endapan Teras dan Aluvium Resen tersusun oleh sedimen berukuran butir pasir, kerikil dan kerakal dengan sisipan lanau, tersebar di sepanjang lembah sungai Cemoro, Pohjajar dan sungai Brangkal. Pada akhir pembahasan Itihara drr. (1985) mengusulkan penggantian nama Formasi Kalibeng, Pucangan, Kabuh, dan Formasi Notopuro, secara berturut-turut menjadi Formasi Puren, Sangiran, Bapang, dan Formasi Pohjajar karena keempat nama tersebut berada di daerah Sangiran. Di sebelah tenggara Sangiran, yakni di Kali Watuburik Bronto drr. (2004) melaporkan adanya lava basal Grumbulpring sebagai indikasi vulkanisme setempat pada umur Kuarter.

**Tabel 1.** Stratigrafi daerah Sangiran.

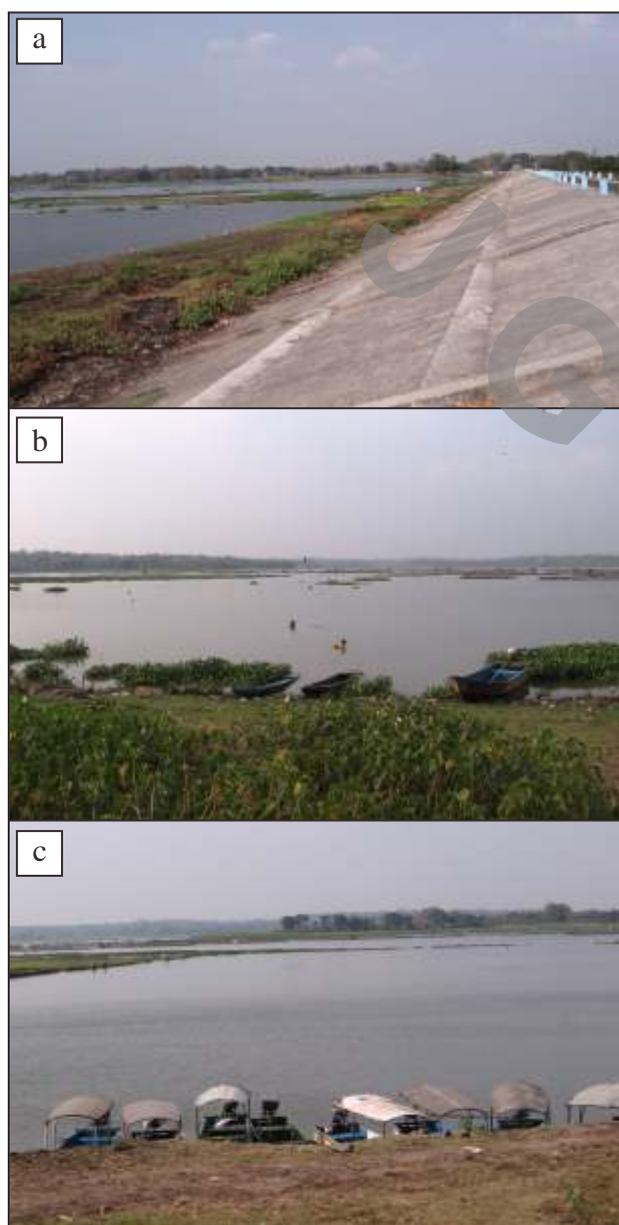
Endapan Aluvium Resen		Holosen	
	Endapan Teras	3.5 m -	Plistosen Akhir 0,25 - 0,07 Jth
Kelompok Kendeng	Formasi Notopuro	47,0 m +	Plistosen Awal - Tengah 0,71 - 0,78 Jth
	Formasi Kabuh	5,8 - 58.6 m	
	Formasi Pucangan	157.3 m -	Plistosen Awal 1,16 - 1,51 Jth
	Formasi Kalibeng	126.5 m +	Miosen - Pliosen Akhir 2,99 ± 0,47 Jth
	{ Atas		
{ Bawah			
	Batuan Dasar		Miosen Awal, Oligosen, Eosen dan Pra-Tersier

Sumber : Itihara drr., (1985)

## HASIL

### Bentang Alam

Dari barat ke timur bentang alam daerah Cengklik dan sekitarnya dibagi menjadi tiga bagian. Bagian barat berupa Danau Cengklik dan beberapa perbukitan rendah di sekitarnya, bagian tengah berupa dataran, dan bagian timur merupakan perbukitan rendah. Danau Cengklik berukuran 2 km (barat-timur) x 2,5 km (utara-selatan), yang dimanfaatkan sebagai waduk irigasi pertanian, perikanan air tawar, dan pariwisata setempat (Gambar 2).



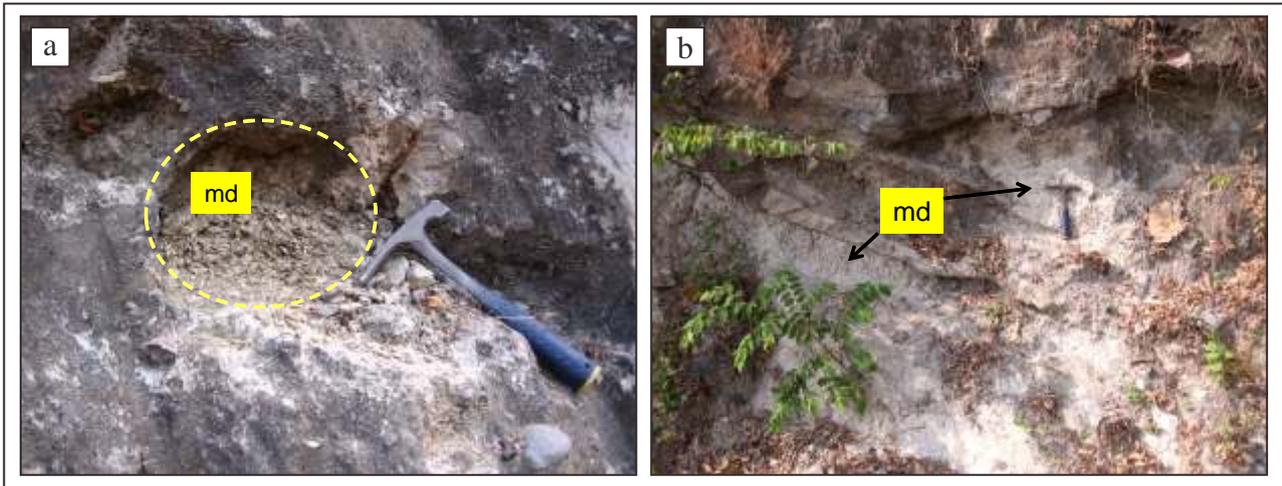
**Gambar 2.** Panorama Danau Cengklik, yang dimanfaatkan untuk: (a) waduk irigasi pertanian, (b) perikanan air tawar dan (c) pariwisata setempat. Danau Cengklik berukuran 2 km (barat-timur) x 2,5 km (utara-selatan).

Perbukitan rendah mempunyai ketinggian 10-30 m di atas dataran sekelilingnya, tetapi sebagian sudah digali untuk bahan bangunan dan tanah urug kemudian daerah tersebut dimanfaatkan untuk sawah dan ladang. Lapangan terbang internasional Adisumarmo berada 1 km di sebelah tenggara Danau Cengklik. Dataran di bagian tengah mempunyai ketinggian 100-110 m di atas muka laut dimanfaatkan untuk pesawahan dan pemukiman penduduk. Di bagian timur perbukitan rendah mempunyai ketinggian 20 – 40 m di atas dataran sekitarnya, sebagian sudah digali untuk bahan bangunan dan tanah urug kemudian dimanfaatkan untuk pemukiman dan ladang. Di daerah ini sedang dibangun jalan tol Solo-Surabaya, yang dimulai dari utara lapangan udara Adisumarmo ke timur menuju Sragen dan terus ke Jawa Timur. Jalan tol ini rencananya akan dihubungkan dengan jalan tol Solo-Semarang. Dengan adanya lapangan terbang Adisumarmo dan jalan tol tersebut menyebabkan pembangunan pemukiman dan kegiatan usaha di daerah ini berkembang sangat cepat.

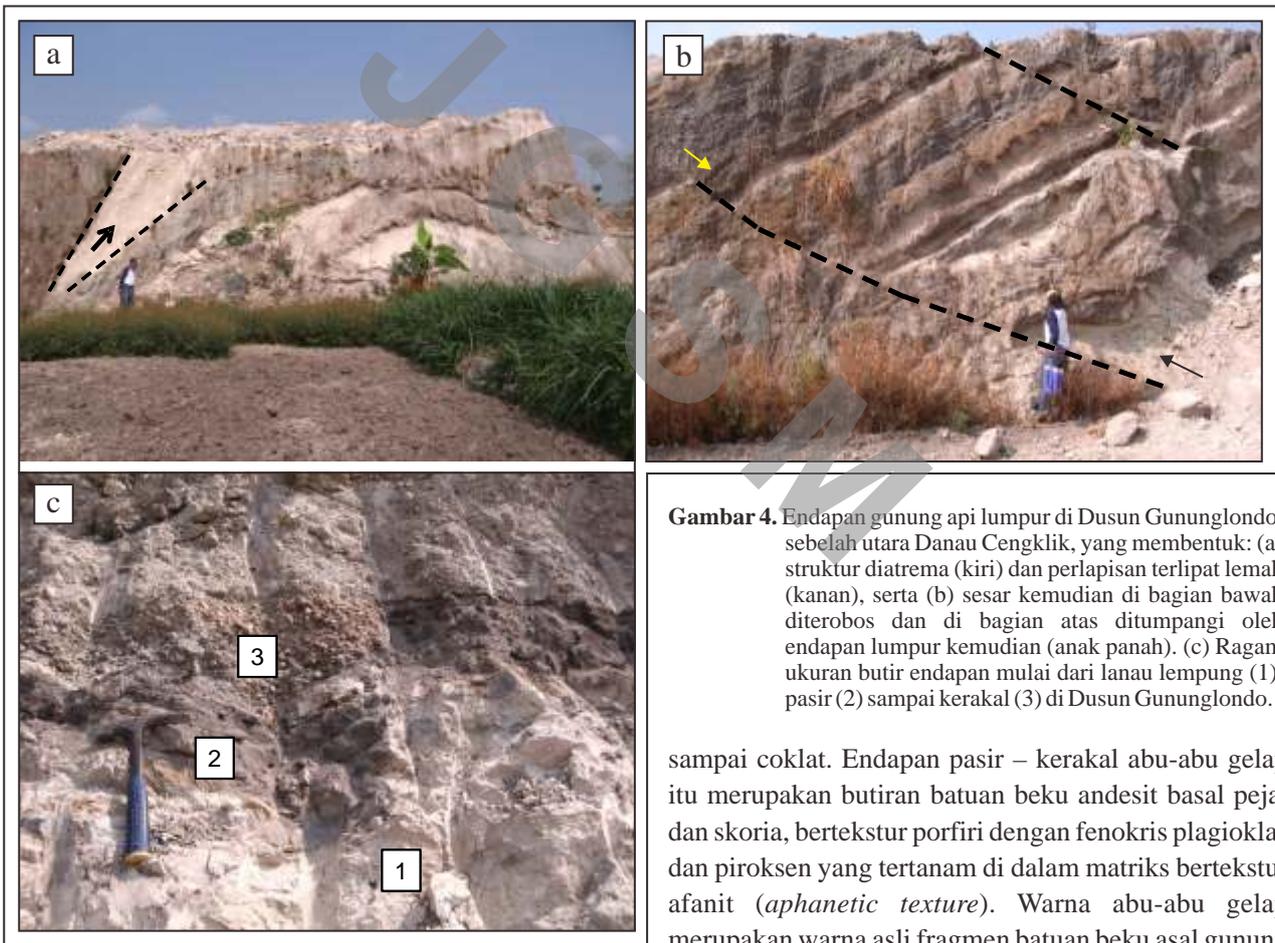
### Endapan Gunung Api Lumpur

Di daerah penelitian singkapan endapan gunung api lumpur dijumpai setempat-setempat memanjang dengan arah barat - timur sekitar 20 km dan lebar 3 – 5 km, mulai dari barat di sekitar Danau Cengklik, Kabupaten Boyolali sampai dengan Desa Karangturi, Kecamatan Gondangrejo, Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah di bagian timur. Endapan gunung api lumpur tersingkap sangat baik di bagian barat dan timur, yang sebagian besar berada di lokasi atau bekas lokasi penambangan bahan galian untuk urugan.

Di bagian barat endapan gunung api lumpur tersingkap di tepi selatan dan timur Danau Cengklik, yakni di Dusun Ngemplak, Desa Ngargorejo, koordinat  $07^{\circ} 31' 08,50''$  LS ;  $110^{\circ} 43' 32,30''$  BT dan di Dusun Tawang Sari, Desa Sobokerto, koordinat  $07^{\circ} 30' 38,90''$  LS;  $110^{\circ} 44' 25,50''$  BT. Keduanya berada di wilayah Kecamatan Ngemplak, Kabupaten Boyolali. Singkapan endapan gunung api lumpur berbentuk terobosan seperti retas, bola lumpur (*mud balls*) dan sisipan (*sills-like*) di antara breksi lahar (Gambar 3), berwarna abu-abu berukuran butir halus (lanau-lempung). Di sebelah utara Danau Cengklik, endapan gunung api lumpur tersingkap di Dusun Gununglondo, Desa Kenteng, Kecamatan Ngemplak, Kabupaten Boyolali, koordinat  $07^{\circ} 29' 19,80''$  LS;  $110^{\circ} 44' 41,90''$  BT. Singkapan endapan gunung api lumpur membentuk struktur diatrema dan sisipan kemudian ke permukaan berupa perlapisan yang kemudian terlipat lemah dan tersesarkan (Gambar 4).



**Gambar 3.** Endapan gunung api lumpur (md) di sebelah timur Danau Cengklik berbentuk bola lumpur (a) dan menyisip di antara breksi lahar (b). Lokasi: Dusun Tawangsari Desa Sobokerto, koordinat 07° 30' 38,90" LS; 110° 44' 25,50" BT.



**Gambar 4.** Endapan gunung api lumpur di Dusun Gununglondo, sebelah utara Danau Cengklik, yang membentuk: (a) struktur diatrema (kiri) dan pelapisan terlipat lemah (kanan), serta (b) sesar kemudian di bagian bawah diterobos dan di bagian atas ditumpangi oleh endapan lumpur kemudian (anak panah). (c) Ragam ukuran butir endapan mulai dari lanau lempung (1), pasir (2) sampai kerakal (3) di Dusun Gununglondo.

Ukuran butir endapan gunung api lumpur itu bervariasi, mulai dari berbutir halus (lanau-lempung), sedang (pasir) sampai kasar (kerikil-kerakal). Endapan berbutir halus berwarna cerah (putih abu-abu), sedang yang berbutir pasir – kerakal berwarna abu-abu gelap

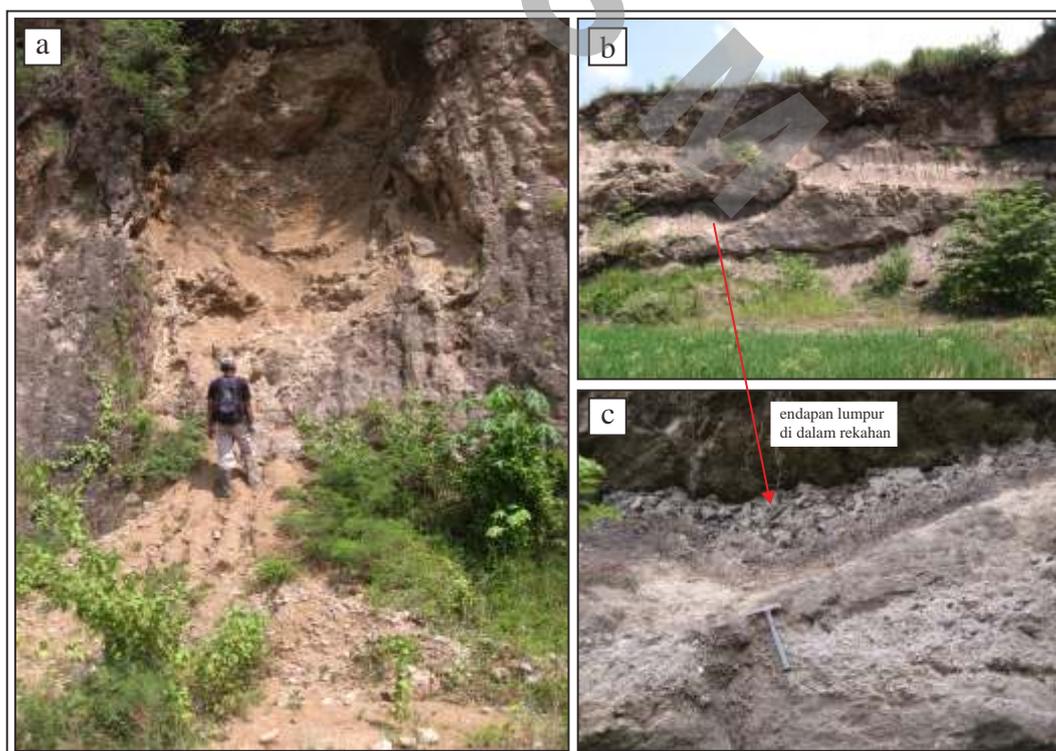
sampai coklat. Endapan pasir – kerakal abu-abu gelap itu merupakan butiran batuan beku andesit basal pejal dan skoria, bertekstur porfiri dengan fenokris plagioklas dan piroksen yang tertanam di dalam matriks bertekstur afanit (*aphanetic texture*). Warna abu-abu gelap merupakan warna asli fragmen batuan beku asal gunung api (*volcanic bombs, blocks & lava fragments*), sedangkan warna coklat diakibatkan oleh proses oksidasi lanjut pada saat bahan itu dirupsikan oleh gunung api (proses pendinginan cepat dan oksidasi pada skoria), dan sebagian lagi sebagai hasil oksidasi karena pelapukan cuaca. Fragmen andesit basal dan skoria abu-

abu gelap sampai coklat itu agaknya dapat dibandingkan dengan endapan rombakan dari Gunung api Merbabu yang terletak di sebelah barat laut daerah penelitian. Oleh sebab itu endapan gunung api lumpur berbutir pasir dan kerakal tersebut diduga berasal dari rombakan lebih ke hilir dari batuan Gunung api Merbabu. Gunung api lumpur mampu mendorong formasi batuan yang lebih tua di bawah permukaan, yang berbutir pasir sampai kerakal, karena mempunyai energi sangat kuat pada waktu erupsi.

Di bagian timur endapan gunung api lumpur tersingkap di banyak tempat, antara lain di Dusun Terek, Desa Jatikuwung, koordinat  $07^{\circ} 30' 40,2''$  LS;  $110^{\circ} 49' 26,8''$  BT, Dusun Sanggrahan Desa Wonorejo ( $07^{\circ} 31' 11,9''$  LS;  $110^{\circ} 49' 28,8''$  BT), jalan tol, dan Gunung Jenggrik wilayah Kecamatan Gondangrejo, Kabupaten Karanganyar. Pada lokasi penggalian bahan urugan di Dusun Terek endapan gunung api lumpur di bawah permukaan membentuk struktur diapir (*diapiric structures*), sisipan atau terobosan mengikuti bidang rekahan, bola-bola lumpur yang dihubungkan oleh rekahan halus, dan ke permukaan membentuk struktur diatrema (Gambar 5 & 6). Di bagian yang lebih dalam bentuk sisipan dan terobosan endapan gunung api nampak tidak beraturan serta batasnya dengan batuan

yang disisipi/diterobos terkadang tidak jelas (Gambar 7). Pada umumnya endapan lumpur di lokasi ini berbutir lempung-lanau.

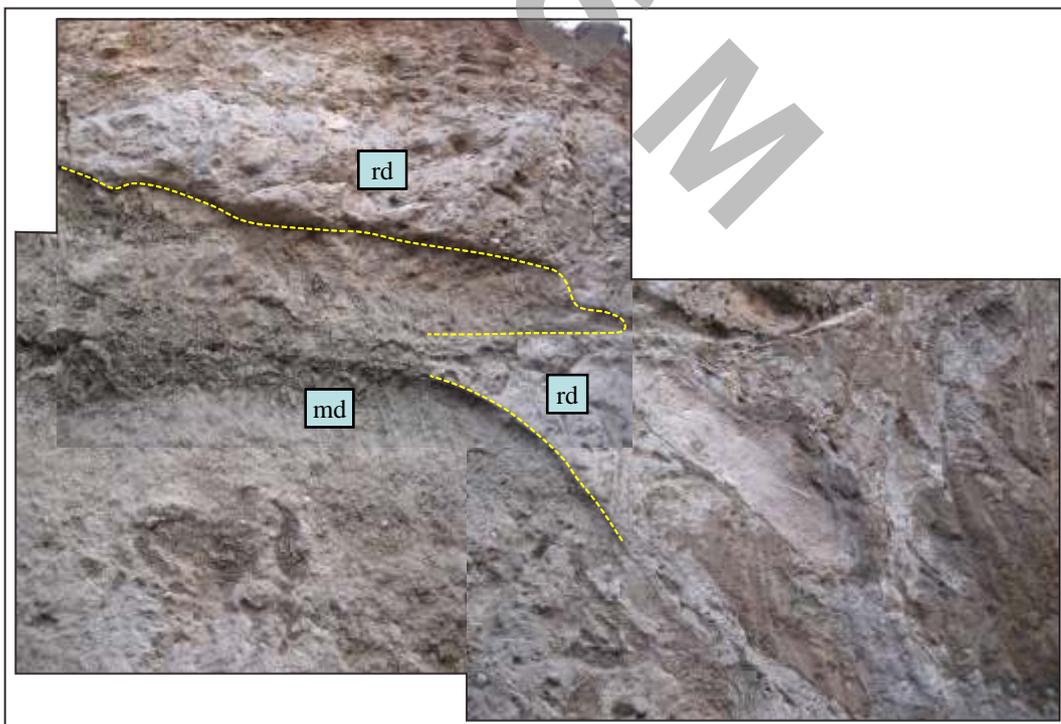
Di Perumahan Permata Dusun Sanggrahan endapan gunung api lumpur menerobos breksi longSORan gunung api dan breksi lahar (Gambar 8). Diduga kedua breksi itu masih belum kompak sehingga sebagian fragmen masuk ke dalam endapan gunung api lumpur. Breksi longSORan berwarna coklat kemerahan, terdiri atas fragmen yang tertanam di dalam matriks skoria berukuran pasir. Fragmen batuan sudah hancur pecah-pecah sangat menyudut sampai menyudut dengan kemas tertutup hingga terbuka, membentuk rekahan gergaji (*jigsaw cracks*) dan kekar prisma (*prismatic jointings*). Ciri tersebut menunjukkan bahwa breksi itu bertekstur kataklastika sebagai akibat mengalami proses deformasi pelongsoran. Di antara bongkah fragmen pejal juga dijumpai bom gunung api, yang bersama dengan matriks pasir skoria menunjukkan bahwa bahan longSORan itu berasal dari endapan piroklastika. Breksi lahar berwarna coklat tanah, banyak mengandung fragmen berbentuk menyudut tanggung sampai membundar tanggung mengambang di dalam matriks berbutir pasir-lanau.



**Gambar 5.** Singkapan endapan gunung api lumpur di Dusun Terek, Desa Jatikuwung, membentuk struktur diapir (a) dan sisipan di dalam rekahan (b). (c) *Close up* endapan gunung api lumpur di dalam rekahan.



**Gambar 6.** Singkapan endapan gunung api lumpur di Dusun Terek, Desa Jatikuwung, berbentuk (a) bola-bola lumpur gunung api. (b) Struktur rekahan berisi lumpur gunung api yang menghubungkan satu bola dengan bola lainnya. (c) Struktur diatrema sebagai jalan keluarnya lumpur ke permukaan (arah panah).



**Gambar 7.** Endapan gunung api lumpur (md) menerobos dan menyisip di antara endapan rombakan (rd), yang terdiri atas batupasir fluvium dan breksi lahar. Batas di antaranya tidak selalu tegas karena endapan rombakan masih bersifat lepas sehingga mudah bercampur dengan lumpur yang menerobosnya. Lokasi: Dusun Terek Desa Jatikuwung.



**Gambar 8.** Singkapan endapan gunung api lumpur bercampur fragmen andesit (md) di dalam endapan longsor gunung api (da, 1) dan lahar (lh, 2). Endapan longsor gunung api memperlihatkan tekstur kataklastika (3), yang di dalamnya terdapat bom gunung api (vb, 4). Lokasi Perumahan Permata Dusun Sanggrahan Desa Wonorejo, Kecamatan Gondangrejo, Kabupaten Karanganyar, koordinat  $7^{\circ} 31' 11,9'' \text{LS} - 110^{\circ} 49' 28,8'' \text{BT}$ .

Di sepanjang jalan tol endapan gunung api lumpur ditemukan mulai dari Dusun Sanggrahan Desa Wonorejo, koordinat  $7^{\circ} 31' 13,5'' \text{LS}; 110^{\circ} 49' 49,5'' \text{BT}$ , Dusun Ngledok ( $7^{\circ} 31' 14,1'' \text{LS}; 110^{\circ} 50' 53,8'' \text{BT}$ ) sampai dengan Gunung Jenggrik, di selatan Dusun Plosorejo, Desa Jatikuwung ( $7^{\circ} 31' 15,0'' \text{LS}; 110^{\circ} 50' 50,0'' \text{BT}$ ). Di tengah-tengah jalan tol endapan gunung api lumpur menerobos batupasir dan breksi lahar serta membentuk bola-bola lumpur (Gambar 9). Bola-bola lumpur masih dijumpai di kompleks Perumahan Wonorejo di sebelah selatan jalan tol atau di utara Dusun Watuburik. Ke arah timur sisipan dan terobosan gunung api lumpur dapat diamati dengan jelas di Gunung Jenggrik (Gambar 10). Di lokasi paling timur, yakni di tepi barat Bengawan Solo, endapan gunung api lumpur tersebut dijumpai di Dusun Kepuh, Desa Karangturi ( $7^{\circ} 31' 12,9'' \text{LS}; 110^{\circ} 52' 09,3'' \text{BT}$ ). Setelah material gunung api lumpur itu mengendap beberapa waktu lamanya terjadi padatan *caliche* di antara endapan lempung-lanau (Gambar 11). Hal itu menunjukkan bahwa pada waktu masih aktif sebagian material gunung api lumpur mengandung banyak larutan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ).

Tabel 2 memperlihatkan hasil analisis kimia oksida utama endapan gunung api lumpur di Terek dan Sanggrahan serta Sangiran. Meskipun berukuran butir halus secara kimiawi endapan lumpur gunung api itu berbeda dengan komposisi kimia mineral lempung dari Brownlow (1996). Perbedaan yang sangat mencolok terjadi pada kandungan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang jauh lebih rendah (17,78 – 21,45 %) dibanding dengan mineral lempung (25,76 – 44,94 %), sebaliknya  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  jauh lebih tinggi (7,22 – 11,84 %) daripada mineral lempung (0,93 – 3,20%). Perbedaan lain di dalam endapan gunung api lumpur masih mengandung Ti dan Mn sedang di mineral lempung tidak ada.

Komposisi kimia oksida utama endapan gunung api lumpur di daerah penelitian dan Sangiran ternyata dapat dibandingkan dengan komposisi kimia lumpur Sidoarjo, yakni semuanya mengandung bahan oksida utama dalam berbagai persentase (Tabel 3). Bahkan komposisi kimia itu mempunyai kemiripan dengan komposisi kimia batuan gunung api di dekatnya, yakni fragmen breksi lahar di Dusun Terek, bom gunung api di Dusun Sanggrahan dan lava basal Grumbulpring, meskipun kandungan  $\text{SiO}_2$  lebih tinggi.



**Gambar 9.** (a) singkapan endapan gunung api lumpur di tengah-tengah jalan tol sebelum digali dan ditutup semen. (b) *Close up* yang memperlihatkan endapan gunung api lumpur (md) menerobos (anak panah) di antara batupasir fluvium (fs) dan breksi lahar (lh), serta membentuk bola-bola lumpur (mb). Lokasi tepi selatan Dusun Ngledok, Desa Jatikuwung, koordinat 07° 31' 14,1" LS - 110° 50' 53,8" BT.

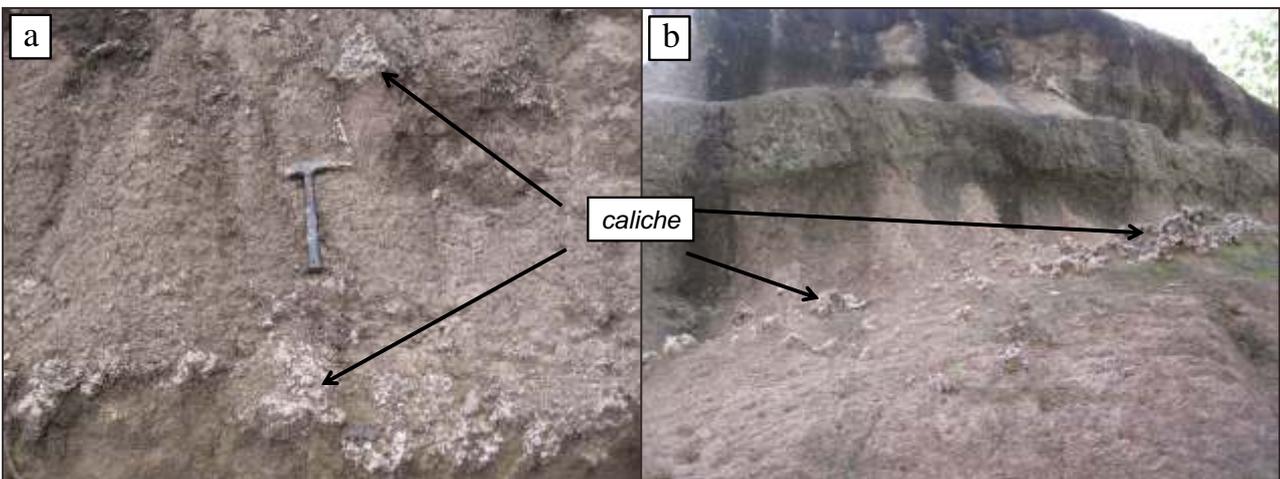


**Gambar 10.** Endapan gunung api lumpur (md) menyisip dan menerobos breksi tuf (tb) di bawah breksi lahar (lh). Lokasi di lokasi galian Gunung Jenggrik, di selatan Dusun Plosorejo Desa Jatikuwung.

**Tabel 2.** Data kimia oksida utama gunung api lumpur di Terek (15M04L) dan Sanggrahan (15M05L) dibandingkan dengan komposisi gunung api lumpur di Sangiran (15M08L & K01L) serta mineral lempung dari Brownlow (1996).

Kode sampel	15M04L	15M05L	15M08L	K01L	Kaolinit	Iilit	Monmorilonit
SiO <sub>2</sub>	61.40	63.21	53.93	63.43	53.01	54.30	66.66
TiO <sub>2</sub>	1.15	0.88	0.91	0.95	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.76	20.24	17.78	21.45	44.94	31.93	25.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.84	8.01	9.61	7.22	0.93	3.20	1.08
MnO	0.13	0.10	0.18	0.09	-	-	-
MgO	2.01	4.12	2.36	2.18	0.09	1.45	4.20
CaO	2.18	1.43	11.82	1.59	0.09	0.74	2.11
Na <sub>2</sub> O	0.64	0.30	2.40	0.64	0.77	0.14	0.05
K <sub>2</sub> O	0.89	1.71	1.01	2.45	0.17	8.24	0.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	-	-
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Satuan dalam % berat setelah dinormalisir 100 % bebas bahan volatil. Sampel 15M04L diambil di Terek Jatikuwung, koordinat 07° 30' 40,6" LS; 110° 49' 27,0" BT. Sampel 15M05L diambil di Sanggrahan Wonorejo, koordinat 07° 31' 20,2" LS - 110° 49' 48,2" BT. Sampel 15M08L diambil di Pablengan Sangiran, 07°27' 10,7" LS; 110° 50' 19,7" BT. Sampel 15K01L diambil di sebelah timur Museum Sangiran, selatan Pablengan, 07° 27' 26,1" LS; 110° 50' 14,9" BT. Komposisi kaolinit, iilit dan monmorilonit dari Brownlow (1996).



**Gambar 11.** Material karbonat *caliche* di dalam endapan gunung api lumpur di lokasi penggalian (1) Dusun Terek dan (2) Gunung Jenggrik.

**Tabel 3.** Komposisi kimia oksida utama di dalam lumpur Sidoarjo dan batuan beku dari daerah penelitian.

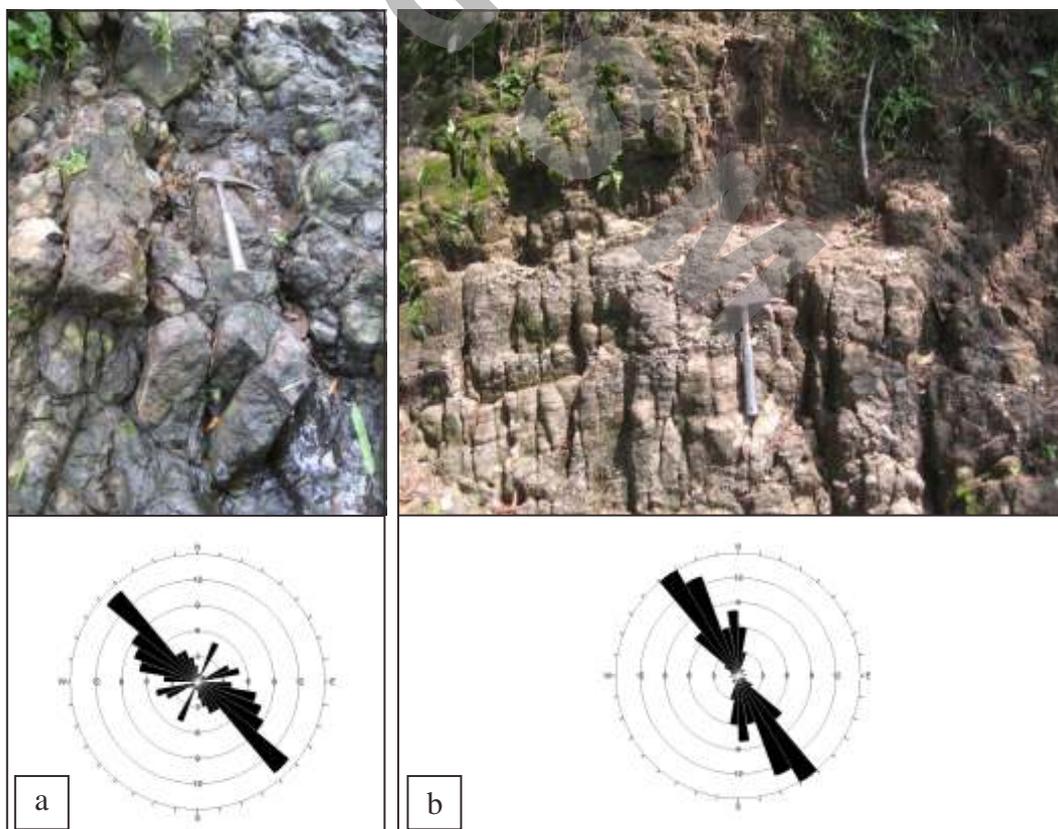
Kode sampel	Lusi-01	Lusi-02	Lusi-03	15M04B	15M05B	15M06B
SiO <sub>2</sub> (% wt.)	62.15	61.10	62.93	54.39	56.25	48.95
TiO <sub>2</sub>	0.91	0.73	0.93	0.73	0.52	0.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.04	20.39	20.35	21.52	22.50	21.96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.47	7.48	7.71	7.37	5.85	8.99
MnO	0.12	0.13	0.13	0.17	0.16	0.20
MgO	2.20	3.17	2.60	2.05	1.70	2.00
CaO	3.25	2.36	2.35	8.37	7.74	10.75
Na <sub>2</sub> O	0.68	2.44	0.70	3.71	3.75	3.49
K <sub>2</sub> O	1.99	1.93	1.93	1.30	1.28	2.31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.27	0.37	0.39	0.25	0.46
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Lusi-01 sampai Lusi-03, diambil pada Maret dan April 2007, serta Februari 2008; Zaennudin dr., (2010). 15M04B: Fragmen andesit di dalam breksi lahar Dusun Terek; 15M05B: Bom gn. api di Dusun Sangrahan sebagai bagian dari endapan longoran gunung api; 15M06B: Lava basal Watuburik, Dusun Grumbulpring. Satuan dalam % berat setelah dinormalisasi 100% bebas bahan volatil.

Zaennudin dr. (2010) melaporkan bahwa lumpur Sidoarjo berasal dari material gunung api. Dengan demikian diyakini bahwa endapan gunung api lumpur di daerah penelitian dan Sangiran juga berasal dari material gunung api, yang belum benar-benar membentuk mineral lempung.

### Struktur Geologi

Struktur geologi berupa sesar dan rekahan di endapan gunung api lumpur di Dusun Gununglondo dan Terek mempunyai arah yang tidak teratur. Berhubung endapan tersebut masih lepas-lepas, diperkirakan pembentukan struktur geologi itu bersifat lokal dan disebabkan oleh dinamika erupsi dan pengendapan pada waktu gunung api lumpur sedang berlangsung. Struktur geologi berupa kekar yang diyakini terkait dengan gerak-gerak tektonik terdapat di lava Grumbulpring (Kali Watuburik, koordinat 7° 31' 25,4" LS; 110° 50' 52,4" BT) dan breksi lahar (Kompleks Perumahan Wonorejo, koordinat 7° 31' 31,5" LS; 110° 50' 18,0" BT; Gambar 12). Hasil pengukuran kekar pada lava basal Grumbulpring menunjukkan arah utama N310° – 320°E, sedangkan di breksi lahar N330°E. Berhubung lava Grumbulpring dan breksi lahar tersebut berumur Kuartar, di duga struktur kekar berarah barat laut-tenggara itu berhubungan dengan kegiatan neotektonik regional.



**Gambar 12.** (a) Struktur kekar pada lava basal Grumbulpring (koordinat 7° 31' 25,4" LS; 110° 50' 52,4" BT) yang menunjukkan arah utama N310 – 320°E. (b) Struktur kekar pada breksi lahar di Kompleks Perumahan Wonorejo (koordinat 7° 31' 31,5" LS; 110° 50' 18,0" BT) yang menunjukkan arah utama N330°E.

## DISKUSI

Bentang alam cekungan Danau Cengklik dan dataran di sekitarnya yang berbentuk elip memanjang ke utara-selatan dengan ukuran 4 km x 3 km adalah bentang alam gunung api lumpur. Di tepi selatan dan timur danau dijumpai endapan gunung api lumpur yang masih berada di bawah permukaan, yang berupa terobosan, sisipan, dan bola-bola lumpur. Di bagian utara danau, yakni di Gununglondo, endapan gunung api lumpur membentuk struktur diatrema dan perlapisan endapan lumpur di permukaan yang mengindikasikan sebagai bahan semburan gunung api lumpur setempat secara berulang-ulang. Berdasarkan data tersebut diperkirakan bahwa cekungan eliptis tersebut, yang di dalamnya sekarang ada Danau Cengklik merupakan bekas kawah gunung api lumpur.

Endapan gunung api lumpur berbentuk sisipan seperti *sills*, menerobos seperti retas, struktur diapir dan bola lumpur seperti kubah lava terjadi di bawah permukaan, diatrema seperti leher gunung api di bawah kawah. Hal itu menggambarkan bahwa dalam proses pembentukannya pergerakan material gunung api lumpur, yang mengikuti bidang-bidang lemah di bawah permukaan, dapat dibandingkan dengan dinamika magma gunung api ketika bergerak menuju ke permukaan. Bidang-bidang lemah di bawah permukaan pada awalnya dikontrol oleh kegiatan tektonik regional, namun gerakan material gunung api lumpur ke permukaan dapat juga mengakibatkan terbentuknya struktur geologi setempat, seperti sesar dan lipatan lemah.

Berdasarkan analisa kimia oksida mayor material gunung api lumpur bersumber dari batuan gunung api, baik sumber asal maupun batuan yang diterobosnya. Untuk mengetahui genesis gunung api lumpur, apakah dipicu oleh kegiatan tektonik saja, atau kombinasi dengan magmatisme masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Namun karena secara regional daerah penelitian di antara gunung api aktif Merapi-Merbabu di sebelah barat dan Lawu di sebelah timur, serta secara lokal terdapat lava basal Grumbulpring yang berumur Kuartar (*sub recent*, van Bemmelen, 1949) maka keterlibatan magma di bawah permukaan tidak bisa diabaikan.

Secara litologis, sifat fisik batuan di daerah penelitian sangat beragam, mulai dari pejal dan sangat keras seperti halnya lava Grumbulpring dan breksi lahar, sampai lepas-lepas dan lunak berupa endapan gunung api lumpur. Struktur kekar dan rekahan juga sangat intensif. Kedua faktor geologis tersebut menjadi landasan bahwa daerah penelitian dapat dipandang sebagai zona lemah. Dengan berkembangnya

pembangunan di daerah ini, baik pembangunan jalan tol, pemukiman, dan kegiatan usaha lainnya, maka perlu diperhatikan potensi bencana yang dapat terjadi di masa mendatang. Potensi bencana terutama di sepanjang jalan tol adalah deformasi muka tanah atau amblesan tanah. Dengan berjalannya waktu tanah dan batuan dasar tidak kuat menahan beban bangunan jalan dan lalu lintas kendaraan yang berat dan padat. Kegiatan pembangunan pemukiman dan kegiatan usaha menyebabkan air permukaan terkontaminasi kemudian melalui struktur rekahan masuk ke bawah permukaan sehingga menyebabkan terjadinya pencemaran air tanah. Berhubung daerah ini terletak di jalur tektonik dan gunung api aktif maka potensi bencana lainnya seperti gempa bumi tektonik serta reaktivasi gunung api lumpur dapat terjadi lagi pada masa mendatang. Bahkan dengan adanya lava basal Grumbulpring yang berumur muda (*sub recent*, van Bemmelen, 1949) maka tidak menutup kemungkinan dapat terjadi lubang letusan gunung api baru (*a new opening vent*, IAEA, 2008) di daerah penelitian. Untuk mengantisipasi berbagai potensi bencana tersebut maka perlu dilakukan penelitian dan mitigasi secara berkesinambungan. Hasil penelitian dan mitigasi tersebut dapat juga untuk membantu menanggulangi bencana gunung api lumpur yang sedang terjadi seperti di Sidoarjo atau yang dapat terjadi di mana saja pada masa mendatang. Di dalam uraian landasan teori dinyatakan bahwa penanggulangan bencana gunung api lumpur belum dimasukkan ke dalam peraturan perundangan yang berlaku. Oleh sebab itu penanganan potensi dan kejadian bencana gunung api lumpur agar dimasukkan ke dalam peraturan perundang-undangan tentang penanggulangan bencana.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Di daerah penelitian terdapat gunung api lumpur tua dan Danau Cengklik diduga sebagai salah satu bekas kawahnya. Dinamika pergerakan gunung api lumpur mulai dari bawah sampai permukaan dapat dibandingkan dengan pergerakan magma selama erupsi gunung api berlangsung.

Secara geologis daerah penelitian merupakan zona lemah, yang berpotensi terjadi bencana amblesan tanah, pencemaran air tanah, dan gempa bumi serta kemungkinan reaktivasi gunung api lumpur. Untuk itu penelitian dan mitigasi secara berkesinambungan sangat disarankan. Potensi bencana gunung api lumpur agar dimasukkan ke dalam peraturan perundang-undangan.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Dengan tersusunnya makalah ini penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Bapak Drs. Kurnia, Bapak Heri dan Ibu Ernawati yang telah membantu kerja di

lapangan dan analisa di laboratorium. Ucapan terimakasih juga ditujukan kepada Redaksi Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral, yang telah menerima dan menyetujui makalah ini untuk diterbitkan.

## ACUAN

- Bronto, S., 2008. Tinjauan Geologi Gunung Api Jawa Barat – Banten dan Implikasinya, *Jurnal Geoaplika, FITK- ITB*, 3 (2), 47-61.
- Bronto, S., 2013. *Geologi Gunung Api Purba*, Badan Geologi, Cetakan kedua, Bandung, 184.
- Bronto, S., Ciochon, R., Zaim, Y., Larick, R., Wulff, A., Rizal, Y., Carpenter, S., Bettis, A., Sudijono dan Suminto, 2004. Studi Petrologi Basal sebagai Indikasi Volkanisme di Daerah Grumbulpring, Sangiran – Jawa Tengah, *Jurnal Sumber Daya Geologi*, XIV (2), 37-50.
- Brownlow, A.H., 1996. *Geochemistry*, Prentice-Hall Ltd., London, 580.
- Duyfjes, J., 1936. Zur Geologie und Stratigraphie des Kendeng-gebietes zwischen Trinil und Soerabaja (Jawa). *De Ingenier Ned. Ind.*, Sect. 4 (8), 136-148.
- Graue, K., 2000. Mud volcanoes in deep water Nigeria: *Marine and Petroleum Geology*, 17, 959-974, doi: 10.1016/S0264-8172(00)00016-7.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), 2008. Volcanic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installation, IAEA Safety Standards for prospecting people and the environment, DS 405, 58.
- Itihara, M., Sudijono, Kadar, D., Shibasaki, T., Kumai, H., Yoshikawa, S., Aziz, F., Soeradi, T., Wikarno, Kadar, A.P., Hasibuan, F., and Kagemori, Y., 1985. Geology and Stratigraphy of the Sangiran Area, in: N. Watanabe & D. Kadar (Eds.): *Quaternary Geology of the Hominid Fossil Bearing Formations in Java*, Spec. Publ. n. 4, GRDC, 11-43.
- Neurauter, T.W. dan Bryant, W.R., 1990. Seismic expression of sedimentary volcanism on the continental slope, northern Gulf of Mexico, *Geo-Marine Letters*, 10, 225-231, doi: 10.1007/BF02431069.
- Planke, S., Svensen, H., Hovland, M., Banks, D.A., and Jamrveit, B., 2003. Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan, *Geo-Marine Letters*, 23, 258-268, doi: 10.1007/S00367-003-0152-Z.
- Purbo-Hadiwidjojo, M.M., 2013. *Kamus Geologi dan Ranah Rinangkun*, Badan Geologi, Bandung, 229.
- Satyana, A., 2008. Roles of mud volcanoes eruptions in the decline of the Jenggala and Majapahit empires, East Java, Indonesia : Constraints from the historical chronicles, folklore, and geological analysis of the Brantas delta-Kendeng depression, *Majalah Geologi Indonesia*, 23 (1-2), 1-10.
- Sukardi dan Budhitrisona, T., 1992. *Geologi Lembar Salatiga, Jawa, skala 1 : 100.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Surono, Toha, B. dan Sudarno, I. 1992. *Peta Geologi Lembar Surakarta, Jawa, skala 1: 100.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Van Bemmelen, R. W., 1949. *The Geology of Indonesia*, Vol. IA, Martinus Nijhoff, the Hague, 732.
- Wirakusumah, A.D., Bronto, S. and Sumaryadi, M., 2000. Volcanological Aspects of Muria Volcanic Complex and Their Hazard Assessment, Final Report on Volcanology, Feasibility study of Nuclear Power Plant at Muria Peninsula, Central Java, Indonesia, National Technical Team collaboration with National Nuclear Energy Agency (BATAN), 97 (unpub. report).
- Zaennudin, A., Badri, I., Padmawidjaja, T., Humaida, H., dan Sutaningsih, N.E., 2010. *Fenomena Geologi Semburan Lumpur Sidoarjo*, Badan Geologi, K-ESDM, Bandung, 174.