

Pemicu dan Dinamika Evolusi gunung lumpur Sidoarjo (LUSI) ***Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia***

Mazzini, A., Svensen, H., Akhmanov, G.G., , Aloisi, G., Planke S.,
Malthe-Sørensen, A., and Istadi, B.
Juli 2007



Baseline Knowledge Asal Mula dan Perkembangan LUSI

Dikaji kontekstual oleh: Dr. IR. Hardi Prasetyo

Disusun kembali 24 Mei 2008

***Dalam Rangka Memperingati 2 Tahun Lumpur Sidoarjo
Dipersembahkan kepada Para Pahlawan LUSI***

TATA URUT DAN KATA KUNCI

Prolog:

SARI

- Gunung lumpur merupakan fenomena geologi penting, terkait dengan aliran fluida secara vertikal dan semburan lumpur
- Pembentukan gunung lumpur oleh sedimen lempung kaya unsur organik dengan tekanan berlebih (Overpressur):
- Pengintegrasian data baru dan lama untuk penulisan makalah Lusi, yang berkembang di cekungan di busur belakang (backarc sedimentary basin) dekat dengan busur magmatik (magmatic arc):
- Lokasi yang berdekatan busur magma (magmatic arc) memicu transformasi mineralogi dan reaksi geokimia pada kedalaman dangkal (shallow deep):
- Pre semburan Lusi diindikasikan adanya struktur pembubungan (piercement):
- Pengendali mekanisme Lusi dari gempa Yogyakarta 27 Mei 2006, membentuk rekahan, depressurization fluida pori:
- Pembentukan sistem panas bumi dan ekspresi permukaan seperti geysir:

KESIMPULAN

- Peluang mempelajari gunung lumpur sejak awal kelahirannya:
- Lusi memiliki perilaku yang menakjubkan dan masih berlanjut dalam waktu jangka panjang:
- Potensi skenario bencana:
- Semburan lumpur di picu gempa bumi 27 Mei di Yogyakarta:
- Rekahan yang terbentuk menyebabkan migrasi lumpur bertekanan tinggi:
- Pengangkatan lumpur didorong oleh pengurangan tekanan dalam rongga pori:
- Vulkanisme lumpur masih langka dipelajari di Indonesia:

PENDAHULUAN

- Awal semburan terhadap sumur eksplorasi BJP-1:
- Lusi dan luas luapannya:
- Dampak sosial dan upaya penanaman luapan:
- Lusi membuka peluang untuk mempelajari evolusi gunung lumpur sejak kelahirannya:
- Keunikan Lusi, semburan terus berlangsung:
- Keunikan Lusi temperatur di permukaan jauh lebih tinggi daripada tempat lain di dunia:
- Semburan terus berlangsung terdiri dari air panas dan lumpur:
- Sumber pengamatan di lapangan dan data kegiatan eksplorasi BJP-1:
- Tujuan dinamika semburan Lusi dan alternatif penyebabnya:

METODA

- Studi Lapangan:
- Geokimia:
- Estimasi besaran volume semburan:
- Survei subsidence:
- Komposisi gas:
- Kandungan LEL gas metan:
- Komposisi gas:
- Hidrokarbon:
- Komposisi isotop karbon:
- Akuntabilitas lembaga pelaksana:
- Kation:
- Komposisi $\delta^{18}\text{O}$ air:
- Komposisi δD :
- Komposisi mineral lempung:
- Vitrinite reflectivity:
- Pengamatan biostratigrafi:

KEDUDUKAN GEOLOGI DAN STRATIGRAFI

- Tektonik P. Jawa sebagai busur kepulauan dari penunjaman kerak samudera aktif:
- Tektonik busur muka (prisma akrasi dan busur magmatik):
- Tektonik cekungan busur belakang (backarc basin):
- Jarak terdekat Lusi dengan G. Pananggungan:
- Terdapatnya indikasi sesar regional:
- Ada tiga gunung lumpur yang telah terbentuk sebelumnya:
- Stratigrafi Sidorajo sampai pada ketebalan 3000m berumur Pleistosen:
- Perbandingan dengan Stratigrafi Sumur Porong-1:
- Umur mutlak batugamping Formasi Kujung:
- Bagian bawah pemboran BJP-1 menembus pasir turbidit (laut dalam?):
- Sanggahan pemboran tidak menembus Formasi Kujung:
- Bukti tidak adanya batuan karbonat dari bagian terdalam pemboran:
- Bukti kecepatan sedimen yang tinggi dan lapisan bertekanan tinggi:
- Analogi dengan vulkanisme lumpur di tempat lain:

DATA SURVEI DAN HASIL

- Sejarah semburan dan dinamika (Eruption history and dynamics)
- Awal kejadian rembesan air di permukaan, 29 Mei 2006:
- Komposisi air dan tinggi semburan uap:
- Perkembangan cepat kawah:
- Hadirnya semburan pasir:
- Kaitan semburan dan pola rekahan dan sesaran regional NE:

- Bubble sebagai bukti sistem pengaliran telah terbentuk:
- Fluktuatif volume semburan 2006-Juni 2007:
- Bukti-bukti penenggelaman:
- Anatomi kaldera dan struktur runtuh dari gunung lumpur:
- Kaitan orientasi daerah tenggelam dengan arah sesar regional:
- Pembacaan dan gradient temperatur
- Hasil pengukuran temperatur:
- Bukti tingginya geothermal gradient dalam lubang sumur BJP-1:
- Faktor pengontrol busur gunung api pada gradient geothermal:
- Komposisi dari erupsi gas dan air
- Komposisi erupsi gas:
- Kandungan gas metan, H₂S, dan CO₂:
- Hasil pengukuran gas:
- Kandungan CO₂ dan CH₄:
- Kandungan δ¹³C:
- Indikasi kandungan klorin lebih rendah dari air laut:
- Indikasi kandungan SO₄ dan Mg jauh lebih rendah dari air laut:
- Indikasi kandungan B dan Ca lebih tinggi dari air laut:
- Kandungan 18O dalam air:
- Sumber dari semburan lumpur
- Kandungan mineral lempung dan bukti sedimentasi pada lingkungan marin:
- Kondisi mineral lempung smektit dan illit:
- Perkiraan sumber lumpur dari interval 1615-1825 m:
- Indikasi sumber lumpur dari lapisan volkanoklastik:
- Bukti biostratigrafi sumber interval lumpur 1219-1829m:
- Korelasi kandungan vitrinit reflektivitas:
- Prediksi sumber lumpur pada interval 1219 dan 1828m:

DISKUSI

- Asal usul semburan padat dan fluida
- Bukti biostratigrafi, mineral lempung, vitrinit reflektivitas sumber utama lumpur dari interval 1615-1828m:
- Alternatif kombinasi dari kedalaman 1871 m dengan tiga alternatif mekanisme fluidization:
- Bukti-bukti adanya percampuran fluida dalam dan dangkal:
- Hipotesis yang mendukung bahwa gas Lusi berasal dari percampuran biogenic dan termogenik:
- Sumber gas biogenic lempung overpressure (1223-1871m):
- Sumber gas termogenik dari formasi yang lebih dalam:
- Kemungkinan H₂S dikontribusikan dari gas dalam:
- Kecepatan dan komposisi semburan yang kompleks:
- Tingginya kandungan CO₂ cukup mengejutkan:
- Fluida dalam lumpur lebih kecil dari nilai air laut:

- Fluida LUSI diperkaya dalam B, Ca, Li, Na, Sr dan Br dan depresi dalam K, Mg and SO₄:
- Bukti lain reaksi alterasi silikat:
- Perkiraan sumber dari pasir volkanoklastik:
- Bukti tambahan dominasi mineral lempung dari isotop pengkayaan ¹⁸O:
- Besarnya semburan air dari proses dehidrasi lempung:
- Lapisan 1109-1828 mengalami dampak transformasi smektit-ilit
- Daerah pengenggelaman 3,5 X 2 km sebagai daerah sumber:
- Hasil perhitungan total air dihasilkan transformasi smektit-ilit 1,2 milyar M³:
- Kontribusi tekanan dari diagenesis:
- Apakah kejadian Lusi dipicu oleh gempa bumi?
- Even gempa bumi 27 Mei 2006:
- Hubungan semburan Lusi dan Gempabumi:
- Bukti-bukti adanya hubungan tersebut di bagian dunia lain:
- Faktor pendukung struktur diapiri terkait dengan struktur sesar dan lipatan:
- Fenomena struktur pengkubahan dan tektonik aktif relevan dengan pemicu Lusi:
- Aktivitas sesar Watukosek:
- Bukti-bukti adanya Sesar Watukosek:
- Bukti-bukti terdapatnya gunung lumpur lainnya yang membentuk orientasi yang seragam:
- Bukti-bukti adanya struktur diapir, sebagai bukti sejarah adanya aliran vertikal:
- Sesar memicu terbentuknya rekahan atau reaktivasi struktur yang telah ada:
- Adanya bukti tambahan dari fenomena loss tanggal 27 Mei:
- Bukti pengurangan produksi gas dari sumur Carat:
- Peningkatan aktivitas semburan gunung lumpur di tempat lain:
- Model semburan
- Pemicu dari gempa bumi terhadap awal semburan Lusi:
- Fenomena gempa bumi memicu kenaikan intensitas gunung api:
- Penulis beranggapan bahwa rekahan dan sesar yang telah ada mengalami tekanan berlebih akibat gempa bumi:
- Naiknya fluida bertekanan tinggi dari interval 1323-1871 melalui rekahan yang baru terbentuk:
- Mekanisme aliran fluida secara vertikal:
- Bersamaan terjadi mobilisasi dari lumpur.
- Pulsanisasi akibat pendidihan pada kedalaman 200m:
- Sumber pendidihan dan keluarnya CO₂ dan CH₄:
- Volume lumpur 27 m³ yang dikeluarkan dari Mei 2006-Maret 2007:
- Penjelasan adanya waktu jeda 2 hari antara gempa dan awal semburan:
- Tidak ada kick dan semburan melalui lubang bor BJP-1:
- Bukti sepatu pemboran yang masih menempel, tidak ada semburan bersentuhan dengan sumur bor:
- Sangatlah tidak mungkin untuk menentukan pemicu semburan dari LUSI.
- Pulsations
- Terjadinya fase fluktuatif semburan:

- Fenomena runtuh gradual dan kaitan dengan pengurangan tekanan
- Model semburan berulang seperti system hidrotermal:
- H₂S membuktikan fluida muncul dari satuan yang lebih dalam:
- Belum ada cukup bukti plumbing system berkaitan dengan busur gunung api:
- Semburan Lusi memperlihatkan perilaku quasi-hydrothermal:
- Lebih satu tahun: LUSI terus aktif
- Lusi pasca setahun masih dahsyat (semburan dan penenggelaman):
- Berkurangnya kadar air:
- Perulangan semburan semakin pendek (1,5-0,5 jam):
- Adanya indikasi terjadinya pengurangan secara gradual energi, namun karena jumlah sedimen padat besar akan menimbulkan bencana:
- Indikasi peningkatan viskositas, implikasi penanganan luapan dan mengalirkannya ke selatan:
- Inseri bola-bola beton dan kendala yang dihadapi:

REFERENCES

PROLOG:

Sampai saat ini asal mula (*origin*), penyebab (*causing*) dan pemicu (*trigerring*) semburan lumpur Sidoarjo masih menjadi hal yang diperdebatan di kalangan para ahli kebumihan (*Earth Scientists*), ahli pemboran (*Drilling Expert*) dan lain-lain.

Secara spesifik telah dapat dikelompokkan dua pandangan yang saling bertolak belakang yaitu: 1) Lumpur Sidoarjo sebagai hasil dari kegiatan manusia (*man made activity*), dipicu oleh terjadinya *under ground blow out (UGBO)* saat berlangsungnya kegiatan eksplorasi gas alam (*natural gas exploration activity*); dan 2) Lumpur Sidoarjo, merupakan fenomena alam (*natural alam*) atau atau fenomena geologi (*geological phenomenon*) yang dipicu oleh terjadinya gempa bumi.

Walaupun terdapat perbedaan pandangan yang sampai pada kontroversi, namun secara universal Lumpur Sidoarjo telah ditempatkan sebagai salah satu mud volcano yang keseluruhannya berjumlah ribuan di seluruh dunia.

Paper *dengan judul Pemicu dan Dinamika Evolusi gunung lumpur Sidoarjo (LUSI)*, yang dipublikasikan oleh Andrio Manzini dkk., Juli 2007 telah ditetapkan sebagai salah satu baseline, dari kelompok yang memandang Lusi sebagai suatu mud volcano, dipicu oleh terjadinya gempa bumi.

Makalah ini ditulis, sebagai respon terhadap pemikiran dan hipotesa yang beranggapan Lusi dipicu oleh kesalahan pada kegiatan pemboran eksplorasi Banjar Panji-1 sebagaimana yang diusulkan oleh Davies dkk., Maret 2007.

Makalah yang terkait dengan lahir dan berkembangnya Lumpur Sidoarjo (telah umum ditetapkan sebagai mud volcano), menyediakan suatu alat bantu yang bernilai dalam mengimpelemantasikan upaya Penanggulangan Semburan, sebagaimana yang diamanatkan oleh Peraturan Presiden No. 14/2007 tentang Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo.

SARI

Gunung lumpur merupakan fenomena geologi penting, terkait dengan aliran fluida secara vertikal dan semburan lumpur

- Gunung lumpur merupakan fenomena geologi penting (*important geological phenomena*), dihasilkan oleh adanya aliran fluida secara vertikal (*vertical fluida flow*) dan semburan lumpur (*mud eruption*).
- Fenomena tersebut umum terjadi pada cekungan-cekungan sedimentasi (*sedimentation basins*) di seluruh dunia.

Pembentukan gunung lumpur oleh sedimen lempung kaya unsur organik dengan tekanan berlebih (Overpressur):

- Pembentukan gunung lumpur umumnya merupakan pelepasan sedimen lempung yang kaya dengan unsur organik dan mempunyai tekanan tinggi atau tekanan berlebih (*overpressure*).
- Kondisi tersebut memungkinkan terbentuknya suatu bangunan gunung lumpur yang impresif, baik di bawah permukaan bumi (*subsurface*) maupun di bawah dasar laut (*submarine*).

Pengintegrasian data baru dan lama untuk penulisan makalah Lusi, yang berkembang di cekungan di busur belakang (backarc sedimentary basin) dekat dengan busur magmatik (magmatic arc):

- Tulisan ini disusun berdasarkan serangkaian data (*data set*) dan hasil kerja lapangan, pada suatu gunung lumpur yang relatif baru menyembur di Jawa Timur (Indonesia), yang selanjutnya diberi nama sebagai LUSI.

- Lokasi semburan terletak pada cekungan sedimentasi di busur belakang (*backarc sedimentary basin*) Indonesia, berdekatan dengan kompleks magmatik (*magmatic complex*) yang merupakan bagian dari busur muka (*forearc region*).

Lokasi yang berdekatan busur magma (*magmatic arc*) memicu transformasi mineralogi dan reaksi geokimia pada kedalaman dangkal (*shallow deep*):

- Lokasi yang spesifik tersebut dengan latar belakang gradien temperatur yang tinggi (*high gradient temperature*), telah memicu terjadinya transformasi mineralogi (*mineralogy transformation*) dan reaksi geokimia (*geochemical reaction*), pada kedalaman yang dangkal (*shallow deep*).
- Tahun 2006 sampai Juli 2007 volume semburan berkisar antara 120.000-180.000 m³/h,
- Volume semburan pada periode Agustus-September 111.000 m³/h, sedangkan angka penenggelaman rata-rata sebesar 11m.
- Tahun 2006, volume semburan berkisar antara 0 sampai 120.000 m³/hari, selanjutnya meningkat secara dramatis, dipicu oleh fenomena gempa bumi yang terjadi pada bulan September 2006.
- Desember 2006 debit semburan meningkat mencapai angka tertinggi, yaitu sekitar 180.000 m³/h.
- Sampai pada bulan ke limabelas dari sejak awal semburan (saat penulisan makalah), LUSI masih terus menyembur dengan debit puncak (*peak eruption*) sekitar 111.000 m³/h.
- Sedangkan rata-rata penenggelaman tanah (*land subsidence*) di daerah luapan mencapai 11m.

Pre semburan Lusi diindikasikan adanya struktur pembubungan (*piercement*):

- Penampang seismik refleksi (*seismic reflection profile*) memotong sumur eksplorasi BPJ-1 memperlihatkan bahwa sebelum terjadinya semburan, telah diidentifikasi adanya aktivitas struktur (diapir lumpur membentuk pembubungan '*piercement*').

Pengendali mekanisme Lusi dari gempa Yogyakarta 27 Mei 2006, membentuk rekahan, depressurization fluida pori:

- Berdasarkan data geokimia dan pengamatan lapangan, penulis mengusulkan mekanisme semburan (*mud eruption mechanism*) bermula saat setelah terjadinya gempabumi 27 Mei di Yogyakarta,
- Proses berikutnya adalah membentuk rekahan yang berasosiasi dengan *depressurization* fluida pori, dengan temperatur > 100 derajat *Celcius* dari kedalaman > struktur yang telah berada pada kondisi kritis.

Pembentukan sistem panas bumi dan ekspresi permukaan seperti geyser:

- Kondisi di atas menghasil pembentukan suatu sistem panas bumi (*geothermal system*), dengan ekspresi permukaan menyerupai geyser, dan berhubungan dengan terjadinya aktivitas yang terkait dengan kegempaan regional.

KESIMPULAN

Peluang mempelajari gunung lumpur sejak awal kelahirannya:

- Fenomena LUSI merupakan suatu kesempatan yang unik (*unique opportunity*) untuk memantau (*monitoring*) dan memahami (*understanding*) terhadap mekanisme yang terjadi selama semburan gunung lumpur (*mud volcano eruption*),
- Mulai dari saat ia dilahirkan (*birth of mud volcano*) sampai saat tumbuh dan berkembangnya (*growth and development stage*).

Lusi memiliki perilaku yang menakjubkan dan masih berlanjut dalam waktu jangka panjang:

Perilaku semburan yang menakjubkan (*Its pulsating behaviour*) dan masih berlanjut berjangka panjang (*long way continuation*), menyediakan suatu data yang bernilai untuk membantu dalam menyusun evolusi erupsi vulkanik yang belum lengkap.

Potensi skenario bencana:

Data yang tersedia menunjukkan bahwa selama masih berlangsungnya semburan lumpur, maka secara sistem mempunyai tingkat kekritisannya, dan bila ditambahkan dengan faktor-faktor eksternal lainnya, menyebabkan lokasi Lusi dapat terinisiasi terjadinya even bencana (*hazard event*).

Semburan lumpur di picu gempa bumi 27 Mei di Yogyakarta:

Walaupun kesimpulan ini adalah hasil dari suatu rangkaian penyelidikan, namun pengamatan para penulis telah mengerucut bahwa gempa bumi yang terjadi 27 Mei 2006 di Yogyakarta,

dianggap telah memicu terjadinya semburan lumpur (*triggering mud eruption*).

Rekahan yang terbentuk menyebabkan migrasi lumpur bertekanan tinggi:

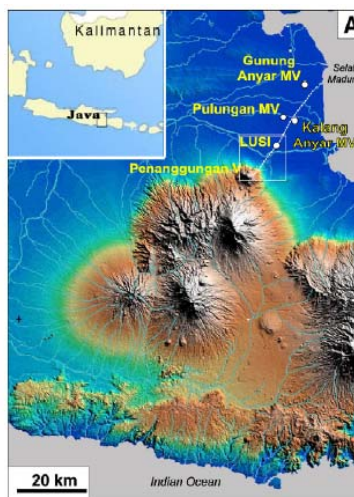
Model konsep yang baru (*new model conception*) adalah bahwa terjadinya semburan lumpur diawali oleh rekahan diikuti dengan migrasi secara vertikal lumpur bertekanan tinggi (*fracture following vertical migrating of overpressure mud*).

Pengangkatan lumpur didorong oleh pengurangan tekanan dalam rongga pori:

Pengangkatan lumpur ke permukaan dihasilkan oleh adanya pengurangan tekanan dari keluaran dari gas yang tidak terlarut di dalam rongga air (*pore fluid*). Pengendali daya (*driving force*) ini memungkinkan lumpur mencapai permukaan bumi dengan kecepatan yang tinggi untuk menginduksi pendidihan pada kedalaman dan fluida rongga yang panas.

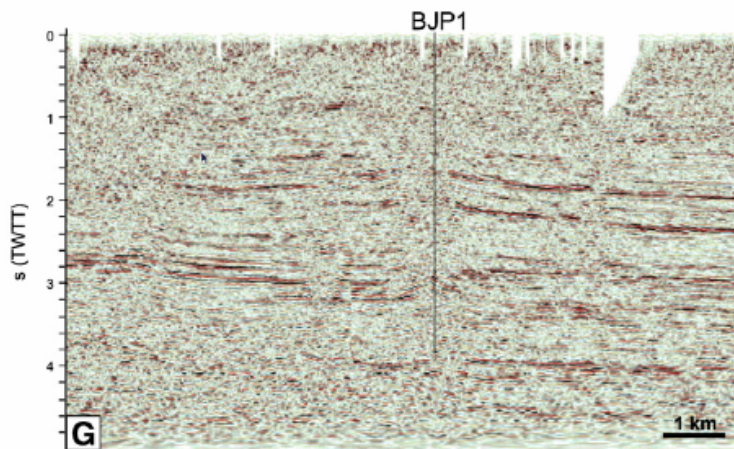
Volkanisme lumpur masih langka dipelajari di Indonesia:

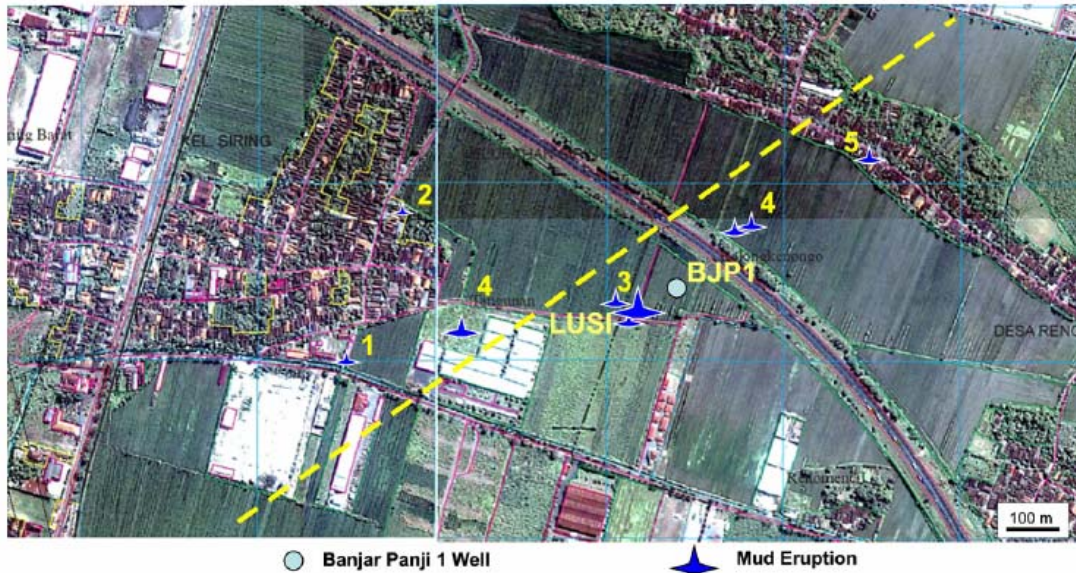
Fenomena volkanisme lumpur (*mud volcanism phenomenon*) masih sangat sedikit dipelajari di Indonesia, walaupun Lusi telah menjadi suatu bencana yang menimbulkan kerugian masyarakat berpenduduk yang banyak.



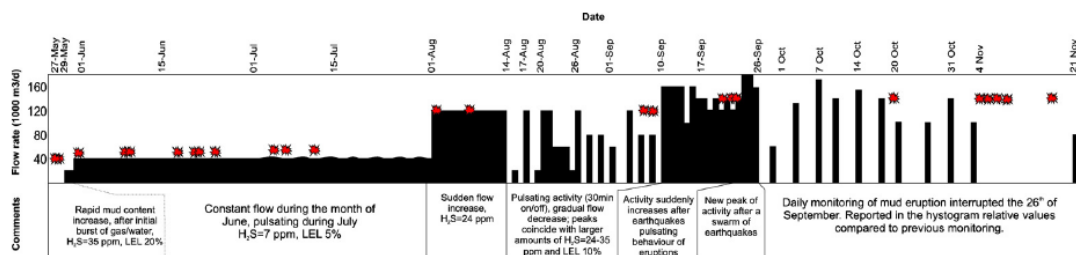


Gambar 1. (Atas) Bagian peta citra satelit memperlihatkan elevasi P. Jawa. Busur volcanik berlokasi di bagian selatan. (Bawah) Cekungan busur belakang, dimana LUSI disemburkan, terdapat di bagian utara dari busur volcanik. Sesar 'Watukosek' berkembang dengan arah dari gunung Penanggungan kearah timur laut. Secara rinci, citra satelit memperlihatkan adanya fenomena pembelokan aliran sungai, gawir (escarpment) Watukosek dan gunung Penanggungan dipotong oleh sesar berorientasi timur laut-baratdaya. Foto satelit dari Google Earth.





Gambar 4. Citra satelit dari daerah sekitar Lusi sebelum semburan. Bintang biru mencirikan bahwa lokasi rembesan dan semburan diamati selama minggu pertama sejak 29 Mei. Lokasi erupsi dan evolusinya tampak selaras mengikuti orientasi yang bersamaan dengan orientasi sesar SW-NE. Orientasi dari sesar ditandai oleh garis putus-putus kuning. Pada kedudukan semburan fluida dan lumpur telah diawali dengan observasi semburan dari tiga lokasi berdekatan.



Gambar 5. Pemantauan kinerja dari lokasi LUSI. Periode semburan kuat bersamaan dengan catatan puncak kandungan H₂S dan CH₄. Bintang mencirikan catatan gempa bumi dengan kekuatan M>3,7 dan dengan pusat gempa berjarak 300 km dari Lusi (Sumber USGS). Perlu dicatat bahwa pemantauan selama bulan Juni dan Juli telah 2007 dilaksanakan pada saat kecepatan harian dan karena itu tidak akurat untuk bagian sisa dari catatan; setelah tanggal 26 September pemantauan telah dilaksanakan kira-kira setiap 4 hari. LEL diukur dari konsentrasi CH₄ pada emisi asap gas, dimana 20% setara dengan 10.000 ppm



Gambar 6. Foto memperlihatkan aktivitas semburan Lusi yang berbeda-beda: (A) Lusi pada hari pertama; (B) asap dan lumpur disemburkan pada bagian tengah dari sawah pada pagi hari; (C) perioda aktivitas tinggi selama konstruksi dari dam tanggul pelindung di sekitar kawah; (D-F) citra helikopter dari Lusi dan daerah sekelilingnya dibanjiri oleh semburan lumpur. Catatan asap tebal pada citra D dan sumur BJP-1 pada citra E. Citra F memperlihatkan rincian dari kawah selama aktivitas pada perioda rendah.

PENDAHULUAN

Awal semburan terhadap sumur eksplorasi BJP-1:

Suatu semburan yang lumpur dan fluida yang tidak diduga sebelumnya, telah terjadi tanggal 29 Mei 2006, di daerah Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur, yang berjarak sekitar 200 m jauhnya dari sumur eksplorasi hidrokarbon Banjar Panji-1 (BJP-1), yang saat kejadian dilaporkan mencapai total kedalaman (*total depth*) sebesar 2833 m.

Lusi dan luas luapannya:

Semburan ini selanjutnya dinamakan sebagai Lusi (Lumpur 'mud' – Sidoarjo), dan sejak 29 Mei 2007 daerah sekitar pemboran eksplorasi telah digenangi oleh luapan lumpur yang mencapai luas sekitar 630 hektar atau 6,3 km persegi.

Dampak sosial dan upaya penanaman luapan:

Sekitar 8800 kepala keluarga (sekitar 30,000 orang) telah diungsikan, sementara jaringan tanggul-tanggul terus dibangun, dan diisi dengan lumpur.

Lusi membuka peluang untuk mempelajari evolusi gunung lumpur sejak kelahirannya:

LUSI menyediakan suatu kesempatan yang unik untuk mempelajari kelahiran dan evolusi dari gunung lumpur (*birth and evolution of mud volcano*), dimana sebagian besar studi telah dilaksanakan selama periode tenang (*quiet periode*) antara semburan dari struktur yang telah ada sebelumnya.

Keunikan Lusi, semburan terus berlangsung:

Erupsi gunung lumpur umumnya hanya berlangsung beberapa hari, dan sangat sedikit diketahui tentang dinamika semburannya (Jakubov et al., 1971). Namun, Lusi memperlihatkan keberlanjutan semburan.

Keunikan Lusi temperatur di permukaan jauh lebih tinggi daripada tempat lain di dunia:

Pengamatan umum dari sebagian besar gunung lumpur yang ada selama ini menunjukkan bahwa temperatur di daerah sumber sekitar 75°C walaupun beberapa lainnya ada yang melebihi (Mukhtarov et al., 2003).

Semburan terus berlangsung terdiri dari air panas dan lumpur:

Dalam kedua hal ini, erupsi lumpur Lusi mempunyai kekecualian, setelah satu tahun dari kemunculannya ia terus aktif menyemburkan air panas dan lempung.

Sumber pengamatan di lapangan dan data kegiatan eksplorasi BJP-1:

Makalah ini menyajikan data yang dihimpun dari dua kali studi lapangan yang diintegrasikan dengan suatu basis data yang diambil sebelum dan selama kegiatan pemboran dari sumur eksplorasi BJP-1, yang berlokasi sekitar 200 m jauhnya dari pusat semburan gunung lumpur.

Tujuan dinamika semburan Lusi dan alternatif penyebabnya:

Tujuan dari makalah ini adalah untuk menguraikan dinamika semburan Lusi dan mengidentifikasi kemungkinan penyebab erupsi yang mendadak.

Metoda

Studi Lapangan:

Dua studi lapangan telah dilaksanakan pada daerah semburan, masing-masing pada bulan September 2006 dan Februari 2007.

Geokimia:

Analisis geokimia dilengkapi pada contoh lumpur, gas, dan air yang berasal dari dalam dan di sekitar lokasi semburan Lusi.

Estimasi besaran volume semburan:

Estimasi besaran volume semburan dan masukan bersifat semikuantitatif yang ditempuh didasarkan pada pengamatan visual harian di pusat semburan, dan pada daerah tangkapan yang ditutupi oleh lumpur yang tebal.

Survei subsidence:

Enam survei pemantauan penurunan tanah (*land subsidence*) di daerah Sidoarjo telah dilaksanakan sejak terjadinya semburan Lusi. Sekitar 20 stasion GPS telah digunakan sebagai acuan dan dasar analisis.

Komposisi gas:

Komposisi gas selama beberapa tahap telah dianalisa menggunakan instrumen *portable* untuk kandungan CH₄ dan H₂S.

Kandungan LEL gas metan:

Kandungan gas Metan telah dianalisis terhadap batas bawah ledakan di udara (*lower explosive limit LEL*) dimana angka LEL 20% setara dengan 10.000 ppm. Contoh gas telah di kumpulkan menggunakan alat penyedot dari awan semburan (*eruption clouds*) pada pojok kawah pada bulan September 2006 dan disimpan dalam botol yang direkatkan.

Komposisi gas:

Komposisi gas telah dianalisis menggunakan perlengkapan HewlettPackard 5890 Series II GC yang dilengkapi dengan kolom Porabond Q, alat *flame ionisation detector (FID)*, alat satuan *thermal conductivity detector (TCD) and a methylation*.

Hidrokarbon:

Kandungan gas hidrokarbon telah diukur dengan FID, CO₂ yaitu *methylation (to CH₄)* dan kemudian FID dan N₂ dan O₂ dengan TCD.

Komposisi isotop karbon:

Komposisi isotop karbon dari gas komponen hidrokarbon telah dideteksi menggunakan suatu sistem GC-C-IRMS. Analisis pengulangan dari standar mencirikan bahwa dari produksibilitas nilai $\delta^{13}\text{C}$ lebih baik dari 1‰ PDB (2 sigma).

Komposisi Isotop hidrogen:

Komposisi Isotop hidrogen dari metan telah ditentukan dengan sistem GC-C-IRMS. Standar Internasional NGS-2 dan standar in-house telah digunakan untuk menguji keakurasian. Nilai dari NGS-2 dilaporkan sebagai 172,5‰ V-SMOW. Pengulangan analisis dari standar mengindikasikan bahwa reproduksibilitas nilai δD lebih baik dari 10‰ PDB (2 sigma).

Akuntabilitas lembaga pelaksana:

Semua analisis isotop telah dilakukan di Institut Teknologi Energi (*Institute for Energy Technology, Kjeller*), Norwegia.

Kation:

Kation (*Cations*) telah dianalisis menggunakan Dionex ion chromatograph dan anion (*anions*) telah dianalisis pada suatu Varian Vista ICPMS.

Komposisi $\delta^{18}\text{O}$ air:

Komposisi $\delta^{18}\text{O}$ air telah diukur menggunakan *Isotop Finnigan DeltaXP isotope mass spectrometer*. Nilai rata-rata GISP dari IAEA selama tahun 2003–2004 adalah $\delta^{18}\text{OVSMOW} = -24.80 \pm 0.10\text{‰}$ (*one standard deviation*).

Komposisi δD :

Komposisi δD telah ditentukan menggunakan *Micromass Optima isotope mass spectrometer*. Rata-rata nilai untuk GISP dari IAEA selama 2003–2004 adalah $\delta\text{DVSMOW} = -189.71 \pm 0.89\text{‰}$ (*one standard deviation*). Nilai yang sebenarnya “True” adalah $-189.73 \pm 0.9\text{‰}$.

Komposisi mineral lempung:

Komposisi mineral lempung telah dianalisis pada tiga contoh dari semburan lumpur dan tigabelas contoh batulempung di sisi dinding inti dari sumur BJP-1 pada interval 1109–1828 m. Orientasi lempung ($b \approx 1 \mu\text{m}$) contoh-contoh telah diukur menggunakan radiasi berdasarkan Cu (*Cu-based radiation*) dan metoda laboratorium standar XDR.

Vitrinite reflectivity:

Vitrinite reflectivity diukur pada material organik pada semburan lempung dan batulumpur dari semua sumur bor yang dilaksanakan oleh Lemigas di Indonesia. Pengukuran telah dibuat untuk asam dan

contoh yang menggunakan mikroskop pemantulan cahaya (*reflective light microscope*), dan dilaporkan sebagai *standar relative % Ro*. Keakurasian pengukuran sampai pada orde 0,05% Ro.

Pengamatan biostratigrafi:

Pengamatan biostratigrafi telah dilaksanakan dengan membandingkan kumpulan fosil foraminifera dan fosil nano berasal dari semburan lumpur dan inti pemotongan dari dinding sumur BJP1.

KEDUDUKAN GEOLOGI DAN STRATIGRAFI

Tektonik P. Jawa sebagai busur kepulauan dari penunjaman kerak samudera aktif:

Pulau Jawa, seperti kebanyakan dari Indonesia, merupakan suatu busur kepulauan (*island arc*), sebagai hasil dari penunjaman lempeng kerak samudera aktif (*active oceanic-plate subduction*).

Tektonik busur muka (prisma akresi dan busur magmatik):

Bagian selatan dari pulau, terutama terdiri dari prisma akresi yang tenggelam (*submerged accretionary prism*) dan busur gunung api (*volcanic arc*).

Tektonik cekungan busur belakang (backarc basin):

Di bagian utara dari Jawa Timur membentuk cekungan busur belakang (*backarc basin*) dengan rezim tektonik ekstensi dibarengi dengan sedimentasi yang cepat (Willumsen and Schiller, 1994; Schiller et al., 1994).

Jarak terdekat Lusi dengan G. Pananggungan:

Situasi LUSI pada busur belakang berjarak 10 km arah timur laut dari gunung Penanggungan.

Terdapatnya indikasi sesar regional:

Penampang seismik dan pengamatan lapangan menunjukkan adanya sesar regional (yang dimaksud adalah Sesar Watukosek) melalui daerah Lusi, walaupun sebagian diantaranya ia ditutupi oleh sedimen aluvial (Fig. 1).

Ada tiga gunung lumpur yang telah terbentuk sebelumnya:

Beberapa kemunculan gunung lumpur berlokasi dekat Lusi. Tiga diantaranya diperlihatkan pada gambar 1 tapi kedua sejarah semburannya dan kemungkinan aktivitas yang baru-baru ini belum didokumentasikan seperti halnya lainnya yang sebelumnya telah dilakukan seperti penyelidikan di Timor (Barber et al., 1986).

Stratigrafi Sidorajo sampai pada ketebalan 3000m berumur Pleistosen:

Stratigrafi daerah Sidoarjo secara lokal diperlihatkan pada gambar (Fig. 2) dari atas ke bawah yaitu : 1) sedimen aluvial, 2) Formasi Pucangan, berumur Pleistosen terdiri dari selang seling batupasir dan serpih, tebal lebih dari 900 m, 3) Formasi Kalibeng Atas, berumur Pleistosen, terdiri dari lempung abu-abu kebiruan pada kedalaman 1871 m, dan 4) Pasir volkanoklastik dengan ketebalan sekurang-kurangnya 962 m.

Perbandingan dengan Stratigrafi Sumur Porong-1:

Sumur Porong#1 yang telah dibor 6,5 km arah timurlaut dari kota Sidoarjo memperlihatkan bahwa sedimen berumur Plio-Pleistosen

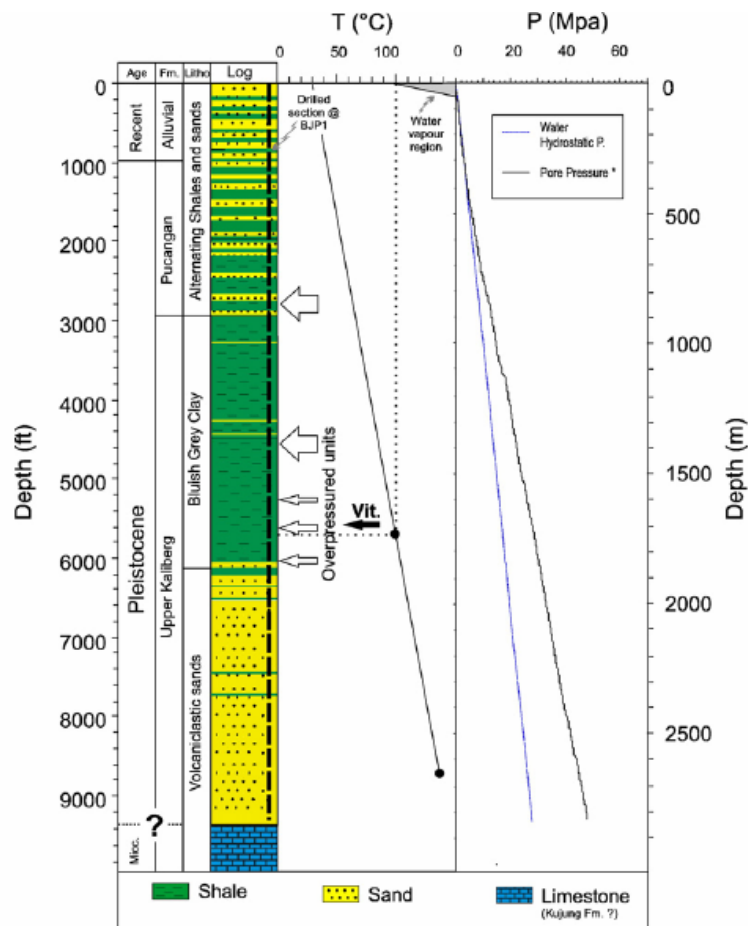
secara langsung menutupi puncak batugamping koral, berumur Miosen.

Umur mutlak batugamping Formasi Kujung:

Isotop strontium mencirikan umur mutlak batugamping Formasi Kujung berumur sekitar 16 juta tahun, (Kusumastuti et al. 2002).

Bagian bawah pemboran BJP-1 menembus pasir turbidit (laut dalam?):

Pemboran BJP-1 pada bagian lebih bawah menembus formasi pasir turbidit, tapi berbeda dengan asumsi sebelumnya (Davies et al., 2007), yang dilakukan dengan pengukuran *well logging*.



Gambar 2. Kolom stratigrafi dan gradien temperatur-tekanan di sumur BJP-1. Catatan bahwa tidak tersedia data pada bagian dasar sehingga tidak ada bukti yang mendukung bahwa paling dalam dari sumur BJP1 telah menembus formasi batugamping. Sekuen sedimen regresif terdiri dari sedimen lempung dan pasir. Satuan tekanan berlebih (*overpressure unit*) yang tercatat selama pemboran diperlihatkan pada interval 762-914, 1323-1457, 16790-1740, 1822-1871. $T=100^{\circ}\text{C}$ dicapai pada kedalaman 1700 m. Nilai vitrinite reflectance diukur dari klastik semburan lumpur pada angka dihasilkan di bawah 1700 m pada lobang bor. Suatu hiatus kira-kira 14,4 juta tahun berada pada bagian paling dalam dari satuan pasir ditutupi oleh fasies karbonat Miosen (Formasi Kujung). Estimasi tekanan pori didasarkan pada pengukuran pemboran. Estimasi tekanan rongga sebesar 12,8 ppg berdasarkan atas pengisian volume atas hilangnya sirkulasi.

Sanggahan pemboran tidak menembus Formasi Kujung:

Memperlihatkan tidak ada bukti-bukti bahwa lobang bor telah menembus Formasi Kujung (Fig. 2).

Bukti tidak adanya batuan karbonat dari bagian terdalam pemboran:

Potongan terhadap batuan hasil pemboran yang terdalam, ternyata tidak menunjukkan keberadaan batuan karbonat, dan data kalsimetri mengindikasikan kandungan kalsit hanya 4% dengan tidak ada peningkatan atau perubahan yang signifikan.

Bukti kecepatan sedimen yang tinggi dan lapisan bertekanan tinggi:

Pemboran terhadap batulempung berumur Pleistosen pada kedalaman 600–1830 m, merupakan pengendapan sedimen yang cepat (Willumsen and Schiller, 1994), pengamatan sekuen di bawah kompaksi dan tekanan berlebih (*undercompacted and overpressured*), khususnya pada satuan serpih antara kedalaman 1323–1871 m.

Analogi dengan volkanisme lumpur di tempat lain:

Perbandingan kondisi geologi dilakukan sebagaimana volkanisme lumpur (mud volcanism) yang berkembang luas seperti halnya di Cekungan Kaspia dan Laut Hitam (e.g. Jakubov et al., 1971; Ivanov et al., 1996; Planke et al., 2004).

DATA SURVEI DAN HASIL

Sejarah semburan dan dinamika (Eruption history and dynamics)

Awal kejadian rembesan air di permukaan, 29 Mei 2006:

Adanya rembesan air (permukaan) berukuran kecil yang tersebar telah dideteksi pada tanggal 29 Mei 2006, selanjutnya beberapa jam kemudian telah berkembang menjadi semburan Lusi.

Komposisi air dan tinggi semburan uap:

Disini, lumpur yang mendidih mengandung air sekitar 60% telah diangkat beberapa puluh meter di atas kawah, bersamaan dengan semburan dari uap setinggi 50 m (Fig. 3(A)).

Perkembangan cepat kawah:

Kawah yang melingkar (*ring crater*) dengan cepat berkembang.

Hadirnya semburan pasir:

Beberapa erupsi pasir yang terjadi di dekat semburan utama telah muncul beberapa hari setelah awal semburan. (Fig. 3(B)). Rekahan di daerah berdekatan dengan sumur eksplorasi BJP-1 (Fig. 3 (C)-(D))

dengan panjang ratusan meter dan lebar puluhan sentimeter juga dapat diamati terjadi beberapa hari setelah semburan.

Kaitan semburan dan pola rekahan dan sesaran regional NE:

Pola rekahan dan lokasi erupsi baru berkembang di daerah tersebut dan menerus ke kompleks vulkanik Arjuno–Welirang kearah pantai di timur laut (Fig. 1 (A)–(B)) dengan arah Timurlaut, arah ini relatif sejajar dengan orientasi sesar yang melintang dengan arah timurlaut-baratdaya (Figs. 4 and 1). Terdapatnya sesar ini diperkirakan dari penafsiran seismik refleksi regional dan dari pengamatan lapangan (Fig. 3(F)).

Bubble sebagai bukti sistem pengaliran telah terbentuk:

Satu lokasi semburan kecil tampak pada bulan November 2006, yang kira-kira berjarak 1 km kearah baratdaya dari pusat kawah. Observasi ini mencirikan bahwa sistem pengaliran di bawah permukaan telah terus berlangsung.

Fluktuatif volume semburan 2006-Juni 2007:

Volume semburan lumpur meningkat, dari sekitar 5000m³/h pada tahap awal (29 Mei 2006), menjadi sebesar 120.000m³/h (Augustus 2006) (Fig. 5).

Puncak kecepatan semburan (*rate of mud eruption*) mencapai 160.000 dan 170.000 m³/h pada kondisi semburan material yang mengikuti terjadinya gempa bumi pada September 2006 (Fig. 5).

Pada bulan Desember 2006 semburan tercatat mencapai tingkat tertinggi yaitu sebesar 180,000 m³/h.

LUSI terus aktif sampai bulan Juni 2007 (makalah ditulis), dengan debit lebih dari 110.000 m³/h dan terdapat rembesan (*bubble*) yang berjumlah keseluruhan 44 yang telah dipetakan sekitar daerah Lusi.

Bukti-bukti penenggelaman:

Penenggelaman (*subsidence*) sekitar daerah LUSI telah dimonitor sejak tahap awal semburan. Koleksi data mencirikan bahwa daerah seluas sekitar 22 km² telah menurun dengan rata-rata 1–4 cm/h.

Anatomi kaldera dan struktur runtuh dari gunung lumpur:

Pembentukan kaldera dan struktur runtuh (*formation of a caldera and collapse structures*) sekitar pusat semburan merupakan suatu tipe fenomena terkait dengan kawah gunung api (e.g. Cita et al., 1996; Planke et al., 2004).

Kaitan orientasi daerah tenggelam dengan arah sesar regional:

Sangat menarik, karena di sekitar LUSI daerah tenggelam mempunyai bentuk seperti elip (sumbu panjang 7×4 km) dengan memanjang sepanjang orientasi sesar barat-laut-timurlaut.

Pembacaan dan gradient temperatur

Hasil pengukuran temperatur:

Temperatur diukur dari aliran lumpur dari jarak 20 m dari Lusi di kawah menunjukkan temperatur tinggi sekitar 97 °C (Februari 2007). Temperatur dari kawah tidak dapat diukur secara langsung, tapi tampaknya mencapai 100 °C, tercatat temperatur untuk mendidihkan air dan erupsi uap.

Bukti tingginya geothermal gradient dalam lubang sumur BJP-1:

Temperatur yang tinggi dari erupsi fluida sebagai cermin dari tingginya temperatur gradien dalam lubang sumur BJP1.

Pengukuran ke dalam lobang memperlihatkan bahwa temperatur sebesar 100 °C dicapai pada kedalaman 1700 m dan temperatur 138 °C pada kedalaman 2667 m.

Faktor pengontrol busur gunung api pada gradient geothermal:

Hasil pengukuran di atas mendemonstrasikan suatu gradien panasbumi yang tidak lumrah (42 °C/km) yang kemungkinan hal ini dipicu oleh kedekatannya dengan lokasi busur gunung api (Fig. 2).

Komposisi dari erupsi gas dan air

Komposisi erupsi gas:

Sejak awal semburan keseluruhan erupsi gas komposisi keseluruhan terdiri dari asap air (*aqueous vapour*).

Kandungan gas metan, H₂S, dan CO₂:

Disamping *aqueous vapour*, pengukuran dengan instrumen *portable* memperlihatkan kandungan gas metan sebesar (LEL=20% ~10.000 ppm) dan H₂S (35 ppm). Contoh lebih lanjut dan analisis gas memperlihatkan bahwa metan dan karbon dioksida merupakan komponen utama dari semburan gas, sebagai tambahan adalah uap air *water vapour* (Table 1).

Hasil pengukuran gas:

Secara lebih rinci, contoh gas diambil pada bulan Juli yang berdekatan dengan kawah memperlihatkan kandungan CO₂ antara 9,9% dan 11,3%, CH₄ antara 83% dan 85,4%, dan sedikit hidrokarbon.

Kandungan CO2 dan CH4:

Bulan September, uap dikumpulkan dari kawah memperlihatkan kandungan CO₂ lebih dari 74,3% dan tambahan CH₄. Secara bersamaan, contoh gas diambil dari rembesan dengan temperatur 30,8 °C yang berjarak 500 m dari kawah mempunyai CO₂ rendah yaitu sebesar (18,7%).

Kandungan δ13C:

Empat contoh gas yang dikumpulkan pada kegiatan bulan September telah dianalisis untuk kandungan δ¹³C di dalam CO₂ dan CH₄. Nilai δ¹³C untuk CO₂ dan CH₄ bervariasi dari - 14,3‰ sampai - 18,4‰ dan dari - 48,6‰ sampai - 51,8‰, (Table 1).

Indikasi kandungan klorin lebih rendah dari air laut:

Komposisi dari air di dekat kawah memperlihatkan komposisi klorin (*chloride*) sebesar 39%, yang lebih rendah dari air laut, dimana konsentrasi klorin sekitar 11.300 ppm dan sodium 7300 ppm (Table 2).

Indikasi kandungan SO₄ dan Mg jauh lebih rendah dari air laut:

Konsentrasi larutan lainnya seperti SO₄ dan Mg jauh lebih rendah daripada kandungan air laut.

Indikasi kandungan B dan Ca lebih tinggi dari air laut:

Namun unsur seperti B dan Ca cukup tinggi. Gelembung dan penguapan kawah bisa meningkatkan salinitas terhadap waktu, tapi fluida terus dierupsi secara konstan pada kecepatan tinggi (*high rate*).

Kandungan 18O dalam air:

Air yang dikumpulkan terkayakan pada 18O ($\delta^{18}\text{O}=9,‰$ di kawah dan $3,7‰$ jauh dari kawah) dibandingkan dengan air laut dan fluida pori yang normal dari cekungan sedimen (*normal pore fluids from sedimentary basins*), sedangkan nilai δD ($- 12,7‰ - 14,4‰$) merupakan diprediksi bila dibandingkan dengan air laut.

Sumber dari semburan lumpur

Kandungan mineral lempung dan bukti sedimentasi pada lingkungan marin:

Mineral lempung yang dianalisis dari tigabelas contoh yang dikumpulkan dari lobang bor memperlihatkan kesamaan litologi sedimen dan asal usulnya (*showed very similar sediment lithology and origin*). Kecuali untuk satuan tipis yang asli batulempung smektit (*smectite claystone*), yaitu pada kedalaman 1341-1432 m, menunjukkan adanya suatu periode kecepatan pengendapan sedimen volkanoklastik yang tinggi pada lingkungan marin, semua contoh terdiri dari campuran kaolinit (*kaolinite*), smektit (*smectite*) dan ilit (*illite*).

Kondisi mineral lempung smektit dan ilit:

Tiga interval utama diidentifikasi dan memperlihatkan suatu perubahan kumpulan mineral lempung selama penguburan (*upon burial*).

- 1) 1109-1341 m: meluas fase *smectite-illite* yang tidak beraturan terdiri dari 35-45% lapisan ilit, pengkristalan ilit yang rendah, klorit tidak terdeteksi;
- 2) 1432-1615 m: lapisan ilit terdiri dari 45-55% smektit-ilit, terdapat fase *subreguler* dan *reguler* seperti rektorit (*rectorite*-

like), kaolinit kehilangan kristalisasinya, dan terdapat sedikit klorit;

- 3) 1615–1828 m: lapisan ilit sampai lebih dari 65% dari smektit-ilit, dan kandungan klorit meningkat dalam jumlah dan pengkristalannya.

Perkiraan sumber lumpur dari interval 1615-1825 m:

Semburan lumpur LUSI mempunyai kesamaan mineralogi lempung pada contoh dari interval 1615–1828 m, dimana lapisan-lapisan ilit dengan kandungan ilit 65% dari smektit-ilit, dan klorit dengan pengkristalan lebih tinggi didapatkan lebih sedikit.

Indikasi sumber lumpur dari lapisan volkanoklastik:

Lumpur LUSI mengandung lebih banyak smektit daripada kebanyakan contoh dari lubang bor, hal ini menunjukkan bahwa mungkin sebagai suatu sumber adalah lapisan volkanoklastik atau percampuran dengan material dari interval yang kaya smektit yaitu pada kedalaman 1341–1432 m, saat ia bergerak menuju permukaan.

Bukti biostratigrafi sumber interval lumpur 1219-1829m:

Perbandingan biostratigrafi dengan potongan sumur memperlihatkan bahwa semburan lumpur berasal dari interval lumpur antara 1219–1828 m.

Korelasi kandungan vitrinit reflektivitas:

Lebih jauh, korelasi dari data vitrinit reflektivitas (*vitrinite reflectivity*) dari semburan lumpur dengan data lubang bor antara 0,55 sampai 0,69% R_o (*a maturity of N 0.65% R_o*) dari unsur organik pada kedalaman sekitar 1700 m. (Fig. 2).

Prediksi sumber lumpur pada interval 1219 dan 1828m:

Di sini semburan lumpur mempunyai asal usul yang dalam dan bermigrasi dari kedalaman sekurang-kurangnya 1219 m dan kemungkinan sedalam 1828 m.

DISKUSI

Asal usul semburan padat dan fluida

Bukti biostratigrafi, mineral lempung, vitrinit reflektivitas sumber utama lumpur dari interval 1615-1828m:

Berdasarkan kombinasi dan biostratigrafi, mineral lempung, hasil vitrinit reflektivitas sumber utama semburan lumpur dapat diduga berasal dari lapisan antara interval 1615–1828 m.

Alternatif kombinasi dari kedalaman 1871 m dengan tiga alternatif mekanisme fluidization:

Terdapatnya pasir volkanoklastik (umumnya bersumber dari Formasi Pucangan atau dari kedalaman 1871 m) semburan setelah fase awal dari aktivitas awal LUSI (Fig. 3(B)) dapat berhubungan dengan faktor-faktor kombinasi.

Usulan alternatifnya adalah:

- a) pencairan (*fluidization*) dari lapisan pasir Pucangan selama fluida kaya air naik,
- b) sebagian pencairan (*partial fluidization*) pada bagian paling atas dari satuan turbidit karena volume air meningkat selama terjadinya dehidrasi dari mineral lempung,
- c) sebagian pasir mengalami pencairan mengikuti adanya aktivitas seismik atau kegempaan (*partial sand fluidization following seismic activity*),
- d) kemungkinan masukan dari naiknya fluida dari kedudukan yang lebih dalam dari Formasi Kujung.

Bukti-bukti adanya pencampuran fluida dalam dan dangkal:

Hasil geokimia konsisten dengan pengamatan geologi menunjukkan adanya pencampuran dari fluida dalam dan fluida dangkal (*a mixture of deep and shallow fluids*).

Hipotesis yang mendukung bahwa gas Lusi berasal dari pencampuran biogenik dan termogenik:

Komposisi isotop gas mendukung hipotesis bahwa gas yang disemburkan pada LUSI berasal dari pencampuran asal usul biogenik dan termogenik (*the hypothesis of a mixed biogenic and thermogenic origin of the gases erupted (e.g. cfr. Bernard et al., 1978; Whiticar, 1999)*).

Relatif rendahnya $\delta^{13}\text{C}$ CH₄ (dibawah dari - 51,8‰) mencirikan bahwa gas biogenik bercampur dengan kontribusi termogenik (*thermogenic contribution*). Sebagaimana didukung oleh adanya kandungan hidrokarbon berat (*heavier hydrocarbons*).

Sumber gas biogenik lempung overpressure (1223-1871m):

Dalam kasus ini, satuan lempung bertekanan berlebih (*overpressured clayey units*) dengan kedalaman 1323-1871 m merupakan kandidat sebagai sumber gas biogenik.

Sumber gas termogenik dari formasi yang lebih dalam:

Sedangkan secara isotop termogenik gas harus bermigrasi dari formasi yang lebih dalam (antara lain Formasi Ngimbang yang berada pada kedalaman yang lebih besar, Wilson et al., 2000).

Kemungkinan H₂S dikontribusikan dari gas dalam:

Terdapatnya H₂S yang konstan sejak awal semburan juga memberikan dugaan suatu kontribusi dari gas dalam (*deep gas*), atau

lebih mungkin, H₂S sebelumnya dibentuk pada lapisan yang lebih dangkal kaya dengan SO₄ dan atau metan atau material organik.

Kecepatan dan komposisi semburan yang kompleks:

Cepatnya variasi komposisi dari semburan gas (Table 1) juga mengindikasikan suatu sistem yang kompleks dari sumber dan reaksi sebelum dan selama semburan.

Tingginya kandungan CO₂ cukup mengejutkan:

Sementara asal mula dari gas metan diuji terhadap material organik, tingginya jumlah CO₂ dalam fase gas sangat mengejutkan. Asal usul CO₂ diperkirakan berasal dari mikroba pada LUSI diindikasikan oleh nilai $\delta^{13}\text{C}$ CO₂ (yang rendah sebesar 18,4‰).

Perbandingan nilai yang dideteksi pada cekungan sedimen yang kaya organik dimana CO₂ diproduksi dalam jumlah yang signifikan dan normalnya terlarut dalam pori air.

Pada kasus ini CO₂ solubility dalam rongga air dari interval bertekanan berlebih pada orde 47 g/L (pada 300 bar, 1 M NaCl, dan temperatur 100 °C) (Duan and Sun, 2003).

Selama pengurangan tekanan dan naik ke permukaan. Solubilitas CO₂ di dalam air berkurang sampai 0,1 g/L (at 1 bar, 1 M NaCl dan 100 °C), dan CO₂ setrerusnya dilepaskan pada fase gas.

Fluida dalam lumpur lebih kecil dari nilai air laut:

Fluida yang terkandung dengan lumpur mempunyai salinitas (~ 20 g/kg) dimana nilai tersebut jauh lebih kecil daripada salinitas air laut (~ 35 g/kg). Komposisi tersebut memberikan kepercayaan bahwa ia telah dibentuk dengan delusi dan modifikasi diagenetik dari air laut yang berasal dari air pada formasi larut di bawah Lusi.

Diasumsikan bahwa klorin berperan secara konservatif selama penguburan dan volkanisme lumpur (*burial and mud volcanism*), telah

dihitung bahwa komposisi air laut dilusi dengan klorinitas sebesar 325 mol l⁻¹ (Table 2).

Fluida LUSI diperkaya dalam B, Ca, Li, Na, Sr dan Br dan depresi dalam K, Mg and SO₄:

Bila dibandingkan ini dengan air laut yang segar (*freshened Seawater*), fluida LUSI diperkaya dalam B, Ca, Li, Na, Sr dan Br dan depresi dalam K, Mg and SO₄. Ia juga diperkaya 18O dan deplesi dalam 2H. Bagian dari penyegaran adalah karena adanya pencampuran dengan air meteorit dangkal (*shallow meteoric waters*). Kimia fluida, memberikan kepercayaan bahwa penyebaran juga dapat dihasilkan dari proses-prose diagenetik (*diagenetic processes*).

Bukti adanya fenomena dehidrasi mineral lempung:

Perkayaan dari B dan Li dan 18O dan deplesi di dalam 2H merupakan tipe yang dibutuhkan bila mineral lempung yang telah dehidrasi dan telah diamati pada cairan gunung lumpur lainnya (Dahlmann and de Lange, 2003; Hensen et al., 2004).

Pada proses ini, mineral lempung kaya 18O, miskin 2H-berlapisan dengan air, Li dan B dilepaskan pada rongga fluida pada temperatur antara 60 dan 160 °C (Ishikawa and Nakamura, 1993; Chan and Kastner, 2000; Dahlmann and de Lange, 2003) menghasilkan pada perubahan kimia dan pada penyegaran rongga air.

Bukti lain reaksi alterasi silikat:

Sebagai tambahan untuk dehidrasi mineral lempung, deplesi dalam Mg and K dan pengkayaan pada Ca dan Sr memberikan dugaan bahwa reaksi-reaksi alterasi silikat telah berlangsung (Egeberg, 1990; Martin et al., 1996).

Perkiraan sumber dari pasir volkanoklastik:

Kemungkinan sumber dari reaksi silikat adalah pasir volkanoklastik berumur Pleistosen. Karena reaksi alterasi silikat mengkonsumsi air yang kaya ^{18}O , ia menghasilkan peningkatan salinitas dan pengurangan rongga pori $\delta^{18}\text{O}$.

Tabel 2. Komposisi air dan isotop dari fluida yang deemburkan pada lokasi yang berbeda Lusi dibandingkan dengan nilai air laut (SW) dan llusi airlaut (Dil, SW)

Sample	Comments	(mM)											Isotopes		
		B	Ca	K	Li	Mg	Na	Sr	Cl	Br	SO ₄	Na/Cl	$\delta^{18}\text{O}^{\circ}$	δD°	$\delta^{13}\text{C}$
SW (mM)	Sea water	0.44	10.5	10.4	0.03	54.3	479	0.09	558	0.88	28.9	0.86	~ 0	~ 0	
Dil. SW (Cl=325 mM)	Diluted sea water	0.26	6.1	6.1	0.02	31.6	279	0.05	325	0.51	16.8	0.86			
JV06-05 (mM)	Sample from hot and fresh mud flow	0.59	18.8	2.8	0.54	6.2	324	0.42	325	1.00	2.7	1.00	9.00	-12.70	-4.0
JV06-02 (mM)	Sample from old mud flow partly dried	0.88	26.6	4.6	0.81	9.3	456	0.62	421	1.20	3.3	1.08	10.00	-5.60	-3.5
JV05-07 (mM)	Small seep approximately 500 m south of main crater	0.41	34.4	2.6	0.14	15.3	231	0.34	255	0.78	0.7	0.91	3.70	-14.30	-3.3

Bukti tambahan dominasi mineral lempung dari isotop pengkayaan ^{18}O :

Pengamatan penyegaran dan pengkayaan ^{18}O dari fluida LUSI memberikan implikasi bahwa mineral lempung dehidrasi didominasi selama reaksi alterasi dari silikat dalam mendefinisikan komposisi kimia isotopic dari fluida rongga.

Besarnya semburan air dari proses dehidrasi lempung:

Adalah sangat mungkin bahwa bagian air disebarkan sangat besar jumlahnya yaitu 15 juta m^3 (i.e. March 2007) berasal dari dehidrasi mineral lempung sebagaimana dicirikan oleh analisis air?

Lapisan 1109-1828 mengalami dampak transformasi smektit-ilit:

Dalam rangka merespon pertanyaan ini, perhitungan konservatif jumlah air yang dihasilkan dari dehidrasi mineral lempung dapat dilakukan. Diketahui bahwa sekurang-kurangnya interval 1109-1828

m mengalami dampak transformasi dari smektit-ilit (*smectite-illite transformation*).

Daerah pengenggelaman 3,5 X 2 km sebagai daerah sumber:

Berdasarkan pemantauan penenggelaman di permukaan, diperkikakan bahwa daerah yang berpotensi berbentuk elip dengan 2 sumbu berukuran 3,5×2 km di sekitar saluran yang berperan sebagai suatu daerah sumber.

Hasil perhitungan total air dihasilkan transformasi smektit-ilit 1,2 milyar M3:

Diperkirakan akan menghasilkan lebih dari 1,2 milyar m³ air dengan asumsi-asumsi, bila:

1. 1 m³ dari smektit dapat menghasilkan lebih dari 0,35 m³ dari air selama dehidrasi (Perry and Hower, 1972; Kholodov, 1983), bahwa,
2. rata-rata smektit terkandung dari studi lempung sebesar 35%, dan bahwa,
3. 65% dari smektit telah ditransformasikan menjadi ilit. Angka ini harus ditambahkan dengan air laut yang berasal pada satuan lempung marin yang belum terkompakkan *undercompacted marine clayey units* dan konservasi didalam satuan impermeabel yang sangat tipis karena penguburan yang cepat.

Kontribusi tekanan dari diagenesis:

Suatu kesimpulan penting bahwa semburan air dan mineral lempung mendemonstrasikan bahwa diagenis pada kedalaman 1109 m berkontribusi tekanan pada sekuen sedimen.

Apakah kejadian Lusi dipicu oleh gempabumi?

Even gempa bumi 27 Mei 2006:

Tanggal 27 Mei tahun 2006 pada jam 5:54 waktu setempat terjadi fenomena gempabumi dengan kekuatan 6,3 skala Richter, yang telah mengguncangkan bagian selatan dari Pulau Jawa, diikuti gempa susulan dengan kekuatan 4,8 dan 4,6 SR yang terjadi 4 dan 6 jam dari gempa utama (U.S. Geological Survey, 2006).

Episentrum telah direkam 25 km baratlaut Yogyakarta, dan menyebabkan lebih dari 6000 orang meninggal dunia dan sekitar 1,5 juta orang kehilangan rumah.

Hubungan semburan Lusi dan Gempabumi:

Pertanyaan adalah apakah ada hubungan antara gempabumi 27 Mei dengan semburan LUSI?

Bukti-bukti adanya hubungan tersebut di bagian dunia lain:

Dalam kaitan ini penulis berpendapat bahwa ada dokumentasi yang baik terhadap *geysers*, emisi metan, dan dinamika gunung lumpur (*mud volcano dynamics*) dikaitkan dengan aktivitas tektonik (*tectonic activity*) (e.g. Guliev and Feizullayev, 1997; Kopf, 2002; Hieke, 2004; Manga and Brodsky, 2006; Mellors et al., 2007; Mau et al., 2007), bahwa semburan dapat diakibatkan oleh suatu gempabumi walaupun jaraknya beberapa ribu kilometer (e.g. Husen et al., 2004). Dimana terdapat suatu tenggang waktu beberapa hari antara terjadinya gempabumi dan inisiasi semburan.

Kesamaan variasi pada tekanan dan permeabilitas yang telah dicatat pada sumur berlokasi ratusan hingga ribuan kilometer dari pusat gempa (Brodsky et al., 2003).

Faktor pendukung struktur diapiri terkait dengan struktur sesar dan lipatan:

Lebih jauh lagi, struktur pembubungan vertikal di bawah gunung lumpur juga terkadang berasosiasi dikontrol oleh faktor-faktor seperti sesar dan antiklin (e.g. Jakubov et al., 1971; Planke et al., 2004).

Fenomena struktur pengubahan dan tektonik aktif relevan dengan pemicu Lusi:

Kedua pengendali adanya tektonik aktif yaitu sesar dan struktur *piercement* sangat relevan dengan lokasi LUSI.

Intensitas gempa bumi tanggal 27 Mei terekam di Surabaya dengan kekuatan 2-3 MMI sampai 4 MMI di bagian utara dari kompleks vulkanik Arjuno-Welirang yang dekat dengan lokasi semburan LUSI (U.S. Geological Survey, 2006).

Aktivitas sesar Watukosek:

Suatu patahan memotong gunung Pananggungan dan singkapan dari *escarpment* Watukosek melebar dengan arah timur laut ke arah LUSI. Dimana sesar ini memotong rel kereta api yang bengkok yang terjadi sesat setelah gempa bumi 27 Mei (Fig. 3(F)) mengindikasikan aktivitas lateral yang kuat.

Bukti-bukti adanya Sesar Watukosek:

Data pendukung lainnya Sungai Porong yang memperlihatkan pembelokan (Fig. 1(B)) mengindikasikan sejarah yang panjang dari ciri sesar tersebut.

Bukti-bukti terdapatnya gunung lumpur lainnya yang membentuk orientasi yang seragam:

Kesamaan arah sesar juga diakomodasikan dengan kelurusan berkembangnya gunung lumpur lainnya di daerah tersebut (yaitu Gunung Anyar, Pulungan, Kalang Anyar, Bangkalan, Fig. 1).

Bukti-bukti adanya struktur diapir, sebagai bukti sejarah adanya aliran vertikal:

Dalam penampang seismik refleksi (*seismic reflection profile*) yang dihasilkan sebelum semburan 26 Mei, memperlihatkan bukti adanya struktur pembumbungan vertikal (diapir) dengan lapisan miring ke atas sekitar zona corong Lusi (Fig. 3(G)). Ini dapat ditafsirkan sebagai suatu bukti untuk sejarah yang panjang terhadap adanya pergerakan lumpur ke arah vertikal di bawah LUSI, kemungkinan erupsi yang sebelumnya atau gangguan sinyal dari sesar yang memotong daerah ini.

Sesar memicu terbentuknya rekahan atau reaktivasi struktur yang telah ada:

Tampaknya bahwa even gempa bumi 27 Mei 2006 mendistribusikan tekanan (*stress distribution*) pada beberapa bagian di Jawa dan khususnya dikonstruksikan oleh reaktivasi rekahan pada sesar yang sebelumnya telah eksis, memberikan dampak tekanan fluida (*fluid pressure*) dan permeabilitas (e.g. Elkhoury et al., 2006) dan dipicu oleh tekanan berlebih di bawah permukaan yang telah ada dari struktur pembubungan.

Adanya bukti tambahan dari fenomena loss tanggal 27 Mei:

Kemungkinan ini juga didukung oleh fakta bahwa kehilangan (*loss*) sebagian telah dicatat pada cairan pemboran kira kira 10 menit setelah gempa bumi 27 Mei. Rekaman ini dapat menjadi fakta

keterkaitan pergerakan sepanjang sesar, bersamaan dengan hilang kapasitas penutup (*lost its sealing capacity*) dan menjadi lebih permeabel.

Bukti pengurangan produksi gas dari sumur Carat:

Pengurangan secara simultan dari produksi gas dari sumur Carat yang berlokasi didekat lokasi mengindikasikan bahwa sistem saluran regional (*regional plumbing system*) telah difektifkan oleh even seismik (gempa bumi).

Peningkatan aktivitas semburan gunung lumpur di tempat lain:

Sangat menarik, bahwa terjadinya peningkatan aktivitas dari semburan-semburan kecil di tetangga gunung lumpur juga bersamaan dengan even seismik yang Resen (i.e. 27 Mei), memperlihatkan bahwa jalur aliran fluida telah diefektifkan. Semburan yang paling signifikan diamati di gunung lumpur Purwodadi (Jawa tengah) yang telah mendidihkan lumpur dan air. Antara Desember 2006 dan Januari 2007 semburan baru dengan ciri yang sama dengan LUSI terjadi di Jawa Tengah (*Bojonegoro mud eruption*) dan Jawa Barat (*Serang mud eruption*) setelah gempa bumi.

Model semburan

Pemicu dari gempabumi terhadap awal semburan Lusi:

Data yang tersedia mendukung hipotesis bahwa aktivitas awal dari Lusi terutama telah dipicu oleh energi yang dilepaskan oleh gempabumi tanggal 27 Mei, dan bukan oleh kegiatan pemboran.

Fenomena gempabumi memicu kenaikan intensitas gunung api:

Telah didokumentasikan bahwa beberapa even gempa instan (termasuk gempa 27-Mei 2006) telah memicu dan meningkatkan aktivitas gunung api di Pulau Jawa (e.g. Walter et al., 2007).

Penulis beranggapan bahwa rekahan dan sesar yang telah ada mengalami tekanan berlebih akibat gempa bumi:

Penulis percaya bahwa perekahan dalam berasosiasi dengan sesar yang sebelumnya telah ada di dalam dan di atas satuan lempung yang telah mengalami tekanan berlebih (*fault occurred within and above the already overpressured clayey units*), sebagai konsekuensi dari gempabumi.

Naiknya fluida bertekanan tinggi dari interval 1323-1871 melalui rekahan yang baru terbentuk:

Fluida dalam interval *overpressured* (1323–1871 m) mulai naik sepanjang dari rekahan yang baru terbentuk. Aliran pemicu dihasilkan sebagian oleh adanya pengurangan tekanan yang memungkinkan melepaskan CO₂ dari pori air.

Mekanisme aliran fluida secara vertikal:

Turunnya tekanan pada nilai hidrostatik pada kedalaman 1700 m akan menghasilkan pengurangan tekanan kira-kira 11 MPa (Fig. 2). Suatu tekanan berkurang pada besaran 100 °C akan menghasilkan pengurangan solubilitas dari CO₂ dalam air sebesar 6 g/L (cf. Duan and Sun, 2003). Proses depresurisasi dan pelepasan gas menyebabkan suatu eskalasi aliran fluida vertikal.

Bersamaan terjadi mobilisasi dari lumpur.

Pulsanisasi akibat pendidihan pada kedalaman 200m:

Sekali aliran fluida panas mencapai kedalaman yang dangkal (~200 m), tekanan hidrosatistik dari fluida mulai mendidihkan dan menghasilkan erupsi dari air dan lumpur yang terus diperbarui dengan sifat-sifat pulsanisasi.

Sumber pendidihan dan keluarnya CO₂ dan CH₄:

Pendidihan bersamaan dengan keluarnya gas (CO₂ dan CH₄) menginisiasi sistem berkelanjutan dan merupakan suatu mesin bertenaga (*powered engine*) yang mampu untuk menyemburkan lumpur dalam waktu yang lama.

Volume lumpur 27 m³ yang dikeluarkan dari Mei 2006-Maret 2007:

Volume semburan lumpur sejak 29 Mei diperkirakan harus lebih besar dari 27 juta m³ (i.e. data updated in March 2007).

Penjelasan adanya waktu jeda 2 hari antara gempa dan awal semburan:

Catatan waktu antara gempa bumi dan erupsi dapat dijelaskan dengan mekanisme sebagaimana yang dijelaskan oleh Miller et al. (2004).

Penulis tersebut menguraikan gempa bumi menginisiasikan gerakan fluida secara lokal, dan sebagai konsekuensi, lebih memicu gempabumi setelah waktu jeda.

Sistem fluida gempa dapat berlanjut untuk beberapa saat setelah even utama.

Sebagai salah satu alternatif hipotesis untuk menjelaskan semburan yang seketika yang keluar sebagai semburan liar pada lokasi semburan.

Tidak adda kick dan semburan melalui lubang bor BJP-1:

Hipotesis ini akan memberikan implikasi bahwa sirkulasi lumpur di dalam sumur telah diinterupsi selama pemboran, diikuti oleh suatu kenaikan tekanan pori.

Hal ini dapat berpotensi untuk menciptakan suatu aliran yang tidak terkontrol dari *fluida reservoir* ke dalam lubang bor dan menyembur liar.

Sebagai contoh semburan liar dari pemboran pada lokasi yang tidak diketahui (e.g. blow-out in the North Sea at Ekofisk field Bravo platform in April 1977, and in Brunei, Tingay et al., 2005).

Namun, tidak ada tendangan '*kicks*' tercatat pada dasar lobang bor BJP-1, dan tidak ada semburan melalui sumur.

Bukti sepatu pemboran yang masih menempel, tidak ada semburan bersentuhan dengan sumur bor:

Lebih jauh lagi sepatu dari sumur BJP-1 yang umumnya sebagai titik lemah dengan pahat bor masih pada posisi yang menempel, karena itu disimpulkan **bahwa saluran semburan utama tidak bersentuhan dengan sumur.**

Pengujian lubang bor memperlihatkan bahwa tidak ada hubungan antara sirkulasi fluida di dalam sumur dan semburan lumpur ke permukaan.

Sangatlah tidak mungkin untuk menentukan pemicu semburan dari LUSI.

Namun, berdasarkan data dan bukti yang ada, hipotesis bahwa semburan seluruhnya dikontribusikan pemboran, adalah tidak dapat disimpulkan. '*However, based on the available data and evidences,*

the hypothesis of an eruption entirely attributed to drilling (e.g. Davies et al., 2007), is inconclusive'.

Pulsations

Terjadinya fase fluktuatif semburan:

Pemantauan perilaku LUSI memperlihatkan bahwa *fase pulsa up and down* terjadi setelah periode 10 Agustus sampai 10 September, dimana kecepatan aliran secara bertahap berkurang, hal ini memberikan argumen bahwa setelah suatu aktivitas yang dahsyat tekanan yang dilepaskan, maka sistem beralih berheti secara lebih alami *'the flow ate was gradually reduced suggesting that after an initial powerful activity and pressure release the system switched off naturally'*.

Fenomena runtuh gradual dan kaitan dengan pengurangan tekanan:

Interpretasi ini didasarkan pada pemikiran adanya runtuh gradual (*gradual collapse*) dari sistem penghubung selama pengurangan tekanan berlebih yang progresif, dan perkembangan dari perilaku seperti geysir.

Namun, reaktifnya kembali semburan, dengan kecepatan yang tiba-tiba meningkat sampai 160,000 m³/h, terjadi bersamaan dengan gempabumi pada September 6 dan 8 (i.e.; Fig. 5).

Model semburan berulang seperti system hidrotermal:

Pemantauan pada bulan September memperlihatkan bahwa semburan yang lebih dahsyat terjadi dengan periode sekitar 30 menit. Perulangan harian juga diuraikan pada gunung lumpur lainnya (e.g. Jakobov et al., 1971), namun durasi total semburan jarang lebih dari beberapa hari.

Analogi yang terbaik untuk perulangan dari LUSI adalah sistem panas bumi (*hydrothermal systems*) dimana fluida disemburkan setelah siklus pendidihan dan seketika melepaskan tekanan.

H₂S membuktikan fluida muncul dari satuan yang lebih dalam:

Jumlah gas H₂S yang dideteksi selama fase awal dari erupsi dan secara sistematis meningkatkan aktivitas puncak, mendukung hipotesis bahwa fluida muncul dari satuan yang lebih dalam.

Belum ada cukup bukti plumbing system berkaitan dengan busur gunung api:

Belum ada indikasi bahwa sistem pengaliran Lusi (the LUSI plumbing system) langsung berkaitan dengan busur gunung api yang berlokasi di selatannya. Walaupun secara umum mempunyai gradien *geothermal* di daerah yang tinggi, biasanya berhubungan dengan proses magmatisme.

Semburan Lusi memperlihatkan perilaku quasi-hydrothermal:

Belum terdapat bukti untuk menjelaskan pergerakan fluida pada kedalaman yang besar sebagai daya pengendali erupsi (cf. Hovland et al., 2006). Berdasarkan data yang tersedia, dipercaya bahwa perulangan aktivitas LUSI dan temperatur yang tinggi mencerminkan perilaku *quasi-hydrothermal* dari sistem semburan.

Lebih satu tahun: LUSI terus aktif

Lusi pasca setahun masih dahsyat (semburan dan penenggelaman):

Satu tahun setelah terjadinya awal semburan, LUSI masih terus menyembur dengan dahsyat. Pada bulan Juni 2007 semburan gunung sebesar 111.042 m³/h dan rata-rata penenggelaman mencapai 10,7 m.

Berkurangnya kadar air:

Salah satu hal yang menarik bahwa kandungan air secara gradual berkurang menjadi 30%, dengan sisanya terdiri dari lumpur dan klastik membulat baik (*well rounded clasts*) dari lempung abu-abu berasal dari Formasi Kalibeng Atas (i.e. tipe breksi lempung dioperasikan dari gunung lumpur).

Kebundaran dari klastik breksi lumpur diuraikan sebagai hasil litifikasi yang sangat buruk dari formasi ini dan adanya naiknya material.

Perulangan semburan semakin pendek (1,5-0,5 jam):

Pada Februari 2007 perulangan dari semburan yang kuat terjadi setiap 1,5 jam dimana merupakan interval yang lebih tinggi yang direkam pada September 2006 (i.e. setiap 30 menit).

Adanya indikasi terjadinya pengurangan secara gradual energi, namun karena jumlah sedimen padat besar akan menimbulkan bencana:

Walaupun observasi kunci ini menunjukkan bahwa gunung telah menunjukkan secara lambat berkurang energinya dan secara gradual berhenti (*Although these key observations might suggest that the volcano is slowly reducing its energy and gradually switching off.*), namun suatu jumlah besar material padat daerah ini akan dihadapkan pada kondisi bencana untuk kawasan ini (*a large amount of erupted solid material poses hazardous conditions for the area*).

Indikasi peningkatan viskositas, implikasi penanganan luapan dan mengalirkannya ke selatan:

Juga karena terjadi peningkatan viskositas dan komponen klastik, maka puluhan armada excavators secara berkelanjutan harus menyerok breksi lumpur dan menggerakannya ke arah selatan.

Inseri bola-bola beton dan kendala yang dihadapi:

Dalam upaya untuk mengurangi tenaga semburan, bulan Maret 2007 proyek baru mulai memasukkan bola beton ke dalam kawah. Bentuknya melingkar (density 2.4 g/cc) dengan diameter antara 20-40 cm, dihubungkan dengan suatu gabungan empat bola (*two of 20 cm and two of 40 cm in diameter*) dan telah diberi lapisan kimia dalam upaya untuk mengurangi disolusi kimia.

374 rangkaian telah diinsersi dan 24 keluar dari 500 yang direncanakan pada fase kedua. Bola-bola tampaknya telah mencapai kedalaman 300 m dan beberapa mencapai kedalaman 1000 m.

Namun, tampaknya kecepatan aliran tidak nampak menurun secara signifikan dengan inseri tersebut. Proyek terakhir adalah upaya membangun tanggul pemanen disekitar kawah, dengan diameter 120 m dengan ketinggian 50 m dan tebal 10 m.

REFERENCES

- Barber, A.J., Tjokosapoetro, S., Charlton, T.R., 1986. Mud volcanoes, shale diapirs, wrench faults and melanges in accretionary complexes, eastern Indonesia. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 70, 1729–1741.
- Bernard, B.B., Brooks, J.M., Sackett, W.M., 1978. Light hydrocarbons in recent Texas continental shelf and slope sediments. *J. Geophys. Res.* 83, 4053–4061.
- Brodsky, E.E., Roeloffs, E., Woodcock, D., Gall, I., M.M., 2003. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes. *J. Geophys. Res.* 108, 7.1–7.10.
- Chan, L.-H., Kastner, M., 2000. Lithium isotopic compositions of pore fluids and sediments in the Costa Rica subduction zone: implications for fluid processes and sediment contribution to the arc volcanoes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 183, 275–290.
- Cita, M.B., Ivanov, M.K., Woodside, J.M., 1996. The Mediterranean Ridge Diapiric Belt, Special Issue. *Mar. Geol.* 132. 273 pp.
- Dahlmann, A., de Lange, G.J., 2003. Fluid-sediment interactions at Eastern Mediterranean mud volcanoes: a stable isotope study from ODP Leg 160. *Earth Planet. Sci. Lett.* 212, 377–391.
- Davies, R., Swarbrick, R., Evans, R., Huuse, M., 2007. Birth of a mud volcano: East Java, 29 May 2006. *GSA Today* 17, 4–9.
- Duan, Z., Sun, R., 2003. An improved model calculating CO₂ solubility in pure water and aqueous NaCl solutions from 273 to 533 K and from 0 to 2000 bar. *Chem. Geol.* 193, 257–271.
- Egeberg, P.K., 1990. Unusual composition of pore waters found in the Izu-Bonin fore-arc sedimentary basin. *Nature* 344, 215–218.
- Elkhoury, J.E., Brodsky, E.E., Agnew, D.C., 2006. Seismic waves increase permeability. *Nature* 441, 1135–1138.
- Guliev, I.S., Feizullayev, A.A., 1997. All About Mud volcanoes. Nafta Press, Baku. 52 pp.

- Hensen, C., Wallmann, K., Schmidt, M., Ranero, C.R., Suess, E., 2004. Fluid expulsion related to mud extrusion off Costa Rica – a window to the subducting slab. *Geology* 32, 201–204.
- Hieke, W., 2004. The August 27, 1886 earthquake in Messenia (Peloponnesus) and reported flames over the Ionian Sea – a Mediterranean Ridge gas escape event? *Mar. Geol.* 207, 259–265.
- Hovland, M., Fichler, C., Rueslatten, H., Johansen, H., 2006. Deeprooted piercement structures in deep sedimentary basins – manifestations of supercritical water generation at depth? *J. Geochem. Explor.* 89, 157–160.
- Husen, S., Taylor, R., Smith, R.B., Heasler, H., 2004. Changes in geyser eruption behavior and remotely triggered seismicity in Yellowstone National Park produced by the 2002 M 7.9 Denali fault earthquake, Alaska. *Geology* 32, 537–540.
- Ishikawa, T., Nakamura, E., 1993. Boron isotope systematics of marine sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 117, 567–580.
- Mazzini et al. / *Earth and Planetary Science Letters* 261 (2007) 375–388 387
- Ivanov, M.K., Limonov, A.F., van Weering, T.C.E., 1996. Comparative characteristics of the Black Sea and Mediterranean Ridge mud volcanoes. *Mar. Geol.* 132, 253–271.
- Jakubov, A.A., Ali-Zade, A.A., Zeinalov, M.M., 1971. *Mud Volcanoes of the Azerbaijan SSR, Atlas* (in Russian). Azerbaijan Academy of Sciences, Baku.
- Kholodov, V.N., 1983. *Postsedimentary Transformations in Elisional Basins (example from Eastern Pre-Caucasus)* (in Russian), 150 pp.
- Kopf, A.J., 2002. Significance of mud volcanism. *Rev. Geophys.* 40, 1–52.
- Kusumastuti, A., Van Rensbergen, P., Warren, J.K., 2002. Seismic sequence analysis and reservoir potential of drowned Miocene carbonate platforms in the Madura Strait, East Java, Indonesia. *Aapg Bull.* 86, 213–232.

- Manga, M., Brodsky, E., 2006. Seismic triggering of eruptions in the far field: volcanoes and geysers. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 34, 263–291.
- Martin, B.M., Kastner, M., Henry, P., Le Pichon, X., Lallement, S., 1996. Chemical and isotopic evidence for sources of fluids in a mud volcano field seaward of the Barbados accretionary wedge. *J Geophys. Res.* 101, 20325–20345.
- Mau, S., Rehder, G., Arroyo, I.G., Gossler, J., Suess, E., 2007. Indications of a link between seismotectonics and CH₄ release from seeps off Costa Rica. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 8, 1–13.
- Mellors, R., Kilb, D., Aliyev, A., Gasanov, A., Yetirmishli, G., 2007. Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions. *J. Geophys. Res.* 112, B04304.
- Miller, S.A., Cristiano, C., Chiaraluce, L., Cocco, M., Barchi, M., Kaus, B.J.P., 2004. Aftershocks driven by a high-pressure CO₂ source at depth. *Nature* 427, 724–727.
- Mukhtarov, A.S.h., Kadirov, F.A., Guliyev, I.S., Feyzullayev, A., Lerche, I., 2003. Temperature evolution in the Lokbatan mud volcano crater (Azerbaijan) after the eruption of 25 October 2001. *Energy Explor. Exploit.* 21, 187–207.
- Perry, E.A., Hower, J., 1972. Late-stage dehydration in deeply buried Pelitic sediments. *Aapg Bull.* 56, 2013–2021.
- Planke, S., Svensen, H., Hovland, M., Banks, D., Jamtveit, B., 2004. Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan. *Geo Mar. Lett.* 23, 258–268.
- Schiller, D.M., Seubert, B.W., Musliki, S., Abdullah, M., 1994. The reservoir potential of globigerinid sands in Indonesia. *IPA 23rd Annual Convention Proceedings*, pp. 189–212.
- Tingay, M.R.P., Hillis, R.R., Morley, C.K., Swarbrick, R.E., Drake, S.J., 2005. Present-day stress orientation in Brunei: a snapshot of ‘prograding tectonics’ in the tertiary delta. *J. Geol. Soc.* 162, 39–49.
- U.S. Geological Survey, 2006. <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2006/usneb6/>.

- Walter, T.R., Wang, R., Zimmer, M., Grosser, H., Lühr, B., Ratdomopurbo, A., 2007. Volcanic activity influenced by tectonic earthquakes: static and dynamic stress triggering at Mt. Merapi. *Geophys. Res. Lett.* 34, L05304.
- Whiticar, M.J., 1999. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chem. Geol.* 161, 291–314.
- Willumsen, P., Schiller, D.M., 1994. High quality volcaniclastic sandstone reservoirs in East Java, Indonesia. *IPA 23rd Annual Convention Proceedings*, pp. 101–111.
- Wilson, M.E.J., Bosence, D.W.J., Limbong, A., 2000. Tertiary syntectonic carbonate platform development in Indonesia. *Sedimentology* 47, 395–419. 388 A. Mazzini et al. / *Earth and Planetary Science Letters* 261 (2007) 375–388