

EVALUASI KEBOLEHJADIAN SISTEM PANAS BUMI BERDASARKAN ASPEK GEOKIMIA DAN DEFORMASI GEOLOGI UNTUK GUNUNG LUMPUR SIDOARJO - JAWA TIMUR

Didi S. Agustawijaya¹, Bq. Dewi Krisnayanti²

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram
Jl. Majapahit 62 Mataram Telp 0370 636126
Email: didiagustawijaya@gmail.com

²Jurusan Ilmu tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Mataram
Jl. Pendidikan 37 Mataram
Email: bdewi.krisnayanti@gmail.com

Abstrak

Salah satu syarat terbentuknya sistem panas bumi adalah adanya reservoir sebagai penjebak air. Fenomena gunung lumpur di Sidoarjo yang mengerupsi lumpur panas dan air secara terus menerus memberi indikasi adanya sumber air dari kedalaman tertentu. Sistem panas bumi kemudian ditelusuri menggunakan unsur kimia lumpur dan air dari hasil erupsi tersebut. Hasil pengujian isotop air dan gas mengindikasikan sistem panas bumi dengan entalpi tinggi. Akan tetapi fenomena semburan lumpur panas ini diikuti oleh deformasi geologi yang intensif. Deformasi geologi ini kemungkinan telah merubah struktur geologi bawah permukaan. Hasil pengukuran GPS menunjukkan bahwa deformasi sangat intensif terjadi di sekitar pusat semburan, kemudian berkurang ke arah menjauh dari pusat semburan. Berdasarkan pengukuran ini tampaknya syarat terbentuknya penjebak air telah dipengaruhi oleh deformasi geologi. Dengan demikian kebolehdajian sistem panas bumi di gunung lumpur Sidoarjo harus dikaji lebih jauh untuk memastikan intensitas perubahan struktur geologi terhadap reservoir penjebak air.

Kata kunci: sistem panas bumi; kebolehdajian; geokimia; deformasi; struktur geologi

Pendahuluan

Sejak terjadinya erupsi lumpur panas pada bulan Mei 2006, semburan lumpur di Sidoarjo, yang dikenal dengan sebutan gunung lumpur Lusi, terus terjadi sampai saat ini. Semburan lumpur di Sidoarjo ini unik dibandingkan dengan semburan lumpur lainnya di sekitar Jawa Timur dan Jawa Tengah, adalah bahwa suhu lumpur yang tinggi dan relatif konstan. Pada periode awal semburan, suhu lumpur adalah sekitar 90-100⁰ C. Saat ini suhu semburan diperkirakan sudah menurun, yaitu sekitar 60⁰ C di permukaan dekat pusat semburan.

Suhu lumpur dan air yang tinggi biasanya berasosiasi dengan sistem panas yang berasal dari sistem gunungapi, atau sistem panas bumi. Beberapa pengujian kimia terhadap material lumpur dan air yang berasal dari semburan memberi jejak sistem panas bumi (Zaennudin, dkk., 2010).

Sumber lumpur berasal dari sebuah formasi batuan yang tebal dan sudah tertekan secara kuat, sehingga muncul di permukaan karena tekanan yang kuat tersebut. Formasi batuan yang tebal dan tertekan sangat kuat ini biasanya berada pada daerah busur belakang dalam tatanan tektonik (Istadi, dkk., 2009; Sawolo, dkk., 2009). Ketebalan formasi batuan di daerah Sidoarjo adalah lebih dari 2000 m, dan secara waktu geologi diendapkan sangat cepat, sehingga membentuk *overpressured sedimentary rock formations* (Istadi, dkk., 2009).

Akan tetapi tidak hanya suhu lumpur yang panas dan kental yang telah menenggelamkan area seluas sekitar 641 Ha di Kecamatan Porong, akan tetapi yang memperburuk kondisi lapangan adalah deformasi geologi yang intensif yang terjadi di pusat semburan dan wilayah di sekitarnya (Agustawijaya, 2010). Deformasi geologi ini telah menjadi kendala utama dalam pelaksanaan penanganan semburan dan luapan lumpur di Sidoarjo (Agustawijaya, 2013).

Kaitan antara deformasi geologi dan sebuah sistem panas bumi, khususnya di gunung lumpur Lusi, adalah deformasi akan mempengaruhi sistem panas bumi tatkala reservoir penjebak air berubah struktur geologinya. Maka paper ini mengevaluasi kebolehdajian sistem panas bumi di gunung lumpur Lusi berdasarkan indikasi geokimia dan deformasi geologi.

Metode

Metode penelitian yang dipergunakan adalah metode survei lapangan, dan pengujian laboratorium. Survei GPS (global positioning system) dilaksanakan di 24 titik pengukuran yang tersebar di sekitar pusat semburan, tanggul dan area terdampak di Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo. Survei ini merekam perubahan koordinat setiap titik ukur setiap bulan pada tanggal yang sama selama satu tahun pengukuran. Data koordinat kemudian ditabulasi dan dianalisis untuk setiap perubahan koordinat. Perubahan koordinat akan mengindikasikan deformasi geologi. Sedangkan pengujian di laboratorium dilakukan terhadap sampel yang diambil dari lokasi pusat semburan gunung lumpur, dan daerah sekitarnya. Pengujian unsur kimia lumpur dan isotop air dilakukan untuk melihat jejak kimia dari aktifitas magmatisme. Data kemudian dipadukan dengan data tersedia sejak munculnya semburan.

Hasil dan Pembahasan

Geokimia

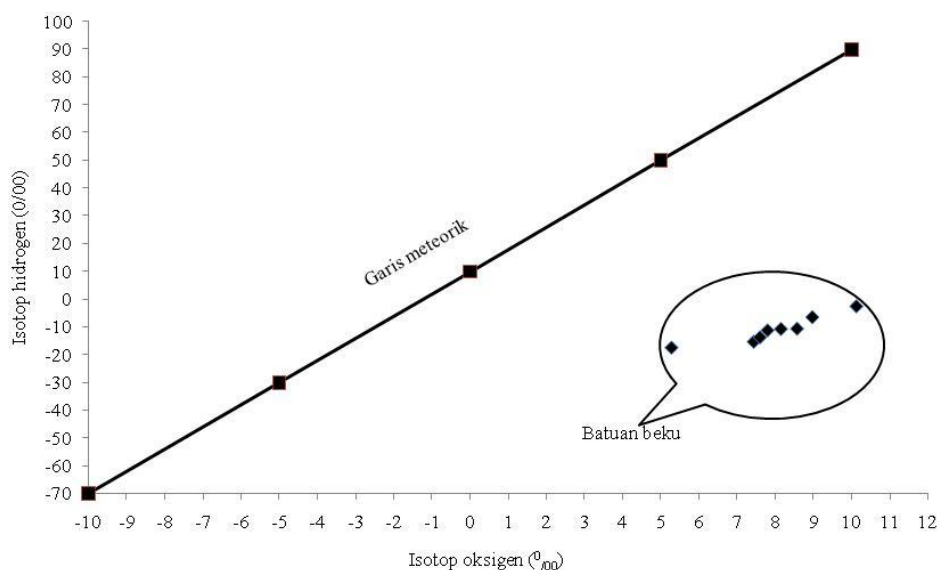
Syarat terbentuknya sebuah sistem geotermal adalah adanya formasi batuan panas sebagai sumber panas, reservoir sebagai pengebak air, dan air itu sendiri sebagai fluida media penghantar panas. Syarat-syarat ini tampaknya terpenuhi oleh fenomena gunung lumpur di Sidoarjo, terutama dua unsur yang muncul di permukaan, yaitu air dan lumpur panas yang tersembur di pusat semburan.

Salah satu parameter sederhana untuk menentukan sistem panas bumi adalah suhu reservoir (Zaennudin, dkk., 2010). Kriteria yang dipergunakan adalah sebuah sistem geotermal memerlukan sumber suhu sekitar 200-300⁰ C.

Sedangkan berdasarkan sistem reservoirnya dibagi menjadi tiga sistem: sistem dominasi uap, sistem dominasi dua fasa, dan sistem dominasi air panas. Indikasi yang dicari adalah radioisotop air, yaitu unsur karbon, dan elemen-elemen langka baik itu yang dikandung dalam air maupun yang dikandung dalam gas. Unsur geotermometer yang dipergunakan adalah unsur Na/K, yang akan mengindikasikan suhu sumber panas dari air (Wahyudi, 2006; Herman, 2009). Kemudian unsur-unsur Hg dan CO₂, yang akan dilihat dari kedua unsur ini adalah anomali dari sebaran unsur-unsur ini untuk daerah sekitar telitian (Nugraha, dkk., 2008).

Survei di lokasi sekitar gunung lumpur Lusi menunjukkan bahwa di sebelah selatan dari lokasi gunung lumpur di Sidoarjo adalah kompleks gunungapi Arjuno-Welirang yang berjarak hanya sekitar 20 km. Jarak ini tidak jauh dari lokasi gunung lumpur. Di kompleks gunung api tersebut ditemukan banyak sumber air panas yang keluar sebagai mata air di sungai, diantaranya ada dua sumber air panas yaitu Pacet dan Cangar. Suhu air permukaan di sekitar pemandian air panas Pacet Kabupaten Mojokerto adalah 47⁰ C, sedangkan mata air panas di Cangar Kota Batu adalah sekitar 52⁰ C.

Kedua sumber air panas tersebut adalah merupakan indikasi sistem panas bumi kompleks Welirang-Arjuno. Indikasi tersebut bisa dianalogikan bahwa Lusi pun mempunyai potensi serupa. Data geokimia yang diperoleh menunjukkan indikasi kuat akan potensi sistem panas bumi, seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Hubungan antara unsur isotop oksigen dan isotop hidrogen (Sumber: modifikasi dari Zainudin, dkk., 2010).

Berdasarkan data dalam Gambar 1, tampak bahwa kandungan isotop air (oksigen dan hidrogen) mempunyai simpangan -2‰ sampai -20‰ untuk isotop hidrogen, dan simpangan $+5\text{‰}$ sampai dengan $+10\text{‰}$ untuk isotop oksigen. Nilai-nilai tersebut jauh di bawah garis air meteorik, dan nilai simpangan isotop-isotop air ini berasosiasi dengan air formasi batuan beku panas (Zaennudin, dkk., 2010).

Zaennudin dkk (2010) melaporkan bahwa gas yang keluar di banyak retakan yang terjadi di sekitar gunung lumpur Lusi juga mengindikasikan keadaan yang sama. Isotop gas sebagai geotermometer dilaporkan mempunyai indikasi suhu dalam kisaran $500\text{--}690\text{°C}$, atau rata-rata 550°C , hal ini mengindikasikan gas kering dengan entalpi tinggi.

Berdasarkan pengukuran langsung di lapangan dengan menggunakan alat portable (Mazzini, dkk., 2007), diketahui kandungan gas adalah metan CH_4 (LEL 20% atau sekitar 10.000 ppm) dan H_2S (35 ppm). Berdasarkan pengujian laboratorium kandungan gas metan adalah 83%, CO_2 adalah 9,9%, dan kandungan CO_2 dalam uap adalah 74,3%. Untuk kandungan radioisotop δ^{13} untuk CO_2 adalah $-14,3\text{‰}$ – $18,4\text{‰}$, dan untuk CH_4 adalah $48,6\text{‰}$ – $51,8\text{‰}$.

Data geokimia ini tentu saja memberi indikasi yang kuat akan sebuah sistem panas bumi di gunung lumpur Lusi. Akan tetapi sebuah sistem panas bumi memerlukan struktur geologi antiklin yang stabil, yang akan menjamin konsep keabadian energi panas bumi. Pola retakan dan deformasi harus terpetakan dan terukur secara baik. Untuk gunung lumpur Lusi, laju dan intensitas deformasi geologi adalah sangat penting, dan barikut adalah pembahasannya.

Deformasi

Berdasarkan data pemboran yang telah dilakukan BPMIGAS untuk Lapindo Brantas Inc., sumber air yang muncul di permukaan diduga berasal dari kedalaman lebih dari 3000 m, yaitu dari formasi batugamping (Istadi, dkk., 2009). Formasi batugamping ini adalah bagian dari formasi batuan sedimen yang sangat tebal terbentuk di daerah Porong dan sekitarnya, yang terdiri dari endapan delta dari sistem sedimentasi cekungan busur belakang (*backarc basin*) (Istadi, dkk., 2009; Sawolo, dkk., 2009). Batuan disusun oleh lapisan batuan sedimen yang terdiri dari batulanau, batulempung, batuserpih, batupasir dan batugamping. Umur batuan sedimen tersebut berkisar antara Miosen Awal hingga Resen. Formasi-formasi batuan sedimen ini telah diendapkan secara cepat (*high sedimentation rate*) dan tertekan secara kuat, sehingga membentuk formasi-formasi batuan bertekanan tinggi (*over pressured rock formations*) (Istadi, dkk., 2009).

Secara geologi struktur regional, formasi batuan di daerah Sidoarjo termasuk ke dalam zona depresi Kendeng, yang memanjang dari bagian tengah Jawa Tengah hingga bagian timur Jawa Timur. Zona depresi ini terbentuk dari beberapa antiklinorium, dan salah satunya adalah antiklinorium Ngelam – Watudakon, yang melalui lokasi semburan lumpur (Satyana, 2007). Daerah ini juga telah mengalami deformasi yang kuat sehingga terbentuk bidang-bidang sesar dan retakan.

Kondisi geologi struktur tersebut merupakan kondisi ideal untuk terbentuknya gunung lumpur, seperti yang terjadi di Porong, Kabupaten Sidoarjo. Fenomena retakan kemudian membentuk sebuah kaldera yang menjadi pusat semburan. Semburan lumpur kemudian ternyata diikuti oleh pergerakan horizontal dan vertikal dari formasi batuan di sekitar pusat semburan.

Berdasarkan pengukuran yang telah dilakukan, pergerakan horizontal dari formasi batuan adalah maksimum sebesar 60 cm. Pergerakan ini terutama terjadi di sekitar jembatan tol lama, atau sekitar 800 m arah utara – barat dari pusat semburan. Sedangkan pergerakan vertikal yang terjadi di titik yang sama dan pada durasi yang sama adalah sekitar 70 cm.

Dampak dari pergerakan-pergerakan diantaranya adalah turunnya muka jalan arteri Porong, bengkaknya rel kereta api, pecahnya pipa PADM, pecahnya pipa Pertamina, dan putusnya jembatan jalan tol (Anonim, 2011). Dampak lainnya adalah amblesnya tanggul penahan lumpur yang berada di sekitar pusat semburan, yang disebut dengan tanggul cincin, juga tanggul yang dibangun di luar pusat semburan untuk menahan luapan lumpur di sekitar area terdampak (Agustawijaya dan Sukandi, 2012).

Deformasi geologi ini juga telah menyebabkan perubahan diameter lubang pusat semburan. Saat ini lubang pusat semburan telah mencapai diameter 200 m, sedangkan saat pertama kali semburan muncul hanya berdiameter beberapa sentimeter saja. Tercatat amblesan di sekitar pusat semburan pernah mencapai 25-40 cm/hari pada tahun 2008-2009. Pada bulan Juni-Juli 2009, tanggul cincin yang dibangun untuk membatasi luapan lumpur di sekitar pusat semburan agar tidak mengalir ke arah utara, telah ambles, sehingga luapan lumpur telah menggenangi luasan Peta Area Terdampak sekitar 641 Ha.

Manzzini, dkk. (2009) melaporkan bahwa telah terjadi pembentukan kaldera dan keruntuhan di sekitar pusat semburan yang sesuai dengan fenomena khas *mud volcano craters*. Walaupun bentuknya menyerupai bentuk elip yang mengarah SW – NE, orientasi pusat semburan sejajar dengan orientasi sesar Watukosek. Manzzini, dkk. (2009) menghitung bahwa area yang dipengaruhi oleh amblesan adalah sekitar 22 km^2 dengan laju rata-rata 1-4

cm/hari. Fukushima, dkk. (2009) membuat model amblesan dengan pendekatan konsep pembebanan dengan bantuan citra satelit SAR. Mereka memberikan model amblesan dengan tiga model, yaitu pembebanan oleh berat lumpur yang sudah tererupsi di permukaan, penurunan kaldera semburan akibat kompresi horizontal, dan kehilangan volume pada kedalaman tertentu akibat pelepasan tekanan pori dan pengurangan material. Berdasarkan model yang dikembangkan oleh Fukushima, dkk. (2009) bahwa pusat penurunan berada lebih dangkal daripada kedalaman sumber lumpur. Maka jika sumber lumpur berada pada kedalaman 1.800 m, penurunan material berada pada kedalaman 1.000 – 1.250 m, maka titik pusat amblesan (*source of deformation*) berada pada kedalaman sekitar 600 m.

Data deformasi geologi terakhir yang dikumpulkan tentang pergerakan horizontal menunjukkan adanya tiga pola pergerakan, yaitu melingkar di seputaran pusat semburan, berarah timur laut – barat daya, dan berarah barat laut – tenggara. Pola-pola ini mengindikasikan adanya pergerakan yang mengarah ke pusat semburan, dan indikasi dengan asosiasi sistem sesar jurus yang ada di sekitar Porong. Pengukuran di sekitar Siring Barat menunjukkan pergerakan sebesar 64 cm menuju pusat semburan selama 17 bulan terakhir. Begitu juga pergerakan vertikal di lokasi yang sama memberikan angka sekitar 120 cm selama periode yang sama. Kedua set data ini memberikan gambaran kuantitatif atas deformasi geologi yang aktif di sekitar pusat semburan.

Data permukaan GPS kemudian dikonfirmasi dengan pemantauan bawah permukaan. Hal ini didasarkan atas pemahaman bahwa pergerakan di permukaan adalah refleksi atas perubahan di bawah permukaan. Data pemantauan bawah permukaan (Anonim, 2011) menggambarkan telah terjadi retakan dan amblesan di sekitar pusat semburan dan luar Peta Area Terdampak, khususnya di Siring Barat. Data pengukuran geofisika ini juga ternyata mempunyai pola yang konsisten dengan data pengukuran di permukaan.

Data-data di atas meyakinkan bahwa fenomena deformasi geologi berupa pergerakan horizontal dan vertikal memang nyata terjadi di sekitar pusat semburan. Deformasi juga telah mempengaruhi kestabilan tanggul penahan luapan lumpur, sehingga tanggul mengalami beberapa kali keruntuhan (Agustawijaya dan Sukandi, 2012). Deformasi yang terbesar terjadi di pusat semburan dan makin luar makin kecil. Berdasarkan pemodelan terhadap tanggul dan dibandingkan dengan pengukuran data GPS, tampak bahwa pengukuran GPS konsisten dengan model, sehingga deformasi vertikal paling tidak telah mencapai sekitar 1,4 m dari titik semula (Agustawijaya dan Sukandi, 2012). Deformasi juga telah mempengaruhi sistem kapal keruk yang diterapkan untuk mengalirkan lumpur dari kolam penampungan ke Kali Porong, sehingga sistem tersebut mengalami kegagalan secara statistik untuk periode tahun 2012 (Agustawijaya, 2013).

Kesimpulan

Semburan lumpur panas di Sidoarjo adalah sebuah fenomena unik dari fenomena geologi gunung lumpur. Fenomena unik ini terutama lumpur mempunyai suhu relatif tinggi dan konstan, sehingga hal ini mengindikasikan sebuah sistem panas bumi. Data geokimia menunjukkan jejak yang kuat unsur radioisotop air dari batuan beku panas, dengan indikasi sistem geotermal uap kering dengan entalphy tinggi. Akan tetapi indikasi sistem panas bumi ini akan sangat dipengaruhi oleh deformasi geologi yang intensif yang terjadi di sekitar pusat semburan. Deformasi ini bisa diyakini berasal dari kedalaman yang cukup tinggi, lebih dari 600 m, hal mana bisa menyebabkan berubahnya pola struktur geologi setempat. Dengan demikian kobelehjadian sebuah sistem panas bumi di Porong, Kabupaten Sidoarjo, harus betul-betul diteliti secara mendalam karena potensi geotermal bisa saja menjadi tidak ada artinya manakala deformasi geologi terus berlangsung sehingga konsep kebaruan sistem panas bumi tidak terjadi.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi untuk hibah penelitian Sinas 2013. Peneliti juga mengucapkan terima kasih kepada BPLS yang telah memberikan fasilitas dukungan dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Agustawijaya, D. S., (2013), "A review on hazard risk reduction systems and reliability estimate of the dredging system of the Lusi mud volcano in Sidoarjo, East Java", *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, Vol. 13 (02), pp. 12-16.
- Agustawijaya, D. S. dan Sukandi, (2012) "The stability of the Lusi mud volcano embankment dams using FEM with a special reference to the dam point P10.D", *Civil Engineering Dimension*, Vol. 14 (2), pp. 100-109.
- Agustawijaya, D.S., (2010), "Penanggulangan semburan dan penanganan luapan lumpur Sidoarjo: Peranan ilmu dan rekayasa kebumihutan dalam pengelolaan bencana", *Prosiding Seminar Nasional Ikatan Geograf Indonesia*, Surabaya, pp 16-28.
- Anonim, (2011), *Laporan Akhir Tahun BPLS*, BPLS, Surabaya.
- Fukushima, Y.; Mori, J., Hashimoto, M., Kano, Y., (2009), "Subsidence associated with the Lusi mud eruption, East Java, investigated by SAR interferometry", *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 26, pp. 1740-1750.
- Herman, D. Z., (2009), "Tinjauan Kemungkinan Sebaran Unsur Tanah Jarang (REE) di Lingkungan Panas Bumi

- (Contoh kasus lapangan panas bumi Dieng, Jawa Tengah)”, *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol. 4 (1), pp. 1-8.
- Istadi, B.P.; Pramono, G.H.; Sumintadireja, P.; Alam, S.,(2009), “Modeling study of growth and potential geohazard for LUSI mud volcano: East Java, Indonesia”, *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 26, pp.1724-1739.
- Mazzini, A.,(2009), “Mud volcanism: Processes and implications”, *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 26, pp. 1677-1680.
- Mazzini, A.; Svensen, H.; Akhmanov, G.G.; Aloisi, G.; Planke, S.; Malthe-Sorensen, A.; Istadi, B., (2007), “Triggering and dynamic evolution of LUSI mud volcano, Indonesia”, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 261, pp. 375-388.
- Nugraha, S. I.; Harmoko, U.; Indriana, R. D.,(2008), “Penelitian Temperatur Permukaan dan Emisi Gas Karbondioksida (CO₂) untuk Mengkaji Kebolehjadian adanya Panas Bumi di Sisi Lereng Utara Gunung Merbabu Jawa Tengah”, *Laporan Penelitian*, MIPA- Fisika Universitas Diponegoro.
- Satyana, A.H.,(2007), “Geological disaster on the falls of Jenggala and Majapahit Empires : A hypothesis of historical mud volcanoes eruptions based onhistorical chronicles of Kitab Pararaton, Serat Kanda, Babad Tanah Jawi; Folklore of Timun Mas; analogue to the present LUSI eruption; and geological analysis of the Kendeng Depression – Brantas Delta”, *Joint Convention Bali 2007*, The 36th IAGI, The 32nd HAGI, and the 29th IATMI, Annual Convention and Exhibition, Bali, 13-16 November 2007.
- Sawolo, N.; Sutriyono, E.; Istadi, B.P.; Darmoyo, A.B.; (2009). “The LUSI mud volcano triggering controversy: Was it caused by drilling?”, *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 26, pp.1766-1784.
- Wahyudi, (2006), “Kajian Potensi panas Bumi dan Rekomendasi Pemanfaatannya pada Daerah Prospek Gunungapi Ungaran Jawa Tengah”, *Berkala Ilmiah MIPA*, 16 (1), pp. 41-48.
- Zaennudin, A.; Badri, I.; Padmawijaya, T.; Humaida, H.; dan Sutaningsih, E.; (2010), “*Fenomena Geologi Semburan Lumpur Sidoarjo*”, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber daya Mineral, Bandung.