



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



EKSPLORASI SUMBER DAYA ALAM DAN MITIGASI BENCANA

Profesor Prihadi Sumintadireja
Fakultas Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB
22 Juni 2024

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

EKSPLORASI SUMBER DAYA ALAM DAN MITIGASI BENCANA

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

EKSPLORASI SUMBER DAYA ALAM DAN MITIGASI BENCANA

Prof. Prihadi Sumintadireja

22 Juni 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:
Eksplorasi Geologi dan Mitigasi Bencana Alam

Penulis : Prof. Prihadi Sumintadireja

Reviewer : Prof. Hendra Grandis

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-477-7

e-ISBN : 978-623-297-478-4 (PDF)

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132

☎ +62 22 20469057

🌐 www.itbpress.id

✉ office@itbpress.id

Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Tulisan singkat yang dibuat merupakan beberapa pengalaman selama menjadi staf pengajar di program studi Geologi selama lebih dari 36 tahun. Pengalaman penelitian maupun pengabdian masyarakat yang telah dilaksanakan telah memberi tambahan wawasan bagi penulis dalam memecahkan permasalahan yang timbul di lapangan. Di dalam tulisan ini dibahas beberapa contoh hambatan dan hal yang dapat diselesaikan dengan cara-cara praktis pada saat melaksanakan penelitian, survei lapangan dan pengambilan data menggunakan peralatan geofisika.

Pekerjaan eksplorasi sumber daya alam dengan metode geologi eksplorasi sangat memerlukan pengamatan/pengukuran yang terintegrasi terutama berkaitan dengan titik koordinat disain survai yang baik terutama dengan kondisi medan, karena kita akan memberikan gambaran kondisi bawah permukaan berdasarkan kaidah geologi dan hasil survei berdasarkan pengukuran parameter fisik dengan metode geofisika. Jika sudah lebih detail, maka data geokimia harus digunakan agar lebih sempurna dalam melakukan interpretasi terpadu kondisi geologi bawah permukaannya.

Kejadian munculnya Lumpur Sidoarjo (LUSI) merupakan pengalaman paling berkesan selama menjadi pengajar di Program Studi Geologi dan juga melakukan pekerjaan profesional dengan perusahaan nasional maupun multinasional dalam bidang minyak dan gas bumi, geotermal, mineral, dan geologi teknik yang telah dilakukan penulis sebanyak lebih dari 120 jenis pekerjaan konsultasi selama hampir 30 tahun sejak lulus menjadi Sarjana Geologi. Survei lapangan dan analisis geologi dan geofisika yang dilakukan sejak dua minggu dari kejadian semburan lumpur di kawasan Porong, Sidoarjo, Jawa Timur yang pertama terjadi pada 29 Mei 2006, sekitar 150 meter arah Barat Daya dari sumur pengeboran eksplorasi Lapindo Brantas Banjarpanji-1 (BJP-1) yang sampai saat ini masih berlangsung. Penulis menggunakan kemampuan dan pengalaman dalam bidang yang telah dipelajari mulai dari S-1 Geologi dan S-2 Geofisika Terapan di ITB, serta S-3 Geofisika Terapan di Kyushu University.

Pekerjaan survei yang dilakukan terdiri atas beberapa jenis pekerjaan yang semuanya berkaitan dengan kemampuan melakukan eksplorasi geologi,

geofisika dan geokimia yang terpadu untuk memberikan gambaran kondisi bawah permukaan. Pada saat itu penulis diminta oleh perusahaan Lapindo Brantas untuk dapat menjelaskan apa penyebab terjadinya keluarnya LUSI. Interaksi yang terjadi selama melakukan studi dengan perusahaan, pemerintah pusat dan daerah, organisasi profesi bidang geologi, geofisika, perminyakan, dan ahli perbankan/ekonomi telah menempe kemampuan optimal dalam berkomunikasi dengan berbagai ahli maupun dengan wartawan yang awam.

Penulis pernah menyatakan pada saat awal semburan kepada pemangku kepentingan, bahwasannya 360 hektar daerah rawan pada akhirnya akan mengecil menjadi sekitar 60 hektar seperti analogi gunung lumpur Bledug Kuwu di Purwodadi yang saat ini luasnya sekitar 45 hektar. Kelihatannya kondisi saat ini mendekati perkiraan tersebut. Pengalaman kerja menjelaskan risiko dan mitigasi kebencanaan geologi dengan mengaplikasikan metode eksplorasi geologi dan geofisika termasuk pemanfaatan teknologi GPS dari awal perencanaan hingga pelaksanaan survei dan pembangunan infrastruktur sangat menarik untuk dipelajari kembali.

Bandung 22 Juni 2024

Prihadi Sumintadireja

SINOPSIS

Eksplorasi sumber daya alam berdasarkan kaidah geologi merupakan penggunaan pengetahuan dasar geologi antara lain, petrologi, stratigrafi, geologi struktur. Pertumbuhan populasi manusia selalu diiringi peningkatan kebutuhan energi, kebutuhan logam, dan segala barang-barang yang dibuat dan diolah dari unsur galian di alam. Dalam kegiatan industri pada saat ini tidak dapat dipungkiri bahwa sudah menerapkan konsep padat ilmu dan teknologi, padat sumber daya, yang berakibat menjadi padat modal, serta memiliki tingkat risiko yang sangat tinggi. Energi dan sumber daya mineral menjadi bahan utama dan menjadi sangat penting bagi keberlangsungan sektor industri bagi kebangkitan dan ketahanan negara terutama dalam bidang ekonomi dan perdagangan.

Kegiatan eksplorasi dalam geologi adalah usaha mencari-cari sumber daya alam berupa energi dan mineral, yang memiliki banyak tantangan dan risiko yang tinggi serta tidak murah. Karena itu, kegiatan eksplorasi memerlukan pemikiran sistematis untuk menentukan apa yang menjadi target eksplorasi, bagaimana lingkungan keberadaannya, serta apa saja petunjuk untuk mengidentifikasinya. Itu semua tertuang dalam konsep eksplorasi. Konsep Eksplorasi memerlukan alur pemikiran yang sistematis, dimulai dari penentuan target eksplorasi, hipotesis dan formulasi, serta perumusan model dugaan geologi dan lingkungan geologinya. Selain itu dibutuhkan pula perencanaan, perumusan sistem pencariannya, yang tercakup dalam penyusunan strategi, metode, dan teknologi eksplorasi.

Eksplorasi geologi secara umum tidak hanya dapat memecahkan masalah pencarian sumber daya mineral dan energi, tetapi dapat dimanfaatkan untuk pencarian air tanah dan mendeteksi berbagai proses-proses yang terjadi di bawah permukaan. Dalam hal mitigasi bencana alam geologi, dibutuhkan pengamatan secara terus menerus untuk mengetahui perubahan-perubahan alam yang terjadi. Untuk itu seorang geologawan membutuhkan alat pemantauan yang ekonomis dan tahan terhadap berbagai kondisi ekstrem.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
1 PENDAHULUAN	1
2 EKSPLORASI SUMBER DAYA ALAM.....	5
3 GEOTERMAL/PANAS BUMI.....	7
4 MITIGASI BENCANA	19
5 LUMPUR SIDOARJO	21
6 METODE PENELITIAN LAPANGAN.....	25
7 PENGAMATAN GEOLOGI PERMUKAAN	35
8 PENGOLAHAN DATA GEOLOGI BAWAH PERMUKAAN	47
9 MODEL LUAPAN LUMPUR	57
10 DAERAH BAHAYA.....	59
11 PENUTUP	61
12 UCAPAN TERIMA KASIH	63
DAFTAR PUSTAKA.....	65
CURRICULUM VITAE.....	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Lokasi gunung api dan batas lempeng serta sesar di Indonesia (disederhanakan tanpa skala).....	2
Gambar 2	Cekungan sedimen dan sejenisnya yang terdapat di Indonesia dan sekitarnya (Badan Geologi, 2009).....	3
Gambar 3	Lokasi kejadian LUSI (Lumpur Sidoarjo) di Jawa Timur	21
Gambar 4	Semburan lumpur di Porong Sidoarjo	22
Gambar 5	Konfigurasi jaringan pengukuran GPS.....	26
Gambar 6	Prinsip studi Pergerakan Tanah dengan Survei GPS.....	26
Gambar 7	Fenomena Geologi yang terjadi pada daerah penelitian	28
Gambar 8	Konfigurasi Wenner	30
Gambar 9	Alur kegiatan penelitian	31
Gambar 10	Perkembangan genangan lumpur di Porong Sidoarjo	32
Gambar 11	(a) Ledakan pipa gas pada tanggal 22 November 2006, (b) retakan pada bangunan	32
Gambar 12	Peta lokasi titik pengamatan	35
Gambar 13	Peta topografi	36
Gambar 14	Morfologi perbukitan <i>Hogback</i> , dilihat dari STA 28 ke arah selatan.....	37
Gambar 15	Pada lokasi Paritan 1, menunjukkan adanya indikasi Sesar berupa <i>offset</i> pelapisan arah bidang <i>offset</i> cenderung Barat - Timur.....	38
Gambar 16	Pada lokasi Paritan 2 menunjukkan adanya indikasi sesar berupa <i>offset</i> pelapisan arah bidang <i>offset</i> cenderung Barat - Timur.....	39
Gambar 17	Retakan bangunan di STA 19, arah retakan cenderung Utara - Selatan.....	39
Gambar 18	Bualan keluar di sepanjang sungai dan di halaman rumah penduduk dimanfaatkan untuk memasak	40
Gambar 19	Peta Geologi	41
Gambar 20	Peta Geologi 1938, J Duyfjes	41
Gambar 21	Kesesuaian arah zona sesar	42
Gambar 22	Peta penyebaran retakan, bualan, dan kerusakan infrastruktur yang pernah terpetakan	43

Gambar 23	Penyebaran data hasil metode Fry (1979)	44
Gambar 24	<i>Diagram Rose</i> untuk penyebaran titik metode Fry untuk jarak antar titik 20 meter	44
Gambar 25	Semburan lumpur yang relatif sejajar dengan Sesar Watukosek	47
Gambar 26	Peta dasar line seismik dan perbandingan luas berdasarkan data seismik serta gravitasi antara Porong dan LUSI (Istadi et.al, 2009)	48
Gambar 27	Profil penampang seismik yang memotong LUSI Banjarpanji-1 dan area runtuh di Daerah Porong (Istadi et.al, 2009)	49
Gambar 28	Peta 17 lintasan geolistrik. Keterangan: Lintasan pengukuran Geolistrik	50
Gambar 29	Korelasi antara data pengukuran geolistrik dengan data bor	50
Gambar 30	Posisi lintasan geolistrik di-overlap-kan pada peta Gravitasi Anomali Sisa.....	51
Gambar 31	Lintasan 2-3-2, yang memiliki pola yang sama dengan kontur atau rendahan dan tinggian pada peta gravitasi.....	52
Gambar 32	Lintasan 5-6-7-8-9, yang memiliki pola yang sama dengan kontur atau rendahan dan tinggian pada peta gravitasi.....	52
Gambar 33	Lintasan geolistrik bagian selatan yang memiliki pola yang sama dengan kontur atau rendahan dan tinggian pada peta gravitasi.....	53
Gambar 34	Lintasan geolistrik yang memiliki kecenderungan kemiringan lapisan yang bersesuaian dengan data GPS	54
Gambar 35	Sidoarjo 2005, LUSI 2018 (Mazzini et.al, 2021)	54
Gambar 36	Sistem Sesar Watukosek (Mazzini et.al, 2021).....	55
Gambar 37	Sebaran lumpur tidak memengaruhi jalan tol yang baru.....	57
Gambar 38	Zonasi daerah bahaya berdasarkan analisis hasil studi	60

1 PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi energi, material, dan sumber daya alam di dalam perut bumi membutuhkan kegiatan eksplorasi, terutama dalam mencari serta menemukan sumber baru untuk menambah jumlah cadangannya. Eksplorasi merupakan kegiatan, aktivitas, atau tindakan mencari dengan cara melakukan penjelajahan untuk menemukan target. Eksplorasi dalam geologi adalah segala usaha yang dilakukan untuk mencari dan menemukan sumber daya alam berupa objek-objek geologi seperti mineral, energi migas, geotermal, susunan lapisan tanah dan kekuatannya, serta potensi bencana geologi.

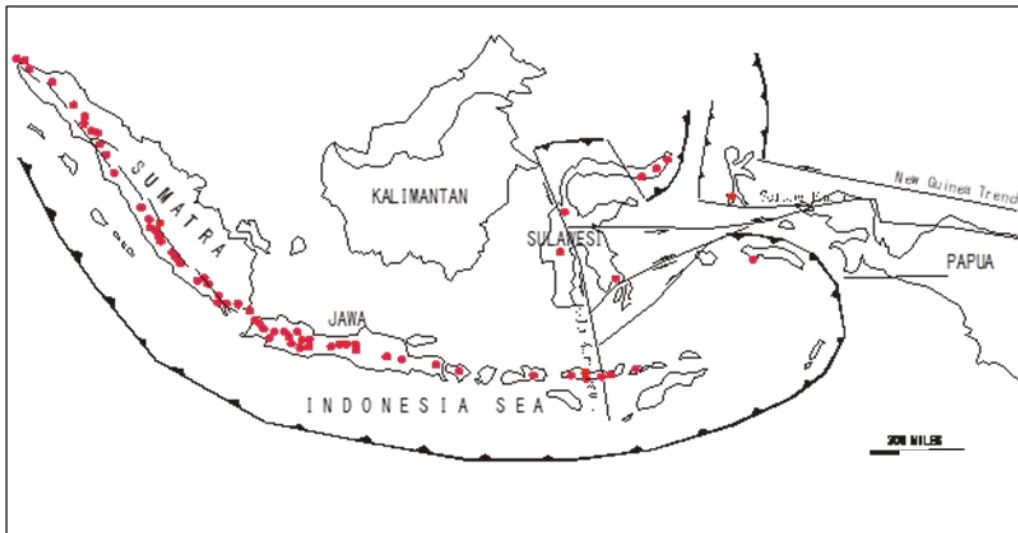
Pertambahan populasi global telah mengakibatkan peningkatan konsumsi air tawar untuk keperluan harian dan industri, serta munculnya permasalahan lingkungan dan tata ruang wilayah yang mulai ramai dan beragam. Situasi ini membuat metode eksplorasi geologi berperan penting dalam mencari sumber air berkualitas baik.

Indonesia sebagai sebuah negara di daerah yang berada di batas lempeng tektonik konvergen yang memiliki sejarah geologi yang panjang. Terdapat tiga lempeng utama, yaitu Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik yang bertemu di wilayah Indonesia, dengan tatanan lempeng tektonik mulai dari zona lempeng samudra, zona subduksi, bersambung ke jalur busur magmatik yang berada di zona kontinen, dan berlanjut sampai ke zona cekungan belakang busur. Rangkaian panjang jalur subduksi mulai dari tepi barat wilayah Pulau Sumatra memanjang ke selatan Pulau Jawa, lalu ke arah timur hingga Kepulauan Sunda Kecil dan Kepulauan Banda, lalu bercabang ke utara menuju Pulau Sulawesi dan ke timur menuju Halmahera, menjadikan Indonesia memiliki rangkaian gunung api aktif yang sangat banyak sebagai bagian dari Cincin Api Pasifik (*Pacific Ring of Fire*) (Gambar 1). Kondisi yang kompleks membuat beragamnya jenis batuan dan umur geologinya, mulai dari Pra-Tersier yang berasal dari intrusi plutonik, proses sedimentasi, sampai endapan aluvial terkini.

Hal ini menjadikan Indonesia memiliki potensi sumber daya geologi yang sangat beragam seperti sumber energi fosil, geotermal, sumber bijih logam dan mineral, sumber air tanah tawar, jalur gunung api aktif, dengan potensi-potensi bahaya yang terkandung di dalamnya. Sebagai ilustrasi, potensi

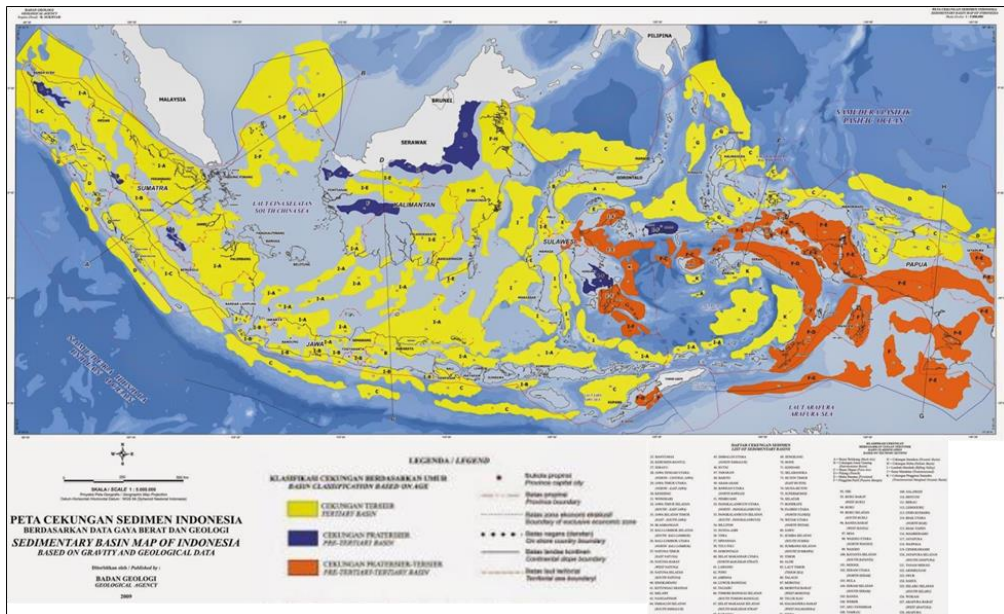
geotermal di Indonesia saat ini baru dimanfaatkan untuk listrik sekitar 2342 MW dari 16 daerah konsesi perusahaan geotermal, atau hanya sekitar 9,8% dari seluruh potensi yang ada. Hasil inventarisasi Badan Geologi menyebutkan adanya 356 titik panas bumi dengan potensi sebesar 24,000 MW. Pada saat pertemuan Indonesia Petroleum Association (IPA) ke-48 tanggal 14 Mei 2024, Presiden Direktur Pertamina, Nicke Widyawati, memaparkan strategi mempertahankan keberlanjutan energi dan lingkungan. Siaran pers Pertamina menyebutkan bahwa keberadaan energi merupakan katalis pertumbuhan ekonomi. Pada saat yang sama Pertamina harus menjamin ketersediaan energi dan mengurangi emisi karbon untuk mendukung target NZE (*Net Zero Emission*) pemerintah di tahun 2060 (<https://www.pertamina.com/en/news-room/news-release>).

Eksplorasi geotermal merupakan salah satu bagian dari energi terbarukan berkeandungan karbon rendah yang cukup menarik untuk dikembangkan, selain pengembangan program *bio-energy* dan CCUS (*Carbon Capture, Utilization, and Storage*).



Gambar 1 Lokasi gunung api dan batas lempeng serta sesar di Indonesia (disederhanakan tanpa skala)

Sumber energi fosil yang berasal dari minyak, gas bumi (hidrokarbon), serta batubara berada di wilayah cekungan yang berisi batuan sedimen. Indonesia memiliki banyak sekali cekungan sedimen (Gambar 2).



Gambar 2 Cekungan sedimen dan sejenisnya yang terdapat di Indonesia dan sekitarnya (Badan Geologi, 2009)

Minyak dan gas bumi merupakan komoditas energi utama yang menjadi tulang punggung ekonomi nasional, sebagai sumber penerimaan devisa negara dan pendorong peluang investasi. Berdasarkan data Wood MacKenzie, Indonesia berada dalam urutan lima besar sebagai negara yang paling banyak mengambil manfaat dari kegiatan produksi minyak dan gas bumi.

Pada perkembangannya industri minyak dan gas bumi terus mengalami kenaikan permintaan untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar transportasi, industri, pembangkit tenaga listrik, dan kebutuhan industri lainnya. Dengan masih pentingnya sektor ini bagi negara, maka diperlukan manajemen dan pengelolaan di bagian hulu untuk meningkatkan kegiatan eksplorasi mencari sumber-sumber cadangan baru, di samping upaya peningkatan produksi melalui optimalisasi produksi dan *Enhanced Oil Recovery* (EOR).

Kegiatan eksplorasi yang terencana, akurat, dan efisien menjadi kunci utama dalam pengambilan keputusan dan kebijakan, serta dapat memberikan peluang kepada para pemangku kepentingan (termasuk pemerintah dan para investor) untuk dapat meningkatkan nilai investasinya.

2 EKSPLORASI SUMBER DAYA ALAM

Kegiatan eksplorasi harus dilakukan dengan penuh perencanaan yang terprogram dan terstruktur agar efisien, efektif, dan ekonomis. Saat menyusun strategi eksplorasi, ahli geologi harus memperhatikan berbagai kendala di lapangan, agar hasilnya sesuai harapan. Pemerintah memiliki kewenangan dalam membina, mengatur, menjalankan, dan mengawasi kegiatan eksplorasi. Perumusan sistem dan strategi eksplorasi yang terdiri atas cara, metode, rentang waktu, ilmu, dan teknologi eksplorasi yang digunakan. Hal ini memerlukan pemahaman tingkat tinggi tentang metodologi yang melibatkan berbagai ahli ilmu kebumihan/geosains, antara lain: geologi, geofisika, geokimia dan geodesi. Identifikasi objek geologi di bawah permukaan sebagai sasaran eksplorasi memerlukan strategi survei lapangan yang memasukkan pengukuran parameter fisika dengan metode geofisika (Sumintadireja, 2023).

Pada rangkaian kegiatan eksplorasi, terlebih dahulu dilakukan kegiatan studi dasar (*baseline study*), sebagai langkah awal untuk menentukan tahap eksplorasi berikutnya. Harapannya adalah dapat menjawab tipe/jenis objek eksplorasi, di mana posisinya, dan berapa besar potensinya. Pemahaman terhadap gambaran model dan konsep geologi menjadi hal yang sangat vital.

Studi dasar berbasis data sekunder dan data lapangan bertujuan untuk mendapatkan informasi awal sebanyak mungkin tentang area eksplorasi dan sekitarnya sebelum pekerjaan eksplorasi dilakukan. Pengumpulan data seperti dokumen laporan-laporan penyelidikan terdahulu, peta geologi regional, peta cekungan air tanah, peta topografi dan tata guna lahan, foto udara, citra satelit, data aliran sungai, data mata air, data curah hujan, dan lain sebagainya, adalah contoh data sekunder yang dibutuhkan. Hasil analisis data sekunder dapat berupa kompilasi kesimpulan terdahulu, interpretasi dan penggambaran ulang model atau konsep geologi untuk mendapatkan informasi aktual area eksplorasi.

3 GEOTERMAL/PANAS BUMI

Sumberdaya geotermal tidak mungkin dapat dipahami tanpa mempelajari mekanisme pembentukan magma dan kegiatan vulkanisme. Sistem panas bumi dengan suhu yang tinggi, letaknya tertentu di sepanjang zona vulkanik punggung pemekaran benua, di atas zona subduksi dan anomali peleburan di dalam lempeng. Batas-batas pertemuan lempeng yang bergerak merupakan pusat lokasi sistem hidrotermal magma. Transfer energi panas secara konduktif pada lingkungan tektonik lempeng diperbesar oleh gerakan magma dan sirkulasi hidrotermal. Energi panas bumi 50% ada di dalam magma, 43% di dalam batu kering panas (*hot dry rock*), serta 7% di dalam sistem hidrotermal.

Sumber panas yang menggerakkan konveksi hidrotermal terdiri atas beberapa macam geometri dan karakteristik. Sistem magma asam yang besar, membentuk kaldera utama dan kaldera yang diisi oleh aliran riolit, zona dapur magma *intermediate*, sampai dengan magma asam, rangkaian tubuh magma basaltik, andesitik, dasitik dan riolitik, kompleks tubuh magma basaltik dan riolitik, rangkaian korok/korok basaltik.

Transfer panas oleh *plume*, letaknya tidak berkaitan dengan tektonik lempeng, tetapi selalu berasosiasi dengan pengangkatan dan banjir basalt yang banyak. Panas dapat berpindah secara konduksi dan konveksi. Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas melalui bahan akibat adanya interaksi atomik/molekul penyusun batuan tersebut dalam mantel. Proses konveksi perpindahan panas terjadi karena molekul penyusun batuan dapat berpindah, dengan kata lain perpindahan panas diikuti oleh perpindahan massa. Kedua proses ini yang dominan terjadi di dalam bumi. Sumber panas di dalam kerak akibat magma asam yang dihasilkan oleh kerak yang lebur sebagian, panas akibat konduksi lokal dari mantel bersuhu tinggi.

Pemanasan kerak di atas suhu leleh pada jarak antara mantel bersuhu tinggi dan Moho (>18-19 km) bisa didapatkan dari akumulasi magma basaltik di bagian bawah kerak, yang kecepatannya tergantung pada tegasan di lapangan. Tegasan *tensile* mendukung akumulasi magma basaltik di atas tekanan hidrostatik dan mengurangi jarak antara mantel bersuhu tinggi dan Moho. Kondisi ini secara mekanis akan mempercepat peleburan kerak. Sumber daya panas bumi menurut Wright et.al. (1985), terdiri atas:

- a. Sumberdaya batu panas (lebur sebagian $>600\text{ }^{\circ}\text{C}$, padat/*hot dry rock* 90-650 $^{\circ}\text{C}$).
- b. Sumberdaya konveksi hidrotermal (dominasi uap $\pm 240^{\circ}\text{C}$, dominasi air panas $\pm 30\text{-}350\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- c. Sumberdaya hidrotermal lainnya yaitu:
 - 1) Cekungan pengendapan/fluida panas pada akifer regional $\pm 30\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - 2) *Geopressed hot fluids*/fluida panas yang tertekan di atas tekanan hidrostatik $\pm 90\text{-}200\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - 3) *Radiogenic*/panas dihasilkan oleh peluruhan alamiah unsur radioaktif U, Th, K $\pm 30\text{-}350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Geometri reservoir hidrotermal di daerah vulkanik merupakan hasil interaksi yang kompleks dari proses vulkano-tektonik aktif, antara lain stratigrafi yang lebih tua dan struktur geologi. Reservoir panas bumi yang produktif harus memiliki porositas dan permeabilitas yang tinggi, ukuran cukup besar, suhu tinggi, dan kandungan fluida yang cukup. Permeabilitas dihasilkan oleh karakteristik stratigrafi (misal porositas intergranular pada lapilli, atau lapisan bongkah-bongkah lava) dan unsur struktur (misalnya sesar, kekar, dan rekahan). Sistem hidrotermal akan kehilangan permeabilitas bersamaan dengan jalannya waktu oleh tekanan larutan atau pengendapan mineral-mineral di dalam fluida (misal air) saat mendingin atau kehilangan CO_2 . Jadi nilai permeabilitas yang optimal perlu dipertahankan dengan proses perekahan (*fracturing*) periodik. Re-injeksi air pada lapangan panas bumi sangat diperlukan untuk pengisian kembali reservoir yang uapnya telah digunakan untuk menggerakkan turbin dan untuk mencegah kontaminasi kimiawi.

Sistem geotermal dalam kerangka tektonik lempeng mengakibatkan suhu yang sangat tinggi pada mantel untuk memanasi batuan di sekitarnya dan menyebabkan terjadinya peleburan. Batuan yang melebur ini disebut magma. Magma memiliki densitas yang rendah daripada batuan di sekitarnya, sehingga cenderung untuk bergerak ke atas menuju permukaan bumi. Dalam perjalanannya menuju permukaan bumi, kebanyakan magma tidak sampai permukaan melainkan tinggal di bawah permukaan bumi dan memanasi batuan sekitarnya dan air yang terkandung di dalam batuan tersebut. Magma juga dapat keluar ke permukaan bumi melalui aktifitas vulkanisme sebagai lava. Energi geotermal yang digunakan oleh manusia bukanlah energi yang berasal secara langsung dari magma. Manusia mengekstraksi air yang

dipanaskan oleh magma sebagai sumber energi panas bumi. Energi inilah yang dipergunakan untuk berbagai macam keperluan seperti pembangkit tenaga listrik, pemakaian langsung untuk kolam air panas, dan sebagainya.

Untuk memahami kondisi alamiah dan mengetahui keberadaan sumberdaya geotermal, perlu dipelajari proses-proses yang menghasilkan anomali panas tersebut. Secara umum proses yang menghasilkan pembentukan anomali geotermal adalah proses transfer panas ke permukaan bumi yang disebabkan oleh magma. Proses ini akan menghasilkan anomali geotermal yang disebabkan oleh aktivitas magmatik. Panas yang dibawa ini kemudian disimpan untuk sementara (konteks waktu: skala umur geologi) di dalam kerak bumi dekat permukaan (<10 km; Muffler, 1976 opcit Raybach-Muffler, 1981).

Magma yang bergerak ke atas menuju kerak bumi dibedakan antara magma basaltik dan magma silisik. Magma basaltik berasal dari material dalam mantel yang mengalami lebur sebagian. Apabila magma ini muncul ke permukaan dan membentuk korok dan lapisan tipis, maka energi panasnya akan dilepas dengan cepat. Proses ini membentuk tubuh intrusi yang besar. Namun apabila membeku di kerak bumi pada rezim ekstensi, maka magma dapat meningkatkan aliran panas regional yang kemudian memicu konveksi hidrotermal di sepanjang sesar-sesar yang terbentuk di area tersebut.

Magma silisik dapat dihasilkan dari material-material mantel yang mengalami lebur sebagian ataupun dari diferensiasi magma basaltik. Magma ini memiliki viskositas yang besar (dibandingkan dengan magma basaltik), sehingga sering kali terperangkap beberapa kilometer di dalam kerak bumi. Di daerah kontinen, sumberdaya panas bumi umumnya berasosiasi dengan vulkanisme silisik daripada basaltik.

Aktivitas magmatik dalam skala regional dapat diamati dalam kerangka tektonik lempeng. Dengan mengetahui jalur aktifitas magmatik ini maka dapat ditentukan daerah-daerah yang secara geografis memiliki potensi sumber panas bumi. Konsep tektonik lempeng menyebutkan bahwa magma yang menuju ke permukaan bumi umumnya berada di sepanjang batas lempeng. Dengan demikian dapat ditarik suatu hipotesa bahwa sumberdaya geotermal yang disebabkan oleh aktifitas magmatik atau intrusi magma akan berada di sepanjang daerah pemekaran lempeng, daerah subduksi, dan daerah peluruhan unsur radio aktif batuan di tengah lempeng/*intraplate*

Berdasarkan suhu reservoirnya sistem geotermal (Hochstein dan Browne, 2000) diklasifikasikan menjadi: suhu tinggi ($>225^{\circ}\text{C}$), suhu sedang ($125\text{-}225^{\circ}\text{C}$), dan suhu rendah ($<125^{\circ}\text{C}$).

Klasifikasi berikut adalah klasifikasi panas bumi yang umum dijumpai di literatur-literatur (Hochstein dan Browne, 2000, Rybach dan Muffler, 1981, Robert Bowen, 1989, Keith Nicholson, 1993).

1. Sistem geotermal konduktif

Entalpi suhu rendah. Sistem panas bumi dalam akifer sedimen yang tinggi porositas dan permeabilitasnya, dengan ciri suhu rendah dan berada di daerah dengan heatflow normal atau agak tinggi. Termasuk dalam kategori ini adalah zona *geopressured*

Sistem batu panas, yang berada di dalam lingkungan suhu tinggi dengan permeabilitas rendah. Pada sistem ini sedikitnya ada dua sumur harus dibor pada kedalaman kira-kira 4000 meter. Satu sumur digunakan untuk menekan air ke dalam pori batuan. Air tersebut akan terpanaskan dan masuk ke dalam sumur ke dua, kemudian mengalir ke atas, mengisi unit tenaga uap panas yang menggerakkan turbin untuk memproduksi listrik.

2. Sistem geotermal konveksi.

Sistem hidrotermal vulkanik, umumnya terdapat di gunung api bertipe stratovolcano atau kaldera berumur muda. Sistem geotermal suhu tinggi yang berasosiasi dengan pusat vulkanisme pada elevasi tinggi. Model ini banyak ditemukan pada geotermal sistem bersuhu tinggi di dunia. Sistem ini diklasifikasikan lagi menjadi tiga tipe, berdasarkan permeabilitas batuan reservoir dibandingkan dengan batuan sekitarnya, dan *recharge area* (infiltrasi air bawah tanah). Sebelum membagi sistem ini kepada kelompok yang lebih spesifik lagi, kita perlu mengenal tipe-tipe reservoir. Berdasarkan permeabilitasnya, tipe-tipe reservoir dikelompokkan menjadi permeabilitas rendah ($k < 1 - 3$ milidarcy), permeabilitas sedang ($k = 3 - 10$ milidarcy), dan permeabilitas tinggi ($k > 10$ milidarcy) ($1 \text{ milidarcy} = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$).

Pada sistem ini umumnya panas yang mencapai permukaan adalah panas yang dibawa oleh sirkulasi air meteorik yang dalam, yang menyapu sumber panas di bawah permukaan, biasanya batuan plutonik yang mendingin. Kemudian air meteorik yang membawa panas ini naik ke permukaan dengan

cara konveksi. Berdasarkan karakteristik batuan reservoir dan batuan sekitarnya serta infiltrasi meteorik ke dalam sistem, geotermal sistem suhu tinggi yang berasosiasi dengan pusat vulkanisme pada elevasi tinggi ini dibagi menjadi tiga tipe, yaitu :

- Sistem dominasi air, jika permeabilitas/k reservoir tinggi, tetapi k dalam *recharge* area sedang. Pada tipe ini, saturasi air dalam reservoir adalah $0,7 < (SI) < 1$.
- Sistem dominasi dua fasa; uap dan air, jika k reservoir dan k *recharge area* sedang. Pada tipe ini, saturasi air dalam reservoir adalah $0,4 < (SI) < 0,7$.
- Sistem dominasi uap, jika k reservoir tinggi dan k dalam *recharge area* kecil (sedikit sekali infiltrasi air meteorik). Pada tipe ini, saturasi air (SI) dalam reservoir adalah $0,4 < (SI) < 0$.

Sistem geotermal suhu tinggi yang berada pada elevasi sedang, sumber panasnya adalah batuan kerak bumi yang panas dan luas dengan energi panasnya berasal dari:

- Lebur sebagian bagian atas kerak bumi (contoh: daerah New Zealand).
- Intrusi korok pada daerah pemekaran lempeng berada dalam batuan basalt (contoh: Iceland) atau sedimen (contoh: California).
- Batuan plutonik yang mendingin yang berada sangat dalam di bawah permukaan bumi (contoh: bekas jalur subduksi tua yang telah mati, Kakonda Jepang).

Pada ketiga model di atas, dapat juga ditemukan sistem geotermal dominasi air, sistem geotermal dominasi uap ataupun sistem geotermal dua fasa. Berdasarkan sumber panasnya (Hochstein dan Browne, 2000), sistem geotermal suhu tinggi yang berada pada elevasi sedang dapat dibagi lagi menjadi:

Sistem geotermal bersuhu tinggi pada elevasi sedang dengan sumber panas berasal dari batuan kerak bumi yang panas dan sangat luas penyebarannya. Morfologi yang mengelilingi sistem ini tidak curam dan vulkanisme berbentuk kerucut berumur muda berada di pinggir-pinggir reservoir geotermal.

Sistem geotermal bersuhu tinggi pada jalur pemekaran lempeng. Sistem geotermal ini berada pada batuan basaltik muda pada jalur pemekaran lempeng seperti di Iceland. Sumber panasnya berasal dari korok atau *sill*.

Sistem geotermal bersuhu tinggi dengan reservoir berupa batuan sedimen. Sistem ini terbentuk di batuan sedimen sampai metamorf derajat rendah dengan sumber panas berasal dari batuan beku dalam yang mendingin, kemungkinan adalah hasil subduksi yang lebih tua, umumnya berada agak jauh dari zona subduksi yang ada saat ini.

Sistem geotermal suhu tinggi dengan sumber panas berupa batuan kerak bumi yang panas pada lingkungan tumbukan lempeng. Sumber panas sistem ini berasal dari batuan granit berumur muda yang kemungkinan dihasilkan dari proses *shear-heating* dari tumbukan lempeng.

Sistem suhu sedang dan rendah, sistem ini terbentuk di berbagai kerangka geologi dan hidrologi, baik di sepanjang batas lempeng aktif maupun di luar batas lempeng aktif. Semua sistem bersuhu sedang adalah reservoir dominasi air. Umumnya sistem ini menghasilkan energi dari air meteorik yang masuk sangat dalam ke bawah permukaan, kemudian terpanaskan oleh batuan yang panas di kerak bumi. Energi panas ini kemudian dibawa ke permukaan melalui rekahan-rekahan. Berdasarkan geologi dan hidrologi model sistem suhu rendah dan sedang ini dapat dikelompokkan lagi menjadi:

- Sistem geotermal suhu sedang-rendah berada di atas jalur vulkanisme, Umumnya sistem geotermal di jalur vulkanisme adalah sistem bersuhu tinggi, tetapi beberapa di antaranya bersuhu sedang sampai rendah. Suhu sedang sampai rendah ini mungkin berasal dari sumber panas yang awalnya bersuhu tinggi namun dalam perjalanan waktu mengalami pendinginan. Selain itu juga sistem ini juga ditemui pada daerah busur vulkanik yang telah mati, yang batuan kerak di bawahnya telah mendingin.
- Sistem pergerakan panas, reservoir sistem ini dapat berupa batuan vulkanik atau batuan sedimen. Sistem ini tidak banyak dideskripsi secara detail tetapi beberapa sistem telah dieksplorasi sampai tingkat lanjut. Sistem ini dapat dikelompokkan lagi menjadi:
 - Sistem pergerakan pada jalur pemekaran lempeng aktif, contoh yang sangat baik untuk sistem ini adalah East African Rift; Daerah ini

berada sepanjang kerak bumi yang panas di mana sumber panasnya adalah batuan intrusi.

- Sistem pergerakan panas pada kedudukan tektonik tumbukan lempeng, sumber panasnya berupa kerak benua yang mengalami deformasi. Infiltrasi air hujan maupun air meteorik yang berasal dari air hujan, masuk dan menyapu sumber panas ini, kemudian mengalir ke permukaan kembali. Sistem ini banyak ditemukan di daerah panas bumi di Indonesia.
- Sistem pergerakan panas zona rekahan, sistem ini dapat terbentuk di daerah dengan topografi agak datar jika fluida mengalir menuju permukaan bumi melalui zona rekahan pada kedalaman yang cukup dalam di batuan yang memiliki permeabilitas sangat tinggi (>100 *milidarcy*), di mana batuan tersebut memiliki *heat flux* yang tinggi (>70 mW/m^2). *Heat flux* yang tinggi ini dapat terbentuk pada batuan granit, di mana elemen-elemen radioaktif menghasilkan panas dari peluruhan radiaktifnya. Zone rekahannya dapat berukuran sempit (<100 m) atau lebar (>200 m).

Sistem suhu rendah, sistem ini memiliki suhu kurang dari 125 °C. Sistemnya umumnya konveksi, dengan sistem pergerakan panas yang dikontrol oleh struktur. Reservoirnya berupa jaringan rekahan. Sistem ini jarang terdapat di jalur gunung api tetapi banyak terdapat di lingkungan geologi di mana tektonik dan topografinya memungkinkan terjadinya sistem pergerakan panas.

Manifestasi permukaan sistem hidrotermal magmatik, pada sistem panas bumi konvektif di mana terjadi sirkulasi fluida dari daerah *recharge* masuk ke dalam reservoir, kemudian keluar menuju permukaan melalui daerah *upflow* dan *outflow*, fluida dengan suhu yang umumnya tinggi ini akan bereaksi dengan batuan sekitar, keluar melalui rekahan-rekahan dalam batuan. Interaksi fluida dengan batuan sekitarnya akan menghasilkan mineral-mineral ubahan (alterasi mineral) yang dapat diamati dipermukaan bumi misalnya mineral-mineral lempung seperti, illite, montmorillonite dan sebagainya.

Selain itu juga karena perubahan keadaan kesetimbangan (Tekanan, Suhu, pH) fluida di dalam bumi dengan di permukaan bumi, maka beberapa mineral terendapkan di permukaan bumi. Air panas yang keluar melalui

rekahan-rekahan akan keluar sebagai mata air panas apabila laju alirnya sangat cepat dengan jumlah massa yang dipindahkan besar. Air panas ini mungkin juga akan mendingin dan keluar sebagai mata air hangat. Fluida berupa gas juga dapat keluar melalui rekahan-rekahan dalam batuan. Segala bentuk gejala sebagai hasil proses sistem panas bumi ini disebut manifestasi permukaan. Pengamatan manifestasi permukaan merupakan cara untuk mengenali sistem geotermal. Manifestasi permukaan bervariasi luas kenampakannya dan sering mencerminkan kondisi reservoir di bawahnya. Parameter lain yang mengontrol manifestasi permukaan adalah suhu reservoir, tipe fluida, jenis batuan reservoir, dan keadaan sumber panasnya. Keadaan sumber panas adalah yang sangat penting dalam mengontrol terbentuknya manifestasi-manifestasi ini. Sumber panas ini dapat dibagi menjadi: Magma dalam kerak bumi (lokal maupun regional), di dalam kerak bumi non-magmatik, dan aliran panas konduktif.

Secara umum, manifestasi permukaan akan banyak ditemukan apabila suhu sistem geotermalnya tinggi. Sistem panas bumi suhu sedang sampai rendah sedikit sekali menunjukkan manifestasi permukaan bahkan beberapa di antaranya tidak memiliki manifestasi permukaan, manifestasi antara lain adalah:

- Danau Kawah Asam: danau yang berada di dalam kawah gunung berapi, memiliki suhu yang tinggi dan pH air yang rendah (acid). Air dalam kawah ini berasal dari air meteorik yang bercampur dengan air hasil kondensasi uap dan gas-gas magmatik dari dalam gunung api, contohnya seperti di Kawah Ijen, Jawa Timur, danau Linau Lahendong, Sulawesi.
- Fumarol: uap panas (*vapour*) yang keluar melalui celah-celah dalam batuan dan kemudian berubah menjadi uap air (*steam*). Pada mulanya istilah ini digunakan untuk mendeskripsi manifestasi yang mengeluarkan gas vulkanik. Fumarol yang berasosiasi dengan vulkanik-hidrotermal sistem dapat mengeluarkan uap air dengan kecepatan >150 m/s. Uap air ini umumnya mengandung magmatik gas yang sangat agresif seperti HF, HCl dan SO₂. Apabila kandungan SO₂ -nya dominan, maka suhunya dapat mencapai >130 °C.
- Solfatara: Istilah ini diambil dari nama sistem vulkanik-hidrotermal aktif di Italia, yaitu Phlegrean Fieds. Solfatara adalah rekahan dalam batuan yang menyemburkan uap air yang bercampur dengan CO₂ dan H₂S (kadang-kadang SO₂), dan pada sekitar lubang rekahan tersebut

diendapkan sulfur dalam jumlah yang banyak. Endapan sulfurnya dapat ditambang seperti yang terdapat di Kawah Ijen, Jawa Timur.

- Tanah terpanaskan: Apabila uap air yang keluar sedikit jumlahnya dan keluar melalui pori dalam tanah atau batuan, maka terbentuklah tanah terpanaskan, bukan lagi fumarol. Kenampakannya hanya berupa uap putih dan hangat, tidak terdengar bunyi dari tekanan uap yang tinggi seperti pada fumarol.
- Tanah hangat: gas dan uap air yang naik ke permukaan akan menaikkan suhu sehingga di sekitar daerah ini suhunya akan lebih tinggi dari sekitarnya dan juga lebih tinggi dari suhu udara di dekat permukaan bumi kadang-kadang mencapai 30⁰-400⁰ C. Tidak semua manifestasi permukaan yang secara langsung dapat diamati, meskipun demikian, kondisi tumbuhan di sekitar daerah tersebut mungkin akan mengalami kelainan sehingga memperlihatkan kondisi tumbuh-tumbuhan tidak lagi berwarna hijau, tetapi kemerahan atau coklat.
- Mata air panas netral: mata air panas, dengan pH netral atau mendekati netral (pH 6-7). Mata air ini diassosiasikan sebagai keluarnya fluida langsung dari reservoir ke permukaan bumi. Umumnya mengandung ion klorida yang tinggi sehingga sering kali disebut air klorida. Mata air ini memiliki suhu yang tinggi bahkan kadang-kadang sampai mendekati titik didih (>75⁰C). Kenampakan mata air ini sering kali terdapat uap putih yang menunjukkan adanya uap air panas yang disebabkan karena tingginya suhu air. Pada lokasi mata air ini, sering didapati endapan silika sinter dan mineral-mineral sulfida, seperti galena, pyrite, dan lain-lain.
- Mata air panas asam: mata air panas, dengan pH asam (pH < 6) yang terbentuk dari hasil kondensasi gas-gas magmatik dan uap panas di dekat permukaan bumi, kemudian melarut dan bercampur dengan air meteorik. Air ini kemudian keluar menjadi mata air ber-pH asam. Fluida asam ini melarutkan batuan sekitar mata air menjadi partikel kecil terdiri atas silika dan lempung. Apabila partikel ini bercampur dengan air dari mata air, maka akan terbentuk kolam lumpur. Apabila tidak bercampur dengan air, tetapi hanya berupa uap asam panas, maka batuan yang terdisintegrasi ini akan menyebabkan tanah yang membentuk lubang besar.

Pada saat ini teknologi yang hampir wajib dilakukan dalam eksplorasi geotermal adalah MT (metode *magnetotelluric*) atau CSAMT (*control source audio magnetotelluric*). Metode MT memanfaatkan sinyal yang berasal dari

alam, sedangkan CSAMT menginjeksikan arus ke dalam bumi. Hasil data lapangan berupa MT *time series* yang diperoleh dari dua komponen medan listrik (E_x , E_y) dan tiga komponen medan magnet (H_x , H_y , H_z), data yang tercatat selama survei disimpan dalam unit MT dan ditransfer ke unit komputer. MT adalah metode pasif yang mengukur arus listrik alami dalam bumi, yang dihasilkan oleh induksi magnetik dari arus listrik di ionosfer. Metode ini dapat digunakan untuk menentukan sifat listrik bahan pada kedalaman yang relatif besar (termasuk mantel) di dalam bumi. Dengan teknik ini, variasi waktu pada potensi listrik diukur pada stasiun pangkalan dan stasiun survei.

Perbedaan pada sinyal tercatat digunakan untuk memperkirakan distribusi resistivitas listrik bawah permukaan. Teknik prospeksi tahanan listrik untuk menentukan kedalaman formasi batuan sedimen yang berada jauh di dalam bumi dengan cara mengukur tahanan jenis formasi batuan tersebut berdasarkan pengukuran serempak medan listrik dan medan magnet yang beresilasi pada lokasi yang sama, yaitu dengan mencatat rentang frekuensi yang tergantung dari kedalaman sasaran. Model konseptual geotermal dapat digambarkan berupa beberapa lapisan. Lapisan paling atas merupakan lapisan penutup yang ditandai dengan resistivitas tinggi dan suhu sekitar 25 °C. Lapisan berikutnya terdiri atas alterasi *smectite* yang mempunyai resistivitas lebih rendah dan suhu sekitar 70 °C (zona kedap). Lapisan ketiga ditandai oleh adanya lapisan *illite-smectite* (lapisan campuran) yang mempunyai resistivitas terendah (zona kedap) dan suhu sekitar 180 °C. Di bawah lapisan zona impermeable terdapat zona alterasi *propylitic* yang terdiri atas lapisan *illite* murni, *chlorite*, *epidote* dan lain-lain, dengan suhu pembentukan di atas 220°C, lapisan ini yang merupakan reservoir geotermal. Karena metode MT ini sensitif terhadap kontras tahanan jenis yang lazim mengkarakterisasi sistem geotermal, maka metode MT sangat efektif digunakan untuk mendeteksi batuan penutup pada sistem geotermal.

Data dalam bentuk *time series* diubah ke dalam bentuk frekuensi. Tahap berikutnya dilakukan rotasi terhadap *strike* konduktivitas, lalu dilakukan pula *smoothing* dan *editing* untuk meningkatkan kualitas data dan dilanjutkan dengan koreksi statik dengan menggunakan metode geostatistik *Cokriging* untuk menghilangkan efek topografi maupun split antara kurva resistivitas semu modulus TE dan TM. Kemudian dilakukan inversi 1-D dan 2-D.

Metode CSAMT merupakan teknik *sounding* EM dalam domain frekuensi dengan menggunakan sumber buatan berupa arus AC yang diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua kutub atau *loop* horizontal dengan frekuensi 0,125 hz sampai 8192 hz. Pada prinsipnya metode CSAMT sama dengan metode MT/AMT hanya saja keuntungan metode CSAMT berupa sumber sinyal buatan, sehingga kekuatan sinyal serta kestabilan sinyalnya dapat dipertahankan sehingga pengukuran dapat dilakukan setiap saat. Kedalaman deteksi metode ini tidak hanya tergantung pada *skin depth*, tetapi merupakan fungsi resistivitas, noise listrik, dan sensitivitas alat.

Resolusi lateral metode CSAMT bergantung pada panjang/jarak antar-kutub transmitter yang dapat diatur sesuai dengan besarnya target tanpa pengurangan kedalaman penetrasi. Metode CSAMT termasuk dalam metode EM (eletromagnetic) frekuensi rendah yang bersifat quasi-static di mana perubahan kuat medan relatif “hampir” tetap dengan berubahnya waktu. Sumber CSAMT biasanya berupa dipol listrik dengan panjang 1-2 km. Lokasi sumber ideal paling sedikit 4 kali kedalaman kulit. Kedalaman investigasi kira-kira jika offset antara sumber dan penerima. Resolusi lateral dikontrol oleh panjang dipol listrik yang normalnya di antara 10-200 m. Parameter yang diukur dalam metode CSAMT ini adalah komponen kuat medan magnet dan kuat medan listrik yang saling tegak lurus. Dalam praktiknya untuk daerah geotermal yang reservoirnya dalam menggunakan metode MT, sedangkan daerah geotermal yang reservoirnya dangkal sekitar 1200 meter cukup dengan metode CSAMT.

4 MITIGASI BENCANA

Bahaya geologi adalah kejadian alam yang disebabkan oleh proses-proses geologi yang berasal dari dalam bumi akibat tumbukan lempeng benua atau samudra, atau proses geologi yang berasal terjadi di permukaan bumi seperti letusan gunung berapi, longsor, banjir. Proses-proses geologi memengaruhi setiap makhluk hidup di bumi sepanjang waktu, pengaruh tersebut akan sangat diperhatikan apabila menjadi bencana karena menyebabkan kematian penderitaan manusia, kerugian harta benda, sarana prasarana, dan fasilitas umum serta menimbulkan gangguan terhadap tata kehidupan di masyarakat. Gangguan terhadap faktor-faktor di atas yang mengakibatkan dampak negatif pada masyarakat untuk menggunakan sumber dayanya, dengan kata lain mengalami bencana alam.

Berbagai macam bencana geologi gempa bumi, gunung meletus, tsunami berbagai macam gerakan tanah seperti longsor, subsiden dan runtuh batuan dan banjir. Semua proses-proses geologi di atas telah terjadi sepanjang sejarah umur bumi, tetapi proses-proses tersebut menjadi potensi ancaman yang berbahaya jika memberi dampak negatif terhadap kehidupan manusia.

Dalam hal ini hal yang perlu diperhatikan adalah bahwa tidak akan ada bencana alam jika tidak ada manusia yang berada di sekitar proses geologi tersebut. Tanpa kehadiran manusia di dalam proses geologi tersebut, gejala alam yang terjadi hanyalah proses alam biasa, berbeda jika terjadi kerusakan infrastruktur dan korban manusia akan disebut sebagai bencana alam. Masyarakat yang tinggal di daerah yang rentan terhadap proses geologi memiliki risiko tinggi terhadap dampak negatif yang diakibatkannya. Risiko ini dapat diestimasi untuk mengetahui seberapa besar kemungkinan kerusakan dan kerugian yang diakibatkan oleh bencana tersebut. Risiko bencana alam memang tidak dapat dihindari, tetapi dalam banyak hal dapat diketahui atau diprediksi proses-proses yang mengakibatkannya, sehingga kerusakan yang ditimbulkannya dapat diminimalkan. Dalam hal ini ahli geologi berusaha untuk mempelajari fenomena geologi dan kemudian memonitor gejala-gejala alam tersebut untuk dapat memformulasikan suatu tindakan untuk meminimalkan risiko yang diakibatkan oleh bencana alam tersebut. Keseluruhan aktivitas di atas disebut kegiatan mitigasi bencana. Dalam mitigasi bencana geologi kegiatan yang dilakukan usaha yang secara

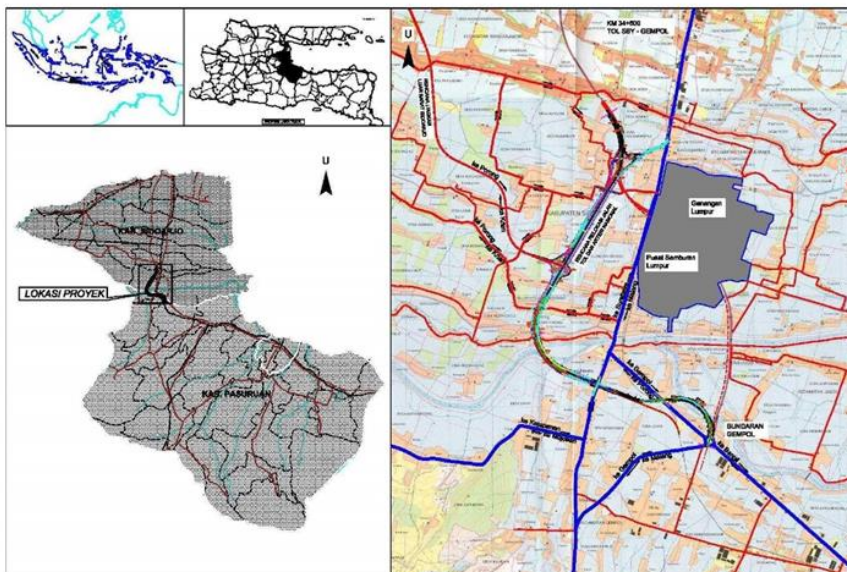
berkelanjutan, bertujuan agar dapat memperkirakan kejadiannya sehingga mitigasinya optimal

Geohazard atau bahaya geologi dapat dibedakan menjadi tiga kategori: (1) Ancaman akibat proses bahaya tektonik, yang meliputi keruntuhan batuan akibat pergerakan sesar, likuifaksi, letusan gunung berapi, dan tsunami. (2) Longsoran yang disebabkan oleh gempa terjadi pada berbagai macam kondisi, misalnya pada lereng-lereng yang terjal atau curam maupun yang hampir datar, pada batuan dasar yang tersingkap di lereng-lereng, pada endapan-endapan yang tidak terkonsolidasi, pada lokasi-lokasi urugan tanah atau bongkah-bongkah, dan hasil buangan di daerah pertambangan, semua dapat terjadi baik dalam kondisi basah atau kering. Beberapa macam longsoran yang dipicu oleh gempa bumi antara lain: guguran batuan, aliran tanah yang cepat dan jatuhnya batuan. Likuifaksi adalah massa yang menyebar dan mengalir bagaikan massa yang jenuh dengan cair mengalir. (3) Guncangan tanah dapat menyebabkan endapan tanah yang tidak mengandung lempung kehilangan kekuatan dan kompetensinya untuk sementara dan berperilaku seperti cairan dengan viskositas tinggi. Biasanya pergeseran tanah atau bangunan sebesar 10 cm telah dianggap sebagai gerakan tanah yang menyebabkan kerusakan. Likuifaksi terjadi pada daerah di mana litologinya didominasi oleh endapan pasir dan lanau dengan ketinggian air tanah yang tinggi. Likuifaksi sangat umum terjadi pada di daerah dengan ketinggian muka air tanah kurang dari 10 m pada endapan berumur Holosen seperti endapan delta, endapan sungai, endapan alur sungai, daerah dataran banjir, dan urugan-urugan yang belum kompak.

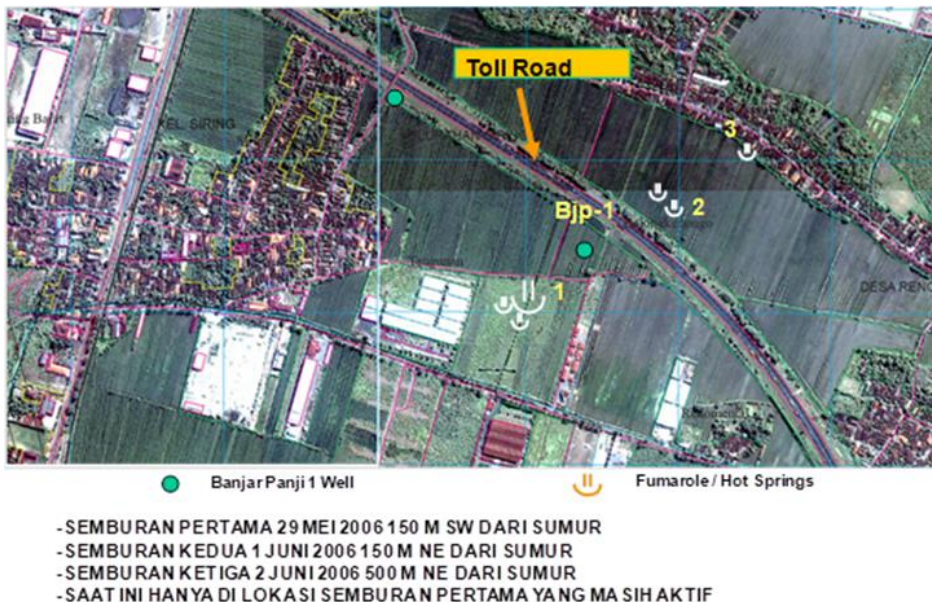
Dalam industri migas dan geotermal sangat masif menggunakan fasilitas permukaan yang mirip, yaitu menggunakan pipa yang menjadi infrastruktur utama untuk mengalirkan minyak atau gas bumi dan uap yang dihasilkan sumur produksi. Ancaman akibat proses geoteknik, seperti gerakan tanah baik di sepanjang jalur pipa (*ROW/Right of Way*), di atas ROW, maupun di bawah ROW, jatuhnya batuan (*rock falls*), dan aliran debris (*debris flow*) dan penurunan (*settlement*). Ancaman akibat proses hidroteknik, meliputi penggerusan, erosi, avulsion, dan longsor. Risiko yang sangat mungkin mengganggu aktivitas kelancaran produksi harus diminimalkan dengan melakukan pemantauan maupun antisipasi dengan penguatan yang dapat menyebabkan terjadinya longsor maupun penggerusan/erosi.

5 LUMPUR SIDOARJO

Permasalahan yang ada di lumpur Sidoarjo sangatlah kompleks karena menyangkut adanya infrastuktur jalan, adanya eksploitasi hidrokarbon, kompleks perumahan, industri, dan jalur pipa gas. Survei lapangan dan analisis geologi dan geofisika yang dilakukan sejak dua minggu dari kejadian semburan lumpur di kawasan Porong, Sidoarjo, Jawa Timur pertama terjadi pada 29 Mei 2006 sekitar 150 meter arah Barat Daya dari sumur pengeboran eksplorasi Lapindo Brantas Banjarpanji-1 (BJP-1) yang sampai saat ini masih aktif. Semburan lumpur kedua dan ketiga terjadi pada tanggal 1 dan 2 Juni 2006 di lokasi yang masing-masing berjarak sekitar 150 m dan 500 m di sebelah Timur Laut dari sumur eksplorasi BJP-1. Semburan kedua dan ketiga kemudian berhenti dalam beberapa hari. Sedangkan semburan lumpur pertama hingga kini masih terus berlangsung. Adapun luas daerah kajian tersebut meliputi area seluas + 25 km² (Gambar 3). Rute terpilih untuk relokasi ruas jalan tol ini terletak di dua kabupaten yaitu Sidoarjo dan Pasuruan dengan posisi di sisi barat dan berada dalam radius 2 km dari pusat semburan lumpur. Lumpur yang keluar semakin lama menggenangi kawasan yang semakin luas, menggenangi persawahan, ladang, pemukiman, dan lain-lain seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



Gambar 3 Lokasi kejadian LUSI (Lumpur Sidoarjo) di Jawa Timur



Gambar 4 Semburan lumpur di Porong Sidoarjo

Terjadinya bencana semburan lumpur panas yang sampai saat ini masih berlangsung di lokasi pemboran minyak PT Lapindo Brantas (EMP) di daerah Sidoarjo telah menyebabkan kelumpuhan sistem transportasi di wilayah tersebut, termasuk di antaranya adalah Jalan Tol Surabaya – Gempol pada ruas Porong-Sidoarjo. Mengingat peran pentingnya keberadaan ruas jalan tol tersebut, maka Pemerintah dalam hal ini Departemen Pekerjaan Umum (PU) telah membentuk dan menugaskan Badan Pelaksana Penanggulangan Lumpur Sidoarjo (BPLS) untuk mengadakan studi relokasi. Adapun dokumen yang sudah tersedia adalah:

- Penetapan rute *alignment* relokasi jalan tol terpilih oleh Departemen PU;
- *Detailed Engineering Design* (DED) Relokasi Jalan Tol Surabaya – Gempol (Segmen Porong – Gempol) oleh PT Virama Karya (Persero) pada Bulan Desember 2007;
- Laporan AMDAL Relokasi Jalan Tol Surabaya – Gempol (Segmen Porong – Gempol) dan Jalan Arteri Raya Porong oleh PT Virama Karya (Persero) pada Bulan September 2008.

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan oleh Tim Geologi BPLS dalam Laporan AMDAL berdasarkan data sebaran bualan (*bubble*) per Mei 2008, disimpulkan bahwa lokasi rencana relokasi jalan tol berada pada Zona

Kerentanan Deformasi Rendah, tetapi tidak menutup kemungkinan untuk terjadinya deformasi akibat efek langsung dari wilayah zona sebelumnya. Disebutkan pula bahwa di lokasi tersebut kemungkinan masih akan ditemui munculnya bualan aktif terutama pada lokasi 2 km dari tanggul lumpur sisi barat karena diperkirakan berkaitan dengan sumber gas yang relatif berada di sebelah barat daerah penelitian. Dari kesimpulan kajian tersebut, apabila relokasi jalan tol dilaksanakan maka masih terdapat risiko operasional berupa kemungkinan terjadinya kerusakan konstruksi (badan jalan atau bangunan struktur) jalan tol akibat deformasi maupun gangguan lainnya akibat timbulnya semburan gas.

Mengingat besarnya biaya investasi untuk relokasi tersebut serta masih adanya risiko operasional, maka perlu dilakukan Kajian Geologi dan Geofisika yang lebih rinci yang hasilnya dapat digunakan untuk melakukan *assesment* risiko secara lebih terukur, untuk memastikan pengaruh semburan gas terhadap keamanan konstruksi pada Trase bersama Relokasi Jalan Tol Porong – Gempol sesuai usulan BPLS, serta lokasi trase yang aman terhadap pengaruh semburan gas apabila trase relokasi tersebut dinilai tidak aman.

Dilakukan kajian yang terintegrasi untuk menentukan seberapa besar dan luas pengaruh Lumpur Sidoarjo pada rencana relokasi Tol Porong. Kajian terhadap laporan-laporan penelitian geologi dan geofisika (baik yang diterbitkan ataupun yang tidak diterbitkan) diperlukan untuk memastikan tingkat kerentanan daerah tersebut.

6 METODE PENELITIAN LAPANGAN

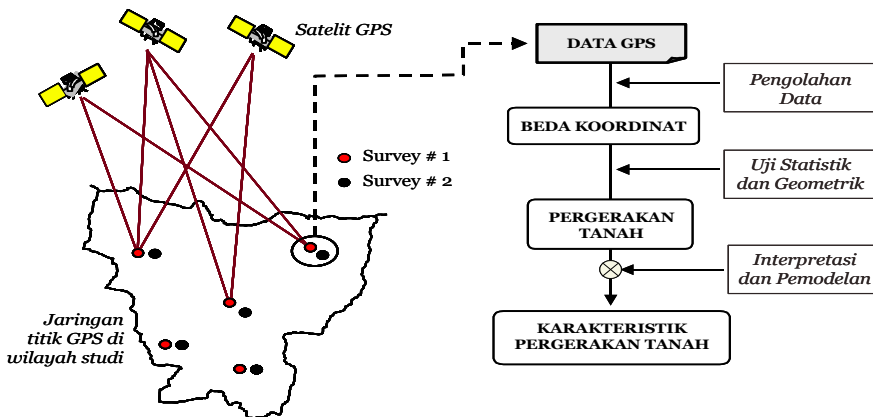
Hal utama yang sangat diperhatikan dalam eksplorasi adalah tempat/koordinat pengamatan atau pengukuran dilakukan, karena sebaik apapun data yang didapatkan jika lokasinya tidak diketahui dengan pasti tidak akan bermanfaat. Pengamatan atau pemantauan deformasi (horizontal dan penurunan) menggunakan teknologi GPS (*global positioning system*), yaitu membandingkan dua nilai koordinat yang diperoleh dari hasil survei GPS pada kala atau periode yang berbeda. Dari hasil perbandingan kedua nilai koordinat tersebut, adanya perbedaan nilai menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi. Hal yang terpenting dari konsep ini, yaitu bagaimana kita memperoleh ketelitian koordinat yang baik. Pada konteks studi deformasi (misal contoh kasus pergerakan tanah) dengan metode survei GPS, ada beberapa keunggulan dan keuntungan yang ditawarkan, yaitu:

- GPS memberikan nilai vektor pergerakan tanah dalam tiga dimensi (dua komponen horizontal dan satu komponen vertikal). Jadi di samping memberikan informasi tentang besarnya penurunan muka tanah, GPS juga sekaligus memberikan informasi tentang pergerakan tanah dalam arah horizontal (Gambar 5).
- GPS memberikan nilai vektor pergerakan tanah dalam suatu sistem koordinat referensi yang tunggal. Dengan itu maka GPS dapat digunakan untuk memantau pergerakan suatu wilayah secara regional secara efektif dan efisien.
- GPS dapat memberikan nilai vektor pergerakan dengan tingkat presisi sampai beberapa mm, dengan konsistensi yang tinggi baik secara spasial maupun temporal. Dengan tingkat presisi yang tinggi dan konsisten ini maka diharapkan besarnya pergerakan tanah dalam arah horizontal dan vertikal yang kecil sekalipun akan dapat terdeteksi dengan baik.
- GPS dapat dimanfaatkan secara kontinu tanpa tergantung waktu (siang maupun malam), dalam segala kondisi cuaca. Dengan karakteristik semacam ini maka pelaksanaan survei GPS untuk studi pergerakan tanah dapat dilaksanakan secara efektif dan fleksibel.

Pada survei GPS untuk pemantauan deformasi, satu titik ditempatkan sebagai titik referensi yang bersifat stabil, yang akan digunakan untuk memantau pergerakan titik-titik lainnya yang tersebar di area yang diduga

mengalami deformasi. Untuk kasus penelitian di Porong Sidoarjo, titik referensi diletakkan di kantor BPLS sekitar 20 kilometer dari daerah survei deformasi. Sementara itu titik-titik pantau deformasi di sebar di sekitar sebelah barat semburan lumpur panas (Total sekitar 50 titik pantau dengan 8 di antaranya berupa titik pantau baru), termasuk sekitar rencana relokasi jalur TOL Porong Sidoarjo, yang diduga ikut sebagai daerah terdeformasi. Ilustrasi dapat dilihat pada (**Error! Reference source not found.6**) di bawah ini.

Gambar 5 Konfigurasi jaringan pengukuran GPS



Gambar 6 Prinsip studi Pergerakan Tanah dengan Survei GPS

Pelaksanaan survei GPS untuk memantau pergerakan tanah di sekitar semburan lumpur Porong dan khususnya di sekitar rencana jalur baru Tol Porong Sidoarjo melalui kerjasama LAPI ITB dengan Jasamarga pada tahun 2009, telah dilakukan tahapan-tahapan pekerjaan di antaranya perencanaan dan persiapan, kemudian survei lapangan, yaitu pada Mei dan Agustus 2009,

dengan masing-masing kegiatan lapangan berupa pengamatan sekitar 50 titik pantau yang telah ada sebelumnya, serta mencari titik-titik baru untuk dijadikan stasiun pemantauan baru khususnya di sekitar jalur rencana Tol baru Porong Sidoarjo. Lama pengamatan GPS di setiap stasiun pengamatan untuk memantau pergerakan tanah di sekitar semburan lumpur Porong dan khususnya di sekitar jalur baru Tol Porong Sidoarjo ini secara umum sekitar 8 sampai 12 jam. Titik referensi BPLS dalam pekerjaan ini dianggap sebagai titik stabil yang tidak terpengaruh oleh fenomena pergerakan tanah di sekitar Porong Sidoarjo dan juga koordinatnya diketahui secara teliti. Sampai saat ini data-data hasil survei lapangan telah dikumpulkan dan dibuat basis datanya dengan baik. Data-data penunjang seperti informasi orbit teliti, informasi Earth Rotation Parameter, dan lain-lainnya dikumpulkan, kemudian dilakukan pengolahan data.

Pemetaan geologi permukaan dilakukan untuk mengetahui jenis batuan dan struktur geologi yang ada di lokasi penelitian. Pemetaan ini juga berguna untuk mengetahui pengaruh struktur geologi dan jenis batuan terhadap pergerakan tanah di lokasi penelitian. Pemetaan geologi teknik dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari fenomena geologi terhadap bangunan teknik di lokasi penelitian. Survei lapangan dilakukan pada tempat-tempat yang diperkirakan mempunyai kerentanan tinggi terhadap bahaya geologi. Secara garis besar, survei lapangan terdiri atas:

- Pengamatan dan Pemetaan Kondisi Geologi dan Sifat Tanah.
- Pemboran geologi teknik
- Paritan (*Trenching*)
- Pemeriksaan laboratorium

Penelitian lebih mendetail akan dilakukan terutama di lokasi tempat Rencana Relokasi Jalan Tol akan dibangun. Di daerah tersebut akan dilakukan analisis geoteknik dan akan dipetakan dengan bantuan data dari GPS. Penentuan lokasi melalui orientasi lapangan dan pengukuran koordinat dengan menggunakan GPS handheld. Pengamatan terhadap akibat dari fenomena geologi yang terjadi pada daerah penelitian (**Error! Reference source not found.**) dapat diindikasikan dari adanya pergerakan tanah, retakan bangunan, pembelokan rel kereta dan lain-lain, pada daerah-daerah tertentu dilakukan pemetaan detail. Fokus daerah pemetaan adalah area sekitar radius 2,5 hingga 3,5 km dari pusat semburan.

Pemboran dilakukan di titik-titik yang bertujuan untuk mengetahui jenis batuan dan lapisan tanah di daerah penelitian. Analisis dari hasil pemboran juga digunakan untuk mengetahui penyebaran dari batuan dan korelasinya terhadap hasil dari pemetaan di permukaan. SPT tes dilakukan terhadap sampel dari batuan dilakukan setiap 5 meter kedalaman.



Gambar 7 Fenomena Geologi yang terjadi pada daerah penelitian

Kegiatan yang dilakukan pada tahap ini adalah membuat paritan sepanjang 2 – 5 meter dengan kedalaman 1 - 3 meter dan lebar 1 - 2 meter di dua titik yang di indikasikan daerah sesar. Paritan dilakukan untuk mengetahui jenis dan aktivitas sesar tersebut. Pada tahap ini dilakukan pula pengambilan sampel untuk dilakukan tes laboratorium. Paritan ini juga diperlukan untuk mengetahui penyebaran dari batuan dan jenis tanah di daerah penelitian.

Sampel tanah dikirimkan untuk diperiksa Laboratorium Mekanika Tanah. Pada tanah lunak dan kohesif, dengan kepadatan lepas sampai medium, dilakukan dengan menggunakan tabung tipis dengan tujuan untuk pemeriksaan *Index, Engineering Properties*.

Geolistrik adalah sebuah metode dalam ilmu geofisika yang digunakan untuk eksplorasi penyelidikan objek bawah permukaan/objek dan kondisi geologi berdasarkan sifat kelistrikan atau dari objek tersebut sehingga afektivitas metode ini bergantung pada kontras nilai resistivitas/hambatan jenis elektrik dari objek bawah permukaan. Survei geolistrik dilakukan

dengan menginjeksikan arus listrik (I) searah (DC) ke dalam tanah melalui dua elektroda dan mengukur responsnya berupa beda potensial (ΔV) pada dua elektroda yang lain. Dengan susunan elektroda tertentu diperoleh parameter fisis tahanan-jenis semu pada kedalaman yang sesuai dengan konfigurasi elektroda tersebut. Informasi mengenai distribusi tahanan-jenis di bawah-permukaan bumi berkaitan erat dengan jenis batuan dan kondisinya.

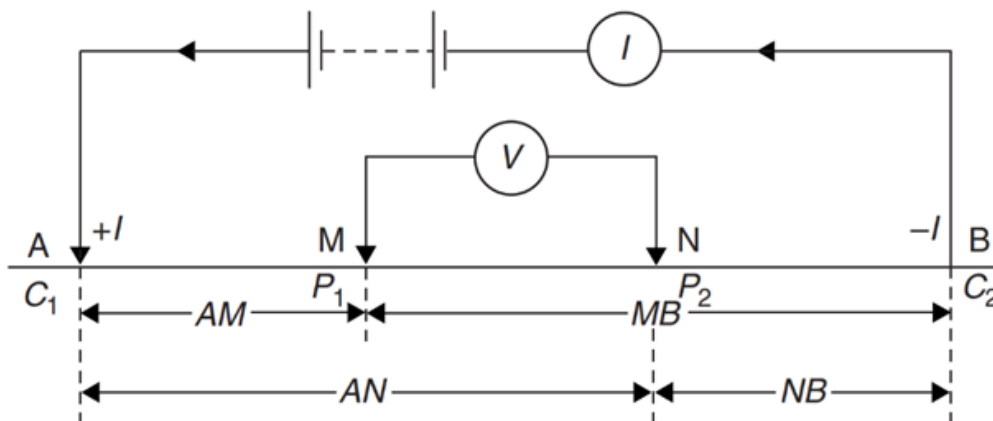
Alat ukur geolistrik mutakhir yang menggunakan teknologi mikro-prosesor dan dilengkapi dengan perangkat lunak pemodelan/simulasi numerik memungkinkan perolehan data secara otomatis dan cepat untuk keperluan pencitraan konduktivitas bawah-permukaan. Hasil pengukuran geolistrik dapat digunakan untuk identifikasi struktur yang dangkal. Instrumen yang digunakan dalam kegiatan survei geolistrik adalah *resistivity-meter* yang memiliki kemampuan untuk menginjeksikan arus listrik, dan sekaligus mengukur potensial listrik yang ditimbulkan dari injeksi arus tersebut.

Skema pengukuran resistivitas utama dalam survei Geolistrik adalah instrumen *resistivity-meter* yang terhubung ke sumber listrik berupa Accu 12 volt, menghantarkan listrik yang mengalir melalui kabel yang terhubung ke elektroda batang baja yang tertancap di permukaan tanah. Arus listrik (I) yang keluar dari elektroda mengalir ke dalam tubuh bumi diukur nilai arusnya dan nilai tegangan potensial (V) yang terbentuk juga diukur oleh alat *resistivity-meter*.

Pengukuran tahanan jenis pada umumnya dengan menggunakan susunan empat elektroda terminal. Sepasang elektroda dipakai untuk menginjeksikan arus ke dalam tanah dan sepasang elektroda lain untuk mengukur beda potensial yang ditimbulkannya. Secara garis besar ada dua teknik yang dipakai, bergantung pada tujuan pengukuran yaitu: *Vertical Electrical Sounding* (VES), untuk mendapatkan informasi variasi tahanan jenis listrik secara vertikal terhadap kedalaman, di bawah suatu titik dipermukaan. Dalam teknik ini jarak antara elektroda secara bertahap ditambah. Dengan spasi elektroda yang lebih lebar, maka efek material pada kedalaman yang lebih besar akan terlihat, yaitu sekitar sepertiga jarak pisah elektroda arus. *Electrical mapping* atau *profiling*, untuk mendapatkan informasi distribusi tahanan jenis listrik secara lateral, yang biasanya diasosiasikan dengan struktur korok atau sesar.

Dalam teknik ini jarak antar-elektroda tetap, dan elektroda secara keseluruhan dipindahkan sepanjang garis lurus.

Pengambilan data dengan metode Wenner dilakukan dengan menyusun elektroda-elektroda arus dan elektroda potensial dalam satu garis lurus yang mempunyai jarak sama (Gambar 8).



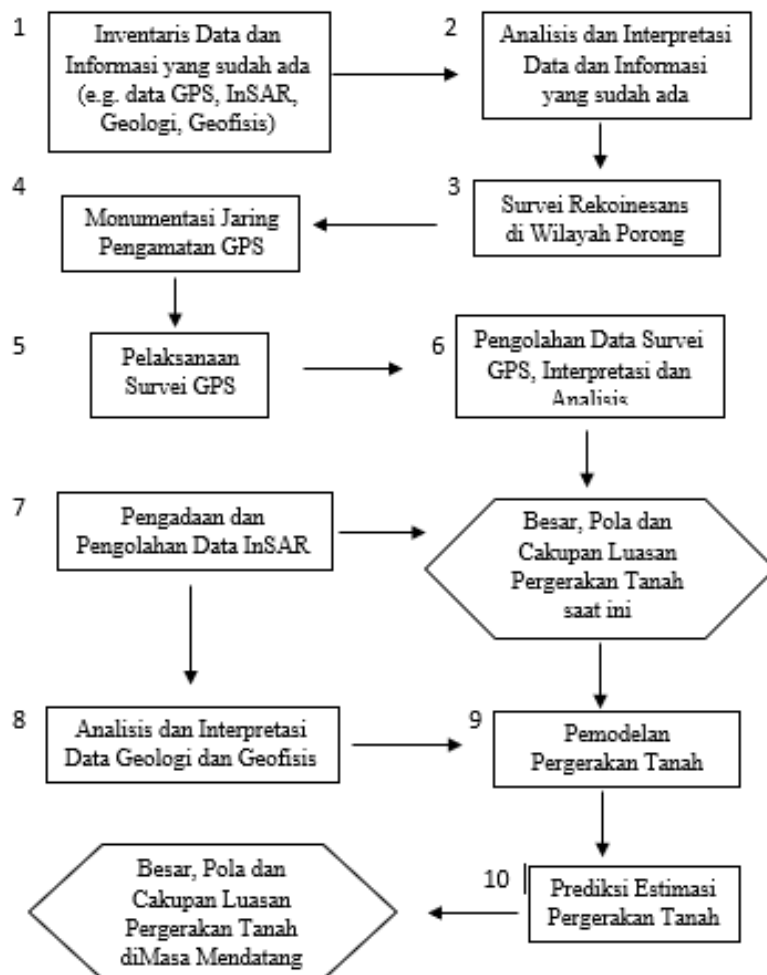
Gambar 8 Konfigurasi Wenner

Keterangan :A & B : elektroda arus, M & N : elektroda potensial, a : spasi elektroda (m)

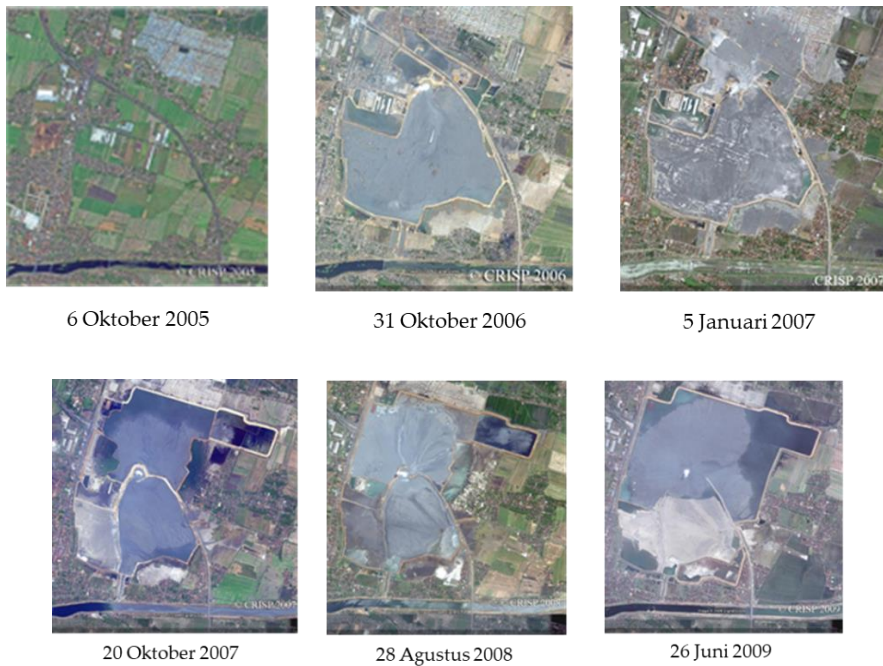
Interpretasi data dilakukan dengan menggunakan metode inversi 2D menggunakan perangkat lunak *Res2Dinv* yang didukung oleh data sumur sebagai pembanding dalam menentukan korelasi resistivitas dengan litologi sebenarnya. Pengukuran geolistrik akan dilakukan di daerah studi untuk mendukung analisis geologi. Geolistrik 2D dengan menggunakan alat multi elektroda akan digunakan dengan bentangan kabel terpanjang ± 300 m dan interval setiap elektroda 5-10 m. Dengan konfigurasi wenner. Target penetrasi diharapkan mampu mencapai 60 meter. Letak posisi line geolistrik di tentukan oleh geologist setelah dilakukan pemetaan. Adapun secara keseluruhan kegiatan penelitian akan mengikuti alur seperti pada (Gambar 9).

Semburan lumpur panas ini terjadi tidak jauh dari aktivitas pemboran (eksplorasi) minyak dan gas bumi yang dilakukan PT Lapindo Brantas. Semburan lumpur panas kian menjadi dan menyebabkan wilayah sekitarnya terendam luapan lumpur. Kawasan pemukiman, sarana umum dan fasilitas vital seperti seperti pabrik-pabrik, jalur pipa gas, jalan kereta api dan jalan tol sampai dengan radius sekitar lebih dari dua kilometer dari pusat semburan lumpur panas bahkan kini hilang terendam luapan lumpur tersebut. Bukti

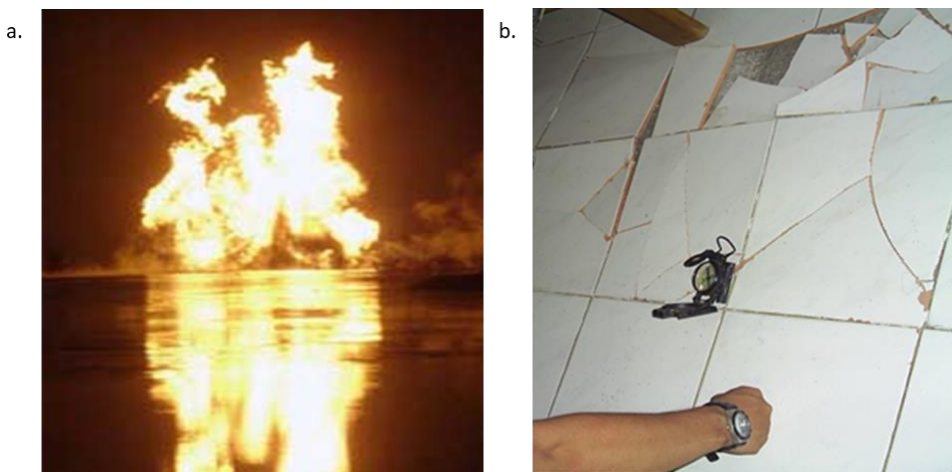
fisik di lapangan dari efek deformasi sudah nyata terlihat di antaranya ledakan pipa gas Pertamina pada tanggal 22 November 2006, retakan-retakan pada bangunan, tanggul dan jalan, serta pembengkokan jalur rel kereta di desa Jatirejo.



Gambar 9 Alur kegiatan penelitian



Gambar 10 Perkembangan genangan lumpur di Porong Sidoarjo



Gambar 11 (a) Ledakan pipa gas pada tanggal 22 November 2006, (b) retakan pada bangunan

Volume lumpur yang korokluarkan semula berkisar antara ± 50.000 - 155.000 m^3 (data Perkindo, 12 Sep 2006) per hari. Perkembangan penyebaran lumpur sebelum kejadian sampai dengan setelah 3 tahun kemudian diperlihatkan oleh Gambar 10. Terjadi penurunan volume semburan sekitar $\pm 100.000 \text{ m}^3$ per hari (BPLS, 2009). Morfologi daerah penelitian adalah berupa

dataran dengan Gunung Penanggungan dan Bukit Watukosek di daerah Selatan Kali Porong atau berada di selatan daerah penelitian. Menurut penelitian sebelumnya secara umum daerah penelitian terdiri atas endapan aluvial, breksi vulkanik Gunung Penanggungan dan Formasi Pucangan. Endapan Aluvial mempunyai ukuran butir dari lempung hingga kerakal. Breksi vulkanik merupakan batuan hasil dari endapan gunung berapi. Ukuran butir dari lempung hingga kerakal dengan bentuk butir yang menyudut. Formasi Pucangan terdiri atas breksi, batu pasir tufaan bersisipan lempung dan konglomerat. Umur batuan di lokasi adalah Plistosen hingga Holosen atau 1,8 juta tahun sampai 10.000 tahun yang lalu.

Dari Peta Geologi lembar Malang (Santosa & Suwardi, 1992) di daerah penelitian tidak terdapat struktur geologi. Namun dari Citra Satelit terlihat adanya pembelokan Kali Porong secara tiba-tiba yang mengindikasikan adanya struktur Geologi yang terdapat di daerah Penelitian berupa Sesar yang mempunyai arah relatif Timur Laut-Barat Daya. Terjadinya pergerakan tanah, baik dalam arah horizontal maupun vertikal, di kawasan semburan lumpur Sidoarjo, adalah sesuatu hal yang teramati. Pergerakan tanah di kawasan Porong Sidoarjo ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor secara bersama-sama, yaitu: proses relaksasi tanah (*ground relaxation*) akibat keluarnya lumpur ke permukaan tanah dalam volume yang sangat besar; beban dari lumpur; pemampatan tanah (*land settlement*) karena adanya pekerjaan dan aktivitas di permukaan tanah, seperti pembuatan tanggul, kendaraan-kendaraan berat yang berlalu lalang, dan lain-lainnya; dan/atau mungkin aktifnya kembali struktur geologi, seperti sesar Watukosek yang melalui kawasan lumpur tersebut, juga akibat dari proses produksi dari sumur eksplorasi di wilayah tersebut. Gambar 11 adalah terjadinya kebakaran pipa gas yang dipengaruhi oleh aktivitas penurunan dan gerakan tanah yang terjadi di sekitar lokasi semburan lumpur.

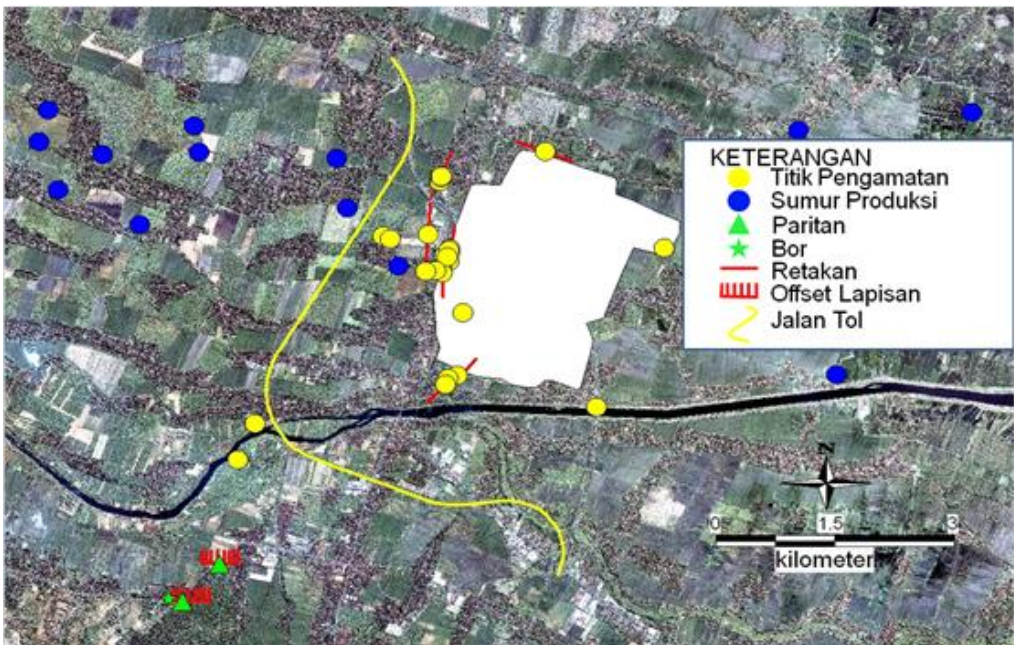
Dari berbagai diskusi para ahli geologi, baik di IAGI Net maupun di berbagai forum yang membahas mengenai banjir lumpur Sidoarjo, belum terdapat kata sepakat mengenai penyebab terjadinya banjir lumpur ini. Sebagian ahli geologi berpendapat bahwa banjir lumpur ini diakibatkan oleh adanya lapisan *over pressure* dan *under compacted clay* yang keluar ke permukaan karena di-*trigger* oleh pemboran sumur Banjar Panji #1. Pembentukan lapisan *over pressured* di daerah Sidoarjo ini juga masih merupakan perdebatan. Sebagian ahli geologi berpendapat bahwa lapisan

over pressured ini diakibatkan oleh adanya proses sedimentasi yang cepat yang mengakibatkan air tanah yang terkandung dalam sedimen tidak sempat keluar, sehingga lapisan tersebut gagal untuk mengalami proses kompaksi (*under compacted*). Sementara itu, sebagian ahli geologi yang lain berpendapat bahwa proses *over pressured* ini diakibatkan oleh *tectonic stress*. Berbagai pendapat tersebut masih merupakan dugaan, yang belum dibuktikan oleh penelitian yang mendalam. Sebenarnya selain oleh proses sedimentasi yang cepat dan *tectonic stress*, masih terdapat penyebab-penyebab lain terjadinya *over pressured*, seperti *hydrocarbon generation*, *aquathermal compression*, dan ada juga yang menyatakan akibat aktivitas pemboran yang dilakukan. Pendapat mengenai gempa Yogyakarta yang terjadi sebelum kejadian semburan, memicu Sesar Watukosek (Mazzini, 2007), hal ini didukung oleh beberapa hasil analisis data geologi permukaan dan bawah permukaan yang dapat menghubungkan antara fenomena geologi permukaan disekitar area semburan Lumpur Sidoarjo dan Struktur Geologi bawah permukaan (pembelokan kali Porong). Jika diperhatikan memang di daerah Jawa Timur terlihat adanya kejadian di masa yang lampau yang mirip dengan apa yang terlihat di sekitar sumur banjarpanji, hanya saja beda waktu kejadiannya tidak koroktahui dengan pasti.

Mengingat kondisi lapangan yang tergenang lumpur dan air alat transportasi untuk pengambilan data gravitasi pada saat menggunakan *hovercraft* yang ukuran kecil kapasitas 3 orang. Demikian juga pada saat itu untuk mengamati pengamatan udara digunakan pesawat *aeromodeling* yang dilengkapi kamera dan GPS, di mana hasil pemotretan yang dilakukan disusun sedemikian rupa untuk dapat memperkirakan volume lumpur yang keluar. Pada saat itu 2 minggu setelah kejadian dengan cara memanfaatkan foto udara dapat diketahuin penyebaran lumpur dan konfirmasi ketebalannya di darat dengan menggunakan tusukan bambu dapat diketahui bahwa volume yang keluar setiap hari sektar 50,000 meter kubik.

7 PENGAMATAN GEOLOGI PERMUKAAN

Data geologi permukaan meliputi data sebaran gelembung/bualan (*bubble*) dan data sebaran rekahan. Survei geologi dilakukan untuk mengetahui keadaan geologi dari daerah penelitian yang berhubungan dengan keberadaan rencana Relokasi Jalan Tol Porong-Gempol. Survei ini menghasilkan Peta Lokasi Titik Pengamatan, Peta Geomorfologi dan Peta Geologi. Peta Lokasi Titik Pengamatan dilakukan dengan cara mencari singkapan batuan segar, memetakan fenomena geologi yang ada di daerah penelitian dan memetakan kerusakan bangunan yang diakibatkan oleh fenomena geologi yang ada di daerah penelitian. Di daerah penelitian sulit didapatkan singkapan batuan yang segar karena lapisan aluvial yang cukup tebal, tingkat pelapukan yang tinggi dan dinding sungai yang sudah dibuat permanen (*Retaining wall*). Dari Peta Lokasi Titik Pengamatan ini kita dapat membuat Peta Morfologi dan Peta Geologi daerah penelitian diperlihatkan oleh (Gambar 12).

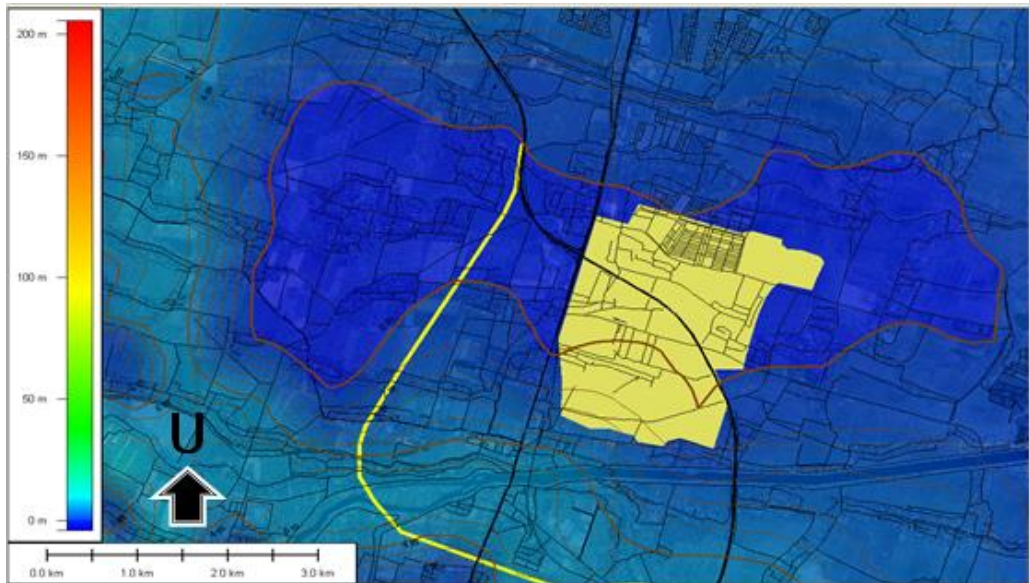


Gambar 12 Peta lokasi titik pengamatan

Morfologi menunjukkan bentuk permukaan bumi saat ini yang merupakan hasil dari proses geologi yang telah berlangsung selama jutaan

tahun. Peta Morfologi dapat menunjukkan keberadaan struktur geologi yang ada di daerah penelitian. Berdasarkan peta topografi lokasi pada umumnya cukup landai. Daerah biru tua (Gambar 13) menunjukkan elevasi rendah dibanding daerah sekitarnya.

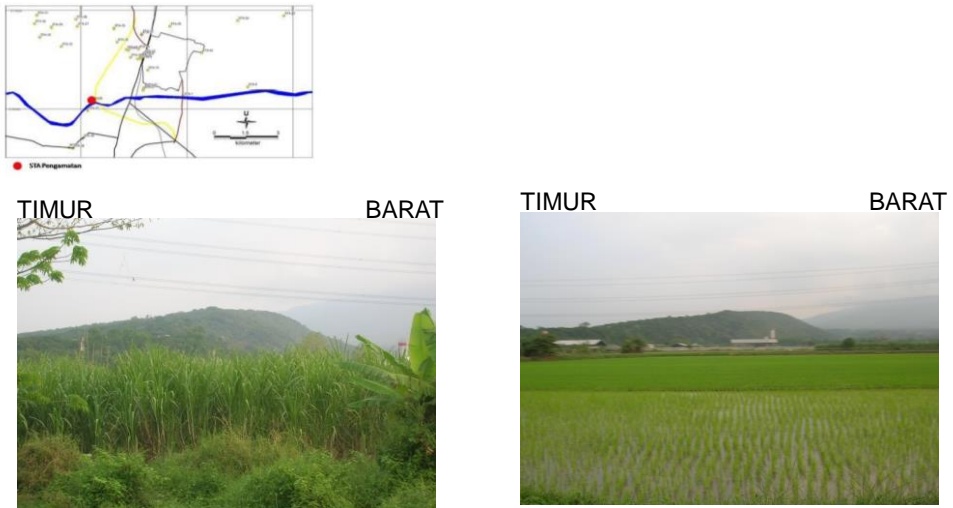
Pembelokan Sungai Porong dan Sungai Alo secara tiba-tiba menunjukkan adanya struktur geologi berupa sesar di daerah penelitian. Perbukitan di selatan daerah penelitian merupakan Perbukitan Hogback. Perbukitan Hogback adalah bentuk morfologi yang menunjukkan adanya struktur geologi berupa sesar.



Gambar 13 Peta topografi

Morfologi (Gambar 14) di daerah penelitian sebagian besar adalah Dataran Aluvial dengan Perbukitan terdapat di bagian Selatan. Sungai yang ada di daerah Penelitian adalah Sungai Porong di sebelah Selatan dan Sungai Alo di sebelah Utara. Peta geologi menunjukkan penyebaran dari batuan dan struktur geologi yang ada di daerah penelitian. Geologi daerah penelitian didominasi oleh Endapan Aluvial dan Batuan Breksi Vulkanik di sebelah Selatan daerah penelitian. Endapan Aluvial adalah batuan yang terbentuk di lingkungan sungai sampai delta atau yang berasosiasi dengan air yang mengalir. Endapan ini dapat juga terbentuk dari endapan banjir dari sungai. Di daerah penelitian Endapan ini terdiri atas lempung, pasir kerikil dan kerakal. Masa dasar terdiri atas pasir dengan fragmen berupa batuan beku dengan bentuk membulat.

Umur dari endapan ini adalah *Recent* atau 10.000 tahun yang lalu sampai sekarang.



Gambar 14 Morfologi perbukitan *Hogback*, dilihat dari STA 28 ke arah selatan

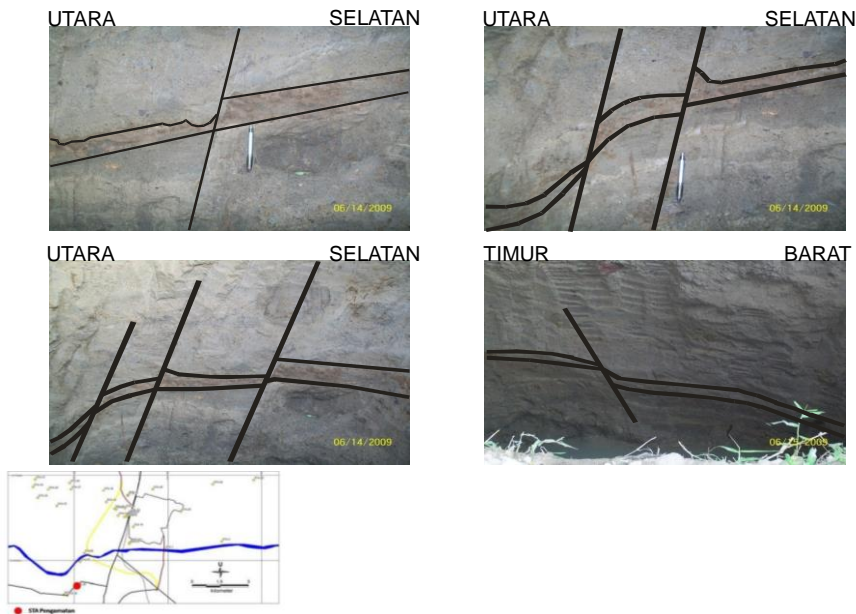
Batuan Breksi Vulkanik adalah batuan yang terbentuk dari endapan gunung berapi. Material yang membentuk batuan ini adalah yang berasosiasi dengan batuan gunung api (vulkanik). Bentuk fragmen dari batuan ini menyudut. Breksi vulkanik di daerah penelitian terbentuk dari hasil endapan letusan Gunung Penanggungan. Masa dasar batuan ini adalah batu pasir tufaan. Fragmen batuan ini berukuran kerikil, kerakal hingga Boulder dengan bentuk menyudut. Fragmen batuan adalah batuan beku andesit. Umur dari batuan ini diperkirakan adalah Plistosen atau 1,78 juta tahun yang lalu. Dalam ilmu geologi, sesar adalah retakan batuan yang menunjukkan adanya pergerakan relatif. Sesar diakibatkan karena adanya gaya pada batuan. Apabila dalam skala yang besar, sesar dapat mengakibatkan gempa bumi.

Struktur geologi di daerah penelitian adalah sesar geser Sinistral (ke arah kiri) dengan kecenderungan Utara-Selatan. Bukti dari sesar ini terlihat dari bentuk morfologi dan adanya *offset* perlapisan di paritan (Gambar 15 dan 16). Sesar ini sudah tidak aktif lagi. Ini terlihat dari tidak adanya endapan aluvial yang terpotong oleh sesar ini.

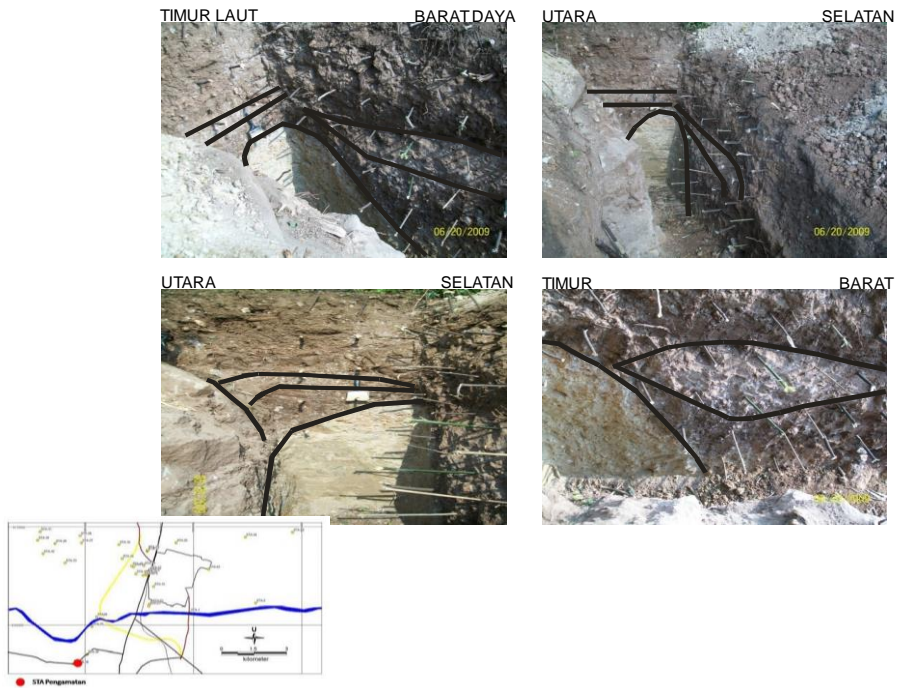
Sesar ini membentuk suatu Zona Lemah. Di dalam zona ini banyak terdapat kekar yang terbentuk akibat dari pergerakan sesar. Berkembangnya retakan di Zona Lemah diakibatkan oleh Fenomena Geologi yang terjadi di

daerah ini, yaitu semburan lumpur. Semburan lumpur ini menyebabkan subsiden yang memicu berkembangnya/terbukanya retakan di Zona Lemah.

Dari Retakan yang terbentuk di Zona Lemah ini dapat keluar Gas, Air atau Lumpur tapi bisa juga tidak terjadi apapun (hanya retakan akibat terjadinya subsiden setempat, Gambar 17 dan 18). Kecenderungan berkembangnya retakan adalah ke arah Barat dan Barat Laut pusat semburan atau ke arah rencana relokasi jalan tol.



Gambar 15 Pada lokasi Paritan 1, menunjukkan adanya indikasi Sesar berupa *offset* pelapisan arah bidang *offset* cenderung Barat - Timur



Gambar 16 Pada lokasi Paritan 2 menunjukkan adanya indikasi sesar berupa offset pelapisan arah bidang offset cenderung Barat - Timur



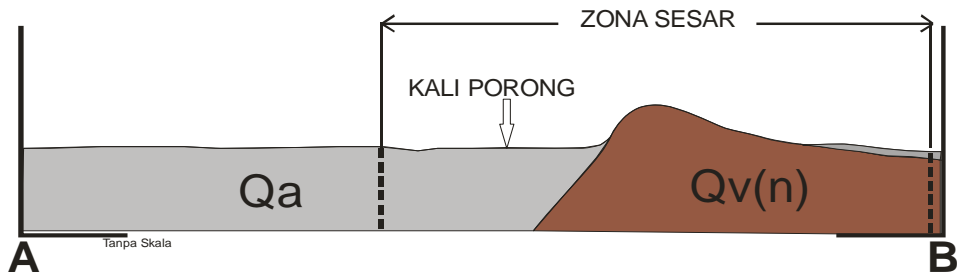
Gambar 17 Retakan bangunan di STA 19, arah retakan cenderung Utara – Selatan



Gambar 18 Bualan keluar di sepanjang sungai dan di halaman rumah penduduk dimanfaatkan untuk memasak

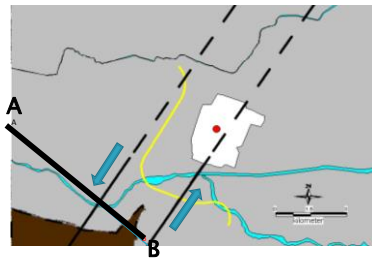
Berkembangnya retakan ini di kontrol oleh Zona Sesar dan jenis batuan di daerah ini. Retakan tidak berkembang ke arah Timur pusat semburan dikarenakan tidak ada Zona Lemah di daerah tersebut. Retakan juga tidak berkembang ke arah Selatan pusat semburan dikarenakan jenis batumannya lebih keras, yaitu Breksi Vulkanik Gunung Penanggungan (Gambar 19). Dari Peta Geologi J. Duyfjes 1938 (Gambar 20), tercatat bahwa di daerah Kalang Anyar atau sebelah Selatan Bandara Juanda Surabaya telah terjadi semburan lumpur yang berlangsung sampai saat ini.

Apabila kita menarik garis dari pusat semburan Porong ke daerah Kalang Anyar, terlihat adanya kesesuaian arah dengan zona sesar di lokasi penelitian. Dapat dipastikan bahwa saat kejadian munculnya semburan lumpur di daerah tersebut tidak ada kegiatan pemboran eksplorasi yang dilakukan.

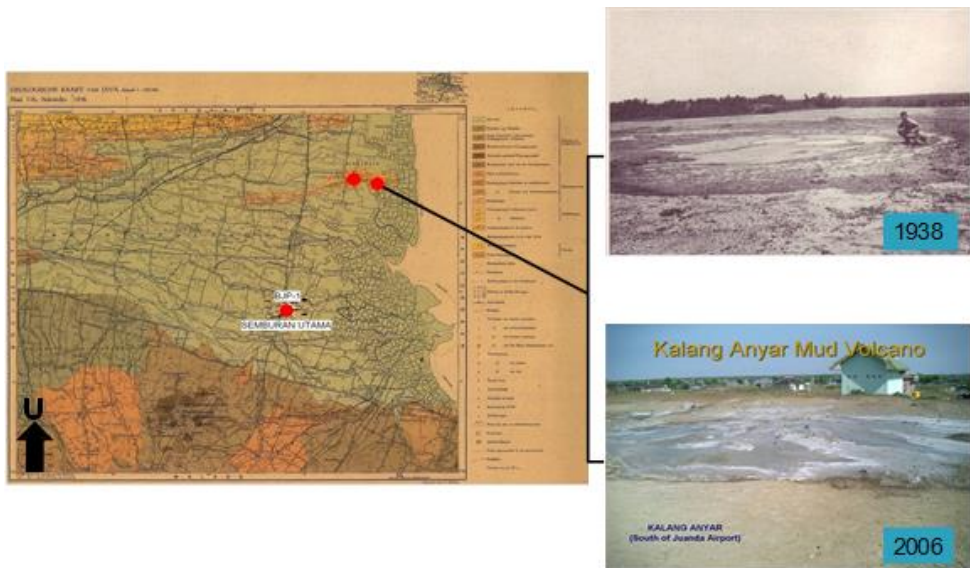


KETERANGAN

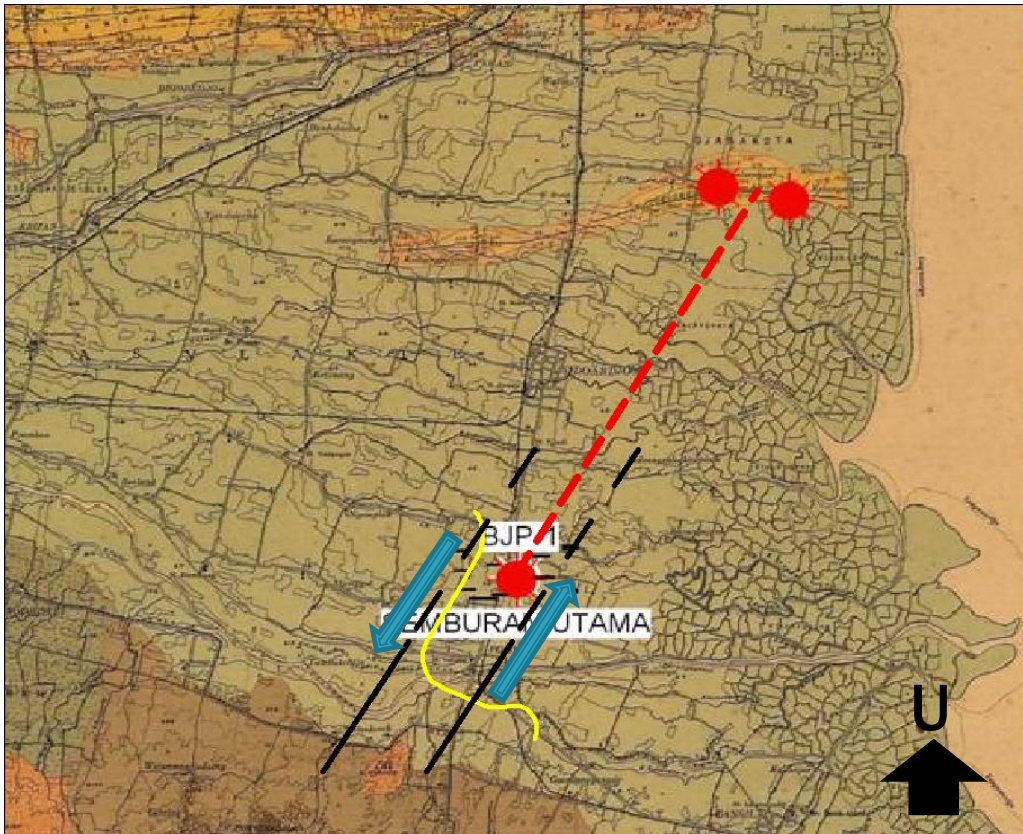
- Qa : Endapan Aluvial
Terdiri dari lempung, batupasir, kerikil dan kerakal
- Qv(n) : Breksi Vulkanik Gunung Penanggungan
Terdiri dari lava, tuf, breksi tufaan, aglomerat dan lahar
- === Zona Sesar



Gambar 19 Peta Geologi

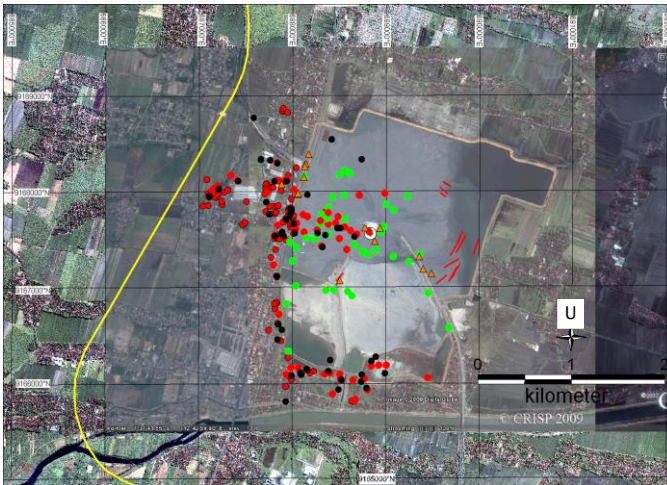


Gambar 20 Peta Geologi 1938, J Duyfjes



Gambar 21 Kesesuaian arah zona sesar

Berdasarkan data BPLS, per 7 Juni 2009, sekurang-kurangnya telah terjadi 116 buah bualan sejak terjadinya luapan LUSI. 50 buah di antaranya sudah dinyatakan tidak aktif, sisanya masih aktif. Hampir semua (90%) bualan keluar dari retakan tanah hingga sulit ditangani. Dari sumber informasi lain ternyata masih banyak bualan-bualan yang belum terpetakan terutama bualan-bualan yang muncul di awal-awal kemunculan LUSI. (Gambar 21) memperlihatkan beberapa titik kemunculan bualan yang pernah terpetakan. Selain kemunculan bualan, muncul pula fenomena-fenomena lain yang memiliki karakteristik sama dengan bualan hanya tidak muncul unsur fluidanya. Fenomena tersebut adalah celah atau rekahan dan kerusakan infrastruktur yang tidak wajar di beberapa pemukiman warga. Adapun setelah terpetakan seperti pada (Gambar 22 dan 23).

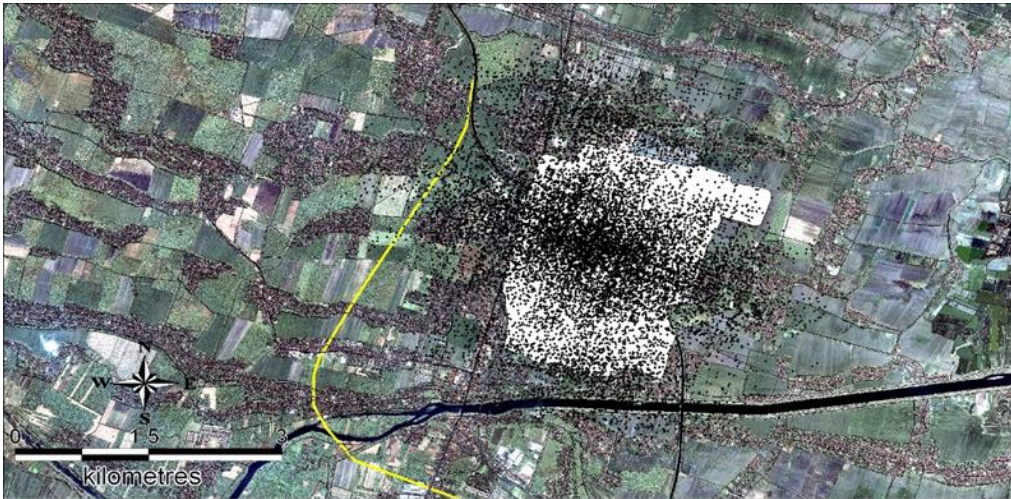


Keterangan: Titik ● keluarnya bualan berdasarkan data BPLS
 ● Titik keluarnya bualan berdasarkan data BPLS-2
 ● Titik keluarnya bualan berdasarkan informasi lain
 ▲ Kerusakan infrastruktur
 ↗ Rekahan

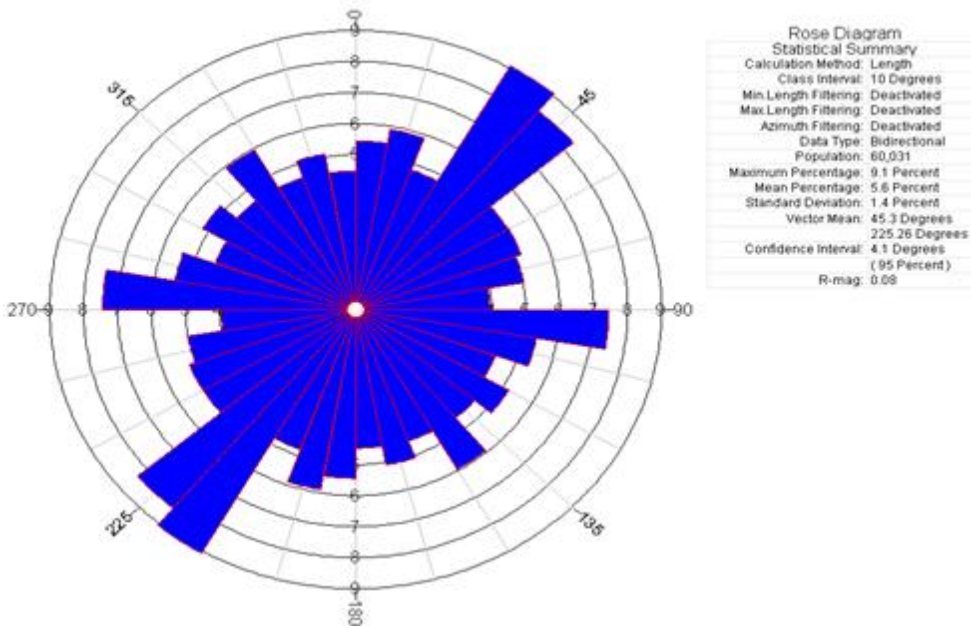
Gambar 22 Peta penyebaran retakan, bualan, dan kerusakan infrastruktur yang pernah terpetakan

Berdasarkan pengamat di lapangan fenomena kemunculan bualan terjadi melalui rekahan di suatu zona lemah yang umumnya memiliki pola tertentu. Analisis dengan menggunakan metode Fry Plot (Fry, 1979) dilakukan pada data titik kemunculan bualan, infrastruktur dan rekahan (Gambar 22). Inti dari metode ini adalah untuk mengetahui kecenderungan pola ke arah tertentu, dari beberapa data titik spasial. sehingga di dapat suatu pola seperti pada (Gambar 23).

Titik-titik hasil pengolahan dilakukan analisis *Diagram Rose*. Titik-titik yang memiliki jarak tertentu dihubungkan sehingga di dapat suatu kelurusan tertentu. Kelurusan-kelurusan yang memiliki kemiringan yang sama dipetakan sehingga di dapat suatu pola tertentu. (Gambar 24) adalah Diagram Rose untuk penyebaran titik yang memiliki jarak antar titik dengan radius kurang dari 20 Meter. Dari Diagram Rose terlihat bahwa pola kelurusan rata-rata berarah 45.3° atau 225.26° .



Gambar 23 Penyebaran data hasil metode Fry (1979)



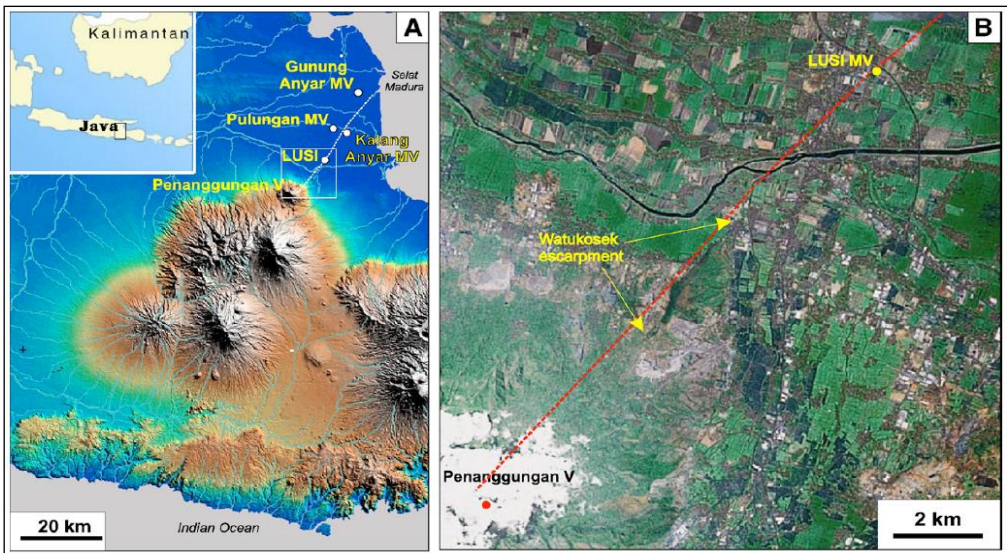
Gambar 24 Diagram Rose untuk penyebaran titik metode Fry untuk jarak antar titik 20 meter

Jarak titik lebih dari 20 hingga 100 meter memberikan respon pada *Diagram Rose*, hampir sama untuk semua sudut. Artinya untuk jarak lebih dari 20 meter kecenderungan titik mengarah ke pusat semburan. Pola pergerakan tanah di kawasan semburan LUSI juga terdeteksi dengan metode

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) yang berbasis pada data radar (PALSAR) dari satelit ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) [JAXA, 2007]. Dari hasil InSAR terdeteksi adanya pergerakan tanah dengan magnitudo maksimum sekitar 3.8 m dalam periode sekitar 7.5 bulan; atau sekitar 1.7 cm/hari. Hasil InSAR juga menunjukkan adanya kawasan *uplift* di sebelah Timur Laut dari kawasan semburan lumpur. Secara umum hasil dari survei GPS konsisten dengan hasil dari metode InSAR, meskipun cakupan wilayah kedua metode tidak persis sama. Dalam hal ini, daerah cakupan survei GPS relatif lebih kecil dari daerah cakupan metode InSAR. Terjadinya fenomena pergerakan tanah ini perlu diantisipasi dan ditangani secara baik, karena pergerakan tanah ini akan memengaruhi banyak aspek lingkungan dan infrastruktur serta kehidupan penduduk di Porong Sidorajo dan sekitarnya, baik saat ini maupun di masa mendatang. Mengingat pergerakan tanah mempunyai dampak yang bersifat merusak, baik untuk lingkungan maupun penduduk yang bermukim di wilayah sekitar semburan lumpur, dan disamping itu juga informasi tentang karakteristik dan pola pergerakan tanah di wilayah Porong ini akan sangat bermanfaat dalam proses perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian penanganan semburan lumpur maupun pembangunan yang berkelanjutan di wilayah Porong, penelitian atau kerja sama proyek untuk mengetahui karakteristik pergerakan tanah secara detail dan komprehensif di wilayah Porong secara berkelanjutan perlu dilaksanakan secara sistematis dan berkesinambungan. Para ahli kebumihan memperkirakan, bahwa semburan lumpur dapat berlangsung lama, dan bahkan bila masukan air ke sistem bawah tanah di kawasan Porong berlangsung terus dari kawasan G. Penanggungan, maka semburan lumpur dapat berlangsung sampai sekitar 30 tahunan. Kalau hal ini terjadi maka fenomena pergerakan tanah akan terus terjadi.

8 PENGOLAHAN DATA GEOLOGI BAWAH PERMUKAAN

Data sebaran bualan/*bubble* per Mei 2008 menunjukkan sebaran titik-titik pemunculan di sekitar area semburan Lumpur Sidoarjo. Titik-titik pemunculan bualan ini memiliki orientasi arah tertentu. Diperlihatkan oleh Gambar 25 Orientasi arah relative kelurusan dari titik-titik pemunculan *bubble* ini adalah Timur Laut - Barat Daya, Barat Laut - Tenggara, Utara - Selatan dan Barat - Timur.

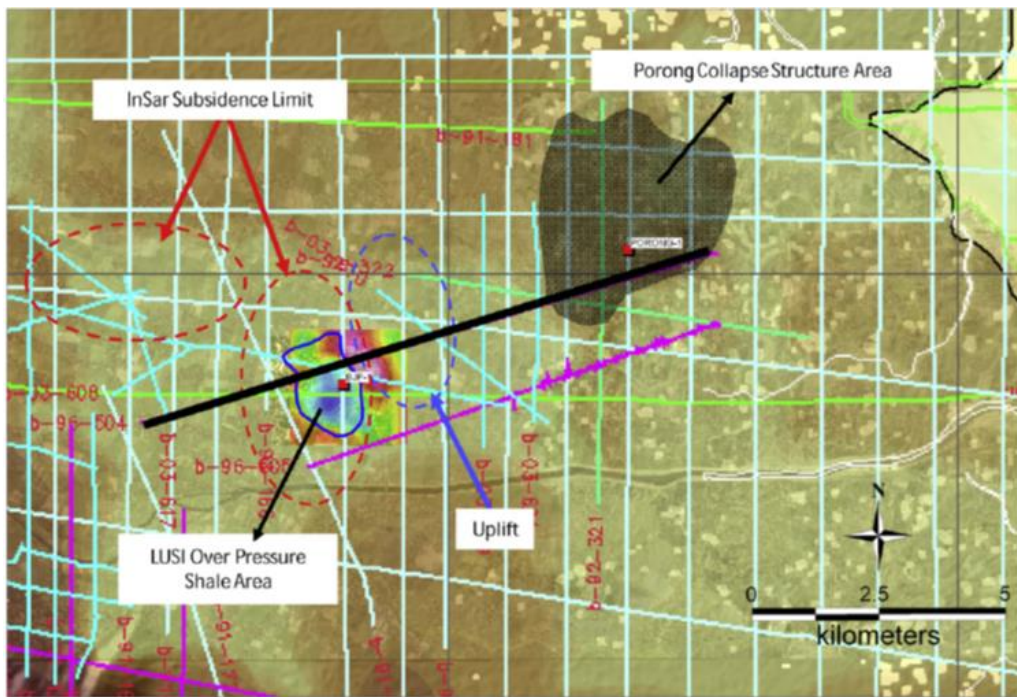


Gambar 25 Semburan lumpur yang relatif sejajar dengan Sesar Watukosek

(A. Mazzini, H. Svensen, G.G. Akhmanov, G. Aloisi, S. Planke a.d, A. Malthe-Sørensen, B. Istadi e, Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia, Earth and Planetary Science Letters 261 (2007) 375-38)

Dari hasil survei GPS, ada beberapa karakteristik pergerakan tanah di sekitar kawasan semburan Porong Sidoarjo yang teramati, yaitu: Kecepatan pergerakan adalah sekitar 0.5-2 cm/hari (komponen horizontal) dan sekitar 1-4 cm/hari (komponen vertikal); pergerakan tanah bervariasi, baik secara spasial maupun temporal, dengan nilai pergerakan yang berubah-ubah besarnya; pergerakan dalam arah vertikal, meskipun didominasi pergerakan tanah (*subsidence*), kadang juga dapat berupa (*uplift*). Luasan kawasan

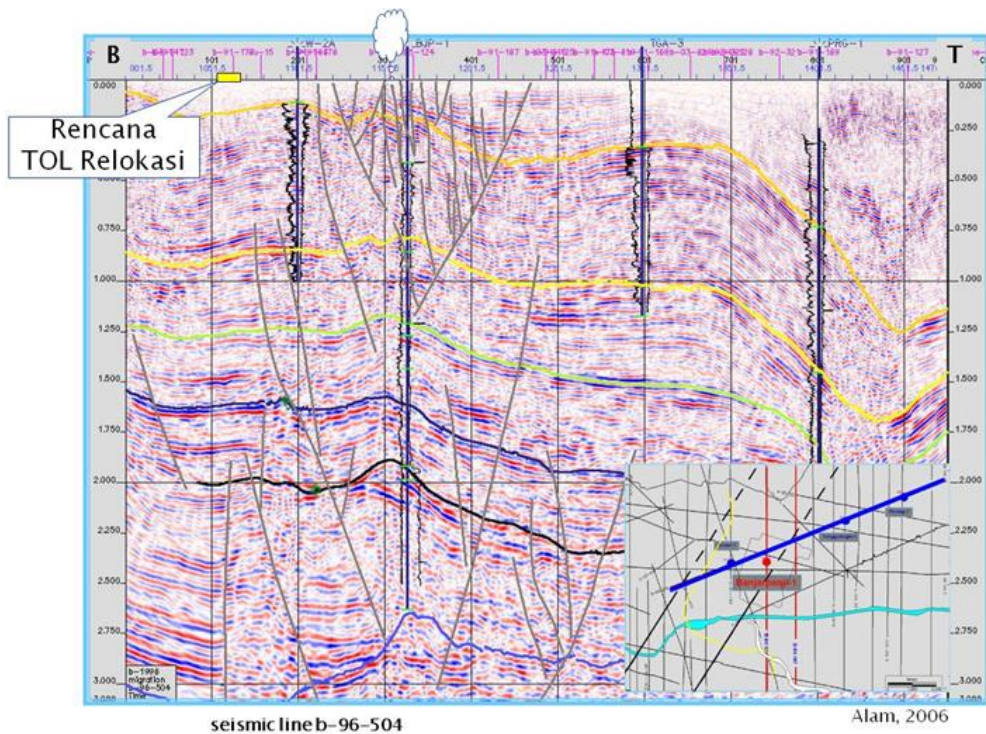
pergerakan tanah cenderung membesar dari waktu ke waktu. Pola pergerakan tanah di kawasan semburan lumpur Porong (Sidoarjo) juga terdeteksi dengan metode InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) [Massonnet and Feigl, 1998] yang berbasis pada data radar (PALSAR) dari satelit ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) [JAXA, 2007]. Dari hasil InSAR yang terdeteksi adanya pergerakan tanah dengan magnitudo maksimum sekitar 3.8 m dalam periode sekitar 7.5 bulan; atau sekitar 1.7 cm/hari. Hasil InSAR juga menunjukkan adanya kawasan *uplift* di sebelah Timur Laut dari kawasan semburan lumpur. Secara umum hasil dari survei GPS konsisten dengan hasil dari metode InSAR, meskipun cakupan wilayah kedua metode tidak persis sama. Dalam hal ini, daerah cakupan survei GPS relatif lebih kecil dari daerah cakupan metode InSAR. Gambaran mengenai dimensi dan geometri kondisi bawah permukaan (Gambar 26 dan 27) merupakan informasi yang diperlukan saat memahami kejadian LUSI yang terjadi tahun 2006 dan struktur runtuh Porong yang pernah terjadi sebelumnya (Istadi et.al. 2009).



Gambar 26 Peta dasar line seismik dan perbandingan luas berdasarkan data seismik serta gravitasi antara Porong dan LUSI (Istadi et.al, 2009)

Metode Seismik adalah salah satu metode geofisika yang digunakan untuk menganalisis bawah permukaan, prinsip dari metode ini adalah dengan

memberikan gangguan di permukaan (dinamit) dan merekam respon kecepatan penjalaran gelombang di sepanjang lintasan tertentu (untuk kasus 2D). Dikarenakan masing-masing lapisan batuan mempunyai cepat rambat yang berbeda-beda, maka setelah melalui pemrosesan data, akan didapat bentuk perlapisan bawah permukaan secara 2 dimensi berdasarkan parameter cepat rambat gelombang. Jika diperhatikan proses yang terjadi di porong mempunyai geometri yang lebih luas dibandingkan dengan yang terjadi di daerah sidoarjo. Sangat jelas dalam Gambar 27 baik aspek dimensi dan penurunan yang terjadi seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 25 ada kemungkinan memiliki proses alamiah yang sama, hanya yang di banjarpanji terjadi pada saat kegiatan pemboran eksplorasi berlangsung.

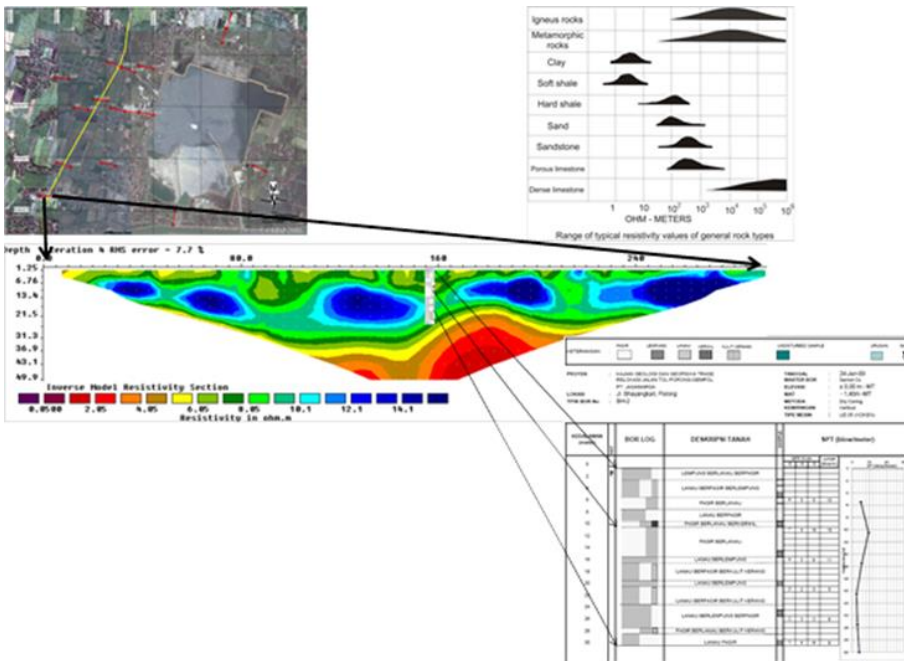


Gambar 27 Profil penampang seismik yang memotong LUSI Banjarpanji-1 dan area runtuh di Daerah Porong (Istadi et.al, 2009)

Tujuh belas Lintasan Geolistrik (Gambar 28) telah diolah dan diinterpretasi.



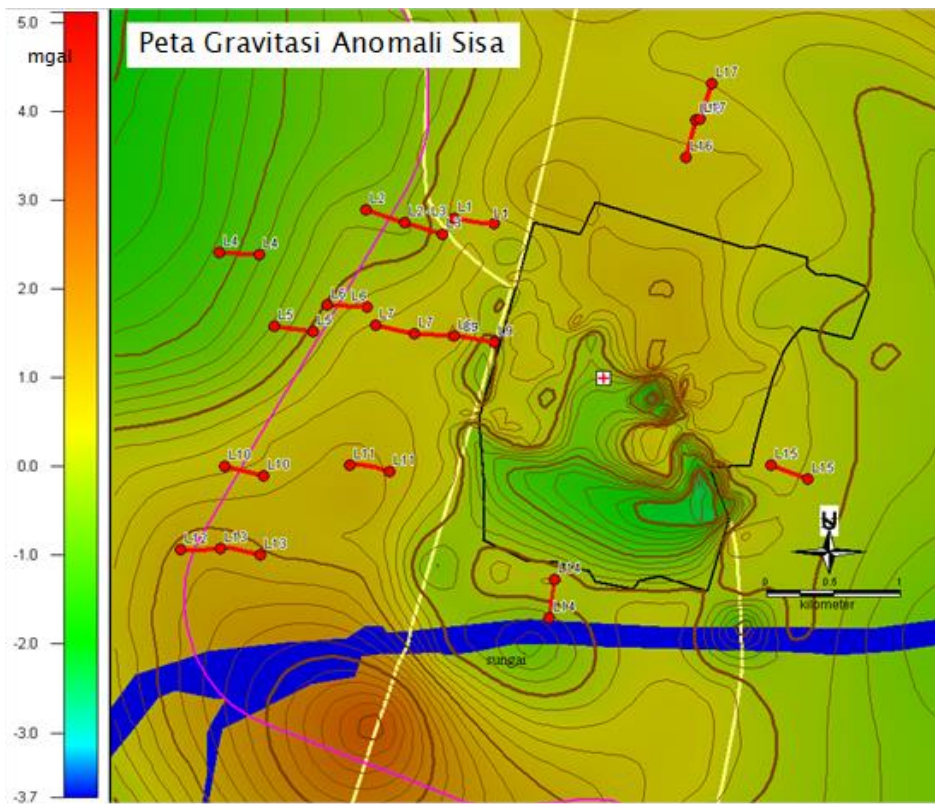
Gambar 28 Peta 17 lintasan geolistrik. Keterangan: Lintasan pengukuran Geolistrik



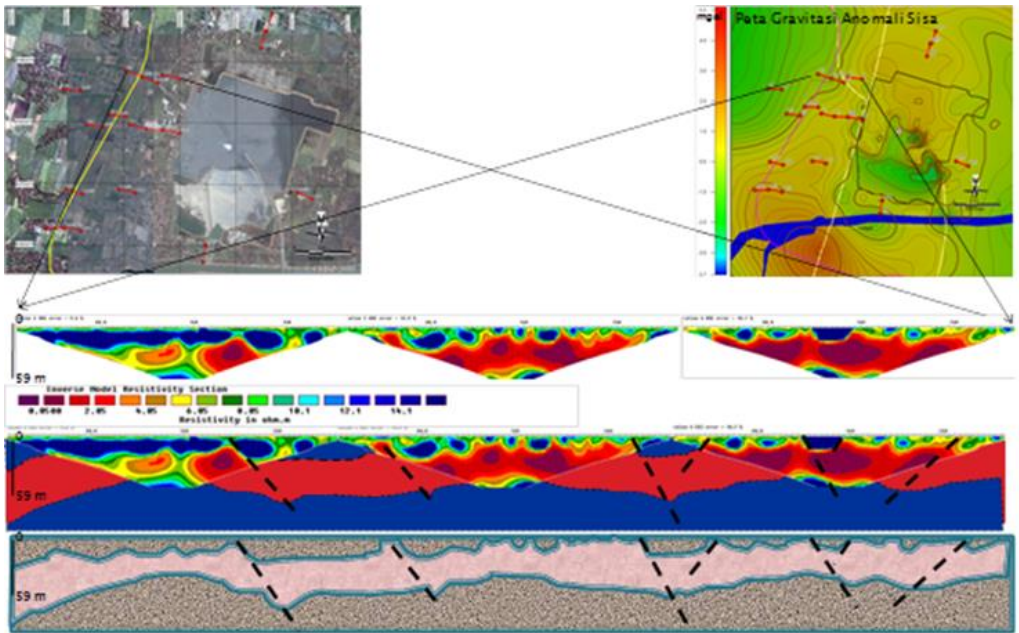
Gambar 29 Korelasi antara data pengukuran geolistrik dengan data bor

Dilihat dari hasil pengolahan data, nilai resistivitas batuan di daerah penelitian umumnya rendah atau memiliki nilai konduktivitas yang cukup tinggi. Berdasarkan data bor nilai resistivitas rendah berasosiasi dengan lanau lempungan sedangkan nilai resistivitas yang relatif tinggi berasosiasi dengan pasir lanau. Sedangkan untuk nilai resistivitas sangat rendah (warna merah) tidak teridentifikasi oleh data bor (Gambar 29). Resistivitas yang sangat rendah ini berdasarkan literatur umumnya berasosiasi dengan dengan lempung (*clay*) dan *soft shale*.

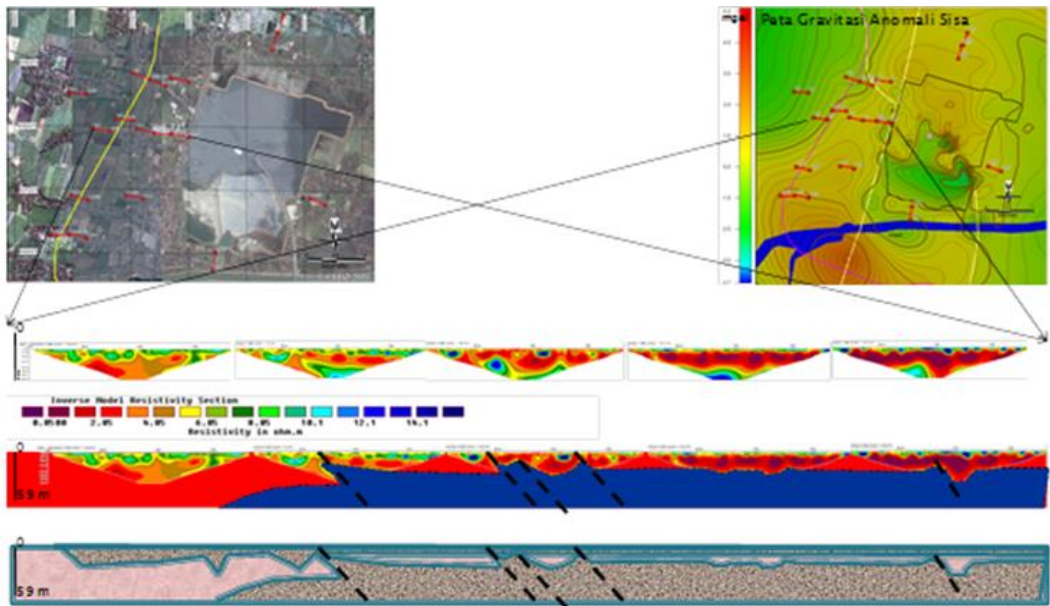
Kecenderungan pola pada beberapa lintasan geolistrik jika di-overlap-kan pada peta Gravitasi Anomali Sisa (Gambar 30), ternyata memberikan pola yang bersesuaian dan cenderung saling mendukung.



Gambar 30 Posisi lintasan geolistrik di-overlap-kan pada peta Gravitasi Anomali Sisa

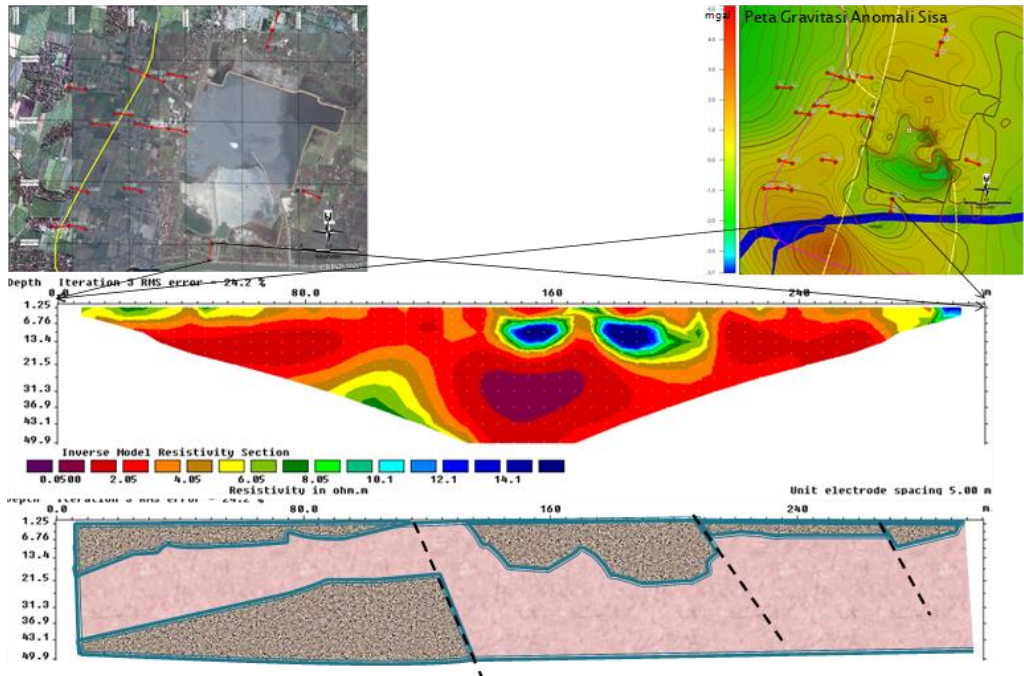


Gambar 31 Lintasan 2-3-2, yang memiliki pola yang sama dengan kontur atau rendahan dan tinggian pada peta gravitasi



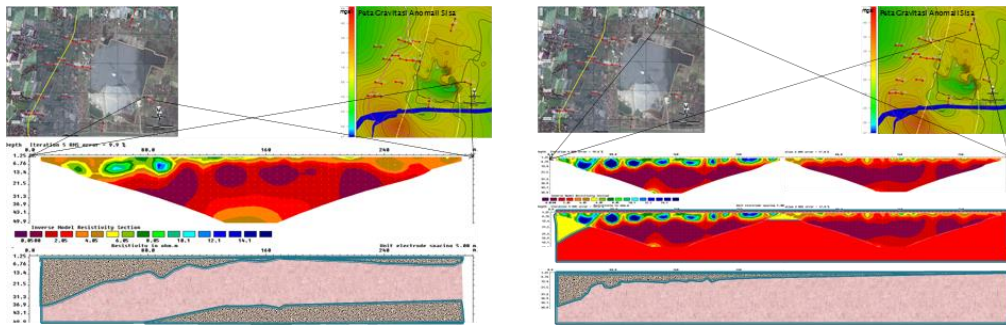
Gambar 32 Lintasan 5-6-7-8-9, yang memiliki pola yang sama dengan kontur atau rendahan dan tinggian pada peta gravitasi

Apabila Lintasan 2-3-2 (Gambar 31) dan Lintasan 5-6-7-8-9 (Gambar 32), disusun menjadi masing-masing satu lintasan terlihat bersesuaian dengan pola kerapatan kontur pada peta gravitasi. Kerapatan kontur pada data gravitasi mengindikasikan suatu anomali kontras densitas yang diinterpretasikan sebagai patahan. Keberadaan zona patahan terkonfirmasi dengan baik oleh data geolistrik. Di sebelah Selatan tanggul terlihat pula suatu pola anomali gravitasi yang tergambarkan dengan baik keberadaan kontras densitasnya oleh penampang geolistrik (Gambar 33).

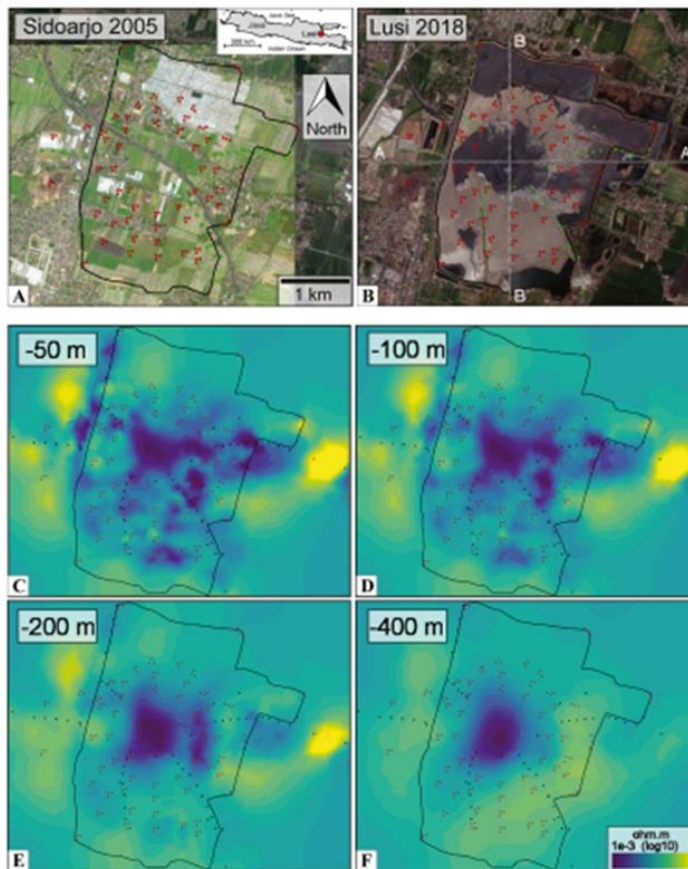


Gambar 33 Lintasan geolistrik bagian selatan yang memiliki pola yang sama dengan kontur atau rendahan dan tinggian pada peta gravitasi

Di sisi sebelah utara dan timur tanggul memperlihatkan pola yang "miskin" struktur tetapi per lapisannya memperlihatkan kemiringan yang sesuai dengan model GPS (Gambar 34). Dari analisis data geofisika di atas, kestabilan kontur anomali gravitasi sisa yang terkonfirmasi oleh data geolistrik dan data interpretasi seismik maka dapat dibuat suatu zona rawan berdasarkan keberadaan interpretasi sesar.



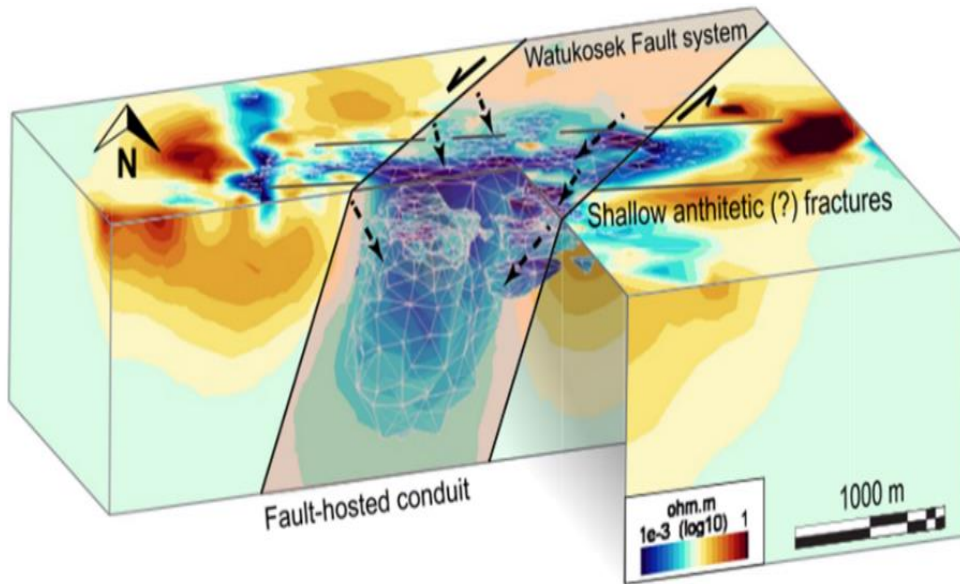
Gambar 34 Lintasan geolistrik yang memiliki kecenderungan kemiringan lapisan yang bersesuaian dengan data GPS



Gambar 35 Sidoarjo 2005, LUSI 2018 (Mazzini et.al, 2021)

Penelitian terakhir yang dipublikasikan pada tahun 2021 (Gambar 35 dan 36) menggunakan metode geolistrik dapat mengonfirmasi hasil interpretasi

yang telah dilakukan sebelumnya. Memperlihatkan nilai resistivitas yang rendah terakumulasi pada kedalaman 400 meter yang memberikan gambaran adanya penumpukan lumpur yang berdensitas lebih rendah dari batuan sekitarnya.



Gambar 36 Sistem Sesar Watukosek (Mazzini et.al, 2021)

Gambar 36 memperlihatkan tomografi geolistrik dalam 3D erupsi LUSI di Jawa Timur. Adanya sistem yang didominasi saluran pusat yang terbentuk diperkirakan zona sesar Watukosek, penemuan ini menjelaskan adanya proses erupsi klastik akibat mekanisme keluarnya tekanan luap. Sistem sesar Watukosek dan perambatan fluida dari daerah belakang busur akhirnya menyebabkan terjadinya LUSI.

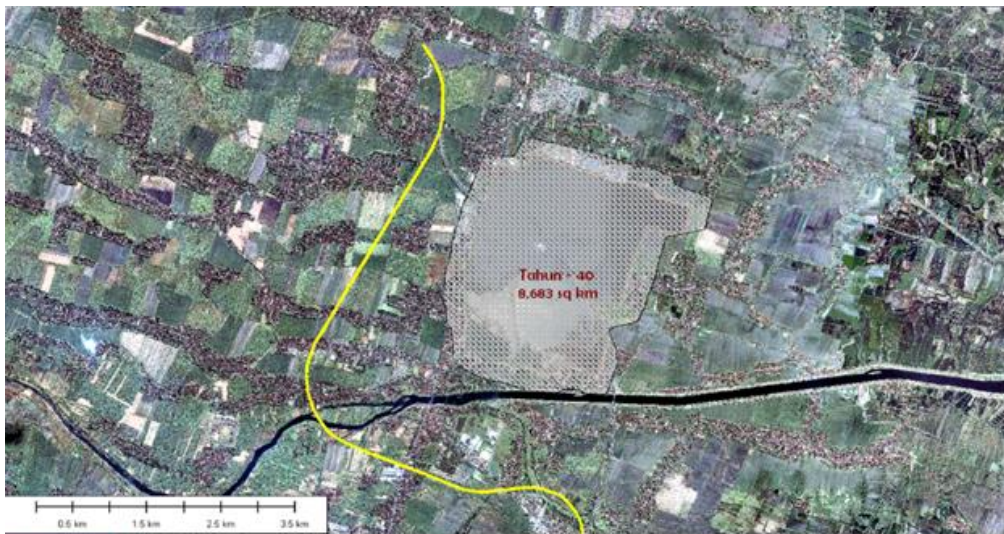
Banyak sekali para peneliti luar negeri multidisiplin yang melakukan kunjungan di daerah Sidoarjo ini sehingga dinamakan sebagai LUSI lab., dinyatakan oleh Mazzini pada saat pertemuan persatuan geosains eropa (EGU) di Viena Austria tanggal 17-22 April tahun 2016.

9 MODEL LUAPAN LUMPUR

Terdapat dua skenario dalam pemodelan luapan lumpur. Berdasarkan kondisi yang teramati selama kurang lebih 18 tahun sejak kejadian LUSI diperkirakan akan berhenti pada sekitar tahun 2044 dengan karena telah terjadi kesetimbangan tekanan berdasarkan perhitungan Sumintadireja et.al, 2007 dalam persentasinya pada “International XXIV IUGG 2007 PERUGIA ITALY JVS004”. Parameter yang dipergunakan antara lain:

- Ketebalan lapisan shale 700 meter
- Luas penyebaran shale berdasarkan data seismik 2 km²
- Luas penyebaran shale berdasarkan data gravitasi 1.3 km²

Hal ini juga telah dipublikasikan pula oleh Istadi et.al, 2009 pada “Marine and Petroleum Geology xxx 2009”. Dengan demikian jika tinggi tanggul tetap, dapat dipertahankan, sehingga akhirnya menjadi seperti di Bledug Kuwu, Purwokerto atau yang diamati di Karanganyar dekat Airport Juanda. Pemodelan menghasilkan luapan lumpur dengan luas +8.68 km² (Gambar 37)



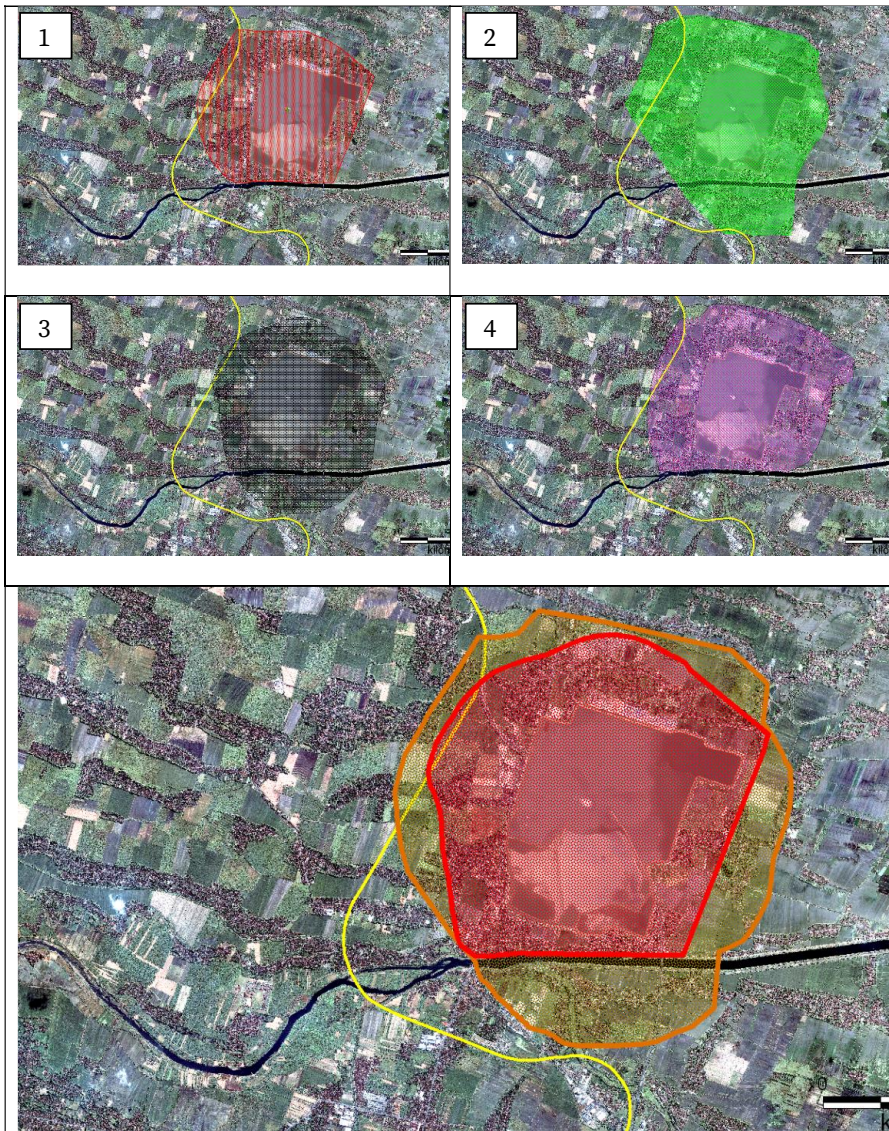
Gambar 37 Sebaran lumpur tidak memengaruhi jalan tol yang baru

10 DAERAH BAHAYA

Penentuan daerah rawan menggunakan teknik *overlay* adalah teknik yang dikembangkan pertama kali oleh Mc. Harg (1971) dari bidang lanskap arsitektur. Teknik ini berdasarkan pada penggunaan peta di mana hasil pemodelan penyebaran dampak digambarkan dalam peta. Teknik *overlay* dewasa ini berkembang dengan bantuan komputer berbasis GIS dan *layering*, sehingga beberapa hasil pemodelan dampak bisa dituangkan dalam satu peta yang sama. Dari sini kita dapat melihat resultan dampak secara menyeluruh. Dalam kasus ini, teknik *overlay* digunakan untuk menganalisis zona-zona rawan masing-masing metode untuk didapat irisannya. Data zonasi yang dilibatkan dalam analisis metode teknik *overlay* adalah :

1. Zonasi daerah rawan berdasarkan pengamatan geologi.
2. Zonasi daerah rawan berdasarkan analisis geofisika.
3. Zonasi daerah rawan berdasarkan pengukuran GPS (Geodesi).
4. Zonasi daerah rawan berdasarkan model luapan lumpur 40 tahun mendatang.

Zona bahaya dibuat dari irisan ke-4 data. Zona hati-hati atau perlu perhatian dibentuk dari irisan minimal dari 3 zonasi rawan dan zona aman adalah zona di luar kedua zona tersebut di atas (Gambar 38). Pada intinya untuk mengenali daerah bahaya kita harus mengidentifikasi koordinat lokasi yang baik, disertai pengamatan geologi permukaan maupun bawah permukaan. Pengukuran geofisika menjadi sangat penting dilakukan karena beberapa konsep geologi yang ada harus dapat ditampilkan berdasarkan sifat fisik batuan yang diukur oleh alat secara pasif dengan memanfaatkan sinyal alam tanpa menggunakan sumber buatan yang berupa ledakan atau injeksi arus.



Keterangan :

1. Zonasi daerah rawan berdasarkan pengamatan geologi.
2. Zonasi daerah rawan berdasarkan analisa geofisika.
3. Zonasi daerah rawan berdasarkan pengukuran GPS (Geodesi).
4. Zonasi daerah rawan berdasarkan model luapan lumpur 40 tahun mendatang.

Gambar 38 Zonasi daerah bahaya berdasarkan analisis hasil studi

11 PENUTUP

Secara tidak langsung masalah mitigasi bencana memerlukan pengetahuan eksplorasi yang terpadu dalam memahami kondisi di atas maupun di bawah permukaan bumi. Pemetaan maupun pengukuran geofisika harus dilengkapi informasi koordinat yang baik untuk memastikan interpretasi yang dilakukan mendekati sempurna.

Zona bahaya yang dibuat dari hasil analisis studi Kajian Geologi dan Geofisika menyimpulkan bahwa, tol relokasi pada KM 1+315 hingga KM 2+682 masuk dalam Zona Bahaya (total panjang jalan 1,36 km), sedangkan KM 0+700 hingga KM 3+482 masuk dalam Zona Perhatian (total panjang jalan 2,78 km).

Dalam Zona Bahaya dapat muncul fenomena berupa:

1. Semburan fluida yang keluar dari retakan. Retakan ini merupakan jalan untuk keluarnya semburan fluida. Semburan ini tidak dapat diperkirakan secara pasti kapan kemunculannya, berapa besar semburannya dan jenis fluida yang keluar. Lokasi pasti dari keluarnya semburan ataupun munculnya retakan ini tidak dapat ditentukan secara pasti, tetapi hanya bisa di perkirakan akan keluar di dalam Zona Bahaya.
2. Terjadi pergeseran tanah secara horizontal ± 0.5 meter dan vertikal ± 1 meter mulai 10 hingga 40 tahun mendatang.
3. Luapan lumpur yang tidak terkontrol dengan ketinggian 8 hingga 15 meter mulai sekitar tahun ke 20 atau 26.

Sedangkan untuk zona perlu perhatian dapat terjadi 2 dari kombinasi 3 ancaman seperti pada zona bahaya. Jalan tol yang tetap di bangun melalui Zona Bahaya dan Zona Perhatian agar dipersiapkan pihak pengelola tol agar dipersiapkan rencana kerja penanggulangan yang detail secara terintegrasi selama 25 tahun ke depan untuk menangani dampak dari semburan LUSI ini seperti yang disebutkan di atas.

Berdasarkan analogi dengan kejadian semburan lumpur yang terjadi di Bledug Kuwu, Purwodadi, Jawa Tengah; maka diperkirakan daerah yg terdampak di daerah LUSI ini sekitar 60 hektar dari yang sebelumnya seluas 360 hektar.

12 UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan izin Allah Swt., Alhamdulillahirobbilalamin amanah menjadi Guru Besar di ITB telah diterima terhitung sejak 1 Juni 2023 berdasarkan keputusan Menteri Pendidikan, Riset dan Teknologi Republik Indonesia, nomor 40318/M/07/2023. Tentunya pencapaian karier sebagai dosen dengan jabatan Guru Besar tidak lepas dari dukungan keluarga, yaitu kedua orang tua yang telah mendidik dan membiayai dari sejak pendidikan dasar sampai dengan sarjana, yaitu Bapak Abdoessoeki Acmadiredja (alm.) dan ibu Siti Maemunah (almh.) dan ucapan terima kasih khusus untuk istri tercinta Diah Saptiawarsih Hamzah dan anak menantu semuanya, Alditama dengan Lina, Nurtami dengan Ichsanuddin, Adlantama dengan Rininta, dan Azzahra yang tidak pernah putus mendoakan dengan tulus selama bertahun-tahun.

Guru-guru saya di Geologi ITB yang telah memberikan pengetahuan dalam bidang geologi dan geofisika, yaitu Prof. Harsono P., Prof. Rubini S., (alm.), Prof. R.P. Koesoemadinata, Prof. Soejono (alm.), Prof. Emmy Suparka, Prof. Yahdi Zaim, Prof. MT. Zen (alm.). Prof Iwan Tachjudin (alm.), Prof. Djoko Santoso, Prof. Lilik Hendrajaya, serta dosen pembimbing selama menempuh S-3 di Kyushu University Prof. Keisuke Ushijima, Prof. H. Mizunaga, Prof. Isao Takashima

Terima kasih juga untuk para dosen kolega di Prodi Geologi FITB, S-2 Airtanah FTTM, S-2 Geotermal FTTM dan sekitar 170 mahasiswa S-1, S-2 dan S-3 yang pernah menjadi bimbingan saya selama berkarier di ITB.

Ucapan terima kasih yang sebesar besarnya saya ucapkan kepada dekanat FITB ITB yang telah mengurus bersama seluruh jajarannya, Prof. Dr. Irwan Meilano, Prof. Ir. Agus Mochamad Ramdhan, S.T., M.T., Ph.D., Dr. rer. nat. Mutiara Rachmat Putri, S.Si., M.Si. dan juga untuk para pemberi rekomendasi untuk jabatan Guru Besar saya, yaitu:

- Prof. Ir. Lambok M. Hutasoit, M.Sc., Ph.D., KKGITB
- Prof. Dr. Ir. Deny Juanda Puradimaja, DEA., KKGITB
- Prof. Ir. Benyamin Sapiie, Ph.D., KKGS ITB
- Prof. Dr. Hendra Grandis, DEA., KKPB ITB
- Prof. Ir. Wahyu Srigutomo, S.Si., M.Si., Dekan FMIPA ITB
- Prof. Dr. Ir. Eddy Ibrahim, M.S., CP., IPU, FT. UNSRI

- Prof. Dr. Ir. Edy Sunardi., M.Sc., FT UNPAD
- Prof. Dr. Gad El-Qady, National Research Institute of Astronomy and Geophysics (NRIAG), Mesir
- Prof. Dr. Katsuaki Koike, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Jepang

Tidak lupa ucapan terima kasih juga disampaikan kepada kolega profesional yang bekerja sama dalam pekerjaan konsultasi khususnya:, Sayogi Sudarman, Iwan Sumantri, Bambang Istadi, Agung B.D., Anditya MTI., Ninik Rina H, Suryantintini, Agus Laesanpura, Fatkhan, Sigit Sukmono, Sri Widiyantoro, Awali Priyono, Wahyu Triyoso, Sonny W., Gumbira AP., Alit Ascaria, Hernansjah, Kukuh Hadianto, Dedi Setiawan, Wildan Somantri, Masruri, D. Erwin Irawan, Hendro H.W., Diky Irawan, Faisal, Ferry Aries, Asrizal Masri, Andri Subandrio, Kristian NT, Darji N, Agus H.H. (alm), Sapta J, Arief F, tim PT Prihaditama, tim PT Geostroom, tim PT Aering, tim PT Geoservices dan tanpa mengurangi rasa hormat, terima kasih saya haturkan juga kepada semua rekan, kolega, dan sahabat yang tidak saya sebutkan satu persatu.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H.Z. , R.J Davies, M.A Kusuma, H. Andreas, 2008, Subsidence and Uplift of Sidoarjo (East Java) due to the Eruption of the LUSI Mud Volcano (2006-Present) *Environ Geol* DOI 10.1007/s00254-008-1363-4
- Abidin H.Z., M.A. Kusuma, B. Istadi, A.B. Darmoyo, P. Sumintadireja, I. Purwaman, H. An-dreas, M. Gamal (2007). “The Deformation of an Area Around a Newly Born Mud Volcano In Sidoarjo (East Java, Indonesia)”, ISG-GNSS, Johor Bahru, Malaysia, 2007.
- Abidin, H.Z., M.A Kusuma, H Andreas, M Gamal and P Sumintadireja. “GPS-Based Monitoring of Surface Displacements in the Mud Volcano Area, Sidoarjo, East Java”. In *Observing Our Changing Earth*, International Association of Geodesy (IAG) Symposia, 2008.
- A. Mazzini, H. Svensen, G.G. Akhmanov, G. Aloisi, S. Planke, A. Malthesørensen, B. Istadi, 2007, Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia, *Earth and Planetary Science Letters* 261 pp. 375–388
- A. Mazzini, Aurore Carrier, Alessandra Sciarra, Federico Fischanger, Anton Winarto-Putro, and Matteo Lupi, 2021, 3D Deep Electrical Resistivity Tomography of the LUSI Eruption Site in East Java.
- A. Mazzini, A. Nermoen, M. Krotkiewski, Y. Podladchikov, S. Planke, H. Svensen, 2009, Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercement structures. Implications for the LUSI mud volcano, Indonesia *Marine and Petroleum Geology* 26 pp. 1751–1765.
- B. Istadi, G Pramono, P Sumintadireja, S Alam, Modeling Study of Growth and Potential Geohazard for LUSI Mud Volcano East Java Indonesia, *Marine and Petroleum Geology* xxx (2009) 1-16.
- Browne, P.R.L., 1989, Investigation at The Rotokawa Geothermal Field Taupo Volcanic Zone, *Journal of Geothermal Research Society*, New Zealand.
- Cas R.A.F, J.V. Wright, 1988, *Volcanic Successions*, Unwin Hyman, London.

- Davies, R.J., R.E. Swarbrick, R.J. Evans, M. Huuse (2007). "Birth of a mud volcano: East Java, 29 May 2006", *GSA Today*, Vol. 17, No.2, February, DOI: 10.1130/GSAT01702A.1, pp. 4-9.
- Direktorat Volkanologi, 1979, *Data Dasar Gunungapi Indonesia*, 820 pp. (Volcanoes Database)
- Francis, P.W., G.Wadge, and P.J. Mougini-Mark (1996). "Satellite monitoring of volcanoes", In *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, by Scarpa, R. and R.I. Tilling (Eds.), pp. 257-298. Springer Verlag, Berlin, 841 pp.
- Fry, N. (1979) Random point distributions and strain measurement in rocks. *Tectonophysics* 60, 89-105. Ehlers G. E. dan Blatt H., 1982, *Petrology*, W.H. Freeman and Co., San Fransisco.
- Fisher R.V. dan H.U. Schminke, 1984, *Pyroclastic Rocks*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, Tokyo.
- Fisher R.V., Grant Heiken dan Jeffrey B. Hullen, 1997, *Volcanoes*, Princeton University Press, New Jersey.
- Hildreth, W., 1981, Gradient in Silicic Magma Chamber, Implication for Lithospheric Magmatism, *Journal of Geophysical Research*.
- Hochstein M.P. dan Browne P.R.L., 2000, Surface Manifestations of Geothermal System with Volcanic Heat Sources, in *Encyclopedia of Volcanoes*.
- MCL (2007). Situs dari Media Center LUSI (MCL), Timnas Penanggulangan Semburan Lumpur di Sidoarjo (LUSI), alamat situs : <http://www.mediacenterLUSI.com/>, waktu akses : 29 May 2007. LAPI ITB, 2006, *Kajian dan Rekomendasi Rehabilitasi Pipa Gas Diameter 28" Jalur Porong-Gresik, Ruas Jalan Tol Surabaya-Gresik Km. 37- Km. 40* (PT. Pertamina, Kepala tim Syoni S.), tidak dipublikasikan
- Hochstein M.P., 1995, Crustal Heat Transfer in the Taupo Volcanic Zone (New Zealand), Comparison with other Volcanics Arcs and Explanatory Heat Source Models, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no.68, p.117-151.
- Muffler L.J. Patrick and Wendell A. Duffield, 1995, *Proceeding of the World Geothermal Congress*, p.657-662, Florence Italy.

- PT. LAPI ITB, 2006, Integrated Geological, Geophysical, and Geochemical Study of Mud Extrusion and Its Controlling Factors in Banjarpanji Area, PT. Lapindo Brantas Inc. (Kepala Tim Prihadi Sumintadireja), tidak dipublikasikan
- PT. LAPI-ITB, 2006, Geohazard Surveillance of Banjarpanji Mud Extrusion Areas, Sidoarjo, East Java, for PT. Lapindo Brantas Inc, (Kepala Tim Prihadi Sumintadireja), tidak dipublikasikan
- Sumintadireja P, Indro P. B. Istadi, A.B. Darmoyo, Geology and geophysics study in revealing subsurface condition of Banjarpanji mud extrusion, Sidoarjo, East Java, Indonesia, IUGG XXIV, Perugia, Italy, 2007
- LAPI ITB, 2009, Kajian Geologi dan Geofisika Trase Relokasi Jalan Tol Porong-Gempol, (Kepala Tim Prihadi Sumintadireja), tidak dipublikasikan.
- PT Virama Karya (Persero), 2008, Laporan AMDAL Relokasi Jalan Tol Surabaya – Gempol (Segmen Porong – Gempol) dan Jalan Arteri Raya Porong, tidak dipublikasikan.
- Wright P.M., Ward S.H., Ross H.P., and West R.C., 1985, State of the Art Geophysical Exploration for Geothermal Resources, Geophysics, v.50, no.12, p.2666-2696.

CURRICULUM VITAE



Nama : Prof. Dr. Ir. Prihadi Sumintadireja,
M.S.
Tempat/tgl lahir : Bandung, 19 Desember 1959
Kel. Keahlian : Eksplorasi Geologi
Alamat Kantor : Jl. Ganesa 10, Bandung 40132
: Muhammad Safri Lubis
Nama Istri : Diah Saptiawarsih Hamzah
Nama anak : Alditama, Nurtami, Adlantama, Az
Zahra

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- S-1, Institut Teknologi Bandung, Jurusan Teknik Geologi, 1986; Skripsi: Geologi dan Stratigrafi daerah Gesi Utara dan Sekitarnya, Kabupaten Sragen Jawa
- S-2, Institut Teknologi Bandung, Jurusan Geofisika Terapan, 1990; Tesis: Penelitian Longsoran daerah PPR – ITB Dago Pasirmuncang, Kecamatan Lembang – Kabupaten Bandung
- S-3, Universitas Kyushu, Jepang, Jurusan Geofisika Terapan, 1999; Disertasi: Integrated Geoelectrical Study of Kamojang Geothermal Field, West Java, Indonesia

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

- Sekretaris Departemen Geologi ITB, Tahun 2004 – 2005
- Ketua Program Studi Teknik Air Tanah ITB, Tahun 2010 – 2012
- Kepala/Manajer Laboratorium Eksplorasi Geologi dan Geotermal ITB, Tahun 2018 – 2023
- Anggota Senat FITB, Tahun 2023 – sekarang
- Ketua Kelompok Keahlian/Keilmuan Petrologi, Vulkanologi dan Geokimia ITB, Tahun 2023 – sekarang
- Anggota Tetap Komisi Program Pascasarjana (KPPs), Tahun 2024

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- Penata Muda Tk. I III/b, 1 Oktober 1991

- Penata III/c, 1 Oktober 1994
- Penata Tk. I III/d, 1 Oktober 2000
- Pembina IV/a, 1 Oktober 2005
- Pembina Tk. I IV/b, 1 Juni 2023

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli 1 Juli 1991
- Lektor 1 Januari 2001
- Lektor Kepala 1 Maret 2005
- Profesor/Guru Besar 1 Juni 2023

V. KEGIATAN PENELITIAN

- Menghasilkan 15 Jurnal Internasional
 - Terakreditasi/Terindeks Scopus : 5 Q1, 6 Q2, 1 Q3, 2 Q4
 - Tidak Terindeks Scopus : 1
- Menghasilkan 5 Jurnal Nasional
 - Terakreditasi Sinta : 1
 - Tidak Terakreditasi : 4
- Menghasilkan 10 Prosiding/Seminar Internasional
- Menghasilkan 13 Prosiding/Seminar Nasional
- Menghasilkan 1 Buku Referensi

VI. PUBLIKASI

a. Dalam Jurnal Internasional Bereputasi dan Terindeks

- Emmanuel John M. Carranza, Hendro Wibowo, Sally D. Barritt, Prihadi Sumintadireja: Spatial Data Analysis and Integration for Regional-Scale Geothermal Potential Mapping, West Java, Indonesia, Geothermics, Volume 37, Issue 3, Juni 2008, Pages 267-299, ISSN 0375 – 6505, Elsevier Ltd, H-Index = 78, SJR 2008 = 0.820, Quartile = Q1, SNIP 1,876
- Bambang P. Istadi, Gatot H. Pramono, Prihadi Sumintadireja, Syamsu Alam: Modeling Study of Growth and Potential Geohazard for LUSI Mud Volcano, East Java, Indonesia, Marine and Petroleum Geology, Volume 26, No. 9, 2009, Pages 1724-1739, ISSN 0264 – 8172, Elsevier, H-Index = 129, SJR 2009 = 1.195, Quartile = Q1, SNIP 1,597

- Dasapta Erwin Irawan, Deny Juanda Puradimadja, Sudarto Notosiswoyo, Prihadi Soemintadiredja: Hydrogeochemistry of Volcanic Hydrogeology Based on Cluster Analysis of Mount Ciremai, West Java, Indonesia, *Journal of Hydrology*, Volume 376, Issue 1-2, September 2009, Pages 221- 234, ISSN 0022 - 1694, Publisher Elsevier, H-Index = 241, SJR 2009 = 2.017, Quartille = Q1, SNIP 1,857
- Imran Hilman Mohammad, Wahyu Srigutomo, Doddy Sutarno, and Prihadi Sumintadireja: Interpretation of 1D Vector Controlled - Source Audio - Magnetotelluric (CSAMT) Data Using Full Solution Modeling, *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, Volume 45, No. 2, 2013, Pages 172-188, ISSN 2337 - 5760, ITB Jurnal, H-Index = 13, SJR 2013 = 0.110, Quartille = Q4, SNIP 0,844
- Prihadi Sumintadireja, Diky Irawan, and Hendra Grandis: Quasi - 2D Resistivity Model from Inversion of Vertical Electrical Sounding (VES) Data Using Guided Random Search Algorithm, *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, Volume 47, No. 3, Agustus 2015, Pages 269-280, ISSN 2338 - 5510 / Online ISSN: 2337 - 5760, ITB Journal, H-Index = 13, SJR 2015 = 0.118, Quartille = Q4, SNIP 0,844
- D. E Irawan, H Silaen, P Sumintadireja, R. F Lubis, B. B Brahmantyo, and D. J Puradimaja: Groundwater - Surface Water Interactions of Ciliwung River Streams, Segment Bogor - Jakarta, Indonesia, *Environmental Earth Science*, Volume 73, No. 3, February 2015, Pages 1295-1302, ISSN 1866 - 6280, Publisher Springer, H-Index = 130, SJR 2015 = 0.732, Quartille = Q2, SNIP 1,138
- Heri Andreas, Hasanuddin Z. Abidin, Teguh P. Sidiq, Irwan Gumilar, Yosuke Aoki, Agus L. Hakim, dan Prihadi Sumintadireja: Understanding The Trigger for The LUSI Mud Volcano Eruption from Ground Deformation Signature, *Geohazards in Indonesia: Earth for Disaster Risk Reduction*. Geological Society, Volume 441, July 2017, Pages 199-212, ISSN 0305 - 8719 / Online ISSN: 2041 - 4927, Publisher The Geological Society of London, H-Index = 140, SJR 2017 = 0.902, Quartille = Q1, SNIP 0,887

- Prihadi Sumintadireja, Darharta Dahrin, and Hendra Grandis: A Note on The Use of the Second Vertical Derivative (SVD) of Gravity Data with Reference to Indonesian Cases, *Journal of Engineering and technological Sciences*, Volume 50, No. 1, March 2018, Pages 127-139, ISSN 2337 – 5779, H-Index = 16, SJR 2018 = 0.212, Quartille = Q2, SNIP 0,652
- S. Byrdina, H. Grandis, P. Sumintadireja, C. Caudron, D. K. Syahbana, E. Naffrechoux, H. Gunawan, G. Suantika, J. Vandemeulebrouck: Structure of The Acid Hydrothermal System of Papandayan Volcano, Indonesia, Investigated by Geophysical Methods, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 358, June 2018, Pages 77-86, Elsevier, ISSN: 0377-0273. H-Index = 125, SJR 2018 = 1.275, Quartille = Q1, SNIP 1,126
- Ilham Arisbaya, Lina Handayani, Maruf M. Mukti, Yayat Sudrajat, Hendra Grandis and Prihadi Sumintadireja: Imaging the Geometry of Cimandiri Fault Zone Based on 2D Audio-Magnetotelluric (AMT) Model in Nyalindung, Sukabumi–Indonesia Pure and Applied Geophysics, Nomor. 176, Issue 11, 13 June 2019, p. 4833 - 4845, Springer Nature Switzerland AG, SJR 2019 = 0.593, Quartille = Q2, H - Index = 93, Impact Factor = 2.3
- Hendra Grandis, Warsa, and Prihadi Sumintadireja: Layer Stripping in Magnetotellurics (MT) for Enhancement of Resistivity Change Effect in Reservoir: Equivalence Analysis, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, ISSN: 2337-5779, Vol. 52, No. 2, 4 Februari 2020, 258-270, ITB Institute for Research and Community Services, SJR 2020 = 0.202, Quartille = Q3, H - Index = 16, Impact Factor = 0.75
- Alviyanda, Gusti Muhammad Lucki Junursyah, and Prihadi Sumintadireja: Stratigraphic Model of East Biak Based on Magnetotelluric Data, *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, ISSN: 2337-5760, Vol. 52, No. 2, 17 Juni 2020, 232-249, ITB Institute for Research and Community Services, SJR 2020 = 0.216, Quartille = Q2, H - Index = 13, Impact Factor = 1.1
- Edy Wijanarko, Ilham Arisbaya, Prihadi Sumintadireja, Warsa, and Hendra Grandis: Magnetotellurics study of Atambua area, West Timor, Indonesia, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, ISSN:

0866-7187, Vol. 45 No. 1, 24 Maret 2023, 67-81, House of Natural Science and Technology, Quartile = Q2, H - Index = 5

- Ilham Arisbaya, Edy Wijanarko, Warsa, Prihadi Sumintadireja, Yayat Sudrajat, Lina Handayani, M. Ma'ruf Mukti, and Hendra Grandis: Magnetotellurics (MT) and Gravity Study of a Possible Active Fault in Southern Garut, West Java, Indonesia, International Journal of Geophysics, Volume 2023, 31 Maret 2023, 20 page, Hindawi Limited, Quartile = Q2, H - Index = 21
- Imran Hilman Mohammad, Wahyu Srigutomo, Doddy Sutarno, and Prihadi Sumintadireja: The Modeling of 2D Controlled Source Audio Magnetotelluric (CSAMT) Responses Using Finite Element Method, Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, ISSN Print: 1942 - 0730 ISSN Online: 1942 - 0749, Vol. 4, No. 7, July 2012, Hal 293-304, Publisher Scientific Research

b. Dalam Jurnal Nasional Terakreditasi

- Asep Saepuloh, Raditya Andrean Saputra, and Prihadi Sumintadireja: Pemetaan Geologi Gunung Api Dijital Daerah Ngebel, Madiun berdasarkan Data Reflektansi dan Suseptibilitas Magnetik Batuan, Journal of Geology and Mineral Resources (J.G.S.M), Vol. 18, No.4, 15 November 2017, p. 201-210, Pusat Survei Geologi, ISSN: 0853 - 9634 / e-ISSN: 2549 - 4759, Nomor Sertifikat: 21/E/KPT/2018
- Damar Nandiwardhana, Allen Haryanto Lukmana, Prihadi Sumintadireja, Asep Saepuloh: Analisis Daerah Potensi Panas bumi Songa-Wayaua, Bacan, Maluku Utara Berdasarkan Data Geologi dan Geokimia, Bulletin of Scientific Contribution : Geology, ISSN: 1693 - 4873, Vol. 19, No. 2, Agustus 2021, p. 107 - 124, Universitas Padjadjaran

c. Jurnal Nasional

- Asep Saepuloh, Minoru Urai, Suryantini, Prihadi Sumintadireja, Irwan Meilano, Agus H Harsolumakso, and Emmy Suparka: Extracting Linear Features Density of SAR Data to Detect The Paths of A Geothermal System, Majalah Geologi Indonesia, Vol. 29, No. 2, Agustus 2014, Ikatan Ahli Geologi Indonesia, ISSN: 0216 - 1061
- Sutikwo Sutikwo, Prihadi Sumintadireja, Saroso Saroso, Dikdik S Mulyadi: Pengolahan Data Magnetik Laut Terkoreksi Diurnal Base

Station (Studi Kasus Perairan Pusong Kuala Langsa - Aceh), Jurnal Hidropilar, ISSN: 2460 - 4607, Vol. 2, No. 1, 25 Juli 2016, p. 27 - 39, Prodi D III Hidro - Oseanografi

- Any A. Rachmad, Djuhaeni, and Prihadi Sumintadireja: Tektonostratigrafi dan Sikuen Stratigrafi Endapan Lisu Blok Duyung, Cekungan Natuna Barat, Buletin of Geology, Vol. 1, No. 2, October 2017, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian - ITB, ISSN: 2580 - 0752

d. Dalam Prosiding/Seminar Internasional Terakreditasi

- P Sumintadireja, M. L Tobing, B Wibowo, I. G. B Sucipta, M. Nurhasanudin, and H Wibowo: Volcanic Hazard Analysis for Proposed Nuclear Power Plant Siting in Central Java, Indonesia, 12th Conference of Int. Association for Mathematical Geology, Geomathematics and GIS Analysis of Resources, Environment and Hazards, August 26 -31, Beijing, China, 2007, p. 171-175
- H. Z. Abidin, M. A. Kusuma, H. Andreas, M. Gamal, and Prihadi Sumintadireja: GPS - Based Monitoring of Surface Displacements in The Mud Volcano Area, Sidoarjo, East Java, Observing Our Changing Earth, of The Series International Association of Geodesy Symposia, Perugia, Italy, Juli 2-13, 2007, ISSN: 1939 - 9585, Vol. 133, 2009, p. 595-603, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Heri Andreas, Hasanuddin Zainal Abidin, Mipi Ananta Kusuma, Prihadi Sumintadireja, and I Gumilar: Ground Displacements Around LUSI Mud Volcano Indonesia as Inferred from GPS Surveys, FIG Congress Facing the Challenges - Building The Capacity Sydney, Sydney Australia, 11-16 April 2010, p. 1-8
- Prihadi Sumintadireja, Asep Saepuloh, Diky Irawan, and Lucky Junursyah: Temporal Analysis of Visible - Thermal Infrared Band and Magnetotelluric Method to Simulate a Geothermal Sitting at MT. Ciremai, West Java, Indonesia, Proceeding 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, 31 Januari - 2 Februari 2011, Vol 1, Hal 280-283, Publisher Stanford Geothermal Program, ISBN: 978161782788
- Diky Irawan, Prihadi Sumintadireja, Asep Saepuloh: 2-D Subsurface Imaging Techniques for Deep Mineral Mapping Using Geoelectrical and Induced Polarization (IP) Methods. Procedia Earth and

Planetary Science, Volume 6, 2013, Pages 139-144, Publisher: Elsevier BV, ISSN: 18785220

- Hendra Grandis, Diky Irawan, and Prihadi Sumintadireja: Shallow to Moderate Depth Resistivity Structure of a Geothermal Field from Inversion of Geo - Electrical Sounding Data, Proceeding 2nd ITB Geothermal Workshop 2013, Bandung 4 - 8 March 2013, p. 97-104, Publisher ITB, ISBN: 978602905663
- Asep Saepuloh, Arif Susanto, Prihadi Sumintadireja, and Emmy Suparka: Characterizing Surface Manifestation of Geothermal System Under Torrid Zone Using Synthetic Aperture Radar (SAR) Data, Proceedings World Geothermal Congress, Viewa from down under-Geothermal in Perspective, Melbourne, Australia, 19 - 25 April 2015
- Prihadi Sumintadireja and Diky Irawan: Static Electrode DC Resistivity Measurement at Surface Water for Pond Subsurface Layer Imaging, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Padjadjaran Earth Dialogues: Internasional Symposium on Geophysical Issues, 8-10 Juni 2015, Bandung, Vol. 29, No.1, 2016, No 012024, Publisher IOP Publishing Ltd, ISSN: 1755 - 1315, H-Index = 34, SJR 2016 = 0.199, SNIP 0,409
- Ilham Arisbaya, H Lestiana, M M Mukti, L Handayani, H Grandis, Warsa, and P Sumintadireja: Garsela Fault and other NE-SW active faults along the southern part of Java Island, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, ISSN: 1755-1315, Volume 789, Nomor 1, 27 Agustus 2021, page 012-065, IOP Publishing
- Prihadi Sumintadireja: Application of Geo-electrical Method in Preliminary Study for Earth Electrode Site Selection, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, ISSN: 1755 - 1315, Vol. 1031, 31 Mei 2022, p. 012017

e. Dalam Prosiding/Seminar Nasional

- Diky Irawan S, Alditama Prihadi, Hilman Mardian, and Prihadi Sumintadireja: Model Sederhana Luapan LUSI untuk Prediksi 40 Tahun Mendatang, Proceeding PIT IAGI Lombok 2010 The 39th IAGI Annual Convention and Exhibition, Senggigi Beach-Lombok, 22-25 November 2010, No. 103, ISBN: 9789798126222

- Saepuloh A, Urai M, Sumintadireja P, and Suryantini: Spatial Priority Assessment of Geothermal Potentials Using Multi-Sensor Remote Sensing Data and Applications ", Proceeding of The 1st ITB Geothermal Workshop 2012, Toward National Geothermal Capacity Building for Supporting Geothermal in Indonesia, March 6-8 Maret 2012, Bandung, p. 95-103, ISBN: 97860207052170, Publisher Geothermal ITB
- Hendra Grandis and Prihadi Sumintadireja: Quasi - 2D Resistivity Model from Inversion of CSAMT (Controlled - Source Audio - frequency Magnetotellurics) Data, Proceedings HAGI - IAGI Joint Convention, Medan, 28 – 31 October 2013, No. Artikel 59, Publisher HAGI-IAGI-IAFMI-IATMI
- Sumintadireja P and Saepuloh A: Significant Role of Remote Sensing Technology in Geology Explorations, Proceeding of the 34th of Asia Conference on Remote Sensing (ACRS) 2013,20-24 Oktober 2013, Bali-Indonesia. Bridging Sustainable Asia, Hal 416-422, ISBN: 9786029439335
- Asep Saepuloh, Minoru Urai, Suryantini, and Prihadi Sumintadireja: Estimating Geothermal Potentials Using Fuzzy - Geostatistics of Multi - Sensor Remote Sensing Data, Proceeding 2nd ITB Geothermal Workshop 2013 Institut Teknologi Bandung, Bandung. Indonesia, March 4 - 8 2014, p. 113-121, ISBN: 9786027861282
- Prihadi Sumintadireja, Dasapta E Irawan, Yuano Rezky, Prana Ugiana Gio, and Anggita Agustin: Classifying Hot Water Chemistry: Application of Multivariates statistics, Conference: The 5th ITB International Geothermal Workshop, The New Era: Initiatives, Strategies, Opportunities, adn Challenges Toward Geothermal Development in Indonesia, Institut Teknologi Bandung, March 28 April 1, 2016, Article number 31, Publisher: ITB, ISBN: 9781510832299 / ISSN: 1755 – 1315
- Hendra Grandis and Prihadi Sumintadireja: Improved Pseudo-Section Representation for CSAMT Data in Geothermal Exploration, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Southeast Asian Conference on Geophysics 31 Agustus-3 September 2016, Bali,

Indonesia, ISSN: 1755 - 1315, Vol. 62, No. 1, April 2017, p. 1-8, IOP Publishing, H-Index = 34, SJR 2017 = 0.149

- Prihadi Sumintadireja, and Diky Irawan: Sub Surface Geoelectrical Imaging for Potential Geohazard in Infrastructure Construction in Sidoarjo, East Java, IOP Conf. Series: Earth and Environmental, 2nd Transdisciplinary Research on Environmental Problems in Southeast Asia (TREPSEA 2016), 20-22 September 2016, Bandung, Indonesia, Vol. 71, No. 1, 2017, No 012009, p. 1-8, ISSN: 1755 - 1315, Publisher IOP Publishing Ltd. H-Index = 34, SJR 2017 = 0.149, SNIP 0
- Hendra Grandis, and Prihadi Sumintadireja: Ground Magnetic Survey for Swallow Iron Ore Prospecting, EAGE - HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience & Engineering, 9 - 13 April 2018, Yogyakarta, Vol 2018, Hal. 1-5. Publisher European Association of Geoscientists & Engineers
- P. Sumintadireja and Hendra Grandis: Adaptation of Zohdy's Method for Controlled-Source Audio-Frequency Magnetotelluric (CSAMT) Data Interpretation with Layered Model, 2nd South Asian Conference on Geophysics, 7 -10 August 2018, Bali-Indonesia, Vol. 318, No. 012030, Publisher IOP Publishing Ltd.
- Prihadi Sumintadireja: Geoelectrical Equipment Research Activity in Laboratory of Exploration and Geothermal, at Geology Department ITB, 5th International Congress On Technology Engineering & Science (ICONTES), 1 - 2 Februari 2018, Kuala Lumpur - Malaysia, Hal 75-84.
- Edy Wijanarko, Prihadi Sumintadireja, Warsa Warsa, Hendra Grandis: Delineating Basin in Atambua, West Timor with Novel Gravity Data, ITB Graduate School Conference, Vol. 1, No.1, 21 Desember 2021, p. 11 - 19.
- Ilham Arisbaya, Edy Wijanarko, Hendra Grandis, Warsa Warsa, Prihadi Sumintadireja: An Attempt to Depict Deformation Under a Young Volcanic Covered Area Using 3D Gravity Data Inversion in Southern Garut, Indonesia, ITB Graduate School Conference, Vol. 1, No.1, 21 Desember 2021, p. 46 - 60. ITB.

f. Buku Referensi

- Prihadi Sumintadireja: Geofisika Terapan untuk Geologi Eksplorasi, Halaman: 159, ISBN 978-623-297-287-2, 2023, PT ITB Press

VII. PENGHARGAAN

- Satya Lencana 10 Tahun, 2002
- Pengabdian 25 Tahun ITB, 2012
- Satya Lencana 20 Tahun, 2013
- Satya Lencana 30 Tahun, 2018
- Pengabdian 35 Tahun ITB, 2022

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen Teknik Geologi, Tahun 2008
- Sertifikasi Profesi Teknik Geologi, Tahun 2020

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
👤 Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
📄 APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id  [FgbItb](https://www.facebook.com/FgbItb)  [FGB_ITB](https://twitter.com/FGB_ITB)
📸 [@fgbitb_1920](https://www.instagram.com/fgbitb_1920)  [Forum Guru Besar ITB](https://www.youtube.com/ForumGuruBesarITB)

ISBN 978-623-297-477-7

