

**Pemodelan Gerakan Penurunan Tanah (*Land Subsidence*) Area Lumpur
Lapindo, Sidoarjo Menggunakan Data Mikrogravity**

SKRIPSI

**Diajukan Untuk Melengkapi Persyaratan Memperoleh
Gelar Sarjana Fisika**

Oleh:

AHMAD ILHAMI

0304020027



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM FISIKA
2009**

**Pemodelan Gerakan Penurunan Tanah (*Land Subsidence*) Area Lumpur
Lapindo, Sidoarjo Menggunakan Data Mikrogravity**

SKRIPSI

**Diajukan Untuk Melengkapi Persyaratan Memperoleh
Gelar Sarjana Fisika**

Oleh:

AHMAD ILHAMI

0304020027



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM FISIKA
2009**

HALAMAN PENGESAHAN

Nama : AHMAD ILHAMI

NPM : 0304020027

Departemen: Fisika

Peminatan : Geofisika

Judul Skripsi : Pemodelan Gerakan Penurunan Tanah (*Land Subsidence*) Area Lumpur Lapindo, Sidoarjo Menggunakan Data Mikrogravity

Skripsi ini telah diperiksa dan disetujui oleh

Dr. H. M. Syamsu Rosyid, M.si

Pembimbing

Lingga Hermanto, M.si

Penguji I

Dr. M. Rivadi, M.Si

Penguji II

Dr. Santoso Soekirno

Ketua Departemen Fisika

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan karunianya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tugas akhir dengan baik. Shalawat dan salam semoga senantiasa tercurahkan kepada teladan terbaik kita Rasulullah Saw, serta para keluarga dan sahabat beliau.

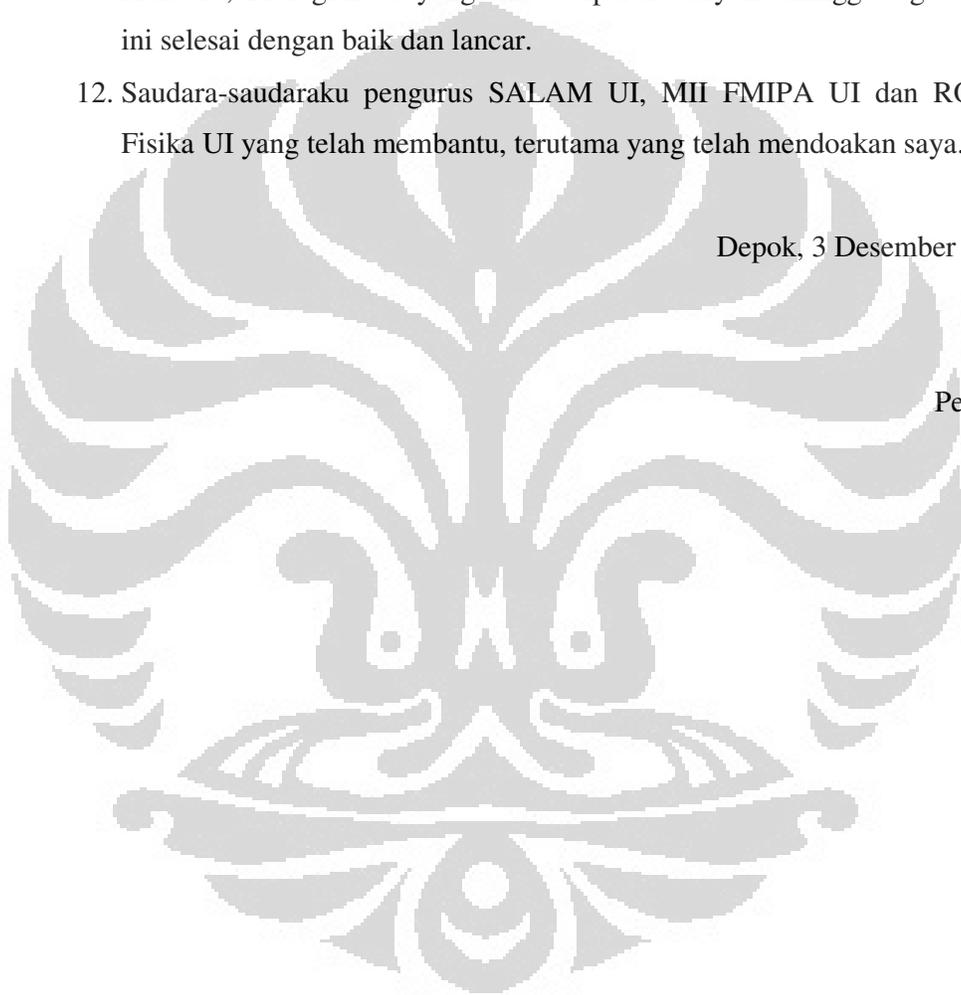
Saya sangat berterima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan berupa fasilitas dan doa serta motivasi, karena dengan itulah penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini dengan baik, sehingga dengan menyelesaikannya penulis dapat memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr H. M. Syamsu Rosyid, M. Si selaku dosen pembimbing yang telah mengarahkan dan memberikan saran serta memberikan persetujuan sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan sebaik-baiknya.
2. Dr. Eng Yunus Daud selaku ketua peminatan Geofisika dan penguji yang telah memberikan persetujuan dan saran-sarannya.
3. Dr. M. Riyadi. M.Si selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan dan saran.
4. Dr. Imam Fakhruddin, sebagai kordinator pendidikan Departemen Fisika dan ketua sidang yang juga telah melancarkan segala sesuatu yang terkait dengan tugas akhir penulis.
5. Bapak Lingga Hermanto, M.si yang telah berkenan menjadi penguji sidang skripsi penulis dan telah meluangkan waktunya untuk berdiskusi.
6. Bapak Yusuf Mahmud dari BMKG yang telah mempercayakan memberikan data gaya berat untuk kemudian diolah sebagai penelitian penulis.
7. Dr. Sastra Kusuma Wijaya yang telah memberikan pengarahan akademis selama masa kuliah dan mempermudah proses perkuliahan.
8. Orang tua penulis Ismail Aziz dan adik penulis Nur Inayati yang terus memotivasi penulis dalam setiap kesempatan.

9. Seluruh dosen dan staf Departemen Fisika yang telah mendidik memberikan ilmunya dan melancarkan proses perkuliahan kepada penulis selama masa kuliah, semoga Allah memberikan RahmatNya.
10. Saudaraku Ahmad Arselan Rambe dan Khoirul Amri, Geografi 2004 yang telah dengan tulus ikut membantu penyelesaian tugas akhir ini.
11. Saudaraku Imanuddin Rahman, Fisika Medis 2004 dan Dimar Adi Kuncoro, Biologi 2005 yang turut berperan banyak sehingga tugas akhir ini selesai dengan baik dan lancar.
12. Saudara-saudaraku pengurus SALAM UI, MII FMIPA UI dan ROHIS Fisika UI yang telah membantu, terutama yang telah mendoakan saya.

Depok, 3 Desember 2009

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ahmad ilhami

NPM : 0304020027

Program Studi : Geofisika

Departemen : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam

Jenis karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PEMODELAN GERAKAN PENURUNAN TANAH (*LAND SUBSIDENCE*)
AREA LUMPUR LAPINDO, SIDOARJO MENGGUNAKAN DATA
MIKROGRAVITY**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 3 Desember 2009

Yang menyatakan

(Ahmad Ilhami)

Nama : Ahmad Ilhami

Program studi : Geofisika

**Judul Skripsi: Pemodelan Gerakan Penurunan Tanah (Land Subsidence)
Area Lumpur Lapindo, Sidoarjo Menggunakan Data
Mikrogravity**

ABSTRAK

Telah terjadi semburan lumpur di Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur, yang telah berlangsung selama tiga tahun. Salah satu dampak dari semburan lumpur tersebut adalah penurunan tanah (*land subsidence*), untuk itu telah dilakukan survey gaya berat yang mengindikasikan adanya penurunan tanah tersebut.

Beberapa penelitian juga telah dilakukan dan menunjukkan adanya penurunan tanah sebesar ± 2 cm/hari. Mengacu pada hasil penelitian tersebut, maka dapat diestimasikan bagaimana penurunan tanah yang akan berdampak pada daerah sekitar dalam kaitannya dengan metode *gravity*.

Besar penurunan tanah di estimasikan berkurang sebesar 2.5% atau 0.05 cm/tahun dengan semakin jauhnya dari pusat semburan, yang menghasilkan arah penurunan menuju pusat semburan dan melingkupi area yang lebih luas dibandingkan dengan tahun 2006 dan tahun 2007 yaitu diperkirakan pada radius 2 km dari pusat semburan atau seluas 24 km² dengan perkiraan lapisan clay menipis setebal 40 m pada pusat semburan dengan kedalaman 300-1000 m.

Kata kunci: semburan, Sidoarjo, *subsidence*, *gravity*

Name : Ahmad Ilhami

Program study : Geophysics

Title of essay : **Modeling of Land Subsidence in Lapindo Mud Area, Sidoarjo Using Microgravity Data**

ABSTRACT

Mud flow were happened in Porong, Sidoarjo Regency, East Java for three years. One of the impact of mudflow is land subsidence. Therefore survey of gravity have been done and indicated of land subsidence in that area.

Some of research other the gravity survey have been done and indicated the rate of land subsidence in the area of mud is approximately 2 cm/day. Base on the research, so can be simulated and estimated how land subsidence will be impact to around in related with gravity method.

The land subsidence is estimated to be less for 2,5 percent or 0,05 centimetre/year with increasing distance from the centre of mudflow, which is production the decline of direction toward the centre of mudflow and including the large area than in 2006 and 2007 that is in radius 2 kilometre from the centre of mudflow or about 25 km² with the estimation that the clay layer became less for about 40 metre on the centre of mudflow inside about 300-1000 metre.

Keyword: mudflow, Sidoarjo, subsidence, gravity

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	iv
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Permasalahan.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Pembatasan Masalah	3
1.5 Metode Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TEORI DASAR	7
2.1 Konsep Metode Gravitasi (Gaya Berat).....	7
2.2 Potensial Gravitasi	10
2.2.1 Turunan Potensial Gravitasi	11
2.3 Konsep Gravitasi Bumi Dan Kaitannya Dengan Metode Gravitasi.....	12
2.3.1 Medan Gravitasi Bumi	13
2.3.2 Koreksi Dan Reduksi Gravitasi	14
2.4 Pengukuran Gravitasi.....	17
2.5 Teori Dasar Mikrogravitasi 4D.....	19
2.6 Teori Dasar Penurunan Tanah (<i>Land Subsidence</i>).....	22
2.6.1 <i>Land Subsidence</i> di Porong, Sidoarjo.....	22

BAB III DATA DAN PENGOLAHAN.....	24
3.1 Lokasi Penelitian.....	24
3.2 Data Geologi Dan Penelitian Lain.....	25
3.2.1 Data Geologi.....	25
3.2.2 Data Penelitian Lain	27
3.3 Data Mikrogravity.....	27
3.4 Pengolahan Data.....	29
3.4.1 Alur Pengolahan Data.....	30
BAB IV ANALISIS DAN INTERPRETASI	32
4.1 Elevasi Area Lumpur Lapindo.....	32
4.2 Hasil Penelitian Lain dan Indikasi Penurunan Tanah.....	33
4.3 Penurunan Tanah Area Lumpur Lapindo.....	37
4.4 Data Gravity Area Lumpur Lapindo Tahun 2006.....	39
4.5 Data Gravity Area Lumpur Lapindo Tahun 2008.....	41
4.6 Selisih Nilai Gravitasi.....	44
4.7 Penipisan Lapisan Subsurface Area Lumpur Lapindo.....	51
4.8 Anomali Residual Area Lumpur Lapindo Tahun 2009.....	54
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	56
5.1 Kesimpulan	56
5.2 Saran	56
DAFTAR ACUAN	57
LAMPIRAN	60

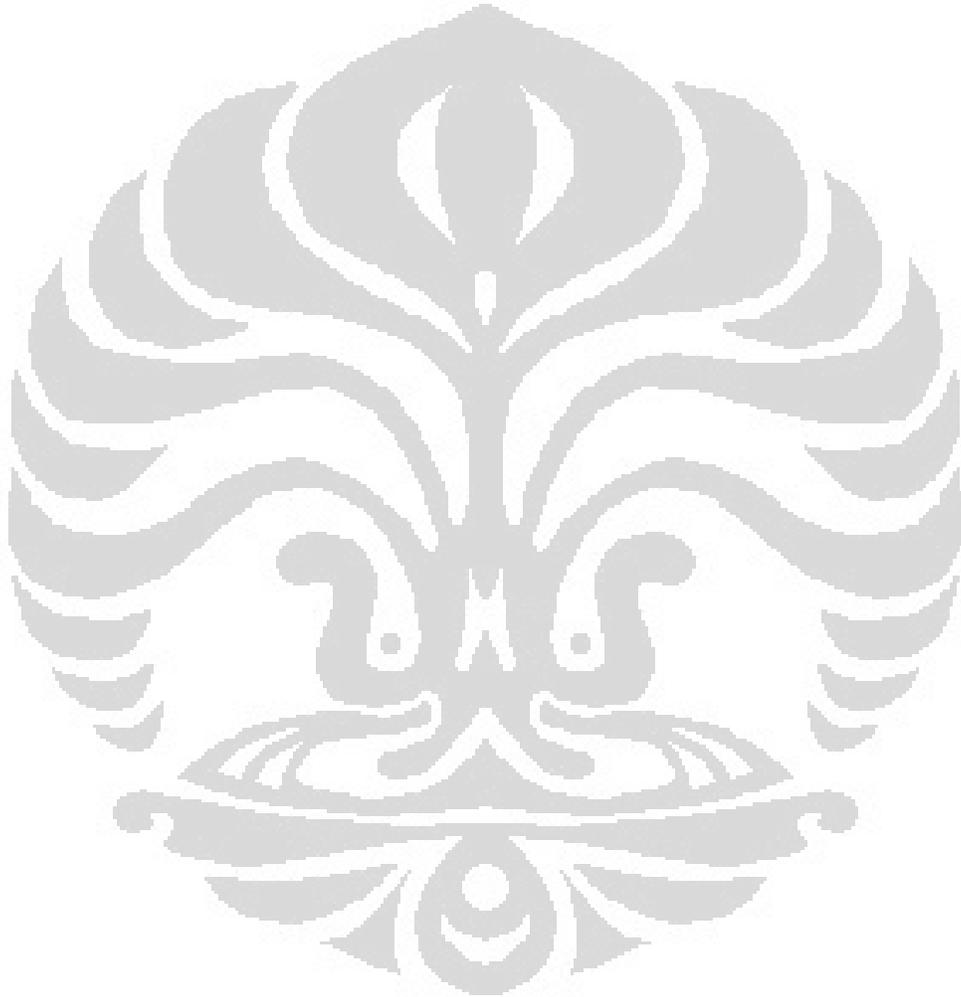
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Bagan alir penelitian.....	5
Gambar 2.1. Potensial gravitasi.....	8
Gambar 2.2. Percepatan gravitasi yang disebabkan oleh benda dua dimensi yang tak beraturan.....	9
Gambar 2.3. Anomali gayaberat pada titik $P(x,y,z)$ di permukaan akibat benda 3D dengan rapat massa $\rho(\alpha,\beta,\gamma)$	20
Gambar 3.1. Peta lokasi Porong, Kabupaten Sidoarjo, Propinsi Jawa Timur	24
Gambar 3.2. Peta geologi Sidoarjo	25
Gambar 3.3. Gambar sumur Banjarpanji 1, daerah Porong, Kabupaten Sidoarjo.....	26
Gambar 3.4. Kerusakan infrasturktur di daerah sekitar lokasi semburan lumpur akibat dari adanya penurunan tanah.....	29
Gambar 3.5 Titik pengamatan area lumpur Sidoarjo tahun 2008, dengan jarak antar titik ± 250 m.....	28
Gambar 3.6 Bagan alir pengolahan data.....	31
Gambar 4.1. Topografi daerah penelitian.....	32
Gambar 4.2. Morfologi daerah Porong, Sidoarjo.....	33
Gambar 4.3. Kontur ketinggian dengan estimasi gerakan penurunan tanah hasil penelitian pada tahun 2006 dan 2007.....	34
Gambar 4.4. Hasil interpretasi data interferogram, yang menunjukkan kemungkinan daerah amblesan tahun 2006.....	35
Gambar 4.5. Kerusakan-kerusakan bangunan (a) Posisi beberapa kerusakan bangunan warga di sekitar area semburan, (b) keretakan bangunan di Desa Gempol Sari, (c) keretakan lantai rumah warga di Desa Renokenongo,	36
Gambar 4.6. Anomali residual Sidoarjo tahun 2006	39
Gambar 4.7. Interpretasi gravitasi anomaly residual 2006 area lumpur lapindo.....	40
Gambar 4.8. Anomali residual Sidoarjo 2008, interval kontur 0.2 mgal.....	41

Gambar 4.9. <i>Overlay</i> anomali residual 2008 dan 2006.....	42
Gambar 4.10. Peta kontur anomaly residual Sidoarjo 2006 (a) dengan 2008 (b).....	43
Gambar 4.11. Selisih nilai gravitasi Agustus – Oktober 2006	44
Gambar 4.12. Selisih gravitasi Sidoarjo, kurun waktu 2008-2009, interval kontur 0.5 mgal.....	45
Gambar 4.13. Arah penurunan tanah hasil interpretasi GPS dengan beberapa tanda-tanda penurunan tanah berupa keretakan-keretakan	46
Gambar 4.14. Gerakan penurunan tanah area lumpur lapindo 2009.....	47
Gambar 4.15. (a) Penurunan <i>phail scale</i> , (b) Penurunan tanggul	47
Gambar 4.16. <i>Overlay</i> kontur selisih gravitasi dengan peta lokasi Kecamatan Porong.....	48
Gambar 4.17 <i>Overlay</i> kontur selisih gravitasi Agustus – Oktober 2006 dengan kontur selisih gravitasi tahun 2008 – 2009.....	49
Gambar 4.18. Kontur estimasi perubahan elevasi 2008-2009 untuk tiap titik pengamatan.....	50
Gambar 4.19. <i>Cross section</i> selisih gravitasi 2008-2009 (line CC).....	51
Gambar 4.20. Grafik besar perubahan elevasi pada lintasan CC, nilai terbesar pada angka 7 m/tahun.....	52
Gambar 4.21. Grafik perubahan g observasi tahun 2008-2009.....	52
Gambar 4.22. Penipisan lapisan <i>subsurface</i> area lumpur lapindo.....	53
Gambar 4.23. Peta kontur anomali residual 2009, interval kontur 0,2 mgal.....	54
Gambar 4.24. <i>Overlay</i> kontur anomaly residual tahun 2008 dengan tahun 2009, interval kontur 0,2 mgal.....	55

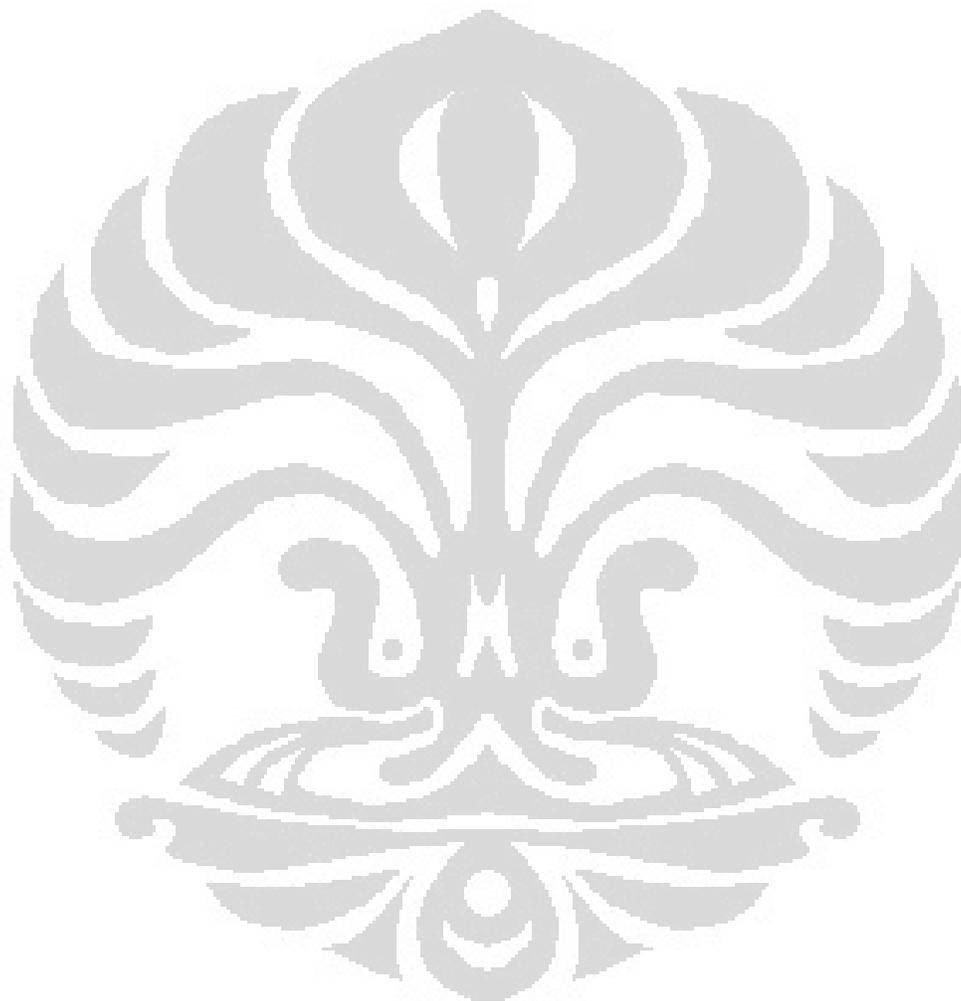
DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Nilai penurunan tanah area lumpur lapindo..... 39



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Mikrogravity 2008.....	57
--	----



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Fenomena-fenomena alam banyak sekali terjadi di Indonesia akhri-akhir ini, seperti banjir, gunung meletus, gempa bumi, semburan lumpur, maupun peristiwa alam lainnya. Hal-hal tersebut dimungkinkan dapat terjadi karena letak strategis Negara Indonesia secara geografi dan tatanan tektoniknya. Fenomena alam yang sangat fenomenal saat ini terjadi di sumur pengeboran minyak PT Lapindo Brantas Inc, Sidoarjo, Jawa Timur, yaitu semburan lumpur yang tak berhenti sampai sekarang. Semburan lumpur ini telah berlangsung selama kurang lebih 3 tahun dan telah menimbulkan kerugian materil yang cukup besar.

Ada tiga kemungkinan yang akan terjadi sebagai efek dari semburan lumpur jika tidak dapat dihentikan. Pertama, kawasan setempat akan menjadi gunung, apabila volume lumpur lebih besar dari volume tanah yang turun, atau kedua, akan tetap menjadi kawasan datar jika volume lumpur dan penurunan tanah seimbang. Dan ketiga, juga dapat menjadi danau jika volume penurunan tanah (ambles) lebih besar daripada volume semburan lumpur. Namun, yang pasti kemungkinan terjadi penurunan tanah secara mendadak secara teori sangatlah kecil. Saat ini yang harus diwaspadai adalah pergerakan tanah dan penurunan tanah yang dapat menyebabkan pergeseran rel kereta api atau putusya jalan tol yang tentunya hal tersebut sangat mempengaruhi aspek social kemasyarakatan yang lebih luas.

Semburan lumpur panas di Sidoarjo saat ini volumenya telah mencapai lebih dari 13 juta m³ yang menggenangi tanah seluas kurang lebih 110,84 hektare. Luapan lumpur ini dari hari ke hari semakin banyak, setiap hari rata-rata lumpur yang keluar mencapai 50.785 m³ (Gunradi, dkk., 2007).

Bahkan, menurut penelitian yang dimuat dalam harian Kompas 2006, Desa Siring yang terletak sekitar 300 meter sebelah barat titik semburan, permukaan tanahnya turun sekitar 88 sentimeter dalam sebulan atau 2,5

sentimeter tiap harinya. Padahal dalam standard normal, penurunan tanah maksimal 10 sentimeter per tahun.

Terlepas sejauh mana kebenaran berita di media massa, penurunan tanah ini harus di monitor tiap waktu. Sehingga kemungkinan-kemungkinan buruk dapat diantisipasi sebelumnya dan agar dapat diperoleh solusi untuk mengatasi terjadinya kemungkinan buruk tersebut. Fenomena rel kereta api yang melengkung, pipa gas Pertamina yang meledak adalah diantara efek buruk yang muncul dengan terjadinya penurunan tanah.

Salah satu dari metode geofisika yang dapat digunakan untuk mengamati penurunan tanah adalah dengan melakukan survey gravitasi, yaitu melakukan pengamatan perubahan gaya berat secara berkala (Styles et al., 2005).

Pengamatan perubahan gaya berat pada kasus ini bertujuan untuk memantau efek perubahan massa yang ada di bawah permukaan akibat semburan lumpur tersebut. Dari hasil pengamatan gaya berat akan diperoleh nilai anomaly microgravity 4D. Nilai anomali gaya berat ini berbanding langsung dengan perubahan rapat massa bawah permukaan dan atau terjadinya penurunan permukaan tanah (*Subsidence*). Untuk mengetahui hal ini digunakan suatu pendekatan matematis dari fungsi Green's, karena fungsi ini berhubungan dengan bentuk benda bawah permukaan dan jarak dari suatu stasiun (Kadir, 1999).

Survey monitoring 4D microgravity menggunakan waktu sebagai dimensi keempatnya. Dimensi waktu berimplikasi bahwa anomali gaya berat adalah *anomaly time-lapse* yang artinya adalah bahwa perbedaan harga gaya berat di suatu stasiun terjadi dalam interval waktu tertentu. Dalam penelitian ini interpretasi data dilakukan dengan metode forward modeling, yaitu dengan membuat model geometri benda anomali dengan rapat massa tertentu. Respons gayaberat dihitung pada titik amat yang telah ditentukan sebagai akibat dari anomali suatu benda dengan rapat massa tertentu. Nilai gayaberat perhitungan ini dibandingkan dengan nilai gayaberat observasi. Jika kedua nilai tersebut berbeda jauh, maka perlu dilakukan modifikasi model benda anomaly tersebut (geometri, posisi atau rapat massa).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan di atas, maka dalam tugas akhir ini, masalah yang akan dirumuskan adalah pemodelan data mikrogravitasi untuk mengestimasi laju penurunan permukaan tanah.

1.3 Batasan Masalah

1. Data yang digunakan hanya satu data pengukuran *microgravity* yang dilakukan pada tahun 2008 sehingga kita mengestimasi besar laju *land subsidence* (berdasarkan hasil penelitian lain) pada tiap data pengamatan untuk mendapatkan besar selisih gravitasi
2. Kita menganggap tidak terjadi perubahan rapat massa (ρ tetap)

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini yaitu:

1. Memahami konsep permodelan *microgravity* berulang untuk kegiatan monitoring.
2. Pemodelan laju dan arah pergerakan *land subsidence* area penelitian
3. Perkiraan luas area terdampak *land subsidence*
4. Pemodelan penipisan lapisan *subsurface* area penelitian
5. Perkiraan asal/*source* semburan lumpur

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian untuk tahap awal dari penelitian ini dimulai dengan mencari, mengumpulkan, dan mempelajari studi literatur mengenai Lumpur Lapindo, Sidoarjo, baik dari segi geologi dan hasil dari penelitian lain (survey GPS dan Interferogram). Proses akuisisi data menggunakan Gravimeter *Scintrex Type CG-3M*.

Pengolahan data *microgravity* dilakukan dengan koreksi elevasi, koreksi pasang surut dan koreksi drift dengan menggunakan *Microsoft Office Excel* hingga mendapatkan nilai medan gravitasi.

Selanjutnya dengan *Surfer8* dapat di visualisasikan anomaly residual dan perbedaan nilai-nilai medan gravitasi. Tahap selanjutnya adalah dengan

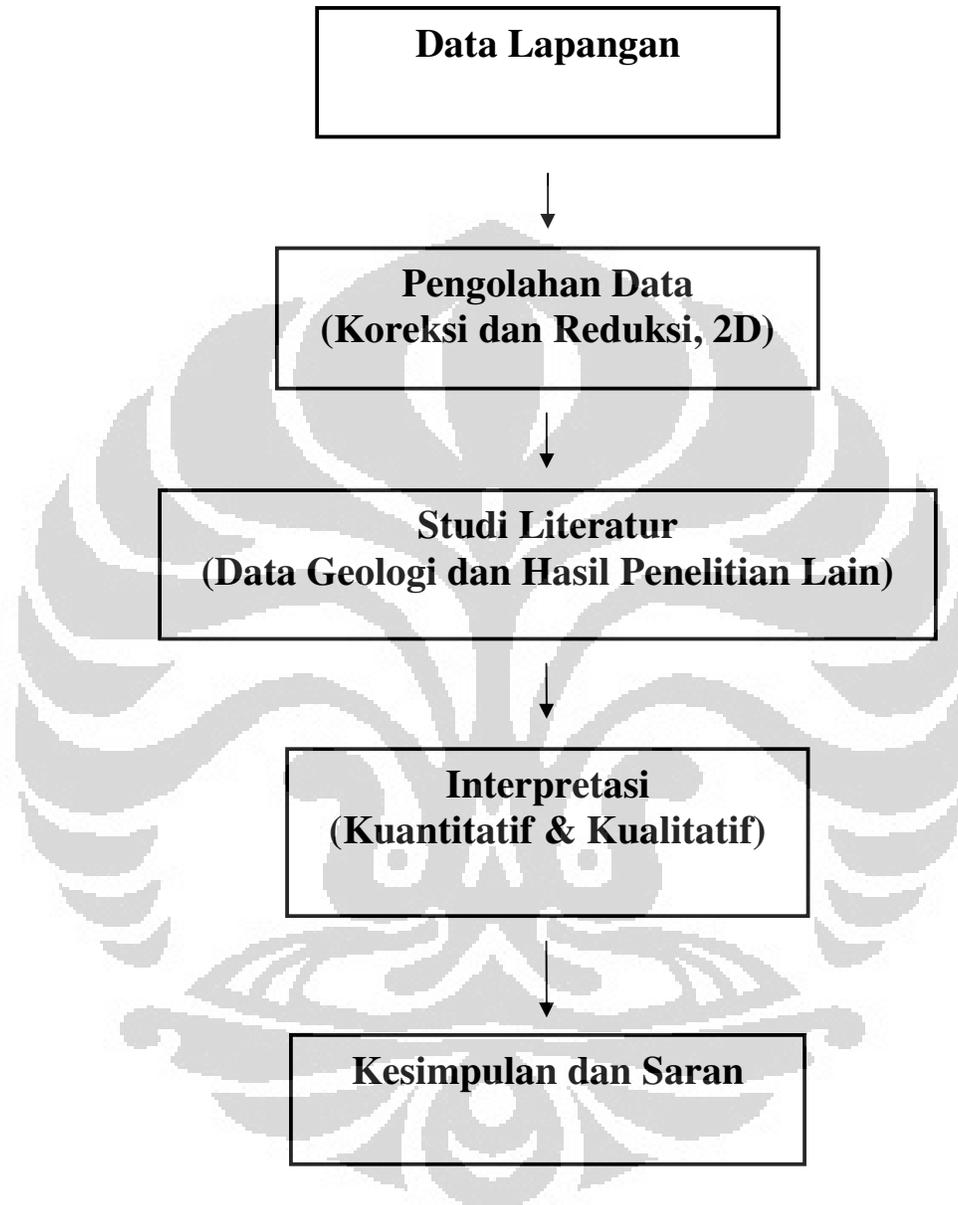
menggunakan *grav2d*, membuat model dua dimensi benda yang mempengaruhi nilai medan gravitasi positif dan negatif dengan nilai densitas tertentu.

Tahapan terakhir adalah membuat interpretasi terpadu dari hasil simulasi perbedaan nilai gravitasi 2008 dan 2009 dengan data-data pendukung dari penelitian lain, untuk memprediksi penurunan tanah pada rentang tahun tersebut.

Adapun metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Tinjauan pustaka, mempelajari buku, jurnal, artikel, dan situs yang terkait dengan metode 4D-mikrogravitasi.
2. Melakukan studi dengan metode diskusi kepada dosen, pembimbing, ataupun praktisi yang berhubungan dengan permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini.
3. Pengumpulan data, mengumpulkan data-data yang terkait dengan proyek yang sedang dikerjakan.
5. Melakukan tahap pemrosesan data, pemodelan yang kemudian diinterpretasikan (Gambar 1.1).
6. Membuat laporan mulai dari latar belakang masalah, tujuan, dasar teori, analisis, hingga ditarik kesimpulan mengenai tugas akhir tersebut.

Secara garis besar, metode yang dilakukan pada penelitian tugas akhir ini dapat digambarkan dalam alir berikut :



Gambar 1.1 Bagan Alir Penelitian

1.6 Sistematika Penulisan

Pada bab I dituliskan mengenai latar belakang dilakukannya penelitian ini beserta tujuan yang diharapkan dapat tercapai, pembatasan masalah agar lebih spesifik arah penelitiannya, kemudian metode penelitian sebagai panduan dalam kerangka berpikir ilmiah dan terdapat sistematika penulisan.

Untuk bab II, berisi mengenai tinjauan pustaka yang di dalamnya terdapat teori dasar gaya gravitasi eksplorasi untuk monitoring, koreksi-koreksi untuk mendapatkan nilai medan gravitasi, perhitungan untuk mendapatkan estimasi perubahan massa subsurface dari nilai medan gravitasi yang didapatkan serta data penunjang berupa data geologi.

Pada bab III berisi data monitoring gaya berat yang berisi mengenai desain dan metode pengukuran dalam penelitian ini yang meliputi titik pengamatan, elevasi dan medan gravitasi.

Pada bab IV berisi analisis yang dibuat berdasarkan hasil dari pengolahan data mengenai perubahan nilai gravitasi yang dapat menggambarkan perubahan elevasi.

Terakhir di bab V terdapat hasil akhir yang merupakan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan, serta saran yang dibuat dengan pemikiran agar penelitian selanjutnya berkaitan dengan judul ini mendapatkan hasil yang lebih representatif.

BAB II

TEORI DASAR

2.1 Konsep Metode Gravitasi(Gaya Berat)

Metode Gravitasi merupakan salah satu Metode Geofisika yang prinsip kerjanya didasarkan pada perbedaan medan gayaberat akibat dari perbedaan rapat massa batuan di bumi. Dengan dasar ini, percepatan gravitasi bumi dapat terukur dilapangan yang kemudian di olah untuk mendapatkan anomali percepatan gravitasi bumi. Anomali percepatan gravitasi bumi ini disebabkan oleh adanya kontras densitas batuan dibawah permukaan.

Prinsip dasar yang digunakan dalam metode ini adalah Hukum Gravitasi Newton yang menyatakan bahwa besarnya gaya tarik menarik antara dua benda berbanding lurus dengan massa kedua benda serta konstanta gravitasi (γ) dan berbanding terbalik dengan jarak kuadrat kedua benda. Jika masing-masing benda mempunyai massa m_1 dan m_2 dan terpisah sejauh r , maka gaya gravitasi (F) yang bekerja pada kedua benda tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana γ adalah konstanta gravitasi yang besarnya $6,673.10^{-11} Nm^2kg^{-2}$

Percepatan gravitasi pada m_1 karena gaya tarik m_2 yang terpisah sejauh r dapat diperoleh secara mudah dengan cara membagi gaya (F) dengan massa m_2 , sehingga diperoleh:

$$g = \frac{F}{m_2} = \gamma \frac{m_1}{r^2} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

Pada sistem SI satuan dari percepatan adalah meter persekon persekon atau m/s^2 . Dalam sistem cgs percepatan gravitasi dinyatakan dengan cm/s^2 yang setara dengan Gal (satuan Gal diberikan untuk menghargai jasa Galileo yang merupakan pionir dalam penelitian gravitasi bumi). Percepatan gravitasi rata-rata di permukaan bumi besarnya sekitar $9,8 m/s^2$ atau 980 Gal. Dalam eksplorasi,

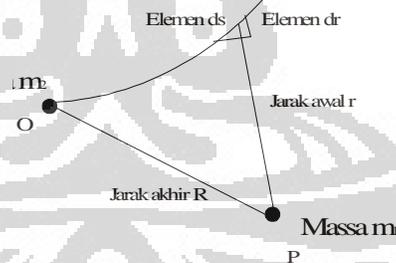
nilai anomali gravitasi yang diukur biasanya jauh lebih kecil daripada nilai gravitasi bumi tersebut. Untuk itu dalam eksplorasi digunakan satuan milliGal sebagai satuan percepatan gravitasi.

Dalam eksplorasi, metode gravitasi ini dapat di sederhanakan dengan menggunakan konsep potensial. Potensial pada gravitasi disebut potensial gravitas yang didefinisikan sebagai kerja yang dilakukan oleh gaya tarik menarik dari massa m_1 pada massa m_2 yang pindah dari satu titik referensi (tak berhingga) ke titik lainnya (Gambar 2.1).

Dari definisi dan Gambar 2.1, besar potensial gravitasi dapat kita rumuskan dalam bentuk:

$$U = \gamma m_1 \int_{\infty}^R \frac{dr}{r^2} = \gamma m_1 \frac{1}{r^2} \Big|_{\infty}^R = \gamma \frac{m_1}{R} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan r adalah jarak antara m_1 dan m_2 setelah massa m_2 berpindah ke suatu titik (O).



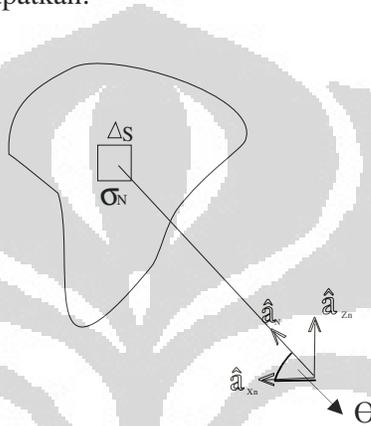
Gambar 2.1 Potensial gravitasi. Kerja yang dilakukan oleh gaya tarik dari m_1 pada m_2 yang bergerak ke titik O dari satu titik tak berhingga.

Sepanjang permukaan yang harga potensialnya konstan disebut sebagai permukaan equipotensial, jadi tidak diperlukan kerja untuk memindahkan massa di suatu titik ke permukaan equipotensial. Contoh permukaan equipotensial adalah muka laut.

Pada dimensi yang lebih luas Hukum Newton juga dapat kita gunakan. Pada penjelasan sebelumnya kita hanya membatasi pada massa dengan dimensi

yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan jaraknya. Ketika dimensinya lebih luas kita dapat menerapkannya dengan cara membaginya menjadi elemen-elemen kecil, tiap elemen tersebut memiliki dimensi yang sangat kecil.

Gaya dan percepatan merupakan besaran vektor, untuk itu memiliki nilai dan arah. Dari Gambar 2.2, ΔS adalah elemen luas, σ_n adalah massa per unit luas, a_n (a_{xn} dan a_{zn}) adalah komponen percepatan gravitasi, dan sudut antara a_n dengan a_{xn} adalah θ , maka kita dapatkan:



Gambar 2.2 Percepatan gravitasi yang disebabkan oleh benda dua dimensi yang tak beraturan

Percepatan pada komponen x
$$g_{xn} = \gamma \sigma_n \frac{\Delta S}{r_n^2} \cos \theta \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan $\cos \theta = \frac{x}{r_n}$, maka persamaan 2.4 dapat ditulis:

$$g_{xn} = \gamma \frac{x}{r_n^2} \sigma_n \Delta S \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan menerapkan hal yang sama untuk menentukan percepatan pada komponen z, dan mengganti $\cos \theta$ dengan $\sin \theta$ yang besarnya $\frac{z}{r_n}$, maka akan kita peroleh:

$$g_{zn} = \gamma \frac{z}{r_n^2} \sigma_n \Delta S \dots\dots\dots(2.6)$$

Elemen percepatan masing-masing komponen ini kita jumlahkan menjadi:

$$\text{Untuk komponen x} \quad g_x = \sum^N \gamma \frac{x\sigma_n}{r_n^3} \Delta S \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Begitu pula untuk komponen y dan z, dengan mengganti *subscript* x dengan y atau z.

Karena ΔS sangat kecil sehingga mendekati batas ds, maka dapat dituliskan dalam bentuk integral

$$\text{Untuk komponen x} \quad g_x = \int^S \gamma \frac{x\sigma}{r_n^3} dS \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

Begitu pula untuk komponen y dan z, dengan mengganti *subscript* x dengan y atau z. Dengan mengacu persamaan (2.7) dan (2.8), kita dapat memperoleh persamaan percepatan gravitasi dalam tiga dimensi (arah x, y dan z), dimana luasan S kita ganti dengan volume V dan massa per unit luas σ diganti dengan massa per unit volume ρ , masing-masing komponen percepatan gravitasi dapat di tulis sebagai berikut:

$$\text{Untuk komponen x} \quad g_x = \int^V \gamma \frac{x\rho}{r_n^3} dV \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

$$\text{Untuk komponen y} \quad g_y = \int^V \gamma \frac{y\rho}{r_n^3} dV \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\text{Untuk komponen z} \quad g_z = \int^V \gamma \frac{z\rho}{r_n^3} dV \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

Pada eksplorasi gravitasi hanya gaya pada arah vertikal yang di ukur oleh alat/Gravimeter). Untuk itu kita disini hanya menggunakan percepatan gravitasi pada arah z yaitu g_z .

2.2 Potensial Gravitasi

Pada bagian 2.1 telah disinggung sedikit tentang potensial gravitasi, berikut akan di jelaskan lebih terperinci dengan pendekatan matematis.

Medan gravitasi adalah medan konservatif, artinya kerja yang dilakukan oleh medan gravitasi tidak bergantung kepada lintasan, akan tetapi hanya

tergantung pada titik awal dan titik akhir. Dengan mengacu pada bagian 2.1 persamaan (2.2) dan (2.3) kita dapat menuliskan percepatan gravitasi dalam bentuk:

$$\nabla U(x, y, z) = -g(x, y, z) \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

dimana g adalah percepatan gravitasi.

Dengan persamaan (2.12) diatas kita akan mendapatkan hasil seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.3). Dengan menggunakan pemikiran bahwa benda terbagi kedalam elemen-elemen yang lebih kecil, secara matematis dapat kita tuliskan:

$$dU = \gamma \frac{dm}{r} = \gamma \rho \frac{dxdydz}{r} \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

Untuk mendapatkan besar potensial U , kita dapat mengintegrasikan persamaan (2.13) diatas menjadi:

$$U = \iiint_{xyz} \left(\frac{\rho}{r} \right) dxdydz \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

Persamaan (2.14) kita turunkan secara parsial dalam arah z , kemudian kita substitusi kedalam persamaan (2.10) dan akan diperoleh:

$$g = \left(\frac{-\partial U}{\partial z} \right) = \gamma \rho \iiint_{xyz} \left(\frac{z}{r^3} \right) dxdydz \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

Persamaan (2.15) pada dasarnya sama dengan persamaan (2.11), hanya saja dalam bentuk matematis yang berbeda. Disini hanya diturunkan parsial pada arah z karena pada pengukuran gravitasi dilapangan hanya komponen z yang terukur.

2.2.1 Turunan Potensial Gravitasi

Dalam beberapa hal, kuantitas yang berguna dalam menganalisis gravitasi adalah dengan menurunkan persamaan potensial gravitasi. Contohnya pada persamaan (2.15) potensial U diturunkan parsial dalam arah vertikal atau arah z dan itu merupakan kuantitas percepatan gravitasi yang diukur oleh alat Gravimeter.

Jika persamaan (2.15) kita turunkan lagi dalam arah z atau U_{zz} maka akan kita dapatkan:

$$\frac{\partial g}{\partial z} = -\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -U_{zz}$$

$$\frac{\partial g}{\partial z} = \gamma \rho \iiint_{xyz} \left(\frac{1}{r^3} - \frac{3z^2}{r^5} \right) dx dy dz \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

Persamaan (2.16) ini di katakan sebagai gradien vertikal dari gravitasi (Telford, et al., 1990)

Jika persamaan (2.16) kita turunkan lagi (turunan kedua) atau U_{zzz} akan kita dapatkan:

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = -\frac{\partial^3 U}{\partial z^3} = -U_{zzz}$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = 3\gamma \rho \iiint_{xyz} \left(\frac{5z^3}{r^7} - \frac{3z}{r^5} \right) dx dy dz \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

Frekuensi dari penurunan ini dalam interpretasi gravitasi digunakan untuk mengisolasi anomali dan untuk *upward* atau *downward continuation*.

2.3 Konsep Gravitasi Bumi Dan Kaitannya Dengan Metode Gravitasi

Anomali gravitasi adalah perbedaan antara gravitasi observasi dengan gravitasi normal yang mengacu pada perhitungan rumus gravitasi dengan bidang referensi geodesi tertentu. Nilai gravitasi observasi tergantung pada bentuk geometri permukaan bumi, struktur, geologi serta penyebaran rapat massa batuan penyusun kulit bumi. Sedangkan nilai gravitasi normal tergantung pada bentuk dan ukuran bidang referensi geodesi yang digunakan dalam pemetaan gravitasi tersebut (Gaol, 2007). Secara lebih rinci nilai gravitasi tergantung pada lima faktor, yaitu lintang (*latitude*), elevasi, topografi atau *terrain*, pasang surut, dan variasi densitas di bawah permukaan bumi (Telford et al, 1990).

2.3.1 Medan Gravitasi Bumi

Permukaan bumi merupakan bidang tak beraturan yang cenderung berbentuk lengkung, sehingga hubungan geometris antara titik satu dengan lainnya dipermukaan bumi tidak dapat ditentukan. Untuk keperluan pemetaan diperlukan model matematis yang mempunyai bentuk dan ukuran tertentu sehingga mendekati bentuk dan ukuran bumi. Bentuk yang paling mendekati adalah elipsoida, karena elipsoid (lebih tepat disebut elipsoid referensi) ini merupakan model matematis yang hanya mempunyai bentuk dan ukuran tertentu, maka model tersebut tidak mempunyai arti fisis sehingga tidak mempunyai makna yang berarti bagi penelitian geodesi. Oleh karenanya maka elipsoid referensi perlu didudukkan (diorientasikan) dalam ruang sedemikian rupa, sehingga bersinggungan atau hampir berhimpit dengan permukaan bumi. Dalam kondisi dan situasi demikian, elipsoid tersebut dapat dinyatakan sebagai model matematis bumi sehingga dapat berfungsi sebagai bidang acuan perhitungan geodesi (Gaol, 2007).

Disamping model elipsoid referensi, dikenal pula model lainnya yang sulit didefinisikan secara matematis karena memerlukan lebih banyak parameter. Model ini dikenal sebagai geoid. Secara ilmiah geoid didefinisikan sebagai bidang ekuipotensial gravitasi bumi, sehingga potensial disetiap tempat pada permukaan geoid tersebut adalah sama. Secara praktis, geoid didefinisikan sebagai bidang permukaan laut rata-rata yang tidak terganggu gaya apapun (Gaol, 2007).

Dalam pertemuan *International Association of Geodesy* (IAG) yang dilakukan di Madrid Tahun 1924, telah menetapkan Elipsoid Hayford 1909 sebagai Elipsoid Referensi Internasional. Pertemuan ini juga menetapkan kecepatan rotasi bumi (ω) dan nilai gravitasi normal di ekuator (G_e). Dengan demikian, Elipsoid Hayford 1909 ditetapkan sebagai acuan geometrik (posisi geodetik) dan medan gravitasi bumi. Kemudian pada tahun 1967 IAG mengadakan pertemuan di Lucerne, intinya membicarakan masalah *elipsoid reference Hayford 1909*. Berdasarkan hasil penelitian lebih lanjut diketahui bahwa elipsoid dan rumusan gravitasi normal yang disusun berdasarkan parameter elipsoid tersebut dinilai belum mencerminkan keadaan yang sebenarnya.

Kemudian IAG pada pertemuan *General Assembly International Union of Geodesy and geophysics* (IUGG) ke XV di Moskow, pada Agustus 1971 mendefinisikan suatu elipsoid referensi yang dinamakan *Geodetic Reference System 1967* (GRS 1967) dengan persamaan secara matematis sebagai berikut:

$$g_n = 978.031.846(1+0.005.278.895\sin^2\varphi+0.000.023.462\sin^4\varphi) \quad \dots\dots(2.18)$$

2.3.2 Reduksi Dan Koreksi Gravitasi

Seperti telah disebutkan diatas bahwa besarnya gravitasi dipengaruhi atau bergantung oleh lima faktor, yaitu: latitude atau lintang, elevasi atau ketinggian, topografi atau medan (*terrain*), pasang surut, dan variasi densitas di bawah permukaan bumi. Pada metode gravitasi ini yang kita inginkan hanya besarnya gravitasi akibat dari variasi densitas dibawah permukaan bumi, untuk itu kita harus mereduksi dan mengoreksi data hasil pengukuran dilapangan dari pengaruh lainnya.

Dengan adanya pengaruh nilai gravitasi tersebut diatas, maka pengolahan data gravitasi dimulai dari data mentah kemudian dilanjutkan dengan pengolahan data awal dan pengolahan data lanjutan. Pengolahan data awal dimulai dari data mentah, konversi ke harga mgal, koreksi pasang surut, koreksi alat atau koreksi *drift*. Tahapan selanjutnya, gravitasi observasi tersebut direduksi dengan berbagai macam reduksi antara lain: reduksi gravitasi normal, reduksi udara bebas (*free air*), reduksi Bouguer, reduksi medan dan diperoleh anomali Bouguer lengkap pada topografi. Secara matematis reduksi dan koreksi data gravitasi adalah sebagai berikut:

a. Koreksi Pasang Surut (*Tide Correction*)

Alat yang digunakan pada pengukuran gravitasi (*Gravimeter*) sangat sensitif merekam efek gravitasi dari gaya tarik Matahari dan Bulan. Efek ini bergantung pada latitude dan waktu. Untuk mengkoreksinya dibutuhkan pengetahuan tentang posisi Matahari dan Bulan.

Secara matematis besar koreksi pasang surut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Tdc = \frac{3\gamma}{2} \left\{ \frac{2M}{2d^2} (\sin^2 p - 1) + \frac{Mr}{d^4} (5\cos^3 p - 3\cos p) + \frac{2S}{3D^3} (3\cos^2 q - 1) \right\} \dots(2.19)$$

di mana :

p = sudut zenit bulan

q = sudut zenit matahari

M = massa bulan

S = massa matahari

d = jarak antara pusat bumi dan bulan

D = jarak antara pusat bumi dan matahari

γ = konstanta gravitasi Newton

r = jarak pengukuran dari pusat bumi

b. Koreksi Apungan (*Drift Correction*)

Koreksi apungan diberikan sebagai akibat adanya perbedaan pembacaan gayaberat dari stasiun yang sama pada waktu yang berbeda, yang disebabkan karena adanya guncangan pegas alat gravimeter selama proses transportasi dari satu stasiun ke stasiun lainnya. Untuk menghilangkan efek ini, akusisi data didesain dalam suatu rangkaian tertutup, sehingga besar penyimpangan tersebut dapat diketahui dan diasumsikan linier pada selang waktu tertentu (t).

$$Kd(ti) = \left\{ \frac{(t_i - t_{aw})}{(t_{ak} - t_{aw})} \right\} (F_{ak} - F_{aw}) \dots\dots\dots(2.20)$$

c. Koreksi Gravitasi Normal

Koreksi ini didasarkan pada kenyataan bahwa bentuk bumi lebih mendekati bentuk spheroid, sehingga digunakan spheroid referensi sebagai pendekatan untuk muka laut rata-rata (geoid) dengan mengabaikan efek benda

diatasnya. Spheroid referensi (g lintang) diberikan oleh persamaan GRS67 (*Geodetic Reference System 1967*) seperti persamaan (2.18).

d. Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Merupakan koreksi pengaruh ketinggian terhadap medan gravitasi bumi, yang merupakan jarak stasiun terhadap referensi. Besarnya faktor koreksi (*Free Air Correction*) untuk daerah ekuator hingga lintang 45° atau -45° adalah $-0,3086$ mGal/m. Secara matematis koreksi udara bebas dituliskan sebagai:

$$g_{fa} = 0.3086h \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

Sehingga besarnya anomali pada posisi tersebut menjadi anomali yang disebut *Free Air Anomaly* (FAA)

$$\Delta g_{fa} = g_{obs} - g_n + 0.3086h \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

e. Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

Koreksi ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan benda berupa *slab* tak berhingga yang besarnya diberikan oleh persamaan:

$$B_c = 0.04193\rho h \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

dengan h adalah elevasi (dalam meter) dan ρ (dalam gr/cc) adalah massa jenis.

Salah satu metode yang digunakan untuk mengestimasi rapat massa adalah metode Nettleton. Dalam metode ini dilakukan korelasi silang antara perubahan elevasi terhadap suatu referensi tertentu dengan anomali gayaberat-nya, sehingga rapat massa terbaik diberikan oleh harga korelasi silang terkecil sesuai dengan persamaan:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n \partial(\Delta g)_i \partial h_i}{\sum_{i=1}^n (\partial h_i)^2} \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

Selain metode Nettleton's, estimasi rapat massa dapat pula diturunkan melalui metode Parasnis.

Selanjutnya, setelah BC diberikan, anomali gayaberat menjadi *Bouguer Anomal* (BA), $BA = FAA - BC$, atau dapat diuraikan menjadi:

$$\Delta g_{fe} = g_{obs} - g_n + 0.03086h - 0.04193\rho h \quad \dots\dots(2.25)$$

f. Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Koreksi ini diterapkan sebagai akibat dari adanya pendekatan Bouguer. Bumi tidaklah datar tapi berundulasi sesuai dengan topografinya.

$$T_c = 2\pi\gamma\sigma R \quad \dots\dots(2.26)$$

Hal ini yang bersifat mengurangi dalam BA (*Bouguer Anomaly*), sehingga dalam penerapan koreksi medan, efek gayaberat blok-blok topografi yang tidak rata harus ditambahkan terhadap BA.

2.4 Pengukuran Gravitasi

Ada dua tipe pengukuran gravitasi, yaitu:

1. Pengukuran Gravitasi Absolut

Pengukuran gravitasi ini biasanya dilakukan dilaboratorium dengan waktu (*timing*) dari ayunan pendulum atau benda jatuh yang akurat. Sampai saat ini, metode standar untuk pengukuran gravitasi absolut menggunakan alat pengukur yang disebut *reversible kater Pendulum*.

2. Pengukuran Gravitasi Relatif

Pengukuran gravitasi relatif berbeda dengan pengukuran gravitasi absolut. Beberapa tipe alat telah digunakan, yaitu: *Portable Pendulum*, *Torsion Balance*, dan *Gravimeter*, *Scintrex*, dan lain-lain. *Gravimeter* adalah alat yang saat ini banyak digunakan untuk tujuan penelitian dan eksplorasi.

Beberapa tipe *Gravimeter* untuk pengukuran gravitasi relatif dijelaskan sebagai berikut:

Portable Pendulum sudah digunakan untuk keperluan Geodesi dan beberapa tujuan eksplorasi. Alat ini menggunakan prinsip ayunan pendulum yang memenuhi persamaan:

$$T^2 g = C \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

Persamaan (2.30) di turunkan, maka akan kita peroleh:

$$\Delta g = -2g \frac{\Delta T}{T} \quad \dots\dots\dots(2.28)$$

Torsion Balance menggunakan prinsip keseimbangan torsi, *Torsion Balance* ini mengukur komponen potensial arah x, y, z. Keseimbangan torsi menggunakan pula prinsip perambatan cahaya, jika terjadi penyimpangan maka akan itulah akibat adanya variasi percepatan gravitasi vertikal dan lateral.

Gravimeter menggunakan prinsip Hukum Hooke pada pegas. Pegas akan menyimpang ketika dikenai oleh suatu gaya. Secara matematis hal ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta F = M \delta g = k \delta s \quad \dots\dots\dots(2.29)$$

dan

$$T = 2\pi \left(\frac{M}{k} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(2.30)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.30) ke dalam persamaan (2.29), maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\delta g = 4\pi^2 \frac{\delta s}{T^2} \quad \dots\dots\dots(2.31)$$

Persamaan tersebut untuk tipe *Stable Gravimeter*.

Pegas yang digunakan sangat sensitif, sehingga perubahan kecil dari nilai gravitasi akan terukur yang diindikasikan terjadinya penyimpangan pegas. Ada tiga jenis *Gravimeter*, yaitu: *Stable Gravimeter*, *Unstable Gravimeter*, *LaCoste Romberg Gravimeter*, *Worden Gravimeter* (Telford et al., 1990) dan yang terbaru adalah *Scintrex*.

Relatif instrumen seperti *LaCoste Romberg* dan *Scintrex* sangat mudah untuk dibawa, ketelitiannya sesuai dengan survey gravity dan survey microgravity.

LaCoste & Romberg adalah pengukur dengan sensitivitas yang berfungsi seperti suatu seismograph yang memiliki periode panjang. Alat Scintrex CG-3M merupakan alat berbasis mikroprosesor yang mengotomatiskan gravitometer. Alat Scintrex lebih mudah penggunaannya daripada LaCoste & Romberg untuk para operator yang kurang berpengalaman dalam menggunakannya.

Pengukuran dengan metode gravitasi dapat dilakukan di darat, di laut, dan di udara tergantung dari posisi objek yang ingin kita amati. Pada dasarnya prinsip kerja alat sama dengan yang telah disebutkan sebelumnya (di darat), begitu pula dengan processing data dan interpretasi tidak jauh berbeda. Penjelasan Metode Gravitasi di laut dan di udara dijelaskan lebih detail oleh Telford et al., 1990 dalam bukunya *Applied Geophysic*.

2.5 Teori Dasar Mikrogravitasi 4D

Mikrogravitasi secara prinsip sama dengan Metode Gravitasi pada umumnya. Singkatnya metode ini merupakan pengembangan dari Metode Gravitasi. Metode Mikrogravitasi terdiri dari perhitungan perubahan gravitasi tiap waktunya dan menginterpretasikan keberadaan perubahan variasi densitas dibawah permukaan akibat perubahan massa.

Survey mikrogravitasi telah dikembangkan lebih dari sepuluh tahun dengan pengembangan yang lebih modern, instrument dengan resolusi yang tinggi, prosedur akuisisi dilapangan yang lebih hati-hati, metode reduksi data yang lebih memuaskan dan teknik analisa yang lebih tinggi.

Dalam microgravity digunakan satuan *mikrogal dimana* :

$$1 \text{ mikrogal } (\mu\text{gal}) = 10^{-8} \text{ m/s}^2$$

Nilai gravitasi pada permukaan bumi adalah sekitar 9.8 m/s^2 (9.8×10^8 microgal). Untuk mendapatkan gravitasi observasi (g_{obs}) disetiap stasiun, koreksi yang diterapkan pada metode ini adalah koreksi apungan (*drift*) dan pasang surut (*tide*).

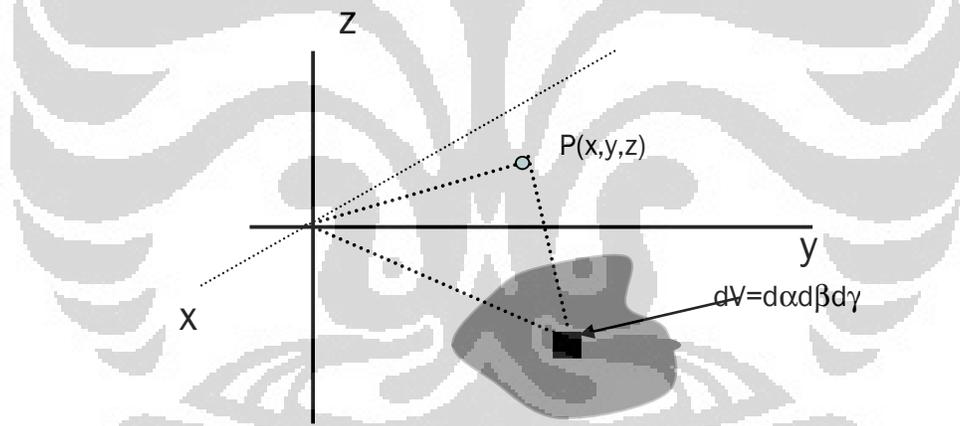
Dari hasil pengamatan gaya berat akan diperoleh nilai anomali microgravity. Kemudian anomali gaya berat yang diamati di permukaan tersebut

berbanding langsung dengan perubahan rapat massa bawah permukaan, dan untuk mengetahui hal ini digunakan suatu pendekatan matematis dari fungsi Green's, karena fungsi Green's ini berhubungan dengan bentuk benda bawah permukaan dan jarak dari stasiun (Kadir, 1999).

Secara matematis untuk mendapatkan anomali mikrogravitasi di awali dengan persamaan (2.29) yang merupakan persamaan anomali Bouguer lengkap (*Complete Bouguer Anomaly*). Anomali mikrogravitasi merupakan selisih CBA pada setiap titik dari dua kali pengukuran pada selang waktu tertentu. Secara matematis dituliskan:

$$\Delta g_B(x, y, z, \Delta t) = \Delta g_B(x, y, z, t_2) - \Delta g_B(x, y, z, t_1) \dots\dots(2.32)$$

$$\Delta g_B(x, y, z, \Delta t) = (g_{obs(2)} - g_{obs(1)}) + (0,3087 - 0,0419\rho)(h_2 - h_1) + c(\Delta h_2 - \Delta h_1) \dots\dots(2.33)$$



Gambar 2.3 Anomali gayaberat pada titik P(x,y,z) di permukaan akibat benda 3D dengan rapat massa $\rho(\alpha,\beta,\gamma)$

Anomali mikrogravitasi pada titik P(x,y,z) di permukaan akibat benda 3 dimensi dengan rapat massa $\rho(\alpha,\beta,\gamma)$

$$\Delta g(x, y, z) = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta \rho(\alpha, \beta, \gamma)(z - \gamma)}{[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2]^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \dots\dots(2.34)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.33) dan (2.34) akan didapatkan anomali antar waktu (*time-lapse anomaly*).

$$(g_{obs(2)} - g_{obs(1)}) = G \cdot \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma, \Delta t)(z - \gamma)}{[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)]^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma - (0,3087 - 0,0419\rho)(h_2 - h_1) - c(\Delta h_2 - \Delta h_1) \dots\dots\dots(2.35)$$

Dalam mikrogravitasi, distribusi anomali gravitasi dapat berubah sebagai fungsi waktu (setiap menit sampai periode tahunan) atau *time-lapse anomaly*. Perubahan distribusi anomali gravitasi sebagai fungsi waktu ini dapat disebabkan oleh:

1. Perubahan massa, misalnya disebabkan adanya eksploitasi baik dari reservoir geothermal maupun minyak dan gas. Sehingga karena ada sebagian massa yang terproduksi keluar, maka massa dalam reservoir tersebut mengalami penurunan.
2. Variasi tingkat kedalaman untuk shallow groundwater, misalkan terjadi penurunan kedalaman muka air tanah.
3. Variasi dalam kelembaban tanah, misalkan disebabkan oleh perubahan tingkat curah hujan, tingkat evaporasi atau tingkat penyerapan air tanah dan tanaman.
4. Perubahan topografi, misalkan pembuatan jalan atau bendungan yang dapat menyebabkan perubahan gravitasi secara signifikan.
5. Penurunan muka tanah atau ground subsidence.
6. Gunung api aktif dapat menyebabkan perubahan anomali gaya berat sampai dengan 400 mikrogal disebabkan aktifitas magma.
7. Operasi tambang mineral dapat menyebabkan perubahan anomali gaya berat karena ada sebagian besar massa yang hilang karena proses eksploitasi tambang mineral (Jati, 2009).

Adapun dalam penelitian ini kita mengamati perubahan anomali gravitasi yang berkorelasi dengan penurunan muka tanah.

2.6 Teori Dasar Penurunan Tanah (*Land Subsidence*)

Land subsidence didefinisikan sebagai penurunan muka tanah sebagai fungsi dari waktu yang diakibatkan oleh proses alamiah dan aktivitas manusia. Contoh penyebab terjadinya penurunan tanah adalah pengambilan air tanah yang berlebihan (*groundwater over exploitation*), keluarnya gas dan lumpur secara massif dari dalam tanah ke permukaan, penurunan karena beban bangunan di atas permukaan, penurunan karena adanya konsolidasi alamiah dari lapisan-lapisan tanah, serta penurunan karena gaya-gaya tektonik (Doukas, 2004).

Data dan informasi tentang penurunan muka tanah akan sangat bermanfaat bagi aspek- aspek pembangunan seperti untuk perencanaan tata ruang (di atas maupun di bawah permukaan tanah), perencanaan pembangunan sarana/prasarana, pelestarian lingkungan, pengendalian dan pengambilan airtanah, pengendalian intrusi air laut, serta perlindungan masyarakat (linmas) dari dampak penurunan tanah (seperti terjadinya banjir). Oleh karena itu sudah sewajarnya bahwa informasi tentang karakteristik penurunan tanah ini perlu diketahui dengan sebaik-baiknya dan kalau bisa sedini mungkin. Dengan kata lain fenomena penurunan tanah perlu dipelajari dan dipantau secara berkesinambungan, artinya proses monitoring sangat berperan.

Pada prinsipnya, penurunan tanah dari suatu wilayah dapat dipantau atau di monitoring dengan menggunakan beberapa metode, baik itu metode-metode hidrogeologis (pengamatan level muka air tanah serta pengamatan dengan ekstensometer dan piezometer yang diinversikan kedalam besaran penurunan muka tanah) dan metode geoteknik, maupun metode-metode geodetik seperti survei sifat datar (*leveling*), survei mikrogravitasi, survei GPS (*Global Positioning System*), dan InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

2.6.1 *Land Subsidence* di Porong, Sidoarjo

Contoh terdekat dan sampai sekarang masih berlangsung terkait deformasi densitas permukaan dan bawah permukaan yang berakibat pada penurunan tanah adalah semburan lumpur Lapindo yang merupakan studi kasus pada penelitian ini. Lokasi semburan lumpur ini berada di Porong, yakni kecamatan di bagian selatan

Kabupaten Sidoarjo, sekitar 12 km sebelah selatan kota Sidoarjo. Kecamatan ini berbatasan dengan Kecamatan Gempol (Kabupaten Pasuruan) di sebelah selatan. Lokasi tersebut merupakan kawasan pemukiman dan di sekitarnya merupakan salah satu kawasan industri utama di Jawa Timur. Tak jauh dari lokasi semburan terdapat jalan tol Surabaya-Gempol, jalan raya Surabaya-Malang dan Surabaya-Pasuruan-Banyuwangi (jalur pantura timur), serta jalur kereta api lintas timur Surabaya-Malang dan Surabaya-Banyuwangi. Akibat dari semburan lumpur yang terus menerus salah satu dampak yang terjadi adalah turunnya permukaan tanah tiap waktu setiap keluarnya lumpur.

Beberapa dampak yang sudah terjadi akibat semburan lumpur terkait penurunan tanah adalah sebagai berikut:

- Bangunan di Perum TAS I mengalami retak-retak pada tembok dan lantai keramiknya.
- Akibat turunnya permukaan tanah di sekitar semburan lumpur, pipa air milik PDAM Surabaya yang berada di daerah lumpur tersebut patah.
- Adanya pemuaian pada rel KA di jalur Siring–Jatirejo hingga mengakibatkan rel melengkung merupakan early warning (peringatan dini) terhadap kondisi lingkungan disekitar kawasan luapan lumpur
- Meledaknya pipa gas milik Pertamina di daerah lumpur lapindo. Hal ini disebabkan karena penurunan tanah yang dilanjutkan dengan tekanan lumpur pada pipa yang terendam sekitar 2,5 kilometer.

Secara umum informasi tentang karakteristik dan pola land subsidence (penurunan tanah) di suatu wilayah akan sangat bermanfaat dalam proses perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian pembangunan yang berkelanjutan serta peringatan dini sebagai upaya untuk menghindari dampaknya (Kelompok Keilmuan Geodesi, 2008).

BAB III DATA DAN PENGOLAHAN

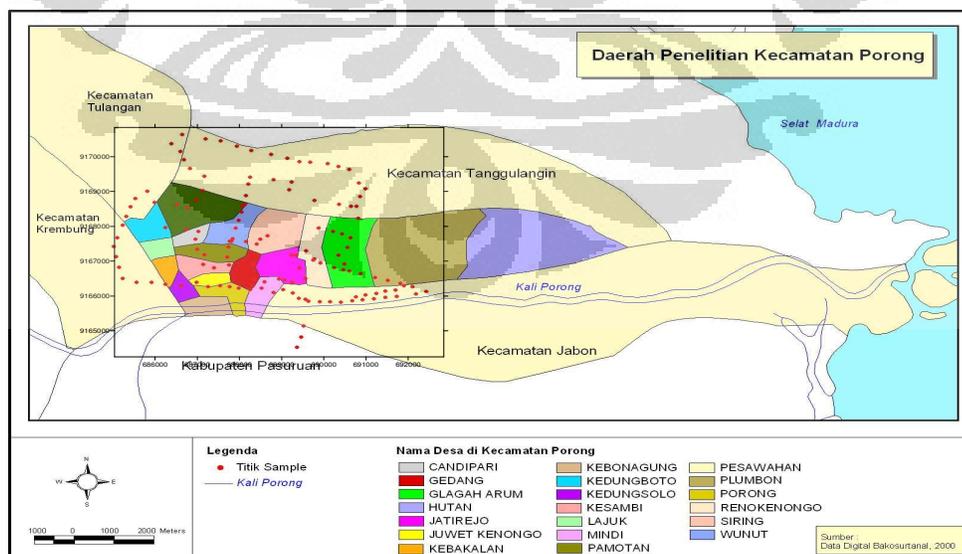
Pada Penelitian ini pengambilan data mikrogravity hanya dilakukan pada tahun 2008 oleh tim BMKG, sehingga kita hanya melakukan simulasi *land subsidence* dengan data yang ada. Oleh karena itu sangat baik jika dilakukan kembali pengambilan data pada tahun 2009, karena dengan itu akan kita peroleh perbedaan nilai gravitasi yang bisa diduga berkaitan dengan amblesan tanah di daerah penelitian dan dinamika fluida di bawah permukaan.

3.1 Lokasi Penelitian

Semburan lumpur yang sampai saat ini masih aktif dan mengeluarkan lumpur secara massif terjadi pada jarak ± 150 meter dari sumur eksplorasi Banjar Panji 1 (BPJ1), Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur.

Keluarnya lumpur secara massif ini dapat membawa dampak buruk bagi lingkungan, salah satunya adalah penurunan tanah. Maka sangat diperlukan pengetahuan penyebaran lokasi sekitar area semburan yang mengalami penurunan tanah agar dapat diantisipasi akibat buruk tersebut.

Metode gravitasi dilakukan sebagai upaya memonitoring penurunan tanah dan memprediksi penurunan tanah selanjutnya. Lokasi penelitian ini melingkupi daerah Porong (Gambar 3.1 dan Gambar 3.2).



Gambar 3.1 Peta Lokasi Porong, Kabupaten Sidoarjo, Propinsi Jawa Timur

3.2 Data Geologi Dan Data Penelitian Lain

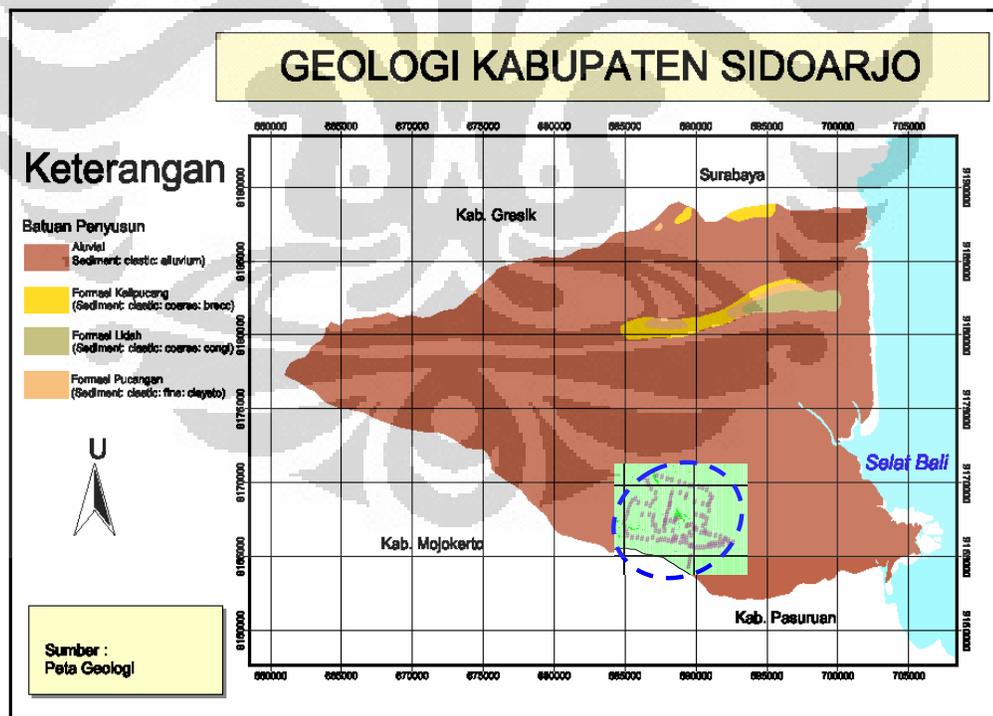
Pada Penelitian ini selain data pendukung berupa data geologi, digunakan pula data pendukung hasil dari penelitian lain terkait penurunan tanah atau amblesan di Sidoarjo.

3.2.1 Data Geologi

Berdasarkan geologi permukaan, formasi batuan di Sidoarjo terdiri dari sedimen aluvial, formasi kalipucang, lidah dan pucangan dan batuan penyusun didominasi oleh alluvial, dan sedimen klastik

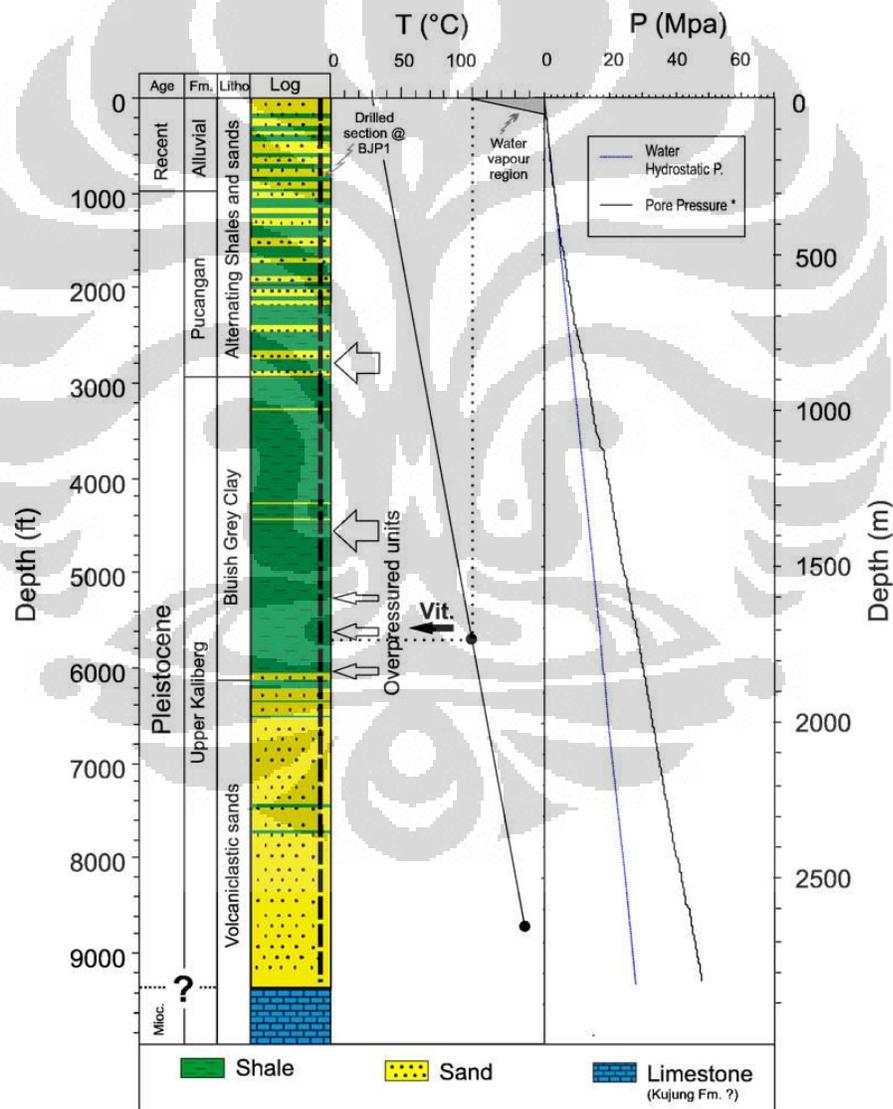
Area penelitian ini yang ditandai dengan lingkaran dengan garis putus-putus warna biru memiliki geologi permukaan berupa sedimen Aluvial yang ditandai dengan warna coklat tua pada Gambar 3.1, warna hijau menunjukkan daerah tersebut merupakan daerah dengan variasi ketinggian yang tidak cukup jauh, relatif *flate* jika dibandingkan dengan bagian barat Sidoarjo.

Berikut peta geologi permukaan Sidoarjo:



Gambar 3.2 Peta Geologi Sidoarjo (SIG, Departemen Geografi FMIPAUI, 2009)

Berdasarkan data sumur Banjar Panji sedalam 2834 meter, Sidoarjo terdiri dari beberapa formasi batuan, yaitu formasi Alluvial pada permukaan setebal ± 300 m, dan Formasi Pucangan dengan lithologi perselingan antara *shale* (batu lempung) dengan *sand* (batu pasir), dan pada bagian bawah terdapat Formasi *Upper Kalibeng* yang merupakan *overpressured mud* dengan lithologi clay berwarna abu-abu, dan paling lithologi paling bawah berupa batu pasir vulkanik (Gambar 3.3). Formasi *Upper Kalibeng* yang berumur *Pleistocene* terletak tidak selaras diatas batugamping, pada kedalaman >2834 m merupakan Formasi Kujung dengan lithologi batuan Gamping (*Limestone*) (Mazzini et al., 2007).

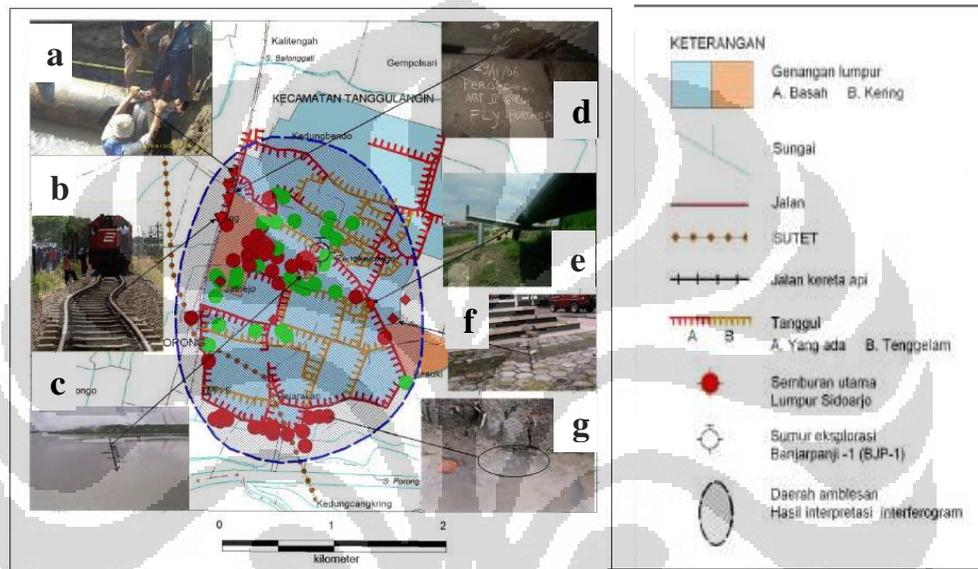


Gambar 3.3 Gambar sumur Banjar Panji 1, daerah Porong, Kabupaten Sidoarjo (Mazzini et al., 2007)

3.2.2 Data Penelitian Lain

Hasil pengukuran yang dilakukan oleh Abidin dkk., dan Deguchi dkk. Pada tahun 2007 dengan metode yang berbeda mendapatkan hasil penurunan vertikal rata-rata, yaitu sekitar 2 cm/hari.

Indikasi akibat penurunan tanah ini dapat dilihat dari keretakan-keretakan infrastruktur yang terjadi disekitar area semburan lumpur (Andreas, et al., 2008).



Gambar 3.4 Kerusakan Infrastruktur di daerah sekitar lokasi semburan lumpur akibat dari adanya penurunan tanah (Abidin, dkk., 2008)

Penjelasan gambar:

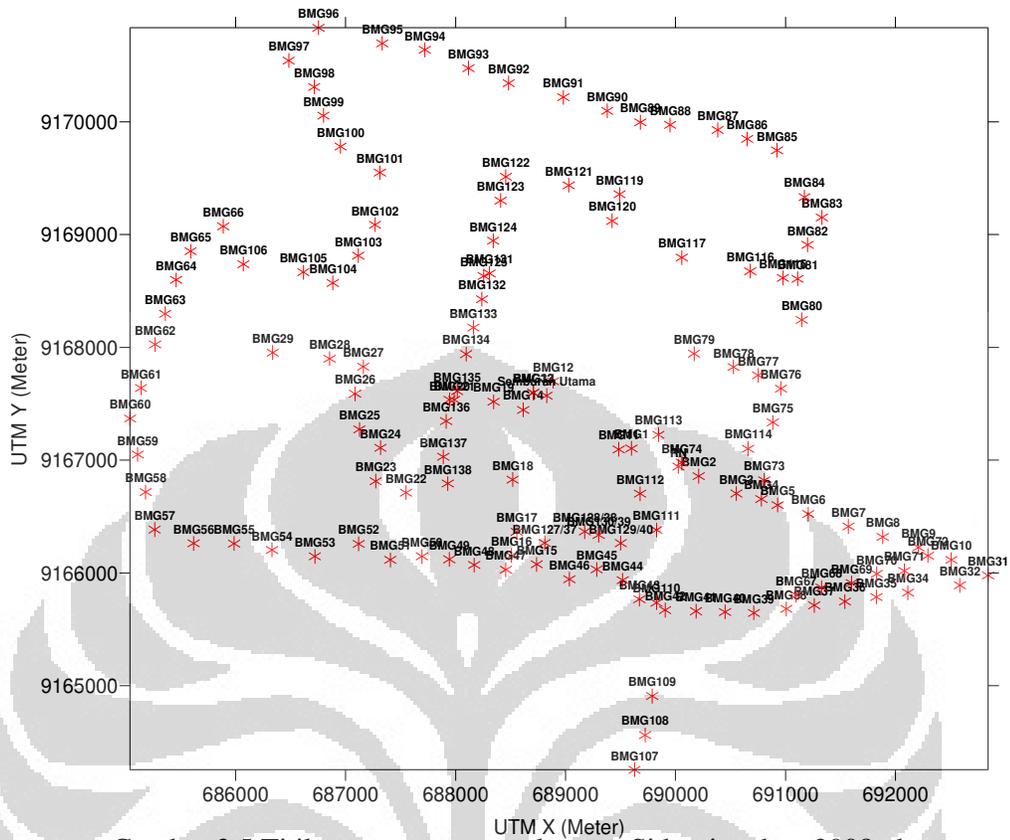
- (a) Salah satu pipa air milik PDAM Surabaya patah akibat penurunan tanah disekitar jalur pipa air. Pipa PDAM yang pecah ini merupakan pipa berdiameter 400 milimeter yang mengalirkan air dari Umbulan Pasuruan ke Surabaya dan Sidoarjo (berkapasitas 110 liter per detik) dan dari Tamanan Pasuruan ke Surabaya dan Sidoarjo (berkapasitas 220 liter per detik). Sejak adanya musibah lumpur, pipa tersebut setidaknya telah empat kali pecah. Kemungkinan selain karena penurunan tanah juga karena kelebihan beban akibat padatnya lalu lintas yang ada di jalan raya. Apalagi sejak tol ditutup, seluruh kendaraan berat lewat Jalan Porong .

- (b) Rel kereta api bengkok, diduga akibat penurunan tanah dan beban kereta. Terjadi di kawasan Ketapang utara tol buntung Porong. Panjang rel yang melengkung itu sekitar 25 meter. Menurut Zulkarnaen, juga dapat diduga akibat pergerakan tanah yang terjadi dibawah permukaan tanah. Adanya sesar geser, yaitu satu bidang tetap, lainnya bergeser atau pergeseran horisontal (BPLS, 2009)
- (c) Posisi pusat semburan lumpur. Tanah dipusat semburan lumpur telah turun sekitar 10 meter sampai tahun 2009 (Sudarsono, dkk., 2008)
- (d) Salah satu tempat di Desa Siring Barat, yang diukur nilai *dip* dan *strikenya* dan didapatkan perubahan nilai yang cukup besar yang merupakan indikasi penurunan tanah
- (e) Jalan tol porong yang mengalami kerusakan akibat adanya penurunan tanah, akibatnya sisi *fly over* jalan tol tersebut patah. Hal ini juga ditandai dengan retaknya jalan tersebut (BPLS, 2009)
- (f) Bidang permukaan jalan disebelah selatan atau sebelah barat dekat Desa Besuki yang retak akibat adanya penurunan tanah.
- (g) Bual-bual yang terdapat didaerah sebelah selatan Porong, bual-bual ini muncul diduga karena terjadi retakan atau rekahan dibawahnya dan diduga pula retakan atau rekahan tersebut dikarenakan adanya penurunan tanah disekitar area tersebut (Sudarsono, dkk., 2008).

Hasil kuantitatif penelitian tersebut selanjutnya akan digunakan untuk simulasi penurunan tanah, dengan tujuan memperoleh model kontur selisih nilai gravitasi, dengan eliminasi persamaan (2.33).

3.3 Data Microgravity

Pengukuran microgravity pada penelitian ini dilakukan oleh tim BMKG dengan menggunakan Gravimeter *Scintrex Autograv CG5*. Alat ini sudah memasukkan koreksi pasang surut, sehingga dalam pengolahan data selanjutnya tidak dilakukan koreksi pasang surut. Pengukuran gravitasi dilakukan pada tahun 2008 pada 137 titik data pengamatan dengan satu kali pengukuran.



Gambar 3.5 Titik pengamatan area lumpur Sidoarjo tahun 2008, dengan jarak antar titik ± 250 m

Adapun ketinggian daerah ini bervariasi, merupakan daerah rendah pada bagian timur dan daerah lebih tinggi pada bagian barat, tepat pada koordinat titik semburan utama memiliki ketinggian yaitu sekitar 3 m di atas permukaan laut pada tahun 2007 (Sudarsono, dkk., 2008)

Dengan data ketinggian ini kita akan mendapatkan koreksi elevasi dan koreksi Bouguer sebagai tujuan untuk memperoleh densitas dan kondisi struktur bawah permukaan saat itu dengan mendapatkan kontur anomali residual dari kontur anomali Bouguer.

3.4 Pengolahan Data

Data di olah dengan menggunakan *microsoft office excel* untuk mendapatkan anomali Bougeur. Selanjutnya data diolah dengan menggunakan *software surfer8* untuk mendapatkan kontur anomali residualnya.

Dari persamaan nilai g observasi, dapat kita simulasikan besarnya perubahan elevasi tiap titik pengamatan untuk mendapatkan nilai delta g observasi. Besar perubahan tersebut diasumsikan dengan menganggap bahwa semakin jauh titik pengamatan dari pusat semburan maka semakin kecil nilai perubahan elevasinya dengan nilai rata-rata perubahan elevasi sebesar 2 cm/hari, dengan menganggap tidak ada perubahan densitas.

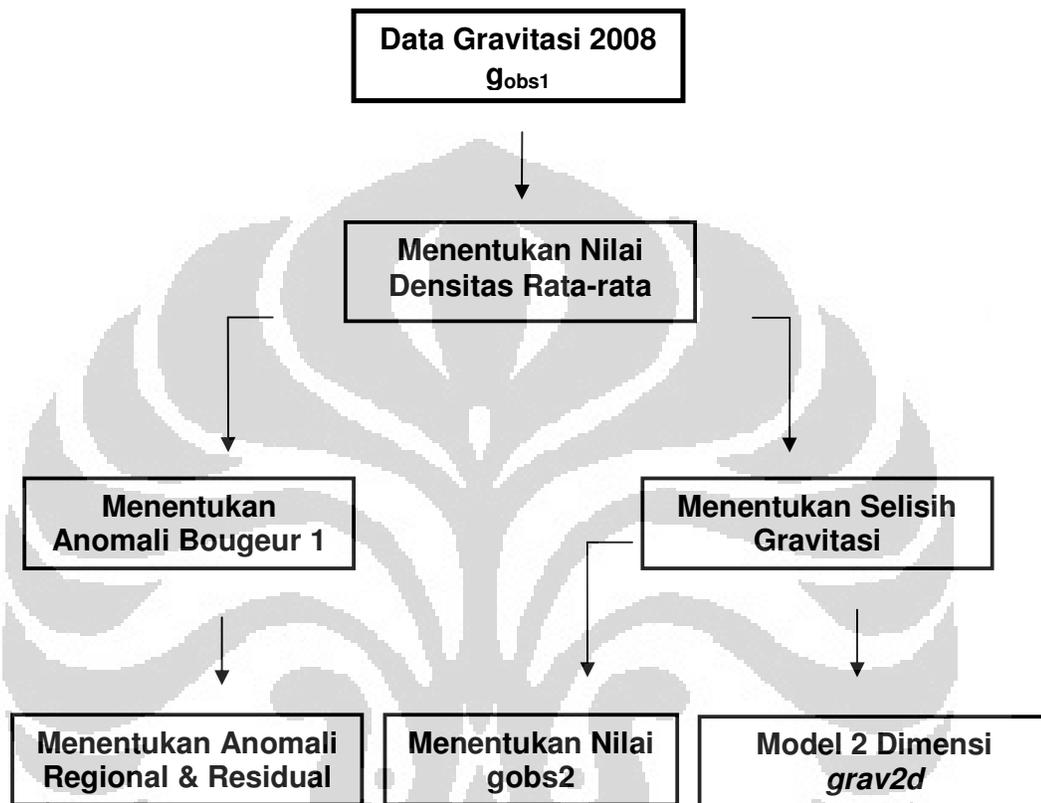
Nilai densitas rata-rata diperoleh dengan metode Parasnis, dengan mencari gradien garis lurus dengan metode kuadrat terkecil (*Least Square*). Nilai densitas ini berguna untuk melakukan koreksi Bougeur.

Selanjutnya dapat kita lakukan koreksi dan reduksi data untuk mendapatkan nilai g Bougeur dan mendapatkan kontur anomali residual dengan *software Surfer8*.

Dengan memprediksikan perubahan elevasi dan menganggap tidak ada perubahan densitas, dapat diperoleh nilai selisih gravitasi tiap titik pengukuran, dan selanjutnya diperoleh kontur selisih gravitasi.

Selanjutnya dengan mengambil garis (*cross section*) pada kontur selisih gravitasi dapat kita memodelkan penipisan lapisan yang terjadi pada subsurface dengan bantuan *software grav2d*.

3.4.1 Alur Pengolahan Data



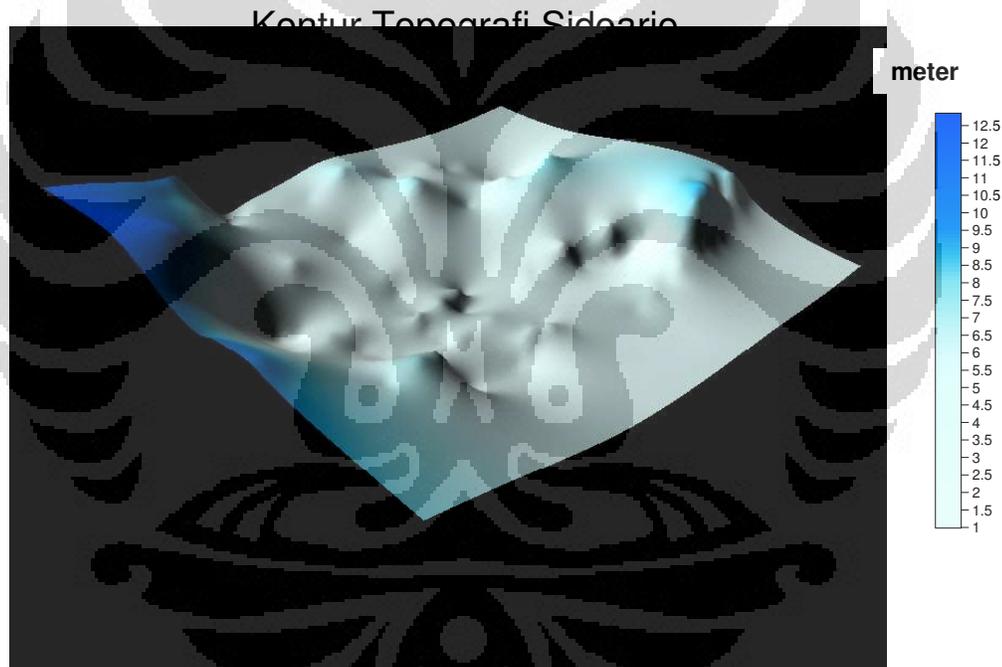
Gambar 3.6 Bagan Alir Pengolahan Data

BAB IV ANALISIS DAN INTERPRETASI

4.1 Elevasi Area Lumpur Lapindo

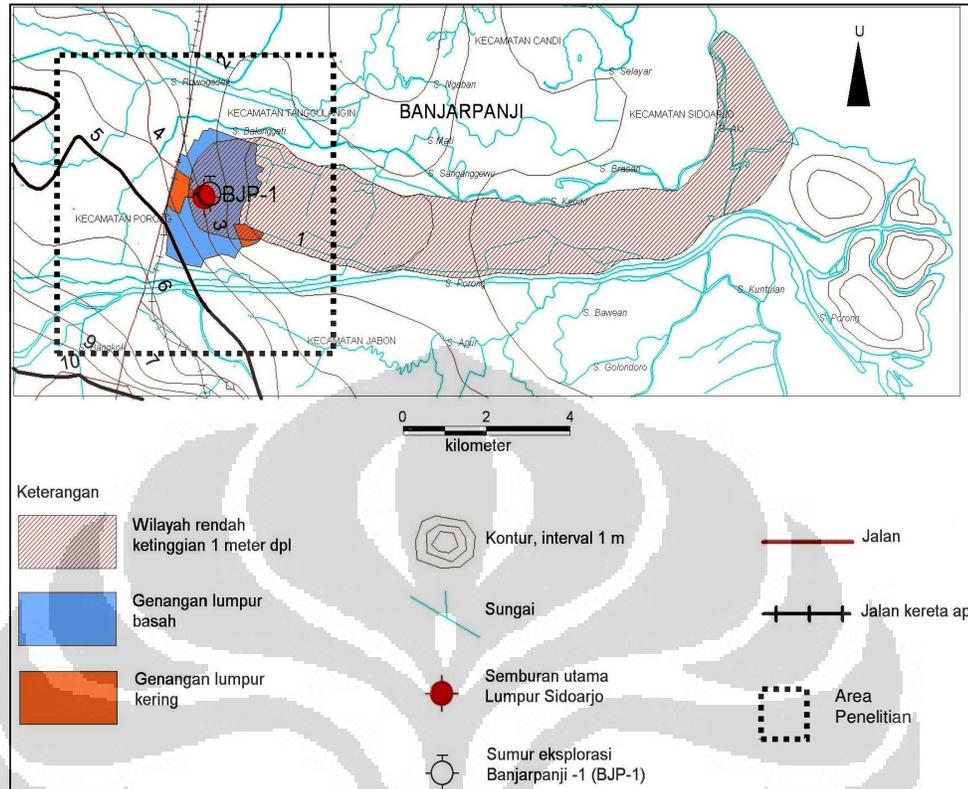
Daerah Sidoarjo berdasarkan pada nilai ketinggiannya dapat dibagi menjadi tiga bagian daerah, yaitu daerah dengan ketinggian 0-3 mdpl pada bagian timur, 3-10 mdpl pada bagian tengah, dan 11-25 mdpl pada bagian barat (PROPEDA, 2007). Area tempat terjadinya semburan lumpur berada pada daerah bagian timur dan tengah, dengan ketinggian yang variatif 1-10 mdpl.

Data ketinggian dari BMKG pada tiap titik pengamatan juga menunjukkan hal yang sama seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.1 Topografi daerah penelitian

Area yang tertinggi ditunjukkan dengan kontur warna biru tua, yang terendah berada pada titik semburan (titik merah) dengan koordinat UTM (X;688828.348279915, Y;9167571.9543661) yang telah turun sebesar 1 m sampai tahun 2008, sehingga elevasinya yang awalnya bernilai 3 mdpl berkurang menjadi 2 mdpl (Sudarsono, dkk., 2008).



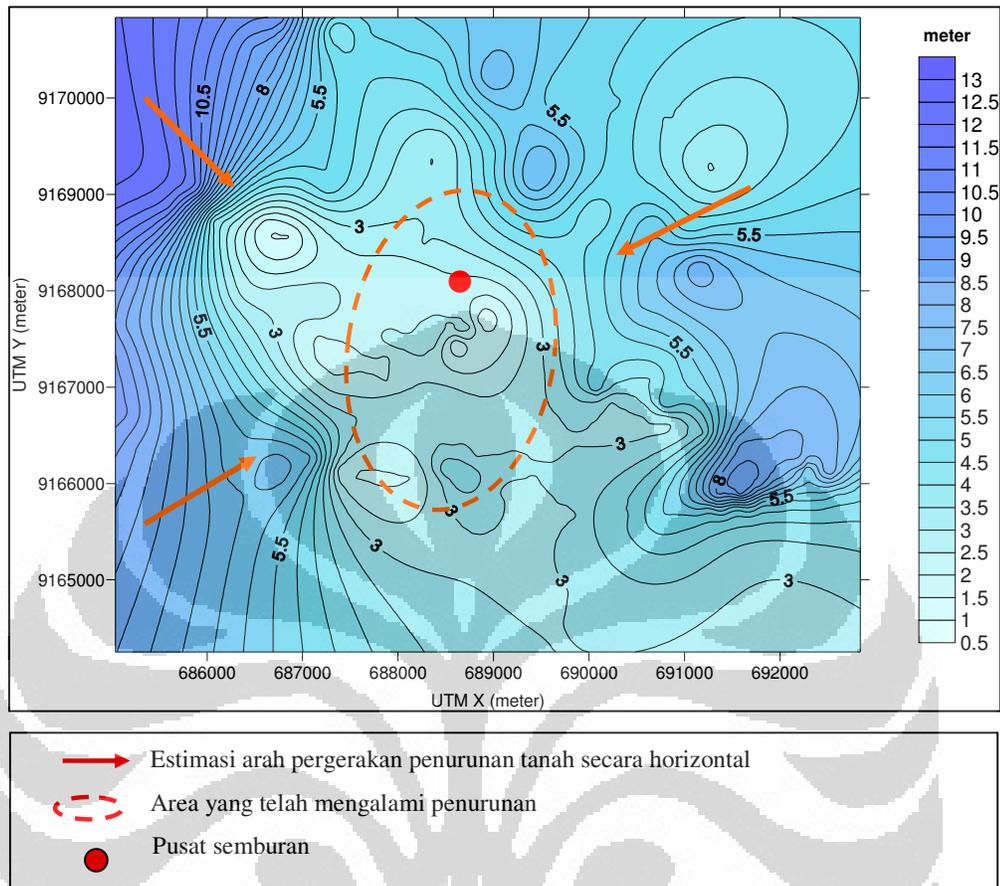
Gambar 4.2 Morfologi daerah Porong, Sidoarjo (Sudarsono, dkk., 2008)

Peta morfologi memperlihatkan daerah bagian barat relatif lebih tinggi dibandingkan dengan daerah bagian timur, ketinggian paling rendah 1 mdpl. Nilai elevasi Sidoarjo akan terus berkurang karena terjadinya penurunan tanah akibat keluarnya lumpur dari *subsurface* secara terus menerus.

Peta tersebut juga memperlihatkan area yang tergenang oleh lumpur, genangan lumpur tersebut ada yang masih berupa lumpur basah dan ada yang telah mengering.

4.2. Hasil Penelitian Lain dan Indikasi Penurunan Tanah

Dari analisa elevasi dan hasil penelitian lain, dapat kita asumsikan arah penurunan tanah secara horizontal yang paling pesat akan terjadi pada daerah yang paling tinggi dan dekat dengan pusat semburan lumpur dan mengarah ke pusat semburan.

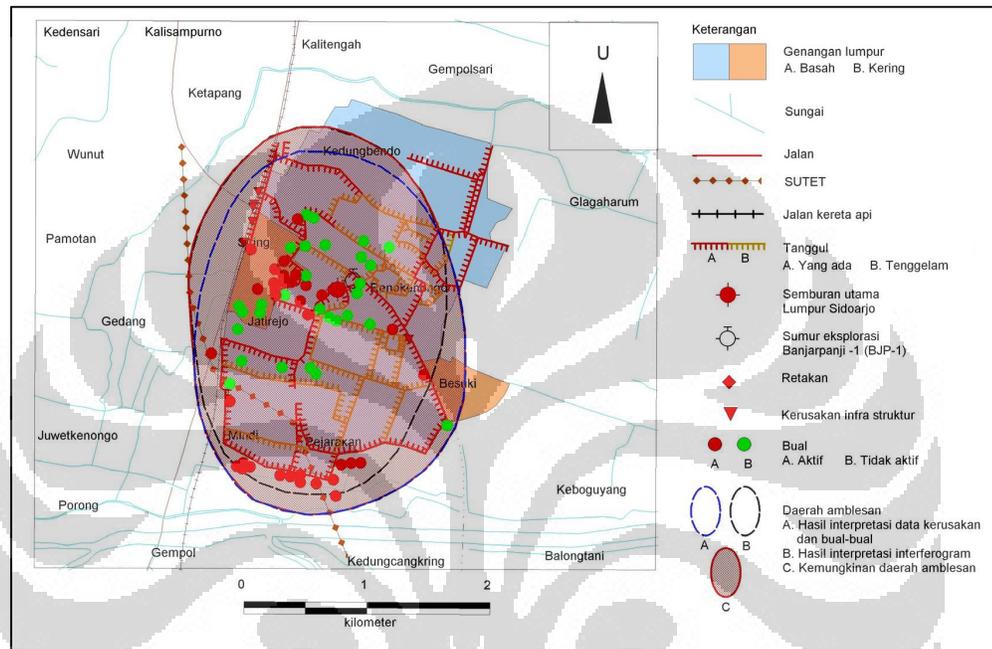


Gambar 4.3 Kontur ketinggian dengan estimasi gerakan penurunan tanah hasil penelitian pada tahun 2006 dan 2007

Estimasi arah penurunan ini berdasarkan hasil penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, yang menyimpulkan bahwa Area amblesan berbentuk elips memanjang berarah utara - selatan dengan luas 6,3 km² mencakup Kecamatan Tanggulangin: Desa Kedungbendo, Kecamatan Porong: Desa Siring, Desa Jatirejo, Desa Mindi, dan Desa Renokenongo, serta Kecamatan Jabon: Desa Pejarakan dan Desa Besuki (Sudarsono, dkk., 2008). Berarti pada tahun 2007 radius ± 1.5 km dari titik sumbuaran harus di waspadai akan terjadinya penurunan tanah.

Hasil ini juga didukung oleh penelitian interferogram yang lebih dahulu melakukan penelitian dengan menggunakan data PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) dengan latar belakang ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) L3A oleh Deguchi,

dkk. pada tahun 2007 yang menunjukkan bahwa di sekitar sumberan utama terdapat gejala amblesan. Pengamatan selama 46 hari (4 Oktober 2006 sampai 19 November 2006) menunjukkan bahwa telah terjadi amblesan sebesar 90 cm atau sekitar 1,96 cm/hari dan berbentuk elips dengan luas 5,2 km² (Sudarsono, dkk., 2008).



Gambar 4.4 Hasil interpretasi data interferogram, yang menunjukkan kemungkinan daerah amblesan tahun 2006 (Sudarsono, dkk., 2008)

Indikasi adanya *land subsidence* ditandai dengan beberapa keretakan-keretakan yang terjadi di beberapa desa sekitar lumpur Lapindo. Tanda-tanda keretakan-keretakan ini telah di inventarisir oleh beberapa penelitian seperti yang dilakukan oleh Heri, dkk. pada tahun 2007, Sudarsono dan Sujarwo pada tahun 2008 sebagai pendukung hipotesa terjadinya penurunan tanah. Lihat (Gambar 3.3) dan (Gambar 4.5).

Selain indikasi keretakan, juga terindikasi adanya bual-bual, ini juga menunjukkan adanya keretakan dipermukaan tanah, sehingga material lumpur dan fluidanya keluar melalui rekahan tersebut. Bual tersebut ada yang masih aktif dan juga ada yang sudah tidak aktif.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.5 Kerusakan-kerusakan bangunan (a) Posisi beberapa kerusakan bangunan warga di sekitar area semburan, (b) keretakan bangunan di Desa Gempol Sari, (c) keretakan lantai rumah warga di Desa Renokenongo, (Andreas, et al., 2008)

Penjelasan gambar:

- (b) Salah satu rumah warga yang terletak di Desa Gempol Sari, Kecamatan Tanggulangin dindingnya mengalami keretakan yang diduga akibat adanya penurunan tanah didaerah tersebut.
- (c) Salah satu rumah warga Desa Renokenongo lantainya mengalami keretakan akibat adanya penurunan tanah, menurut penelitian tahun 2006 tepatnya selama Juli-Agustus Desa Renokenongo ini mengalami penurunan rata-rata sebesar 2 cm. Keretakan lantai ini juga sebagai akumulasi dari beban diatas lantai yang tak mampu ditopang oleh lantai karena di bawah lantai tersebut mengalami penurunan tanah.

4.3. Penurunan Tanah Area Lumpur Lapindo

Pada Jurnal Geologi Indonesia tahun 2008, penurunan tanah yang diartikan pula sebagai amblesan adalah gerakan ke bawah di permukaan bumi dari suatu datum (Fulton, 2006), sehingga elevasi muka tanahnya berkurang atau menjadi lebih rendah dari semula. Kebalikannya adalah pengangkatan (*uplift*) yang menghasilkan naiknya permukaan atau elevasi permukaan tanahnya bertambah.

Penyebab Penurunan tanah ada beberapa hal, antara lain ekstraksi cairan (seperti air tanah, minyak termasuk gas dan geotermal), tambang bawah permukaan, proses pelarutan batuan-batuan seperti batu garam, gipsum, batu gamping, dolomit, kompaksi, dan tektonik.

Hilangnya cairan akibat ekstraksi menyebabkan konsolidasi pori-pori yang kosong. Artinya pori-pori tersebut sebelumnya terisi cairan memadat karena beban material di atasnya, sehingga volume tanah berkurang dan menimbulkan amblesan. Amblesan tipe ini paling umum dijumpai. Amblesan lain disebabkan oleh tambang bawah permukaan. Penambangan tersebut mengambil bahan-bahan tambang di bawah tanah, sehingga permukaannya menjadi ambles atau ambruk.

Kondisi yang mirip dengan kegiatan penambangan adalah terjadinya pelarutan pada batuan yang mudah larut (seperti batu gamping, dolomit, gipsum). Dalam hal ini air tanah mengalir melalui batu-batuan tersebut membentuk rongga-

rongga di bawah tanah. Apabila rongga-rongga tersebut dekat dengan permukaan dapat menimbulkan amblesan atau runtuhan.

Penurunan tanah dapat pula disebabkan oleh pengurangan volume endapan sedimen lunak disertai dengan proses kompaksi yang terjadi secara alamiah maupun kegiatan oleh manusia.

Penurunan tanah yang terjadi akibat tektonik umumnya berasosiasi dengan gempa bumi berkekuatan besar. Penurunan/amblesan ini dapat meliputi daerah yang sangat luas seperti dilaporkan oleh Myers dan Hamilton, 1964, di Amerika Serikat dan Weischat, 1963, di Chili (Jati, 2009).

Di daerah Porong penurunan tanah terjadi karena keluarnya lumpur dalam jumlah yang amat besar dan lumpur tersebut diduga berasal dari kedalaman 790 sampai 1900 m di bawah permukaan tanah setempat (Sudarsono, dkk., 2007).

Penurunan di Sidoarjo akan terjadi secara perlahan (terutama di daerah yang jauh dari pusat semburan) karena lapisan diatas sumber lumpur cukup tebal (\pm 700-1900 m) dan terjadi tergantung pada massa semburan yang keluar kepermukaan.

Berdasarkan hasil beberapa penelitian pada tahun 2006, 2007 dan 2008, maka dapat digunakan beberapa asumsi antara lain:

- Penurunan tanah/amblesan di daerah Porong, Kabupaten Sidoarjo terjadi karena keluarnya lumpur ke permukaan dalam jumlah yang sangat besar.
- Area penurunan berbentuk elips memanjang berarah utara - selatan dengan luas $6,3 \text{ km}^2$ mencakup Kecamatan Tanggulangin: Desa Kedungbendo, Kecamatan Porong: Desa Siring, Desa Jatirejo, Desa Mindi, dan Desa Renokenongo, serta Kecamatan Jabon: Desa Pejarakan dan Desa Besuki.
- Kecepatan penurunan disekitar lokasi semburan yang diketahui dari *monitoring* dengan GPS dan interferogram diperkirakan sebesar 2 cm/hari. Amblesan yang terjadi akan berjalan secara perlahan-lahan karena tebal batuan di atasnya berkisar antara 790 – 1.900 m (Sudarsono, dkk., 2008)
- Penurunan tidak merata dengan besar 2cm/hari akan tetapi semakin kecil penurunannya (<2 cm/hari) jika semakin jauh jaraknya dari pusat semburan lumpur (Deguchi, et al., 2007 dalam Hasanuddin, dkk., 2007).

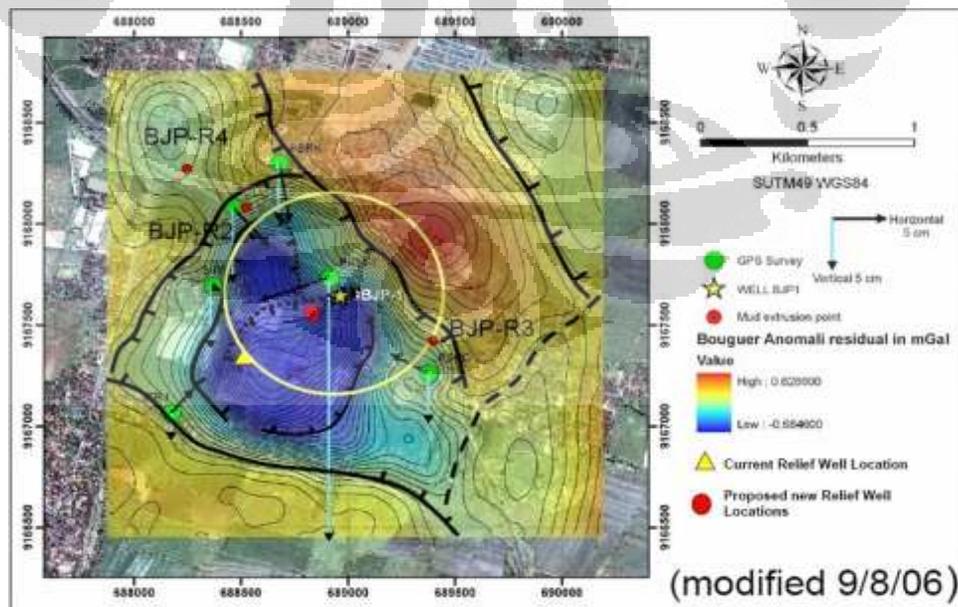
Date	Inetrval (day)	Max Subsidence (m)	Max Subsidence Rate (cm/day)
19 May - 4 Oct 06	138	1.26	0.9
4 Oct - 19 Nov 06	46	1.58	3.4
19 Nov 06 - 4 Jan 07	46	0.96	2.0

Tabel 4.1 Nilai penurunan tanah area lumpur lapindo (Deguchi, et al., dalam Hasanuddin, et al., 2007)

Estimasi pengurangan penurunan tanah dilakukan dengan melihat hasil penelitian lain dan studi literatur kondisi lapangan, yaitu penurunan tanah berkurang dengan semakin jauh jaraknya dari titik pusat semburan lumpur, estimasi pengurangannya adalah 2,5% dari titik pengamatan sebelumnya (2,5% per 250 m) atau sebesar 0.05 cm per hari per 250 m.

4.4.Data Gravity Area Lumpur Lapindo Tahun 2006

Pada tanggal 9 Agustus 2006 telah dilakukan penelitian gravitasi dan GPS, yang hasilnya menunjukkan adanya penurunan tanah, dilihat dari anomaly negatif pada kontur anomaly residual saat itu, data tersebut juga dikorelasikan dengan penelitian GPS untuk mengetahui kuantitas penurunan yang terjadi (Gambar 4.1)

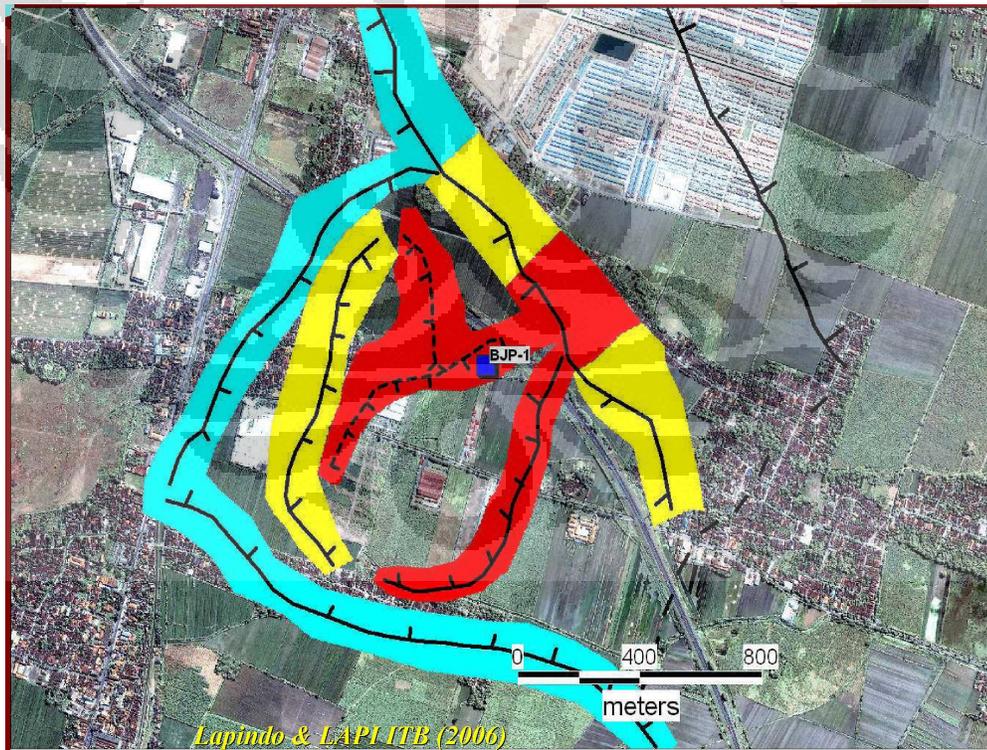


Gambar 4.6 Anomali residual Sidoarjo tahun 2006 (Hasanuddin, dkk., 2006)

Warna biru muda mengarah kebawah itu menunjukkan besarnya penurunan. Terlihat dibagian tengah memiliki garis panah biru muda terpanjang, itu menunjukkan besaran penurunan terbesar (± 5 cm). Garis panah warna hitam menunjukkan arah pergerakannya. Jadi terlihat dengan jelas bahwa arah penurunan tanah itu menuju ke satu titik yang sama, yaitu pusat semburan utama. Kontur warna biru tua memiliki densitas terendah, karena itu daerah tersebut berpeluang terjadi amblesan terbesar.

Dapat terlihat dari garis-garis kontur pada gambar tersebut semakin negatif kearah pusat semburan, sehingga dari data ini kita bisa asumsikan penurunan tanah didaerah yang semakin jauh dari pusat semburan semakin kecil. Batas-batas kemungkinan akan terjadinya penurunan tanah ditandai dengan garis hitam (Gambar 4.7).

Hasil penelitian gravitasi dan GPS ini didukung dengan penelitian interferogram oleh Deguchi, dkk pada tahun 2007 (lihat Gambar 4.4 dan Tabel 4.1).



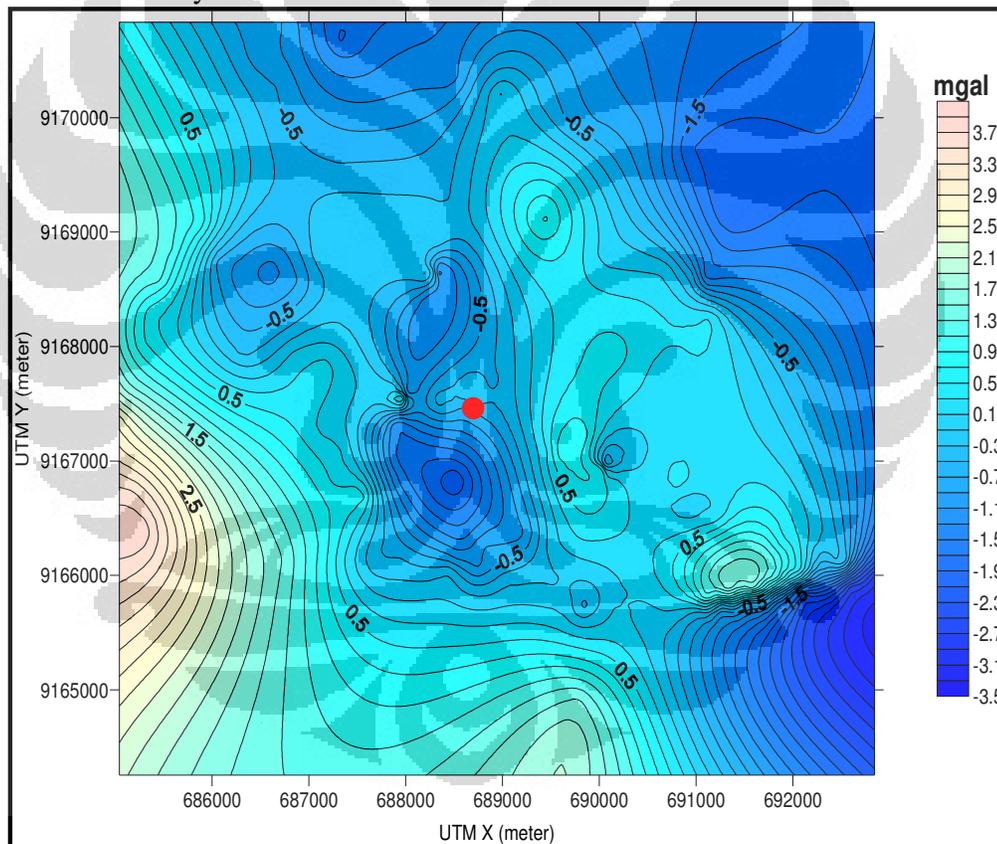
Gambar 4.7 Interpretasi gravitasi anomaly residual 2006 area lumpur lapindo
(Bachtiar, 2007)

Batas-batas area perkiraan yang akan mengalami penurunan tanah hasil interpretasi anomaly residual 2006, dengan warna merah adalah area yang akan mengalami penurunan paling besar karena dekat dengan pusat semburan.

Warna kuning memiliki kemungkinan penurunan tanah lebih besar dibandingkan dengan warna biru.

4.5. Data Gravity Area Lumpur Lapindo tahun 2008

Setelah melalui pengolahan data, dengan koreksi dan reduksi data, didapatkan kontur anomaly residual yang tidak berbeda dengan anomaly residual tahun 2006, hanya saja terjadi perluasan daerah anomaly gravitasi yang negatif, berikut anomaly residual 2008:

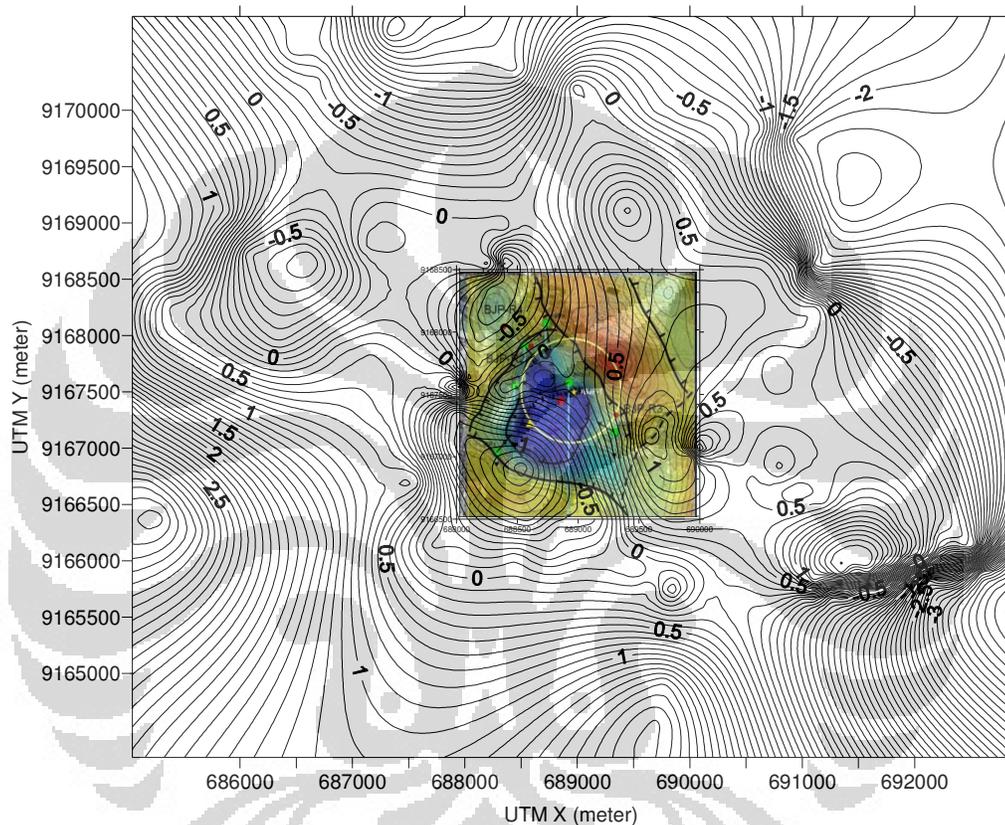


Gambar 4.8 Anomali residual Sidoarjo 2008, Interval kontur 0.2 mgal

Dapat dilihat pada peta kontur anomaly residual 2008, titik merah adalah pusat semburan utama. Anomaly negatif ditunjukkan oleh kontur berwarna biru dan semakin positif ke arah barat dan utara sedangkan pada titik dekat semburan

lebih negatif sama seperti halnya yang ditunjukkan pada anomaly residual tahun 2006.

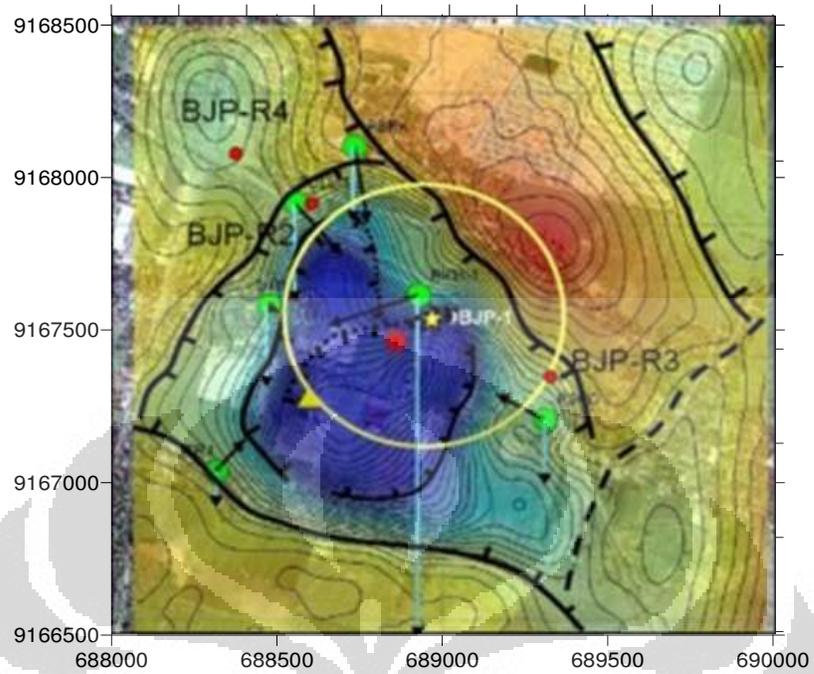
Jika kita *overlay* kontur anomali residual 2006 dengan 2008 maka akan didapatkan pola kontur yang hampir sama akan tetapi luasan daerah yang memiliki anomali negatif lebih meluas pada tahun 2008.



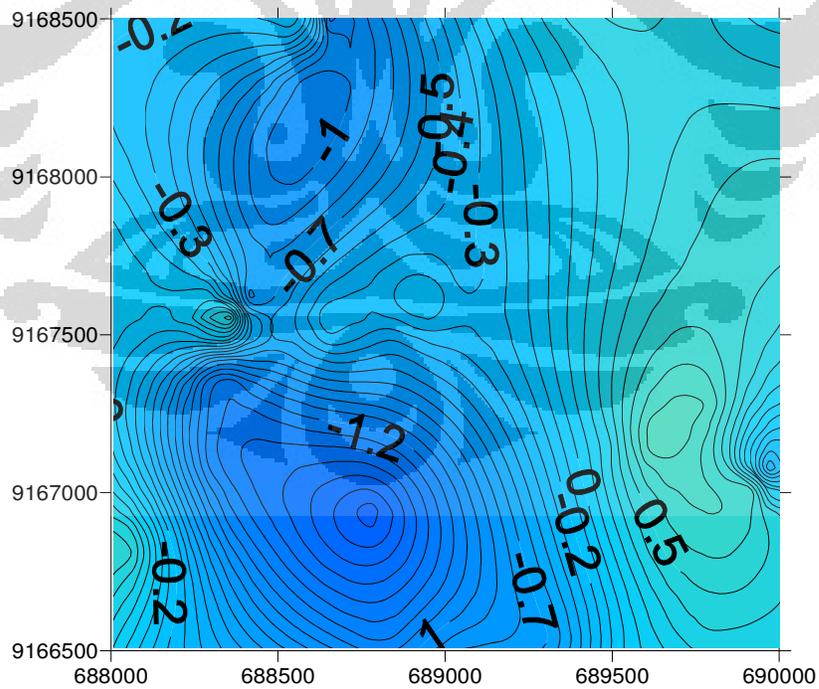
Gambar 4.9 *Overlay* Anomali Residual 2008 dan 2006

Terlihat pola yang sama, kontur negatif berwarna biru telah bertambah luas pada rentang waktu dua tahun (2006-2008). Pada kontur anomali residual 2006 anomali positif telah menjadi anomaly negatif pada kontur anomali residual tahun 2008. Nilai anomali negatif pada pusat semburan (kontur warna biru tua) tidak jauh berbeda yaitu 0.5-0.6 mgal.

Pada bagian utara dan sedikit bagian timur anomali positif tahun 2006 tetap positif pada tahun 2008 dengan kuantitas lebih positif 2006. Dapat diinterpretasikan pada daerah tersebut terjadi penurunan tanah yang tidak signifikan, perubahan gravitasinya sebesar ± 0.1 mgal.



(a)



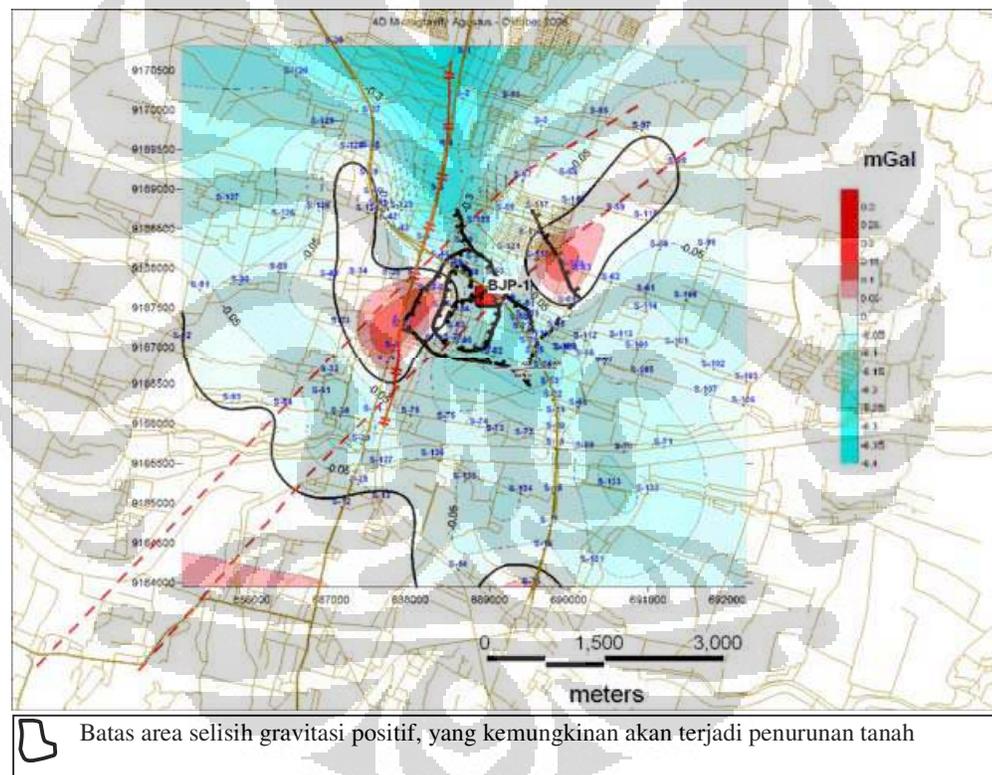
(b)

Gambar 4.10 Peta kontur anomaly residual Sidoarjo 2006 (a) dengan 2008 (b)

Hal ini juga dapat diinterpretasikan yaitu seiring berjalannya waktu yang berkorelasi dengan semakin banyaknya lumpur yang keluar maka anomali negatif menjadi lebih luas dari sebelumnya, yang berarti semakin luas daerah yang berpotensi terjadi penurunan tanah.

4.6. Selisih Nilai Gravitasi

Pada tahun 2006 dengan rentang waktu Agustus – Oktober telah dilakukan penelitian selisih nilai gravitasi, menghasilkan kontur yang didominasi nilai selisih gravitasi negatif meliputi area utara-selatan, sedangkan pada area timur dan barat daerah penelitian tersebut menunjukkan selisih gravitasi positif (Gambar 4.11).



Gambar 4.11 Selisih nilai gravitasi Agustus – Oktober 2006 (Bachtiar, 2007)

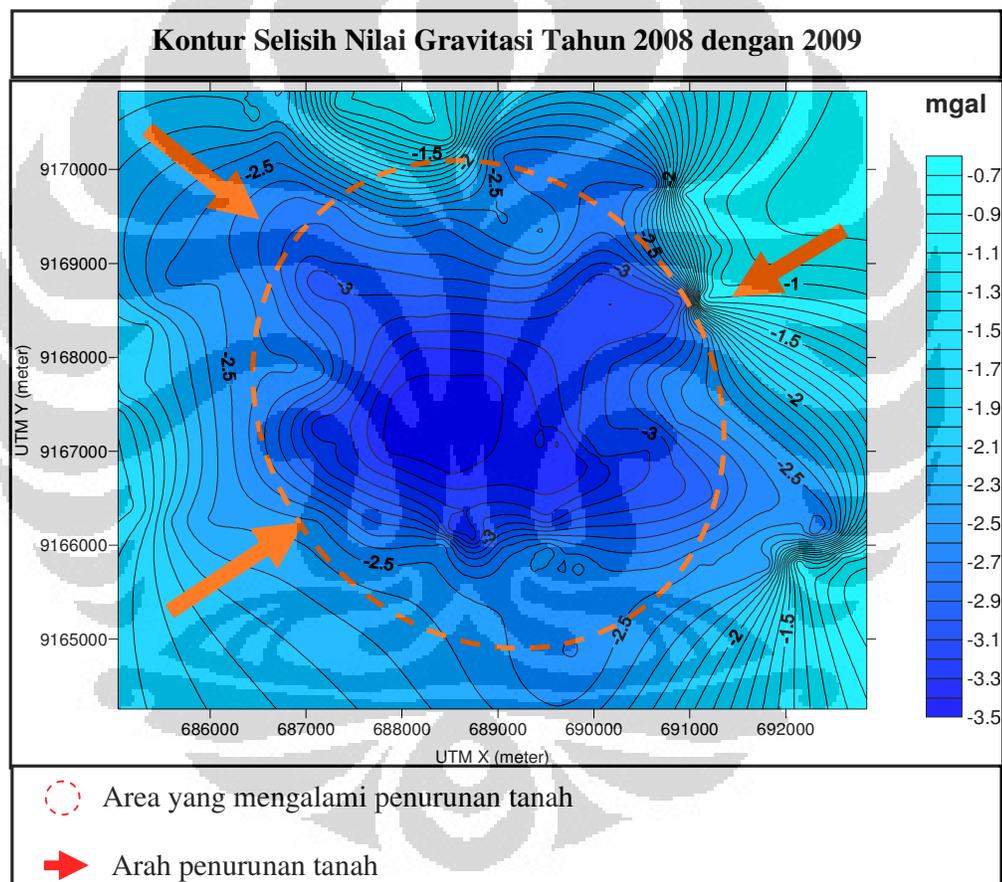
Selisih gravitasi positif ditunjukkan oleh kontur warna merah, dengan besar selisih gravitasi 0.05 - 0.3 mgal, artinya pada rentang waktu Agustus sampai Oktober area tersebut belum terjadi penurunan tanah.

Selisih gravitasi negatif ditunjukkan oleh kontur warna biru muda yang meliputi area utara dan selatan daerah penelitian tersebut, dengan besar selisih

gravitasi bervariasi dari -0.05 sampai -0.4 . Artinya area tersebut telah terjadi penurunan tanah.

Dengan simulasi penurunan tanah berdasarkan pada hasil penelitian-penelitian yang lain, dengan satu data gravitasi pada suatu titik pengamatan tertentu dapat kita peroleh nilai selisih gravitasi pada tahun berikutnya.

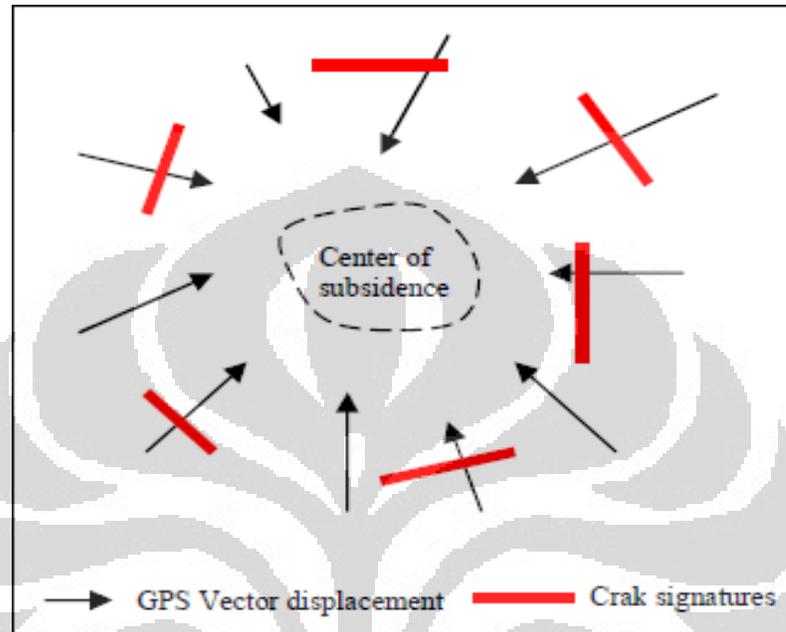
Berdasarkan data tahun 2008 dengan asumsi penurunan tanah rata-rata 2 cm/hari dan terus berkurang dengan bertambahnya jarak dari pusat semburan maka diperoleh selisih gravitasi dalam rentang waktu tahun 2008 sampai tahun 2009



Gambar 4.12 Selisih Gravitasi Sidoarjo, kurun waktu 2008-2009, interval kontur 0.5 mgal

Terlihat jelas sekali garis kontur yang berwarna biru tua adalah daerah yang paling negatif, artinya daerah tersebut rentan terjadinya penurunan tanah, dari kontur tersebut juga dapat diambil kesimpulan bahwa pergerakan penurunan

tanah mengarah kepusat semburan dan ini sesuai dengan hasil penelitian GPS yang juga dikaitkan dengan tanda-tanda keretakan infrastruktur dilapangan (Gambar 4.13, 4.12) juga lihat (Gambar 4.5).

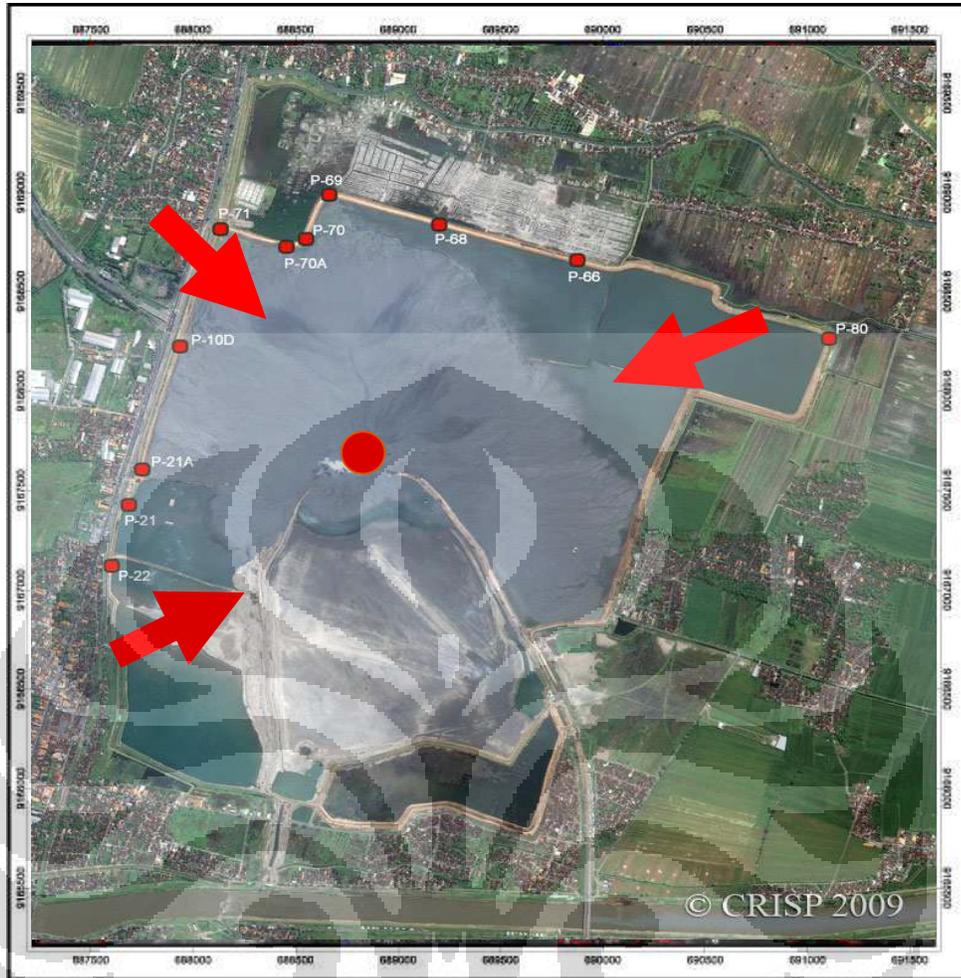


Gambar 4.13 Arah penurunan tanah hasil interpretasi GPS dengan beberapa tanda-tanda penurunan tanah berupa keretakan-keretakan (Gambar 4.5) (Andreas, dkk., 2007)

Garis merah memiliki makna terdapat indikasi penurunan tanah, yaitu keretakan-keretakan bangunan dan infrasturktur pada area tersebut, berhubungan dengan Gambar 4.5.

Sedangkan Panah hitam menunjukkan arah penrunan menuju pusat semburan utama, dengan besar penurunan rata-rata sebesar 2 cm/hari (Andreas, dkk., 2007).

Dengan menggunakan foto satelit, dapat kita gambarkan arah penurunan tanah lebih jelas, dan dapat diperkirakan area mana saja yang terkena dampak penurunan tanah ini, sehingga dapat diantisipasi sebelumnya (Gambar 4.14).



Gambar 4.14 Gerakan penurunan tanah area lumpur lapindo 2009

Titik merah adalah indikasi penurunan tanah yang terjadi pada sejumlah lokasi, terutama yang dekat dengan tanggul penahan lumpur.

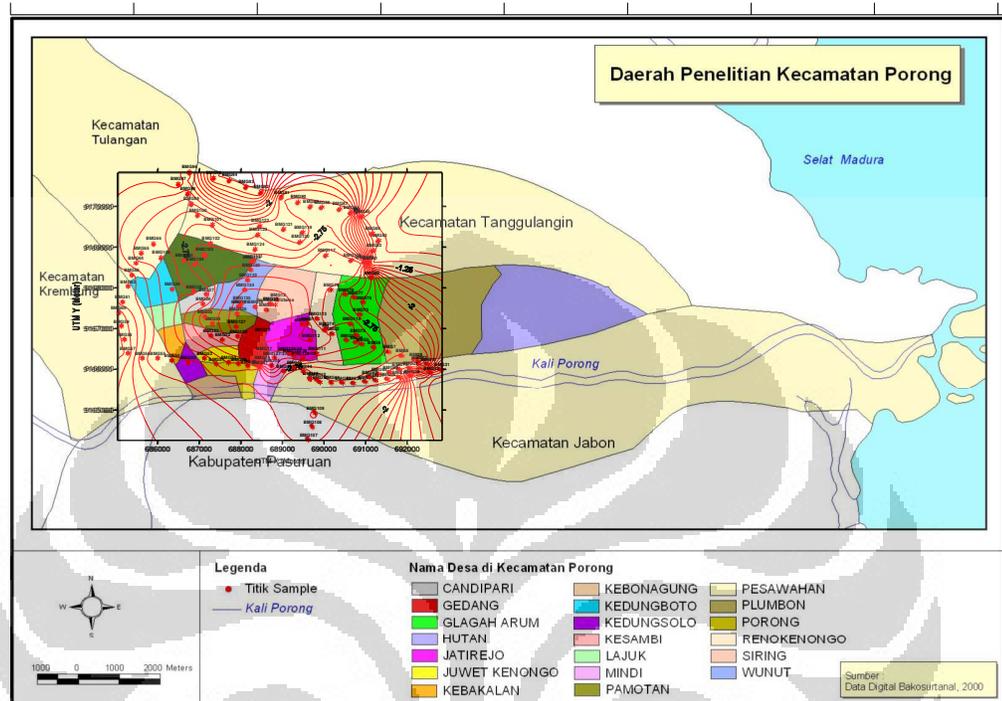


P80 (a)

P10D(b)

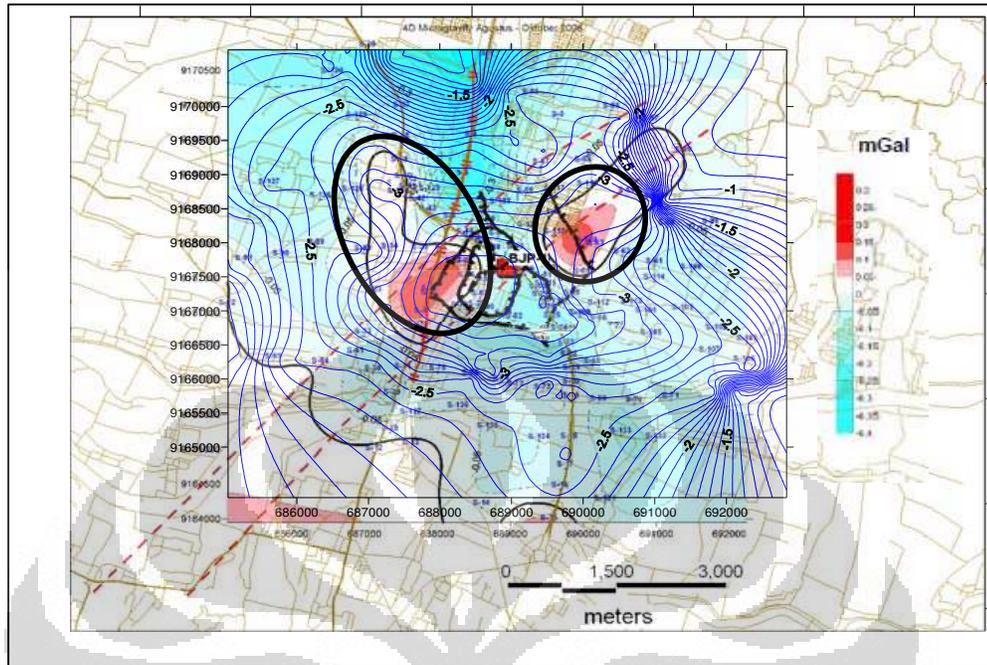
Gambar 4.15 (a) Penurunan *pheil scale*, (b) Penurunan tanggul (lihat Gambar 4.14)

Gambar (a) dan (b) menunjukkan penurunan tanah di area sekitar tanggul, terlihat terjadi beberapa yang mengalami penurunan tanah.



Gambar 4.16 Overlay kontur selisih gravitasi dengan peta lokasi di Kecamatan Porong (SIG, 2009)

Melihat Gambar 4.16, estimasi area terdampak penurunan tanah dalam rentang ± 1 tahun mencakup 3 Kecamatan, yaitu; Kecamatan Tanggulangin mencakup Desa Kedungbendo, Kecamatan Porong mencakup Desa-desa Siring, Jatirejo, Mindi, dan Desa Renokenongo serta Kecamatan Jabon mencakup Desa Pejarakan dan Desa Besuki. Kemungkinan terdampak pada kecamatan disebelah barat, seperti Kecamatan Tulangan dan Krembung juga sangat besar, jika semburan terus aktif dan tidak dapat dihentikan.



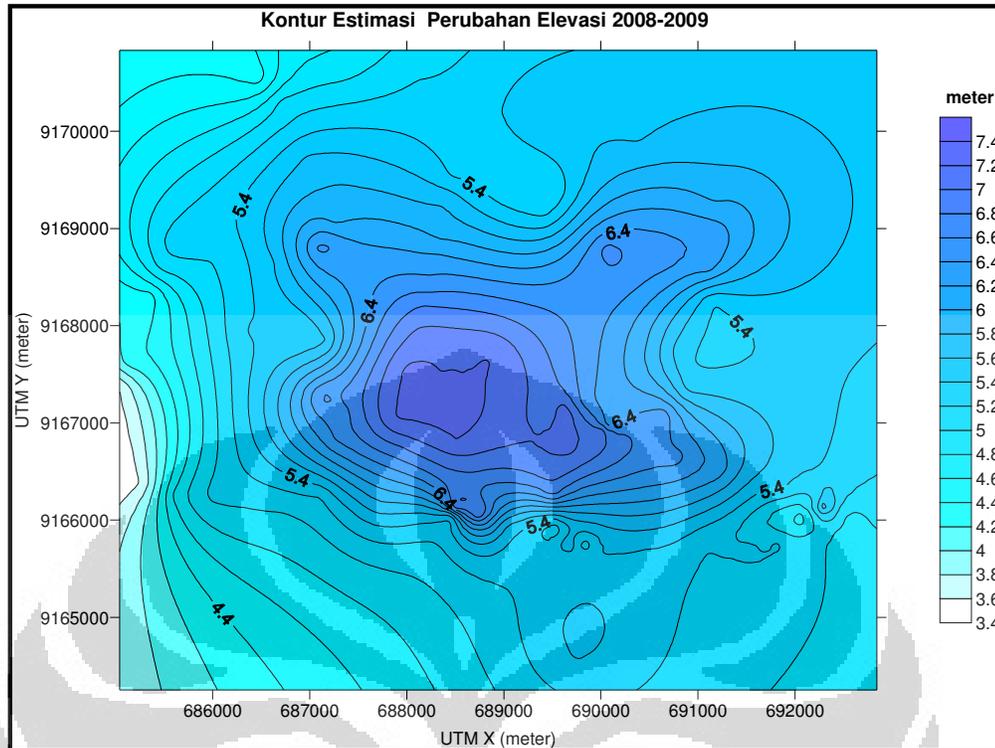
○ Perubahan selisih gravitasi 2006 dan 2008-2009

Gambar 4.17 *Overlay* kontur selisih gravitasi Agustus – Oktober 2006 dengan kontur selisih gravitasi tahun 2008 - 2009

Hasil simulasi menunjukkan selisih gravitasi negatif telah mendominasi area lumpur lapindo. Bila dibandingkan dengan selisih gravitasi 2006, area dengan lingkaran hitam masih bernilai positif, artinya diperkirakan pada tahun berikutnya (2009 atau 2010) area tersebut akan menjadi negatif karena diprediksikan akan terjadi penurunan tanah.

Perubahan elevasi ini merupakan estimasi, secara kuantitas, besar penurunan tanah tiap titik pengukuran ditunjukkan oleh gambar dibawah ini (Gambar 4.18).

Perubahan elevasi terbesar ditunjukkan oleh kontur berwarna biru tua, dan penurunan tersebut adalah yang terbesar yaitu 2 cm/hari atau 7.2 m/tahun. Dengan jarak yang semakin jauh dari pusat semburan maka besar penurunan semakin berkurang.



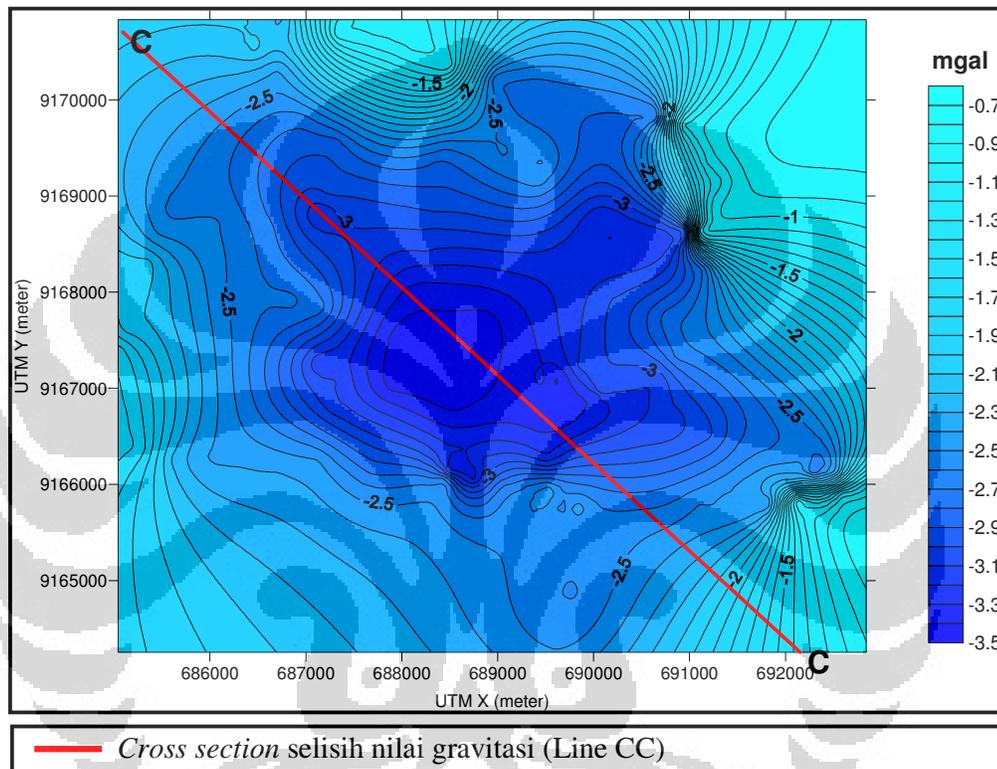
Gambar 4.18 Kontur estimasi perubahan elevasi 2008-2009 untuk tiap titik pengamatan

Pengurangan besar penurunan terhadap jaraknya dari pusat semburan diestimasi berkurang sebesar 2.5% dari titik didekatnya (± 250 m) atau sebesar 0.05 cm pertahun setiap 250 m.

Besaran 0.05 cm merupakan estimasi berdasarkan hasil penelitian yang telah dijelaskan sebelumnya.

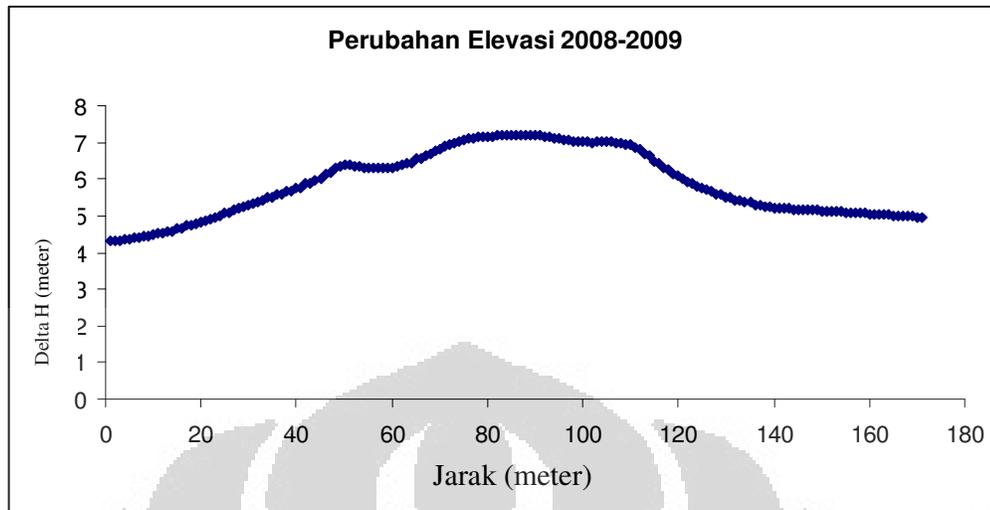
4.7 Penipisan Lapisan Subsurface Area Lumpur Lapindo

Untuk mengetahui perkiraan besar penipisan lapisan yang terjadi pada subsurface area penelitian, dilakukan pengambilan suatu garis (*cross section*) dan *digitize* pada kontur selisih gravitasi 2008-2009 dengan bantuan *software Surfer8* dan *grav2d* (Gambar 4.19).

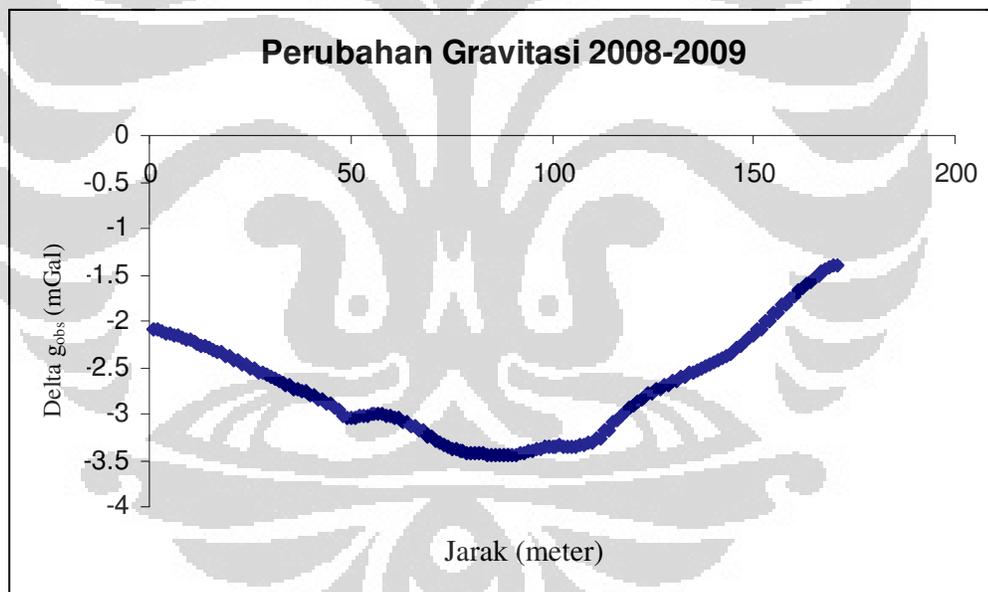


Gambar 4.19 *Cross Section* Selsisih Gravitasi 2008-2009 (line CC)

Dengan melalui proses tersebut, sehingga didapatkan, nilai perubahan elevasi dan perubahan g observasi sepanjang garis tersebut. Besarnya perubahan elevasi dan g observasi ditunjukkan oleh Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 sebagai berikut:



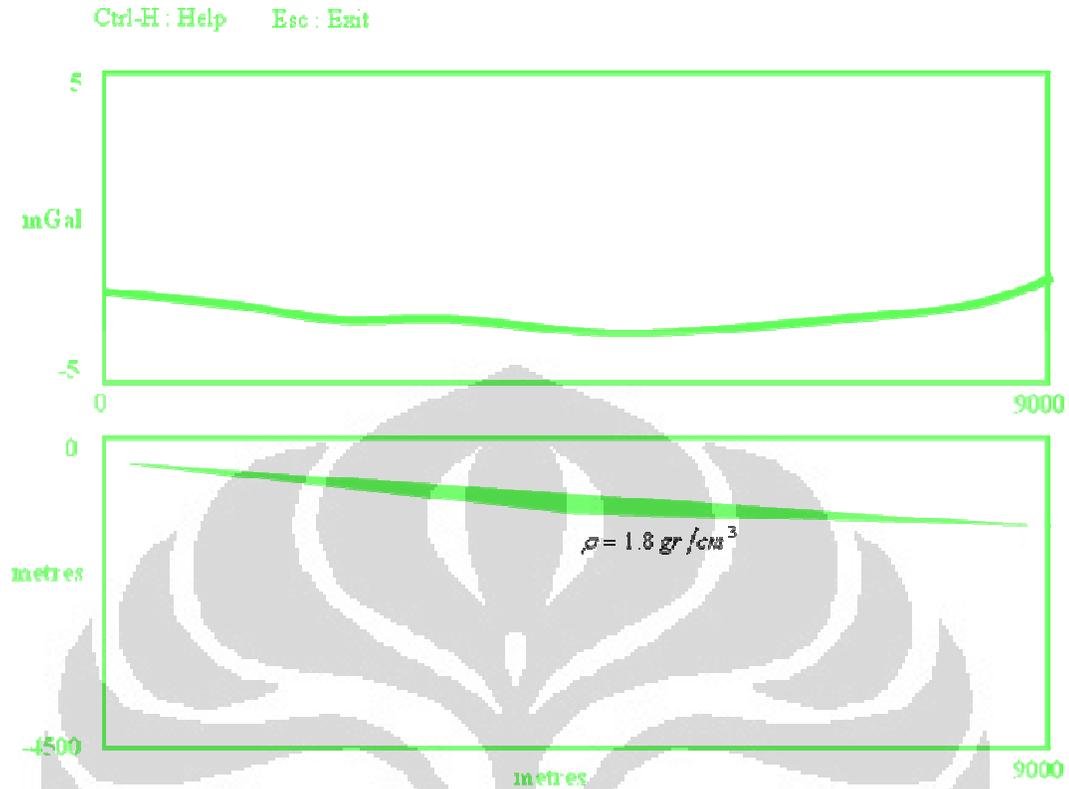
Gambar 4.20 Grafik besar perubahan elevasi pada lintasan CC, nilai terbesar pada angka 7 m/tahun



Gambar 4.21 Grafik perubahan g observasi tahun 2008-2009

Terlihat g obs bernilai sangat negatif pada penurunan yang paling besar, >-3 mgal.

Dengan bantuan *software grav2d*, kita dapat merekonstruksi besar penipisan *subsurface* dan kedalaman lapisan yang mengalami penipisan itu selama rentang waktu tahun 2008 sampai 2009 atau selama satu tahun (Gambar 4.22).



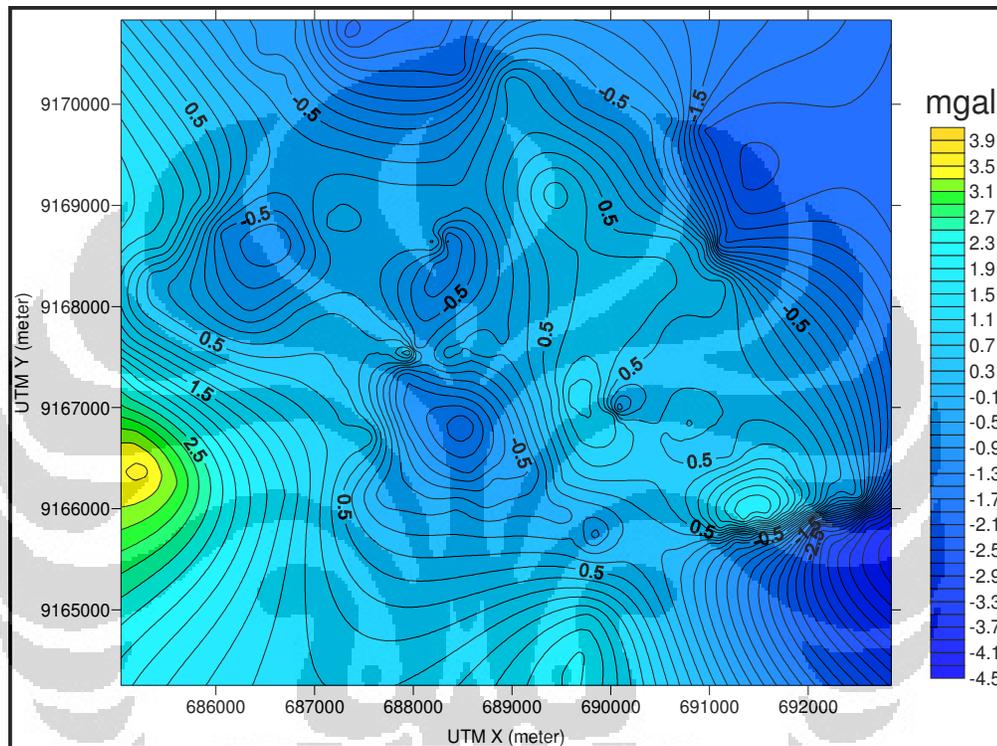
Gambar 4.22 Penipisan lapisan *subsurface* area lumpur lapindo

Penipisan lapisan *subsurface* area lumpur Lapindo diprediksikan dialami oleh lapisan pada kedalaman 300-1000 meter yang merupakan lapisan lempung (*clay*) yang bercampur batu pasir (*Sand*).

Berdasarkan hasil pemodelan ini ketebalan lapisan yang menipis dalam waktu satu tahun didekat pusat semburan yaitu lapisan pertama setebal 10-40 meter dan ketebalannya semakin menipis jika semakin jauh dari pusat semburan,

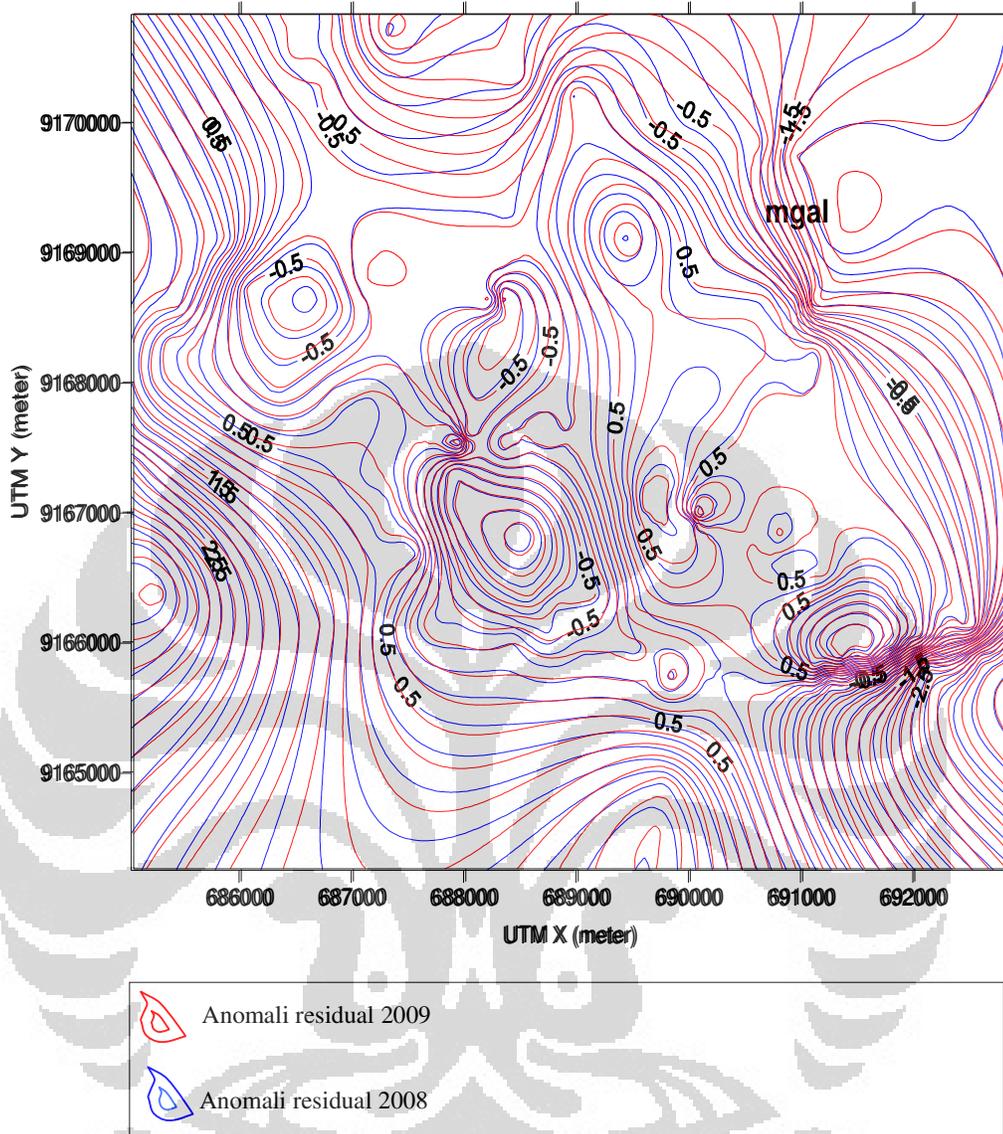
4.8 Anomali Residual Area Lumpur Lapindo 2009

Dengan diperolehnya besar perubahan g observasi, dapat kita peroleh besar g observasi estimasi untuk tahun 2009.. kemudian dengan melakukan koreksi dan reduksi kita bis aperoleh besar anomaly bougeur untuk kemudian dengan bantuan *software surfer8* dapat kita buat peta kontur anomaly residual 2009. (Gambar 4.23)



Gambar 4.23 Peta Kontur anomali residual 2009, interval kontur 0.2 mgal

Jika kita bandingkan dengan kontur anomali residual 2008, maka akan terlihat perluasan area dengan nilai anomaly negatif yang ditunjukkan oleh kontur berwarna biru.



Gambar 4.24 *Overlay* kontur anomaly residual tahun 2008 dengan tahun 2009, interval kontur 0,2 mgal

Terlihat jelas pada kontur *overlay* anomaly residual 2008 dengan 2009 diatas, kontur dengan nilai anomaly positif semakin meluas pada tahun 2009, menandakan terjadinya penurunan tanah yang semakin meluas.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari pembahasan di muka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Area terdampak penurunan tanah akan semakin meluas sebagai fungsi waktu jika semburan lumpur tidak berhenti atau dihentikan, radius dari pusat semburan diperkirakan 2 km, sehingga luasnya diperkirakan $\pm 25 \text{ km}^2$.
2. Berdasarkan pemodelan dengan *grav2d*, penipisan lapisan *subsurface* area lumpur Lapindo diprediksikan dialami oleh satu perlapisan, yaitu lapisan pada kedalaman 300-1000 meter yang merupakan lapisan lempung (*clay*) yang bercampur batu pasir (*Sand*) dengan dominasi *clay*.
3. Berdasarkan kesimpulan poin kedua ketebalan lapisan yang menipis dalam waktu satu tahun didekat pusat semburan adalah sekitar 10-40 meter dan semakin menipis untuk daerah yang semakin jauh dari pusat semburan.

5.2 Saran

1. Pengambilan data gravity dengan titik pengamatan yang sama pada tahun 2009 dan tahun selanjutnya sangat diperlukan, karena akan sangat membantu dalam monitoring penurunan tanah untuk memperoleh hasil yang lebih baik, lebih akurat dan riil.

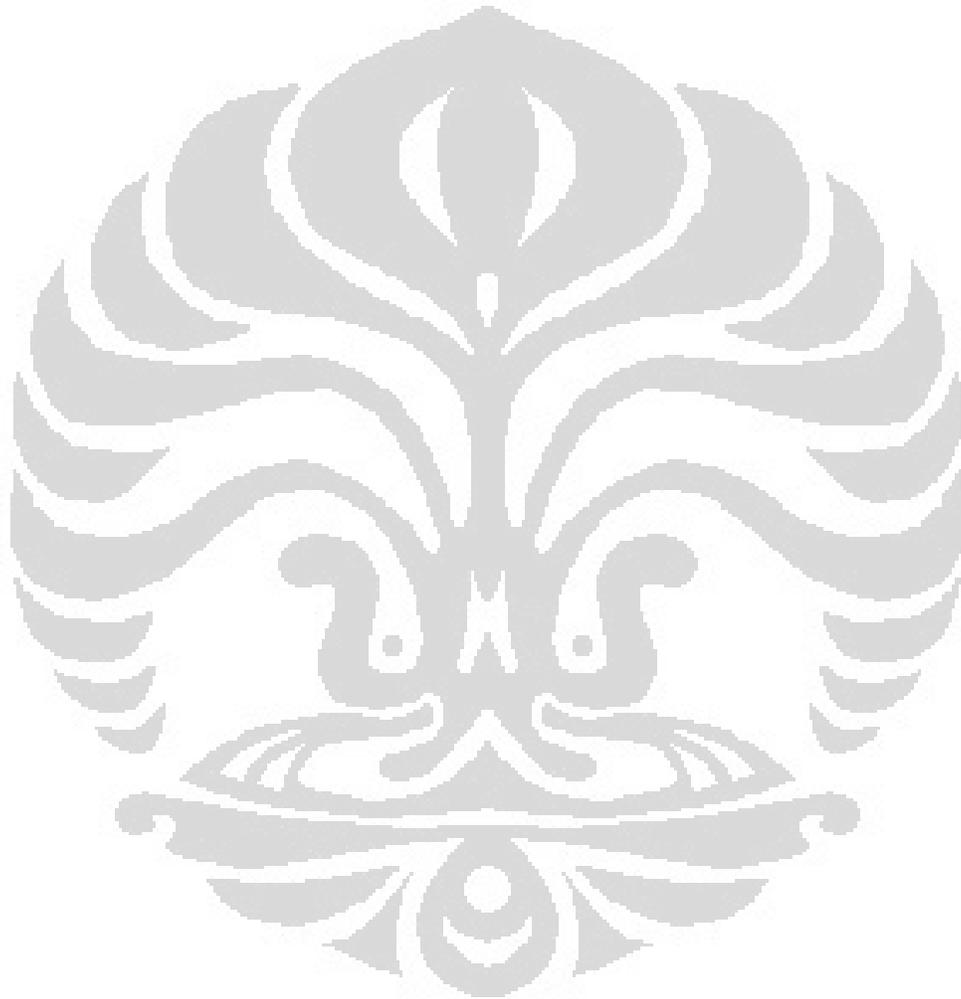
DAFTAR ACUAN

- Andreas, Heri, Sidik, P., T., G., Irwan, Abidin, H., Z., dan Kusuma, M., A., 2007, *Crack Signature from Subsidence Effect around Mud Vulcano Porong Sidoarjo*, Geodesy Research Division, Faculty of Earth Science and Technology, Institute Technology of Bandung
- Bachtiar, Andang, 2007, *East Java Mud Flow*, pertemuan periset teknis geosains-engineering lumpur Sidoarjo, Surabaya
- Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo (BPLS), 2009, *Dampak Lingkungan*, bagian 2, hlm. 254, Sidoarjo, Jawa Timur
- Dobrin, B. Milton, and Savit H. Carl, 1987, *Introduction to Geophysical Prospecting*, New York Mc, Graw Hill, Inc.
- Doukas, 2004, *Monitoring and Analysis of Ground Subsidence due to Water Pumping in the Area of Thessaloniki, Hellas, Greece*.
- Fulton, Allan, 2006, *Land Subsidence: What Is It and Why Is It an Important Aspect of Groundwater Management?*, University Of California
- Gaol, L., Karit, 2007, *Sistim Geodetik Global 1984 (WGS 1984) dalam Menentukan Nilai Gravitasi Normal (g_n)*, Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI, Bandung.
- Gunradi, Rudy dan Suprpto, Joko, Sabtanto, 2007, *Penelitian Endapan Lumpur Di Daerah Porong Kabupaten Sidoarjo Provinsi Jawa Timur*, Kelompok Program Penelitian Konservasi, Pusat Sumber Daya Geologi
- Hasanudin Z., M.A, Abidin, Prihadi, B., Andreas, H. dan Gamal, M. (2007), *The Deformation an Area a Newly Born Mud Vulcano in Sidoarjo (East Java, Indonesia)*, Institute Technology of Bandung
- Jati, Satrio, 2009, *Monitoring Lapangan Panas Bumi Kamojang Menggunakan Pengukuran Gravitasi Berulang*, Fisika FMIPA Universitas Indonesia, Depok

- Kadir, W.G.A., 1999, *The 4-D Gravity Survey and Its Subsurface Dynamics: A Theoretical Approach*, Proceeding of 24 HAGI Annual Meeting, Surabaya.
- Mazzini, A., Svensen H., Akhmanov, G.G., Aloisi G., Planke, S., Malthe-Sørenssen, A., and Istadi, B., 2007, *Triggering and Dynamic Evolution of the LUSI Mud Vulcano, Indonesia*, EPSL
- Program Pembangunan Daerah (PROPEDA) Sidoarjo, 2007, *BAB I Pendahuluan*, hlm. 1, Sidoarjo, Jawa Timur
- P., Styles, Sam, T., Michael, B., Richard, E., Ewan, T. and Richard, M., 2005, *High Resolution Microgravity Investigations for the Detection and Characterisation of Subsidence Associated with Abandoned, Coal, Chalk and Salt Mines*, Applied and Environmental Geophysics Group, School Of Physical and Geographical Sciences, Keele University, Staffs and Geotechnology
- Sarkowi, Muhammad, 2003, *Karakteristik Gradient Gayaberat Untuk Interpretasi Anomali Gayaberat Mikro Antar Waktu*, Fisika FMIPA Universitas Lampung.
- Sawolo, N., S., Edi, Istiadi, P.,B. dan Darmoyo, B., A., 2009 *East Java Mud Vulcano (LUSI): Drilling Fact and Analysis*, Search and Discovery Article
- Sistem Informasi Geografi, 2009, Departemen Geografi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia
- Sudarsono, U. dan Sudjarwo, I. B., (2008). *Amblesan di daerah Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur*, Jurnal Geologi Indonesia, Vol. 3 No. 1
- Sumintadireja, Prihadi. (2007), *Mud Extrusion at Banjarpanji Areas, Sidoarjo, East Java*, Institute Technology of Bandung
- Telford, W. M, Geldart L.P, and Sherrif R.E., 1990, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press

www.mediacentersidoarjo.wordpress.com, 2006, *Prediksi TIMNAS Masalah Tanah Ambles Mulai Terjadi*, 11 Juli 2009, Pukul 15:27:46

www.kelompokkeilmuangeodesi.wordpress.com, 2008, *Survey Land Subsidence Porong Sidoarjo*, Juli 2009



LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

Data Mikrogravity 2008

Bench Mark	X	Y	Gobs	h1	Delta h pertahun (meter)
BMG1	689599	9167104	978097.1469	3	7.2
RN	690026	9166943	978096.242	4	6.84
BMG2	690210	9166858	978095.9688	3	6.66
BMG3	690553	9166704	978095.533	3	6.48
BMG4	690780	9166654	978095.261	3	6.48
BMG5	690928	9166602	978094.9833	3	6.3
BMG6	691207	9166522	978094.7069	4	6.12
BMG7	691572	9166412	978094.1675	8	5.58
BMG8	691884	9166320	978093.6895	8	5.4
BMG9	692208	9166226	978092.913	8	5.22
BMG10	692507	9166116	978092.7324	8	5.04
BMG11	689483	9167096	978096.7702	3	6.84
BMG12	688886	9167700	978096.726	1	7.2
BMG13	688707	9167596	978096.9325	3	7.2
BMG14	688615	9167446	978097.1385	1	7.2
BMG15	688738	9166076	978097.3856	4	6.84
BMG16	688508	9166154	978097.6719	4	6.84
BMG17	688557	9166364	978097.1574	3	6.66
BMG18	688518	9166828	978096.1049	3	7.2
BMG19	688346	9167518	978097.3481	3	7.2
BMG20	687945	9167534	978098.7199	3	7.2
BMG21	687988	9167534	978097.9445	3	7.2
BMG22	687550	9166712	978100.0444	3	6.48
BMG23	687274	9166814	978100.133	3	6.408
BMG24	687317	9167110	978099.8433	2	6.48
BMG25	687126	9167272	978099.8289	2	6.66
BMG26	687086	9167588	978099.5958	2	5.94
BMG27	687161	9167828	978099.0277	3	5.58
BMG28	686855	9167900	978099.1091	3	5.4

Lanjutan

BMG29	686338	9167954	978098.9659	3	5.4
BMG31	692842	9165978	978091.4	5	5.04
BMG32	692585	9165890	978091.6452	5	4.86
BMG33	688707	9167596	978092.0874	1	7.2
BMG34	692113	9165824	978092.5049	5	5.04
BMG35	691826	9165786	978093.2337	5	5.22
BMG36	691540	9165746	978093.8647	5	5.22
BMG37	691261	9165712	978094.1968	5	5.22
BMG38	691007	9165680	978094.8341	5	5.22
BMG39	690712	9165646	978095.4332	5	5.328
BMG40	690451	9165654	978095.982	4	5.364
BMG41	690186	9165660	978096.4771	4	5.4
BMG42	689905	9165670	978096.8169	3	5.4
BMG43	689672	9165766	978097.2488	3	5.58
BMG44	689519	9165934	978097.2064	3	5.04
BMG45	689283	9166030	978097.4118	3	5.58
BMG46	689035	9165944	978097.8945	3	5.58
BMG47	688457	9166028	978098.7146	3	5.4
BMG48	688169	9166070	978099.1465	2	5.58
BMG49	687944	9166120	978099.4594	2	5.688
BMG50	687694	9166146	978099.7415	2	5.724
BMG51	687407	9166115	978100.6819	2	5.4
BMG52	687119	9166258	978100.6398	6	5.22
BMG53	686721	9166146	978101.6398	7	5.04
BMG54	686331	9166204	978102.1626	6	5.04
BMG55	685986	9166260	978102.6635	7	5.04
BMG56	685619	9166262	978103.3807	8	4.68
BMG57	685265	9166384	978103.8651	9	3.6
BMG58	685183	9166716	978102.9184	10	3.6
BMG59	685110	9167050	978101.9002	10	3.6
BMG60	685041	9167368	978101.1506	10	3.6
BMG61	685140	9167640	978100.2381	9	4.32
BMG62	685269	9168026	978098.9297	9	4.32
BMG63	685360	9168298	978098.4116	9	4.32
BMG64	685459	9168598	978098.3656	10	5.04
BMG65	685592	9168852	978097.738	11	5.292
BMG66	685888	9169074	978097.0872	11	5.292
BMG67	691097	9165802	978095.638	6	5.2308
BMG68	691328	9165870	978095.4325	8	5.22

Lanjutan

BMG69	691601	9165910	978094.8684	9	5.04
BMG70	691829	9165992	978094.3773	8	4.86
BMG71	692081	9166018	978093.6832	7	4.68
BMG72	692295	9166154	978093.0544	6	5.76
BMG73	690807	9166820	978094.9813	5	6.3
BMG74	690056	9166978	978094.7461	5	6.3
BMG75	690885	9167334	978094.3422	5	5.58
BMG76	690958	9167634	978093.8057	6	5.4
BMG77	690751	9167752	978093.801	6	5.58
BMG78	690527	9167826	978094.1301	6	5.94
BMG79	690169	9167944	978094.9472	5	6.3
BMG80	691148	9168244	978092.7296	8	5.4
BMG81	691109	9168608	978092.2992	5	6.3
BMG82	691200	9168910	978091.7466	4	6.3
BMG83	691331	9169152	978091.0295	3	6.12
BMG84	691172	9169334	978091.1581	3	5.94
BMG85	690922	9169748	978091.1886	4	5.76
BMG86	690651	9169848	978091.5349	4	5.688
BMG87	690383	9169928	978091.7524	5	5.58
BMG88	689951	9169972	978092.3605	5	5.58
BMG89	689680	9169996	978092.8122	5	5.58
BMG90	689378	9170098	978093.1401	6	5.58
BMG91	688980	9170218	978093.7028	7	5.4
BMG92	688483	9170344	978093.5882	5	5.256
BMG93	688117	9170476	978093.9378	5	5.22
BMG94	687721	9170638	978094.1272	5	5.04
BMG95	687334	9170696	978094.4006	4	4.86
BMG96	686753	9170834	978094.3591	10	4.68
BMG97	686483	9170544	978094.9668	9	4.32
BMG98	686715	9170310	978095.1988	8	5.04
BMG99	686799	9170056	978095.4566	7	5.22
BMG100	686954	9169782	978095.7724	6	5.58
BMG101	687312	9169550	978095.8629	5	5.76
BMG102	687268	9169088	978096.6513	5	5.94
BMG103	687116	9168814	978097.4827	3	6.48
BMG104	686884	9168572	978097.8844	1	5.904
BMG105	686617	9168666	978097.744	1	5.58
BMG106	686071	9168738	978097.8016	4	5.22
BMG107	689627	9164254	978099.906	3	5.22

Lanjutan

BMG108	689723	9164562	978099.608	3	5.4
BMG109	689787	9164908	978099.0627	3	5.472
BMG110	689827	9165736	978096.6322	3	5.04
BMG111	689827	9166380	978096.9538	3	6.48
BMG112	689678	9166702	978097.0464	3	7.02
BMG113	689844	9167226	978096.4203	4	6.48
BMG114	690659	9167102	978094.9214	4	6.48
BMG115	690976	9168616	978092.4917	5	6.3
BMG116	690679	9168676	978092.9832	6	6.48
BMG117	690057	9168796	978094.0063	4	6.66
BMG119	689491	9169358	978094.1449	7	5.22
BMG120	689424	9169122	978094.7273	7	5.4
BMG121	689029	9169438	978094.7753	5	5.22
BMG122	688457	9169514	978095.2137	3	5.4
BMG123	688409	9169302	978095.4233	3	5.76
BMG124	688342	9168946	978096.0202	3	5.94
BMG125	688256	9168632	978096.5329	3	6.3
BMG127/37	688811	9166266	978097.4096	3	6.48
BMG128/38	689175	9166366	978096.7094	3	6.588
BMG129/40	689502	9166264	978097.1163	3	6.66
BMG130/39	689301	9166336	978096.8261	3	6.588
BMG131	688309	9168656	978095.1838	3	6.3
BMG132	688240	9168428	978095.6897	3	6.48
BMG133	688162	9168176	978096.2172	2	6.84
BMG134	688096	9167940	978096.6625	2	7.02
BMG135	688015	9167612	978097.2468	2	7.2
BMG136	687915	9167346	978097.213	2	7.2
BMG137	687888	9167030	978097.5673	2	7.2
BMG138	687929	9166792	978097.7667	3	6.84