

MILIK PERPUSTAKAAN  
UNIV. NEGERI PADANG



LAPORAN KEGIATAN PENELITIAN DASAR

**JUDUL KEGIATAN**  
**PERUBAHAN PERILAKU SPEKTRUM OPERATOR DEKONVOLUSI**  
**SETELAH DIBERI KONTRAIN DALAM SURVAI GAYABERAT-**  
**MIKRO 4D**

Oleh:

Drs.Ahmad Fauzi, M.Si

MILIK PERPUSTAKAAN	UNIVERSITAS NEGERI PADANG
TANGGAL TEL.	11-6-2010
SUMBER HASIL	Hd
KOLEKSI	F1
NO. INVENTARIS	261/Hd/2010 - p.1
KLASIFIKASI	550 Fau p.1

**DIBIYAI PROYEK PENINGKATAN PENELITIAN PENDIDIKAN TINGGI**  
**DENGAN SURAT PERJANJIAN PELAKSANAAN PENELITIAN NOMOR:**  
**19/SPPP/PP/DP3M/IV/2005 TANGGAL 11 APRIL 2005**  
**DIREKTORAT PEMBINAAN PENELITIAN DAN PENGABDIAN PADA MASYARAKAT**  
**DIREKTORAT JENDERAL PENDIDIKAN TINGGI**  
**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**  
**UNIVERSITAS NEGERI PADANG**  
**2005**

**SISTEMATIKA LAPORAN AKHIR HASIL  
PENELITIAN DASAR**

	<b>Halaman</b>
LEMBAR IDENTITAS DAN PENGESAHAN .....	ii
RINGKASAN.....	iii
PRAKATA .....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN .....	x
I. PENDAHULUAN .....	1
II. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN .....	6
III. TINJAUAN PUSTAKA .....	8
IV. METODE PENELITIAN .....	28
V. HASIL DAN PEMBAHASAN .....	72
VI. KESIMPULAN DAN SARAN .....	75
DAFTAR PUSTAKA .....	79
LAMPIRAN A : PUBLIKASI.....	90
LAMPIRAN B : PERSONALIA PENELITI.....	100
LAMPIRAN C : INSTRUMENTASI PENELITIAN.....	101
(termasuk instrumen penelitian, personalia tenaga peneliti beserta kualifikasinya, dll)	

**LEMBAR IDENTITAS DAN PENGESAHAN LAPORAN AKHIR  
HASIL PENELITIAN DASAR**


1. Judul : **Perubahan Perilaku Spektrum Operator Dekonvolusi Setelah Diberi Konstrain Dalam Survei Gayaberat-Mikro 4D**
2. Ketua Peneliti
- a. Nama Lengkap dan Gelar : Drs.Ahmad Fauzi, M.Si
  - b. Jenis Kelamin : Laki-laki
  - c. Pangkat/Golongan : Penata/IIIC
  - d. Jabatan Fungsional : Lektor
  - e. Fakultas/ Jurusan : FMIPA/Fisika
  - f. Perguruan Tinggi : Universitas Negeri Padang
  - g. Pusat Penelitian : Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang
3. Jumlah Tim Peneliti : 1 orang
4. Lokasi Penelitian : - Laboratorium Geofisika-UNP  
- Laboratorium Teknik Geofisika-ITB  
- Salah satu lapangan minyak di Riau
5. Kerjasama dengan Institusi lain :
- a. Nama Institusi : Teknik Geofisika-ITB
  - b. Alamat : Jl. Ganesha No.10 Bandung
6. Masa Penelitian : 10 bulan
7. Biaya yang Diperlukan : Rp 15.000.000,-(terbilang : *lima belas juta rupiah*)

Padang , 30 Oktober 2005

Mengetahui  
Dekan FMIPA UNP

Ketua Peneliti

(Drs. Ali Amran, M.Pd., MA., PhD)  
NIP. 130 353 264

  
(Drs. Ahmad Fauzi, M.Si)  
NIP. 132/051 380

Menyetujui  
Ketua Lembaga Penelitian  
Universitas Negeri Padang

(Prof.Dr.Anas Yasin, MA)  
NIP. 130365634

## RINGKASAN

Pada saat ini telah terjadi perubahan secara mendasar dalam metoda gayaberat karena adanya peningkatan ketelitian alat dan perbaikan teknik survai sehingga metoda ini dikenal dengan metoda gayaberat mikro 4D. Dengan kemampuan seperti ini, metoda gayaberat mikro 4D telah menjadi alternatif baru dalam memecahkan masalah-masalah dinamika dekat permukaan seperti pemantauan reservoir minyak, gas, panas bumi, injeksi uap, injeksi air, penurunan muka air tanah, penurunan muka tanah, dan lain-lain.

Akan tetapi peningkatan dalam ketelitian alat dan perbaikan dalam teknik survai dari metoda tersebut belum ditunjang oleh perbaikan dalam teknik pengolahan dan interpretasi data sehingga penerapannya dirasa masih belum optimal. Oleh karena itu, pengembangan teknik pengolahan dan interpretasi data merupakan hal yang sangat mendesak untuk meningkatkan akurasi metoda tersebut. Salah satu teknik akuisisi dan pengolahan data gayaberat yang paling berkembang pada saat ini adalah teknik dekonvolusi. Hal ini didasarkan atas kenyataan bahwa anomali gayaberat yang terukur dipermukaan dapat dinyatakan sebagai hasil konvolusi antara kontras rapat massa dengan fungsi Green. Masalah utama yang berhubungan dengan proses dekonvolusi adalah ketidakstabilan dari operator dekonvolusi karena masalah inversi. Ini berarti diperlukan sebuah persyaratan untuk menurunkan fungsi operator dekonvolusi berdasarkan kriteria dan asumsi tertentu.

Tujuan umum penelitian adalah (1) menghitung tanggapan anomali gayaberat-mikro 4D secara teoritik yang disebabkan sumber rapat massa dibawah permukaan. Model yang digunakan adalah model ideal *steamflood* yang menggambarkan pergerakan uap dari sumur produksi ke sumur injeksi, (2) menemukan kriteria-kriteria baru untuk menilai kinerja operator dekonvolusi baik sebelum maupun setelah diberi konstrain. dan (3) menerapkan metoda pada daerah studi kasus pada salah satu lapangan minyak yang diinjeksi dengan uap di Sumatera. Untuk mencapai tujuan penelitian dua pendekatan ilmiah dipilih yaitu pemodelan geofisika dan studi kasus. Pendekatan pemodelan geofisika bertujuan untuk mendapatkan tanggapan anomali gayaberat-mikro 4D secara teoritik yang disebabkan oleh penggantian minyak oleh uap selama operasi peningkatan produksi minyak. Sedangkan pendekatan studi kasus bertujuan menerapkan metoda pada data lapangan. Untuk menunjang keberhasilan pendekatan pemodelan geofisika, tiga perumusan masalah diusulkan yaitu perumusan model ideal, perumusan model konvolusi dan dekonvolusi, dan perumusan model numerik. Pengembangan terhadap model ideal dilakukan agar mendekati kondisi riil di lapangan seperti model lapisan tipis horizontal, sesar, graben dan horst. Sebagai studi kasus, metoda diterapkan di LMLM.

Untuk menggambarkan perpindahan fluida didalam reservoir, parameter yang digunakan adalah perubahan rapat massa batuan reservoir minyak setelah diinjeksi dengan uap. Masalah yang harus dipecahkan adalah bagaimana menentukan kontras rapat massa pada kedalaman reservoir berdasarkan anomali gayaberat-mikro 4D yang diamati dalam selang waktu tertentu di permukaan.

Teknik dekonvolusi diusulkan untuk mendapatkan kontras rapat massa pada kedalaman reservoir dengan asumsi kontras rapat massa fluida merupakan sebuah impuls sedangkan fungsi Green adalah respon dari impuls sehingga anomali gayabarat-mikro 4D dapat dinyatakan sebagai proses konvolusi antara kontras rapat massa dengan fungsi Green. Kinerja operator dekonvolusi diujikan pada data sintetik berdasarkan empat kriteria utama yaitu jumlah total set koefisien operator dekonvolusi, jumlah kuadrat total set koefisien operator dekonvolusi, resolusi matrik rapat massa dan resolusi matrik operator dekonvolusi.

Hasil pengujian pada data sintetik menggunakan kriteria jumlah total dan jumlah kuadrat total set koefisien operator dekonvolusi menunjukkan bahwa operator dekonvolusi ukuran  $11s \times 11s$  adalah optimum untuk mendapatkan rapat massa pada kedalaman  $h/s < 1$ . Sedangkan hasil pengujian menggunakan kriteria resolusi matrik rapat massa dan operator dekonvolusi menemukan bahwa operator dekonvolusi ukuran  $101s$  adalah optimum untuk mendapatkan rapat masaa pada kedalaman  $h/s \leq 6$  dan operator dekonvolusi ukuran  $61s \times 61s$  adalah optimum untuk mendapatkan rapat massa pada kedalaman  $h/s \leq 5$ .

Penerapan metoda pada data lapangan menunjukkan bahwa hipotesis yang menyatakan tanggapan anomali gayabarat-mikro 4D akan bernilai negatif akibat penggantian minyak dengan uap selama operasi peningkatan produksi minyak dapat dibuktikan pada salah satu sumur selama pengamatan periode Maret 2001-Agustus 2001. Nilai anomali sebesar  $-300\mu\text{Gal}$  s/d  $-600\mu\text{Gal}$  pada salah satu sumur menunjukkan bahwa telah terjadi penggantian minyak dengan uap selama operasi peningkatan produksi minyak dan minyak didorong oleh uap menuju sumur produksi. Pada pengamatan berikutnya periode Agustus 2001-Januari 2002 menunjukkan bahwa nilai anomali disekitar sumur tersebut adalah positif. Hal ini berasosiasi sebagai proses penghentian injeksi pada bulan Desember 2001 sehingga menurunkan tekanan dan temperatur uap di dalam reservoir. Nilai anomali sebesar  $+300\mu\text{Gal}$  s/d  $+600\mu\text{Gal}$  pada pengamatan periode Agustus 2001-Januari 2002 membuktikan bahwa telah terjadi perubahan fase uap menjadi menjadi air akibat penurunan temperatur. Hal ini sekaligus membuktikan hipotesis bahwa perubahan fase air menjadi uap selama operasi peningkatan produksi minyak akan membangkitkan tanggapan anomali gayabarat-mikro 4D bernilai positif.

Untuk mendapatkan penyebaran fluida pada kedalaman reservoir yaitu 600m maka didesain sebuah operator dekonvolusi ukuran  $61s \times 61s$  dan ditempatkan pada kedalaman maksimum yaitu  $h/s \cong 5$  dimana  $s$  adalah jarak grid dengan nilai 120m. Namun penerapan operator dekonvolusi pada data lapangan sangat sulit karena adanya berberbagai keterbatasan pada operator dan data lapangan seperti jumlah data atau ukuran grid data jauh lebih kecil dari ukuran operator dekonvolusi sehingga operator menjadi tidak stabil dan data gayabarat lapangan mungkin terkontaminasi dengan efek benda-benda dangkal. Oleh karena distribusi rapat massa hasil dekonvolusi tidak konsisten dengan distribusi anomali gayabarat lapangan, maka interpretasi pergerakan uap selama operasi peningkatan produksi minyak berdasarkan rapat massa dekonvolusi belum bisa dilakukan.

## PRAKATA

Syukur *Alhamdulillah hi rabbil 'alamin* peneliti utama panjatkan kepada Allah SWT atas berkat, ramaat dan karunia-Nya jualan kegiatan Penelitian Ilmu Dasar ini dapat diselesaikan sesuai rencana dalam proposal.

Dalam melaksanakan kegiatan Penelitian Ilmu Dasar ini, peneliti utama telah banyak mendapatkan masukan, bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu izinkan kami menyampaikan terima kasih kepada :

1. Pimpinan Universitas Negeri Padang seperti Rektor, Dekan FMIPA, Ketua Jurusan Fisika dan Ketua Lembaga Penelitian atas dukungan dan izin penelitian yang telah diberikan. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada staf LP UNP Ibu El, dkk yang telah berkoordinasi dengan baik selama kegiatan penelitian ini.
2. Rektor Institut Teknologi Bandung Prof.Dr. Ir. Djoko Santoso, M.Sc dan Ketua Departemen Teknik Geofisika-ITB Dr. Wawan Gunawan A Kadir, M.S, atas bantuan alat, diskusi dan dukungan terhadap kegiatan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada teknisi Departemen Teknik Geofisika-ITB Dedy Sukamayadi atas peran serta dalam pengumpulan data di lapangan.
3. Segala pihak yang telah turut serta dan tidak mungkin disebutkan satu per satu.

Semoga bantuan yang telah diberikan dapat memajukan perkembangan Ilmu Dasar di Indonesia serta segala amal baik yang telah diberikan akan mendapatkan imbalan yang setimpal dari Allah SWT.

Padang, awal November 2005

*Selamat Hari Raya Idul Fitri 1426H  
mohon maaf lahir dan batin.*

***Peneliti utama***

## DAFTAR GAMBAR

GAMBAR	Halaman	
2-1	Bagan alir rancangan penelitian	7
3-1	Potensial gayaberat pada titik $P(x,y,z)$ yang disebabkan $\rho(\alpha,\beta,\gamma)$	10
3-2	Model ideal <i>steamflood</i>	12
4-1	Penampang anomali gayaberat dari prisma berukuran 60mx60mx50m ditempatkan pada kedalaman 600m.	28
4-2	Amplitudo operator dekonvolusi pada kedalaman (a) $1 \leq h/s \leq 8$ dan (b) $9 < h/s \leq 10$	29
4-3	Hubungan (a) $C^T$ dan, (b) $C^T C$ terhadap ukuran grid (2M-1)	30
4-4	Hubungan (a) $C^T$ dan, (b) $C^T C$ terhadap ukuran operator (MxN), dengan M=N	30
4-5	Hubungan (a) $C^T$ dan, (b) $C^T C$ terhadap rasio (h/s) dengan ketebalan tetap	30
4-6	Hubungan antara $C^T C$ terhadap panjang operator (a) $3s \leq M \leq 51s$ , (b) $3s \leq M \leq 101s$ , (c) $3s \leq M \leq 201$ dan (d) hubungan panjang operator terhadap rasio (h/s).	32
4-7	Hubungan (a) resolusi rapat massa terhadap rasio (h/s), (b) resolusi operator dekonvolusi ukuran 51s terhadap rasio (h/s).	33
4-8	Hubungan (a) resolusi rapat massa terhadap rasio (h/s), (b) resolusi operator dekonvolusi ukuran 101s terhadap rasio (h/s)	33
4-9	Hubungan (a) resolusi rapat massa terhadap rasio (h/s), (b) resolusi operator dekonvolusi ukuran 201s terhadap rasio (h/s).	33
4-10	Tanggapan anomali gayaberat tiga buah prisma dengan kontras rapat massa masing-masing adalah $0,5 \text{ g/cm}^3$ , $-0,2 \text{ g/cm}^3$ dan $0,3 \text{ g/cm}^3$ disusun pada kedalaman 1 km dan 0, 5km dengan spasi grid 1 km(Kadir, dkk, 1995).	34
4-11	Rapat massa hasil dekonvolusi menggunakan ukuran operator (a) 3km x 3km,(b) 5km x 5km,(c) 9km x 9km, dan (d)11km x11km.	35
4-12	(a) Model rapat massa zona <i>steamflood</i> dan (b) anomali gayaberat-mikro 4D	37
4-13	Rapat massa hasil dekonvolusi pada rasio kedalaman (a) $h/s=6$ , (b) $h/s=7$ , (c) $h/s=8$ dan (d) $h/s=9$ menggunakan panjang operator 101s dimana $s=60\text{m}$ . Ketebalan zona <i>steamflood</i> adalah 50m.	38
4-14	RMS terhadap perubahan ketebalan operator dekonvolusi dimana zona <i>steamflood</i> diparameteri dengan ketebalan model	39

(a) 10m, (b) 30m, (c) 50m dan (d) 70m.

4-15	Penampang lapisan tipis yang diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam.	41
4-16	Penampang anomali gayaberat-mikro dari lapisan tipis horizontal setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga bulan (garis hitam tebal) dan enam bulan (garis putus-putus).	42
4-17 (a)	Peta anomali gayaberat-mikro dari lapisan tipis horizontal setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga bulan.	43
4-17(b)	Peta rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari anomali gayaberat-mikro lapisan tipis horizontal setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga bulan.	43
4-18(a)	Peta anomali gayaberat-mikro dari lapisan tipis horizontal setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu enam bulan	44
4-18(b)	Peta rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari anomali gayaberat-mikro lapisan tipis horizontal setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu enam bulan.	45
4-19(a)	Model penampang lapisan tipis tersesarkan secara vertikal turun setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam bulan.	47
4-19(b)	Penampang anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan (garis hitam tebal) dan enam bulan (garis putus-putus) yang disebabkan oleh lapisan tipis tersesarkan secara vertikal turun.	47
4-20(a)	Peta anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan yang disebabkan oleh lapisan tipis tersesarkan secara vertikal turun.	48
4-20(b)	Peta rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan yang disebabkan oleh lapisan tipis tersesarkan secara vertikal turun.	49
4-21(a)	Model penampang lapisan tipis tersesarkan secara vertikal naik setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam bulan.	50
4-21(b)	Penampang anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan (garis hitam tebal) dan enam bulan (garis putus-putus) yang disebabkan oleh lapisan tipis tersesarkan secara vertikal naik.	51
4-22(a)	Peta anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan yang disebabkan oleh lapisan tipis tersesarkan secara vertikal naik.	52



4-22(b)	Peta rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan yang disebabkan oleh lapisan tipis tersesarkan secara vertikal naik.	52
4-23(a)	Model penampang graben setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam bulan.	54
4-23(b)	Penampang anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan (garis hitam tebal) dan enam bulan (garis putus-putus) yang disebabkan oleh struktur graben.	54
4-24(a)	Peta anomali-gayaberat selang waktu enam bulan yang disebabkan oleh struktur graben.	55
4-24(b)	Peta rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari anomali-gayaberat selang waktu enam bulan yang disebabkan oleh struktur graben.	56
4-25(a)	Model penampang horst setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam bulan.	57
4-25(b)	Penampang anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan (garis hitam tebal) dan enam bulan (garis putus-putus) yang disebabkan oleh struktur horts.	58
4-26(a)	Peta anomali-gayaberat selang waktu enam bulan yang disebabkan oleh struktur horts.	59
4-26(b)	Peta rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari anomali-gayaberat selang waktu enam bulan yang disebabkan oleh struktur horts.	59
4-27	Gambaran struktur LMM (Sumber : Eubank dan Makki,1981)	61
4-28	Stratigrafi umum daerah penelitian	63
4-29	Stratigrafi area LOSF dan sekelilingnya (Sumber : Toha, dkk., 1999)	64
4-30(a)	Peta anomali gayaberat-mikro 4D lapangan periode Maret 2001-Agustus 2001	66
4-30(b)	Peta anomali gayaberat-mikro 4D lapangan periode Agustus 2001-Januari 2002	67

- 4-31(a) Peta kontras rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari peta anomali gayabarat-mikro 4D lapangan periode Maret 2001-Agustus 2001. 69
- 4-31(b) Peta kontras rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari peta anomali gayabarat-mikro 4D lapangan periode Agustus 2001-Januari 2002. 70

## DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

LAMBANG	ARTI
ITB	Institut Teknologi Bandung
UNP	Universitas Negeri Padang
PT.CPI	Perseroan Terbatas Caltex Pacifik Indonesia
4D	empat dimensi
$\Delta\tau$	selang waktu pengukuran
$\tau_0$	waktu pengukuran awal
$\tau_1$	waktu pengukuran akhir
SEG	<i>Society of Exploration Geophysicists</i>
LOSF	<i>Light Oil Steam Flood</i>
LMLM	Lapangan minyak LOSF Minas
$\rho$	rapat massa dari benda anomali gayaberat
$\alpha, \beta, \gamma$	koordinat rapat massa
$\nabla^2$	Laplacian
F	fungsi Green dari potensial gayaberat
K	konstanta gayaberat umum= $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg sec}^2$
U	potensial gayaberat
x,y,z	koordinat stasiun
$\Delta$	delta
$\nabla$	gradien
$g_z$	gayaberat-mikro arah sumbu-z
h	kedalaman benda anomali
h/s	rasio kedalaman terhadap jarak stasiun/grid
$h_1$	kedalaman atas benda anomali
$h_2$	kedalaman bawah benda anomali
R	fungsi Green dari anomali gayaberat
s	jarak stasiun/grid
C(x,y)	operator dekonvolusi dalam kawasan ruang
M	panjang operator dekonvolusi arah sumbu-x
N	panjang operator dekonvolusi arah sumbu-y
a	panjang prisma
b	lebar prisma
C(u,v)	operator dekonvolusi dalam kawasan bilangan gelombang
K	vektor bilangan gelombang
u	bilangan gelombang arah sumbu x
v	bilangan gelombang arah sumbu y
t	ketebalan benda anomali= $h_2-h_1$
$\lambda$	perkalian Lagrange
$C_w$	operator Wiener
$G_{pg}$	matrik korelasi silang
$R_{gg}$	matrik korelasi diri
$\epsilon$	bising berasosiasi dengan anomali gayaberat

E	kesalahan energi
I	matrik identitas
$\sigma^2$	standar deviasi
$\otimes$	operasi konvolusi
$\rho_j$	vektor model/rapat massa
$c_j$	vektor koefisien dekonvolusi
$g^{\text{benar}}$	gayaberat yang dianggap benar
$g_i$	vektor data/gayaberat
$g^{\text{konv}}$	gayaberat hasil konvolusi
i	panjang vektor i
ij	ukuran matrik baris i kolom j
j	panjang vektor j
ji	ukuran matrik baris j kolom i
$R_{ij}$	matrik kernel data fungsi Green
$S_{ij}$	matrik resolusi gayaberat
$G_{ij}^{-g}$	matrik inversi tergeneralisasi
$C_{ji}$	matrik kernel data
$G_{ji}$	matrik kernel data baru
$\rho^{\text{dekonv}}$	rapat massa hasil dekonvolusi
$\rho^{\text{obs}}$	rapat massa hasil pengamatan
$c^{\text{benar}}$	operator dekonvolusi yang dianggap benar
$c^{\text{dekonv}}$	operator dekonvolusi
$C^T$	jumlah total set koefisien operator dekonvolusi
$C^T C$	jumlah kuadrat total set koefisien operator dekonvolusi
n	jumlah sel matrik operator dekonvolusi ternormalisasi
$N_{ij}$	matrik resolusi operator dekonvolusi
$R_{ii}$	matrik resolusi rapat massa
T	transpos dari vektor atau matrik
U	vektor uniter= [1, 1, 1, 1, ...]
r	jumlah sel resolusi matrik rapat massa ternormalisasi
RMS	<i>Root Mean Squares</i>
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i>
LMM	Lapangan minyak Minas

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1. Latar belakang masalah

Pada saat ini telah terjadi perubahan secara mendasar dalam metoda gayaberat karena adanya peningkatan ketelitian alat dan perbaikan teknik survai. Pada akhir tahun 2000, LaCoste & Romberg mengeluarkan gravimeter digital akurasi  $1\mu\text{Gal}$  sehingga ketelitian alat berubah secara signifikan dari orde  $\text{mGal}$  ke orde  $\mu\text{Gal}$ . Perbaikan dalam teknik survai ditandai dengan perubahan dari survai 3D menjadi survai 4D dimana waktu adalah dimensi ke-4 sehingga metoda ini dikenal dengan nama metoda gayaberat-mikro 4D atau *the time-lapse microgravity*. Survai gayaberat-mikro 4D adalah survai pengukuran dimana nilai gayaberat-mikro pada saat  $\tau_1$  (survai awal) dibandingkan pada saat  $\tau_2$  (survai akhir). Perbedaan antara nilai gayaberat-mikro pada saat  $\tau_1$  dan  $\tau_2$  disebut anomali gayaberat mikro selang waktu  $\Delta\tau=\tau_2-\tau_1$  atau anomali gayaberat-mikro 4D atau *the time-lapse microgravity anomaly*. Anomali gayaberat mikro 4D ini dapat ditafsirkan sebagai perubahan rapat massa batuan di bawah permukaan. Hal ini berarti metoda gayaberat-mikro 4D secara tidak langsung dapat merekam perubahan rapat massa di bawah permukaan baik dalam dimensi ruang dan maupun waktu. Dengan kemampuan seperti ini, metoda gayaberat mikro 4D telah menjadi alternatif baru dalam memecahkan masalah-masalah dinamika dibawah permukaan seperti pemantauan injeksi uap, injeksi air, panas bumi, gas, minyak bumi, intrusi air laut, penurunan muka air tanah dan subsiden.

Akan tetapi peningkatan dalam ketelitian alat dan perbaikan dalam teknik survai belum ditunjang oleh pengembangan dalam teknik akuisisi, pengolahan dan interpretasi data sehingga penerapannya masih belum optimal. Oleh karena itu penelitian untuk menemukan teknik akuisisi, pengolahan dan penafsiran data yang baru untuk menunjang penerapan metoda gayaberat mikro 4D di lapangan adalah penting mengingat metoda ini sangat prospek di masa depan dengan bidang terapan yang sangat luas.

Salah satu teknik akuisisi, pengolahan dan penafsiran data gayaberat yang paling berkembang pada saat ini adalah teknik dekonvolusi. Hal ini didasarkan atas kenyataan bahwa data gayaberat yang terukur di permukaan dapat dinyatakan sebagai konvolusi antara rapat massa pada kedalaman sumber dengan sebuah fungsi Green yang

berhubungan dengan faktor-faktor geometri sumber. Permasalahan yang harus diselesaikan adalah bagaimana mendesain sebuah operator dekonvolusi ukuran tertentu agar rapat massa pada kedalaman sumber dapat ditafsirkan dengan baik.

Hasil penelitian awal telah berhasil menemukan desain operator dekonvolusi pada kedalaman ( $h/s \leq 1$ ). Penelitian lanjutan yang dilakukan adalah mendesain operator dekonvolusi pada kedalaman ( $h/s \geq 1$ ), beberapa pengembangan dan penemuan kriteria-kriteria untuk menilai kinerja operator dekonvolusi dilakukan. Dari hasil penelusuran pustaka, sampai saat ini sangat sedikit literatur yang menerbitkan hasil-hasil penelitian tentang desain operator dekonvolusi pada kedalaman ( $h/s \geq 1$ ). Temuan dari penelitian diharapkan akan memperkaya khazanah ilmu pengetahuan dasar mengenai kriteria-kriteria baru dalam mendesain operator dekonvolusi pada kedalaman ( $h/s \gg 1$ ). Jadi pentingnya penelitian ini adalah :

1. Diperoleh landasan ilmiah untuk menurunkan perumusan persamaan dekonvolusi data anomali gayaberat-mikro 4D untuk menurunkan operator dekonvolusi pada kedalaman sumber.
2. Diperoleh kriteria-kriteria baru mengukur kinerja operator dekonvolusi.
3. Bila kajian awal ini berhasil, terbuka kemungkinan pengembangan teknik dekonvolusi untuk menafsirkan data anomali gayaberat-mikro 4D yang terkontaminasi dengan bising yaitu anomali-anomali diluar target.

## **1.2. Masalah pemilihan studi kasus**

Daerah yang menjadi studi kasus adalah salah satu lapangan minyak yang diinjeksi dengan uap di Sumatera. Luas area yang diselidiki adalah  $1400 \times 1400 \text{ m}^2$  atau  $23s \times 23s$  dimana  $s=60\text{m}$  adalah jarak stasiun. Reservoir minyak diperkirakan berada pada kedalaman 600m-700m dengan ketebalan sekitar 180m. Penelitian ini menjadi studi kasus yang sangat menarik karena seluruh informasi yang diperlukan untuk menghitung tanggapan anomali gayaberat-mikro 4D secara teoritik sudah tersedia seperti jumlah produksi minyak/hari, jumlah injeksi minyak/hari, kedalaman reservoir, ketebalan reservoir, jarak stasiun, jumlah stasiun, luas area dan selang waktu pengamatan.

### **I-3. Cara pendekatan dan metodologi penelitian**

Untuk mencapai tujuan penelitian maka dua pola pendekatan ilmiah dipilih yaitu pemodelan dan studi kasus. Pendekatan pemodelan bertujuan untuk mendapatkan tanggapan anomali gayaberat-mikro 4D secara teoritik akibat penggantian minyak dengan uap selama operasi peningkatan produksi minyak. Pendekatan studi kasus bertujuan untuk menerapkan metoda pada data lapangan. Kegiatan yang dilakukan adalah pengumpulan, pengolahan dan penafsiran data yang ditunjang oleh data-data inti dan sumur.

Secara garis besar penyelesaian masalah penelitian adalah melakukan pemodelan untuk menghitung tanggapan gayaberat-mikro secara teoritik pada saat  $\tau_1$  dan  $\tau_2$ . Nilai gayaberat-mikro pada saat  $\tau_1$  berassosiasi sebagai kondisi reservoir sebelum injeksi dan nilai gayaberat-mikro pada saat  $\tau_2$  berassosiasi sebagai kondisi reservoir setelah injeksi. Dalam hal ini peta anomali gayaberat-mikro 4D didefenisikan sebagai selisih antara nilai gayaberat-mikro dalam selang waktu  $\Delta\tau=\tau_2-\tau_1$ . Hasil penelitian pemodelan akan diterapkan pada data lapangan sebagai verifikasi. Penelitian pemodelan akan dikembangkan mengikuti kondisi riil lapangan seperti model lapisan tipis, sesar, graben dan horst.

Selanjutnya rapat massa pada kedalaman reservoir diturunkan dari data anomali gayaberat-mikro 4D dengan teknik dekonvolusi baik untuk data sintetik maupun data lapangan. Pengembangan teori/metoda diperlukan terutama bila data anomali gayaberat-mikro 4D secara teoritik atau rapat massa hasil dekonvolusi berbeda dengan data lapangan. Validitas metoda diujikan pada data sintetik sebelum diterapkan pada data lapangan.

### **I-4. Pelaksanaan penelitian secara garis besar**

Pelaksanaan penelitian secara garis besar dilakukan dalam dua arah yaitu pemodelan dan studi kasus. Penelitian pemodelan bertujuan untuk mendapatkan anomali gayaberat-mikro secara teoritik sesuai kondisi-kondisi reservoir. Perhitungan anomali gayaberat-mikro 4D secara teori dari berbagai model pada kondisi-kondisi reservoir dilakukan menggunakan program MATLAB versi 7.0.1.24704 (Release 14), pengkonturan dan pengkisian dilakukan menggunakan program SURFER 8.00 sedangkan

desain penampang reservoir dilakukan menggunakan program CorelDRAW 12.

Pendekatan studi kasus bertujuan untuk menerapkan metoda pada data lapangan. Kegiatan yang dilakukan adalah pengumpulan, pengolahan, dan analisa data. Pengumpulan data lapangan menggunakan dua gravimeter yaitu (1) gravimeter LaCoste & Romberg model G-1158 yang dilengkapi sistem Alloid dan (2) gravimeter LaCoste & Romberg model G-508 yang dilengkapi sistem Feed Back via komputer. Peralatan lain yang diperlukan adalah GPS dan altimeter untuk menentukan posisi dan ketinggian stasiun. Gravimeter model G-1158 digunakan sebagai peralatan lapangan untuk mengukur nilai gayaberat di setiap stasiun, dan gravimeter model G-508 dipasang pada stasiun dasar (BS) untuk mengamati variasi diurnal akibat efek gayaberat yang disebabkan benda-benda angkasa luar (tidal). Pengamatan gayaberat dikontrol dengan mengaplikasikan sistem tertutup dimana stasiun dasar selalu diamati dua kali yaitu sebelum dan setelah pengamatan gayaberat di lapangan. Pengumpulan data menggunakan "teknik 4D" dimana setiap stasiun diamati minimal dua kali dalam selang waktu tiga atau empat bulan. Sampai saat ini, tiga pengumpulan data telah dilakukan yaitu pada bulan Maret 2001, Oktober 2001 dan Januari 2002. Dari ketiga pengumpulan data diperoleh dua peta anomali gayaberat-mikro yaitu selang waktu Oktober 2001-Maret 2001 dan Januari 2002-Oktober 2001. Analisa pergerakan uap selama penelitian akan merujuk kepada model ideal yang telah dirumuskan. Distribusi fluida pada kedalaman reservoir akan ditafsirkan berdasarkan rapat massa hasil dekonvolusi.



## BAB II TUJUAN PENELITIAN DAN MANFAAT

### 2.1. Tujuan penelitian dan lingkup permasalahan

Tujuan umum dari penelitian ini adalah

1. Menghitung tanggapan anomali gayabarat-mikro 4D secara teoritik yang disebabkan sumber rapat massa dibawah permukaan. Model yang digunakan adalah model ideal *steamflood* yang menggambarkan pergerakan uap dari sumur produksi ke sumur injeksi.
2. Menemukan kriteria-kriteria baru untuk menilai kinerja operator dekonvolusi baik sebelum maupun setelah diberi konstrain.
3. Menerapkan metoda pada daerah studi kasus pada salah satu lapangan minyak yang diinjeksi dengan uap di Sumatera.

Ruang lingkup dan batas penelitian adalah kajian teoritis tentang anomali gayabarat-mikro 4-D yang disebabkan oleh benda-benda bawah permukaan. Asumsi yang digunakan adalah (1) injeksi uap mengikuti model ideal *steamflood*, (2) tanggapan anomali gayabarat-mikro 4D yang diukur dipermukaan dapat dinyatakan sebagai konvolusi antara kontras rapat massa dibawah permukaan dengan suatu fungsi Green yang berhubungan faktor-faktor geometri sumber dan (3) model reservoir dapat didekati oleh satu atau lebih prisma sisi tegak.

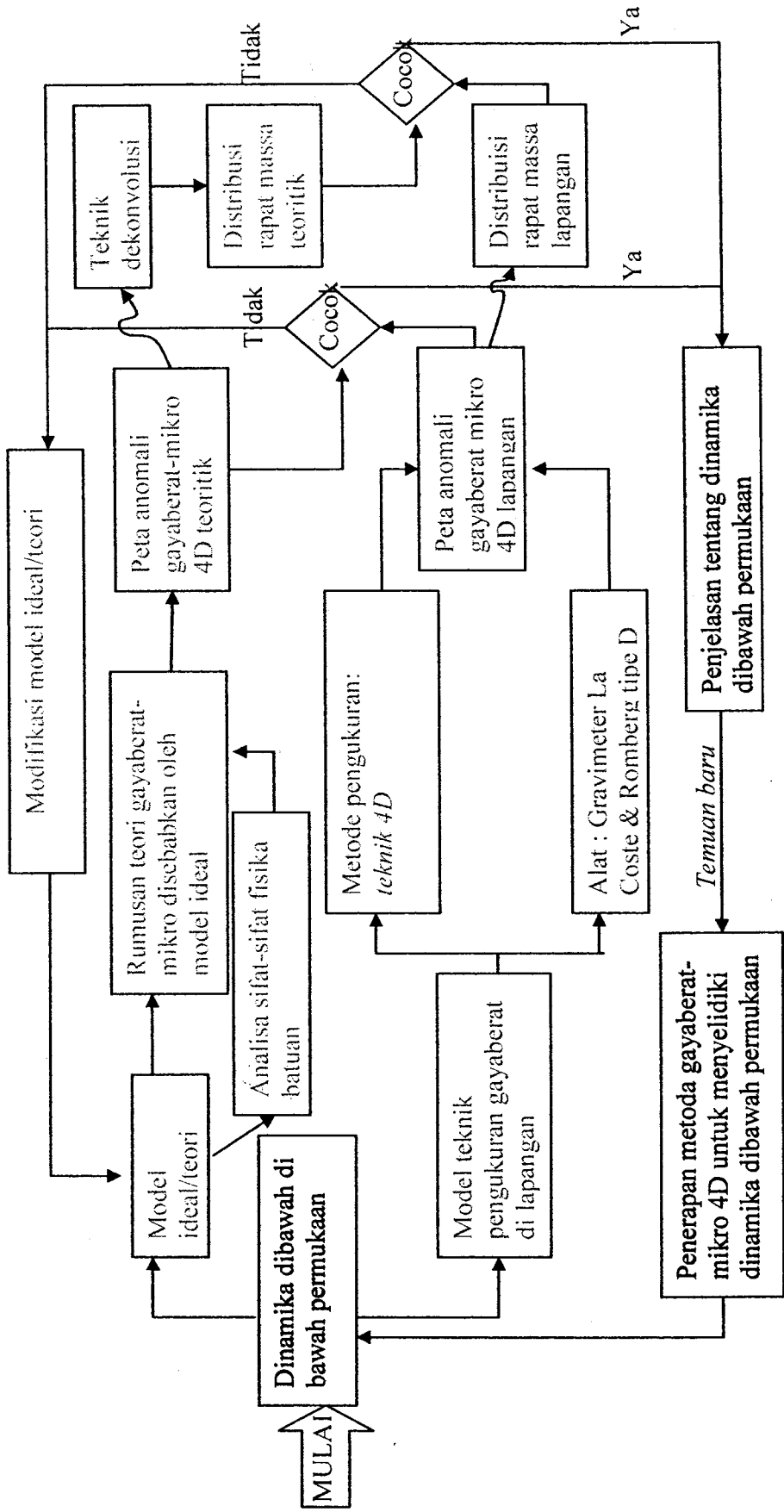
Hipotesis yang akan dibuktikan dalam penelitian ini adalah apakah tanggapan anomali gayabarat-mikro 4D akan bernilai negatif akibat penggantian minyak dengan uap selama operasi peningkatan produksi minyak. Hipotesis lain yang akan diuji adalah apakah tanggapan anomali gayabarat-mikro 4D akan bernilai positif jika fase uap berubah menjadi air akibat penghentian injeksi. Mengingat keterbatasan waktu, tenaga dan biaya, maka pengukuran lapangan di batasi maksimal tiga kali selama

waktu studi untuk mendapatkan minimal dua peta anomali gayaberat-mikro 4D dalam selang waktu yang berbeda.

## **2.2. Manfaat penelitian dalam khasanah ilmu pengetahuan.**

Kontribusi dari penelitian ini adalah didapatkan sebuah hipotesis, metode, model dan desain baru dalam survai gayaberat-mikro 4D berdasarkan teknik dekonvolusi untuk berbagai kepentingan aplikasi seperti pemantauan injeksi uap, injeksi air, panas bumi, gas, minyak bumi, intrusi air laut, penurunan muka air tanah dan penurunan muka tanah (amblesan). Hipotesis baru yang diuji apakah pemberian konstrain pada operator dekonvolusi mempengaruhi kinerjanya. Metode baru yang dihasilkan adalah sebuah pengembangan metode dekonvolusi untuk menafsirkan rapat massa pada berbagai kedalaman sumber. Model baru yang dihasilkan adalah sebuah model ideal *steamflood* pergerakan uap dari sumur injeksi ke sumur produksi. Sedangkan desain baru yang dihasilkan adalah sebuah teknik pengumpulan dan penafsiran data berdasarkan teknik dekonvolusi.

Realisasi kontribusi kepada pengembangan ilmu pengetahuan dasar diperlihatkan oleh munculnya sebuah topik penelitian baru berjudul "*Pengembangan metode dekonvolusi dalam survai gayaberat-mikro 4D untuk proses monitoring menggunakan model ideal steamflood dan waterflood*" yang diusulkan oleh Drs. Ahmad Fauzi, M.Si dari Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang pada program Penelitian Dasar tahun anggaran 2005. Disamping itu, muncul pula beberapa makalah yang telah dan akan dipublikasikan dalam prosiding/jurnal nasional maupun internasional. Kontribusi dari penelitian ini dapat dirumuskan dalam sebuah rancangan penelitian tentang penerapan metoda gayaberat-mikro 4D untuk memantau fenomena alam di bawah permukaan diperlihatkan pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1-1. Diagram alir rancangan penelitian

## BAB III TINJAUAN PUSTAKA

### 3-1. Medan gayaberat dan potensial gayaberat

Pengertian tentang medan gayaberat sangat diperlukan untuk mengevaluasi dan menganalisis data gayaberat hasil pemodelan dan pengamatan. Pengetahuan dasar dari medan gayaberat berguna untuk merencanakan pengukuran di lapangan. Oleh karena itu pembahasan pengertian medan gayaberat dan potensial gayaberat diperlukan untuk memudahkan penerapan metoda gayaberat di lapangan.

Watson (1976) mendefinisikan medan sebagai ruang dimana efek listrik, gravitasi atau magnet, dan lain-lain ada dan dapat diukur pada setiap titik. Selanjutnya ia mendefinisikan medan gravitasi sebagai daerah atau ruang yang berasosiasi dengan konfigurasi massa dimana gaya gravitasi dapat dideteksi. Hornby (1997) mendefinisikan medan gravitasi sebagai daerah atau ruang dimana pengaruh gaya dapat dirasakan. *Merriam-Webster's Collegiate Dictionary* (2003) dalam Zeng dan Wan (2004) mendefinisikan medan sebagai daerah atau ruang dimana efek tertentu (magnet) ada. Sedangkan the SEG's *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics* (Sheriff, 2002) mendefinisikan medan sebagai ruang dimana efek gayaberat, listrik dan magnet dapat diukur.

Di sisi lain para pakar geofisika memberikan defenisi yang khas, misalnya Grant dan West (1965) mendefinisikan medan gayaberat sebagai gaya persatuan unit massa yang bekerja pada sebuah partikel  $m_1$  pada titik P pada jarak  $r$  dari partikel  $m_1$ . Rao dan Murthy (1978) mengusulkan gaya yang dialami oleh satu unit massa pada permukaan bumi secara numerik sama dengan percepatan yang disebabkan oleh gayaberat dan gaya ini juga disebut medan gayaberat atau medan gravitasi bumi. Berdasarkan defenisi dari Grant dan West (1965), Telford dkk., (1990), dan Blakely (1996) dapat disimpulkan bahwa medan gayaberat adalah sebuah gaya atau medan gaya dalam suatu daerah atau ruang. Pengukuran medan gayaberat dapat dibuat dalam daerah atau ruang dimana medan gayaberat berada.

Zeng dan Wan (2004) mengatakan bahwa defenisi medan sebagai daerah atau ruang dimana efek gravitasi ada adalah defenisi yang tidak sesuai dan

menyesatkan (*misleading*). Oleh karena itu defenisi baku diperlukan yaitu medan dalam geofisika adalah fenomena geofisika yang terdistribusi dalam ruang. Berdasarkan uraian diatas medan gayaberat dapat didefenisikan sebagai gaya gravitasi yang bekerja pada sebuah sumber pada sebuah titik dalam ruang atau permukaan bumi atau sekitarnya. Medan gayaberat adalah sebuah gaya atau medan gaya yang terdistribusi dalam daerah yang mengeliling sumber. Pengukuran medan gayaberat dapat dilakukan dalam daerah atau ruang dimana medan gayaberat berada.

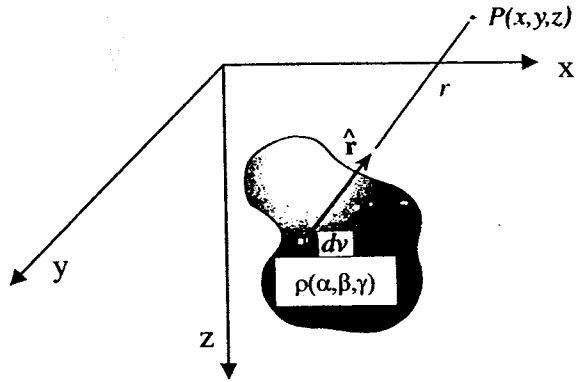
Secara implisit defenisi diatas menggambarkan adanya hubungan antara medan gayaberat dengan sumber dibawah permukaan. Hubungan ini dapat diungkapkan sebagai berikut :

$$\nabla^2 U(x, y, z) = 4\pi K \Delta \rho(\alpha, \beta, \gamma) \quad (3-1a)$$

dimana  $U(x,y,z)$  adalah medan potensial gayaberat pada koordinat  $(x,y,z)$  dan merupakan sebuah medan skalar,  $\Delta \rho(\alpha,\beta,\gamma)$  adalah kontras rapat massa pada koordinat sumber  $(\alpha,\beta,\gamma)$ ,  $K$  adalah konstanta gayaberat umum. Pers. 3-1a disebut persamaan Poisson. Bila tidak ada massa, persamaan Poisson berubah menjadi persamaan Laplace

$$\nabla^2 U(x, y, z) = 0 \quad (3-1b)$$

Perbedaan prinsip antara persamaan Poisson dan Laplace adalah bila persamaan Poisson menggambarkan potensial pada semua titik didalam massa, maka persamaan Laplace menggambarkan potensial gayaberat diluar massa dan persamaan Laplace hanya valid untuk daerah bebas massa. Gambar 3.1 memperlihatkan potensial gayaberat yang disebabkan rapat massa yang ditempatkan pada jarak  $r$  dibawah permukaan.



Gambar 3-1. Potensial gayaberat pada titik  $P(x,y,z)$  yang disebabkan  $\rho(\alpha,\beta,\gamma)$

Blakely (1997) mengatakan bahwa Pers. 3-1a adalah persamaan diferensial yang mempunyai banyak kemungkinan penyelesaian seperti teknik beda hingga, elemen hingga, dan fungsi *Green*. Zang, dkk., (2004) telah mengembangkan algoritma genetik dikombinasikan dengan metoda beda hingga untuk mencari penyelesaian Pers. 3-1a untuk menurunkan distribusi rapat massa 3D. Lee dan Biehler (1991) menerapkan teknik transformasi Fourier untuk mengkonstruksi gayaberat dan menerapkan algoritma inversi dari Chai dan Hinzie (1988) untuk mendapatkan distribusi rapat massa kembali. Sedangkan Boas (1983) menyelesaikan Pers. 3-1a berdasarkan fungsi *Green* dan menunjukkan bahwa

$$U(x, y, z) = K \int_{\alpha=-\infty}^{\infty} \int_{\beta=-\infty}^{\infty} \int_{\gamma=0}^{\infty} \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)}{\sqrt{(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (3-2)$$

adalah penyelesaian dari Pers. 3-1a. Misalkan Pers. 3-1a dapat ditulis

$$\nabla^2 F(x-\alpha, y-\beta, z-\gamma) = \delta(x-\alpha, y-\beta, z-\gamma) \quad (3-3)$$

dimana  $\delta(x-\alpha, y-\beta, z-\gamma)$  adalah delta Dirac yang mempunyai sifat

$$\int_{\alpha=-\infty}^{\infty} \int_{\beta=-\infty}^{\infty} \int_{\gamma=0}^{\infty} \Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma) \delta(x-\alpha, y-\beta, z-\gamma) d\alpha d\beta d\gamma = \Delta\rho(x, y, z) \quad (3-4)$$

Penyelesaian dari Pers. 3-1a dapat juga ditulis

$$U(x, y, z) = \int_{\alpha=-\infty}^{\infty} \int_{\beta=-\infty}^{\infty} \int_{\gamma=0}^{\infty} \Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma) F(x-\alpha, y-\beta, z-\gamma) d\alpha d\beta d\gamma \quad (3-5)$$

Bandingkan Pers. 3-2 dengan Pers. 3-5 sehingga didapatkan

$$F(x-\alpha, y-\beta, z-\gamma) = \frac{K}{\sqrt{(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2}} \quad (3-6)$$

Fungsi  $F(x-\alpha, y-\beta, z-\gamma)$  pada Pers. 3-6 disebut fungsi *Green* dari potensial gayaberat.

Fungsi *Green* adalah alat yang sangat berguna memecahkan masalah-masalah tertentu dalam teori potensial. Boas (1983) mengatakan bahwa fungsi *Green* adalah tanggapan terhadap impuls pada  $x=\alpha$ ,  $y=\beta$ , dan  $z=\gamma$ . Fungsi *Green* memenuhi kondisi batas ideal bila  $U(x,y,z)$  adalah nol pada jarak tak hingga (Zhang, dkk., 2004) dan merupakan penyelesaian persamaan Poisson bila distribusi rapat massa  $\Delta\rho(x,y,z)$  merupakan sebuah impuls (Blakely, 1996).

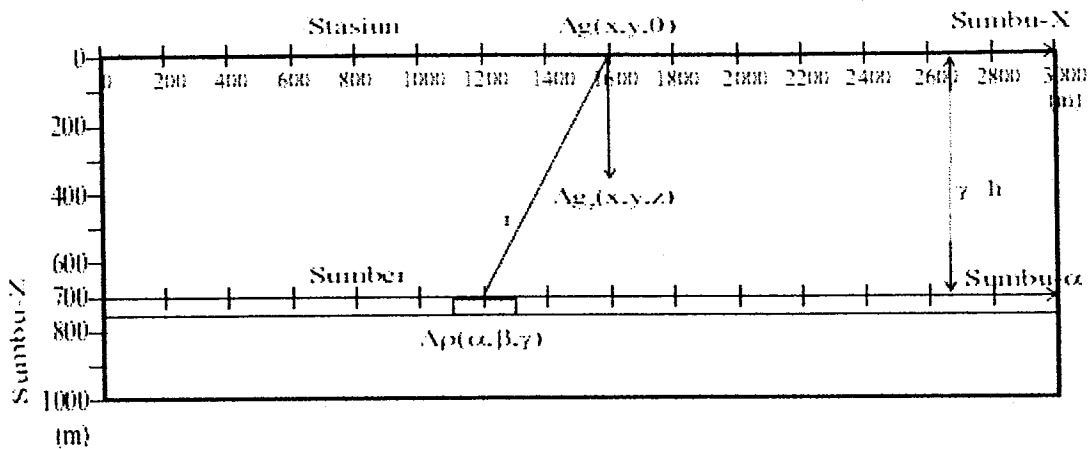
Hubungan antara medan gayaberat dengan potensial gayaberat dapat ditulis

$$\Delta\bar{g}(x, y, z) = -\nabla U(x, y, z) \quad (3-8a)$$

dimana  $\nabla$  adalah operator diferensial sebagai medan vektor,  $\nabla U$  adalah gradien potensial gayaberat sebagai medan skalar,  $\bar{g}(x, y, z)$  adalah vektor percepatan gravitasi. Tanda (-) menunjukkan kerja dilakukan oleh benda pada medan (Grant dan West, 1965) sedangkan tanda (+) menunjukkan kerja dilakukan oleh benda untuk melawan medan (Blakely, 1996).

### 3-2. Persamaan umum konvolusi data gayaberat

Perumusan masalah konvolusi data anomali gayaberat-mikro 4D dapat diilustrasikan pada Gambar 3-2. Misalkan sumber anomali adalah kontras rapat yang tersebar secara merata pada sumbu- $(\alpha, \beta, \gamma)$  pada kedalaman  $h$  dibawah permukaan.



Gambar 3-2. Model pengukuran gayaberat di lapangan.

Hubungan antara anomali gayaberat-mikro 4D yang terukur dalam selang waktu tertentu pada sumbu-(x,y,z=0) di permukaan dengan kontras rapat massa pada sumbu-(α,β,γ=h) dibawah permukaan dapat ditulis sebagai berikut

$$\Delta \bar{g}_z(x,y,z) = K \int_{\alpha=-\infty}^{\infty} \int_{\beta=-\infty}^{\infty} \int_{\gamma=0}^{\infty} \frac{\Delta \rho(\alpha, \beta, \gamma)(z-\gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (3-8b)$$

dimana  $\Delta g_z(x,y,z)$  dapat didefinisikan sebagai nilai gayaberat yang terukur oleh gravimeter di permukaan dan biasanya dilambangkan dengan  $\Delta g$  saja. Pers. Dalam bentuk diskrit, Pers. 3-8b dapat ditulis

$$\Delta g(x,y,z) = K \sum_{\alpha=-\infty}^{\infty} \sum_{\beta=-\infty}^{\infty} \sum_{\gamma=h_1}^{h_2} \frac{\Delta \rho(\alpha, \beta, \gamma)(z-\gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} \quad (3-8c)$$

atau

$$\Delta g(x,y,z) = \sum_{\alpha=-\infty}^{\infty} \sum_{\beta=-\infty}^{\infty} \sum_{\gamma=h_1}^{h_2} \Delta \rho(\alpha, \beta, \gamma) R(x-\alpha, y-\beta, z-\gamma) \quad (3-8d)$$

dimana  $R(x-\alpha, y-\beta, z-\gamma) = \frac{K(z-\gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}}$  adalah fungsi

*Green* dari anomali gayaberat. Berdasarkan pada pers. (3-8) diketahui bahwa anomali gayaberat-mikro 4D adalah hasil konvolusi antara kontras rapat massa dengan fungsi *Green* yang berhubungan parameter-parameter geometri seperti kedalaman, ketebalan, jarak antar stasiun/jarak grid dan lebar anomali/lebar grid dan sistem bekerja pada suatu sistem linier dimana fungsi *Green* merupakan



tanggapan impuls dari sistem tersebut. Pengetahuan tentang fungsi *Green* adalah kunci untuk mendapatkan distribusi rapat massa berdasarkan metode dekonvolusi. Perumusan masalah dekonvolusi dalam metoda gayaberat-mikro 4D adalah bagaimana mendesain operator dekonvolusi ukuran tertentu agar distribusi rapat massa pada koordinat sumber  $(\alpha, \beta, \gamma)$  dapat diturunkan dari data anomali gayaberat-mikro 4D yang diukur pada koordinat stasiun  $(x, y, 0)$ .

Untuk benda berupa prisma sisi, tanggapan gayaberat teoritik telah diturunkan oleh Plouff (1976) sebagai berikut

$$\Delta g(x, y, z) = G\Delta\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 s \left[ z_k \tan^{-1} \frac{a_i b_j}{z_k R_{ijk}} - a_i \ln(R_{ijk} + b_j) - b_j \ln(R_{ijk} + a_i) \right] \quad (3-8e)$$

dimana  $R_{ijk} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ , a, b, dan z adalah panjang, lebar, dan kedalaman prisma serta  $\Delta\rho$  adalah kontras rapat massa prisma dengan sekeliling.

Battacharya dan Navolio (1975) telah menyelidiki proses konvolusi antara geometri sumber dengan fungsi *Green* pada Pers. 3-8c menggunakan prisma sisi tegak dari Nagy (1966). Asumsi yang digunakan adalah benda yang membangkitkan anomali medan potensial dicirikan oleh rapat massa merata. Efek gayaberat hanya dipengaruhi oleh lokasi titik amat (fungsi *Green*) dan tidak dipengaruhi oleh bentuk geometri benda. Perbedaan antara anomali gayaberat teoritik dengan anomali gayaberat hasil konvolusi adalah 16% *error* pada kedalaman prisma dua kali jarak stasiun ( $h/s=2$ ) dan 4% *error* pada kedalaman prisma delapan kali jarak stasiun ( $h/s=4$ ) dan *error* sangat pada kedalaman prisma jauh lebih besar dari jarak stasiun ( $h/s \geq 10$ ). Temuan dari penelitian ini mempunyai implikasi penting didalam aplikasi untuk pemantauan reservoir minyak yang diinjeksi dengan uap atau air. Bila reservoir berada pada kedalaman 600m-700m, maka spasi pengukuran 60m adalah ideal untuk mengkonstruksi penampang atau peta anomali gayaberat berdasarkan teknik konvolusi.

Battacharya dan Navolio (1976) juga telah mempelajari Pers. 3-8c dalam kawasan bilangan gelombang. Perbedaan anomali gayaberat teoritik dengan anomali gayaberat hasil konvolusi hanya 1,3% untuk jumlah data adalah 32.

Metoda konvolusi dalam kawasan bilangan gelombang cukup efisien, akurat dan mudah digunakan untuk mendapatkan anomali gayaberat dari benda dengan bentuk tidak beraturan. Selanjutnya Battacharya dan Navolio (1977) juga menurunkan ungkapan analitik dari perubahan efek gayaberat yang disebabkan oleh perubahan distribusi rapat massa. Bila rapat massa merata maka yang ditinjau hanyalah perubahan tanggapan impuls terhadap medan gayaberatnya.

Granser (1985) menurunkan persamaan konvolusi efek gayaberat sebuah benda lapisan tipis untuk untuk kasus 1D sebagai berikut

$$\Delta g(x) = \sum_{\alpha=-\infty}^{\infty} \Delta \rho(\alpha) R(\alpha - x) \quad (3-8g)$$

dimana  $R(\alpha - x) = G \ln \frac{(\alpha - x)^2 + h_2^2}{(\alpha - x)^2 + h_1^2}$  adalah operator konvolusi dan  $h_1$  dan  $h_2$

adalah kedalaman atas dan bawah lapisan. Untuk kasus 2D, persamaan konvolusi dapat ditulis

$$\Delta g(x, y) = \sum_{\alpha=-\infty}^{\infty} \sum_{\beta=-\infty}^{\infty} \Delta \rho(\alpha, \beta) R(x - \alpha, y - \beta) \quad 3-8h$$

dimana

$$R(x - \alpha, y - \beta) = K \left[ \frac{1}{\sqrt{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + h_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + h_2^2}} \right].$$

Dimri (1992) meninjau sistem gayaberat sebagai sistem informasi. Benda gayaberat diistilahkan sebagai target atau sumber yang dikelilingi oleh material-material yang berbeda. Material-material dalam ruang antara target dan permukaan bumi disebut medium. Gayaberat yang diukur oleh gravimeter dan dalam hal ini gravimeter disebut receiver. Analogi ini semata-mata mengambil dari data seismik. Pada awalnya konsep konvolusi dalam bidang geofisika dikembangkan dalam deret waktu seperti pada data seismik. Muncul pertanyaan apakah data gayaberat yang dikumpulkan dipermukaan bumi dapat dipandang sebagai deret waktu? Sebagai jawabannya, ternyata data-data gayaberat yang diukur dipermukaan bumi dalam waktu yang berbeda-beda, tapi tetap ditampilkan

dalam sebuah penampang atau peta (grid) sebagai fungsi jarak. Penampang atau peta kemudian dilakukan pengkisian pada spasi atau jarak yang sama dan kemudian sample-sampel ini menghasilkan sebuah deret data baru yang disebut deret ruang diskret. Sehingga dengan sendirinya analogi konvolusi data seismik dalam deret waktu dapat digunakan sebagai konvolusi data gayaberat sebagai deret ruang. Sebelum tahun tujuh puluhan belum ada literatur geofisika yang membahas konsep konvolusi data gayaberat dan pada pertengahan tahun tujuh puluhan sudah muncul tiga makalah yang membahas pendekatan konvolusi secara teoritis dalam gayaberat (Battacharya dan Navolio,1975; Battacharya dan Chan, 1976) ; Battacharya dan Navolio, 1977) sehingga pada saat itu konsep konvolusi dalam gayaberat masih dapat dinilai sebagai pendekatan baru. Perbedaan besar antara konvolusi data seismik dengan konvolusi data gayaberat adalah landasan teori yang dipakai dimana konvolusi data seismik diturunkan dari teori peluang sedangkan konvolusi data gayaberat diturunkan dari teori medan potensial. Sehingga kelak akan muncul dua kelompok besar proses dekonvolusi yaitu model deterministik untuk data gayaberat dan model stokastik untuk data seismik.

### 3-3. Persamaan umum dekonvolusi gayaberat

Proses penentuan rapat massa dari data gayaberat sesuai pers. 3-8d disebut dekonvolusi dan persamaan ditulis

$$\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma) = \sum_{x=-M}^{+M} \sum_{y=-N}^{+N} \sum_{z=0}^h C(x, y, z) \Delta g(\alpha - x, \beta - y, \gamma - z) \quad (3-9)$$

dimana  $C(x,y,z)$  disebut operator dekonvolusi yang juga berhubungan dengan fungsi *Green*.

Bichara dan Laksmanan (1979) telah menganalisa dekonvolusi data gayaberat menggunakan metoda lanjutan ke luar dan ke dalam. Operator dekonvolusi hanya bergantung kepada parameter-parameter geometri seperti jarak grid  $s$ , kedalaman  $z$  dan ketebalan sumber  $l$ . Ukuran operator  $C(M \times N)$  dapat diturunkan dari ukuran grid  $(2M-1)(2N-1)$ . Kadir, dkk.,(1995) membuktikan

bahwa operator dekonvolusi bergantung kepada jarak grid dimana terjadi amplifikasi yang besar pada saat kedalaman iterasi melewati jarak grid. Oleh karena itu operator dekonvolusi ini hanya efektif untuk kedalaman sumber berada dalam jarak grid ( $h/s < 1$ ). Ukuran operator bergantung kepada nilai terluar dari anomali gayebat secara empiris nilai seperseratus anomali maksimum. Granser (1985) menurunkan operator dekonvolusi dalam kawasan bilangan gelombang dan menunjukkan bahwa sifat dari operator dekonvolusi adalah bernilai positif, real dan simetri sehingga fase dari rapat massa sama dengan fase efek gayaberatnya.

Proses dekonvolusi data gayaberat mirip dengan metoda lanjutan kedalam untuk mendapatkan medan gayaberat pada kedalaman tertentu. Telah dijelaskan bahwa medan gayaberat memenuhi persamaan Poisson pada sisi dalam dari rapat massa dan memenuhi persamaan Laplace pada disisi luar dari rapat massa. Hal ini disebabkan medan gayaberat dengan metoda lanjutan kedalam hanya sampai kedalaman sumber. Jika medan dilanjutkan sampai melewati kedalaman sumber, maka rapat massa dekonvolusi menjadi tidak stabil dan hasilnya menyimpang jauh dari rapat massa sebenarnya. Sifat ini dapat digunakan untuk mengestimasi kedalaman sumber dari medan gayaberat. Buttkus (2000) membandingkan meroda lanjutan kedalam dan metoda turunan vertikal kedua untuk mendapatkan medan gayaberat pada kedalaman  $z$  yang diturunkan dari fungsi *Green*. Jika rasio  $h/s < 0,5$  perbedaan antara medan model sintetik dan medan lanjutan kebawah relatif kecil. Tetapi jika rasio  $0,5 < h/s < 1$  medan lanjutan kebawah mendekati medan hasil turunan vertikal kedua. Perbedaan yang berarti terjadi pada bilangan gelombang rendah dimana komponen medan tidak terpakai oleh metoda turunan vertikal kedua dan terpakai oleh metoda lanjutan kebawah. Jika rasio ( $h/s > 1$ ), maka komponen bilangan gelombang tinggi mengalami amplifikasi lebih kuat oleh metoda lanjutan kebawah dari pada metoda turunan vertikal orde tinggi sehingga hasilnya tidak terpakai oleh metoda lanjutan kebawah dan terpakai oleh metoda turunan vertikal kedua. Karena adanya kesamaan bentuk operator dekonvolusi dengan operator metoda lanjutan kebawah dalam kawasan bilangan gelombang ( $e^{+uh}$ ), maka sifat-sifat metoda lanjutan kebawah dapat digunakan sebagai

pertimbangan dalam mendesain operator dekonvolusi.

Secara analitik, beberapa peneliti terdahulu telah merumuskan fungsi operator dekonvolusi data gayaberat baik dalam kawasan ruang maupun bilangan gelombang. Bichara dan Laksmanan (1979) berdasarkan hasil kerja dari La Porte (1963) merumuskan fungsi operator dekonvolusi data gayaberat dalam kawasan ruang menggunakan model lapisan tak hingga

$$\sum_{x=-M}^{+M} \sum_{y=-N}^N C(x, y) = \frac{3}{4\pi t} \quad (3-10a)$$

dimana  $t$  adalah ketebalan lapisan. Granser (1985) merumuskan fungsi operator dekonvolusi data gayaberat dalam domain bilangan gelombang menggunakan model lapisan tak hingga

$$C(u, v) = \frac{1}{2\pi K} \frac{ke^{kh}}{1 - e^{-kt}} \quad (3-10b)$$

dimana  $k = \sqrt{u^2 + v^2}$  adalah bilangan gelombang dan  $t = h_2 - h_1$ . Sedangkan Kadir, dkk., (1995) berdasarkan menurunkan fungsi operator dekonvolusi data gayaberat dalam kawasan ruang menggunakan model prisma sisi tegak

$$C(u, v) = \frac{1}{8\pi K} \frac{k u v e^{kh}}{(1 - e^{-kt}) \sin(\frac{au}{2}) \sin(\frac{bv}{2})} \quad (3-10c)$$

dimana  $(a, b, t)$  adalah panjang, lebar dan tinggi prisma. Dengan bantuan hukum Hospital, dapat dibuat pendekatan asimtotis terhadap Pers. 3-10b dan Pers. 3-10c pada harga limit tertentu

$$\lim_{u \rightarrow 0, v \rightarrow 0} C(u, v) = \frac{1}{2\pi K} \frac{1}{t} \quad (3-10d)$$

dan

$$\lim_{u \rightarrow 0, v \rightarrow 0} C(u, v) = \frac{1}{2\pi K} \frac{1}{abt} \quad (3-10e)$$

Berdasarkan defenisi yang diberikan Pers.3-10a, 3-10d s/d 3-10e dapat disimpulkan bahwa tanggapan operator dekonvolusi data gayaberat adalah ruang balik dari efek gayaberat yang disebabkan prisma atau lapisan dengan rapat massa satu. Jika ukuran prisma atau tebal lapisan tidak berubah maka tanggapan operator dekonvolusi akan bernilai konstan pada harga limit tertentu.

Wei (1990) mengungkapkan bahwa operator dekonvolusi dikatakan stabil bila set koefisien operator dekonvolusi dapat dijumlahkan secara mutlak, sebagai contoh  $\sum_{x=-\infty}^{+\infty} |C(x)| < \infty$ . Sedangkan Robinson dan Treteil (1980) mengungkapkan bahwa operator dekonvolusi akan stabil bila energi atau jumlah kuadrat dari set koefisien operator dekonvolusi berhingga, sebagai contoh,  $\sum_{x=-\infty}^{+\infty} |C(x)|^2 < \infty$ .

Berdasarkan kedua kriteria tersebut, penulis mengusulkan sebuah kriteria baru untuk menilai kinerja operator dekonvolusi data gayaberat sebagai berikut

$$\lambda \sum_{x=M}^{+M} \sum_{y=-N}^{+N} \sum_{z=0}^h C(x, y, z) = \text{konstanta} \quad (3-10f)$$

dan

$$\lambda \sum_{x=M}^{+M} \sum_{y=-N}^{+N} \sum_{z=0}^h |C(x, y, z)|^2 = \text{konstanta} \quad (3-10g)$$

dimana  $\lambda$  adalah perkalian Lagrange.

#### 3-4. Pengembangan persamaan dekonvolusi gayaberat

Pengembangan metoda dekonvolusi data gayaberat dapat dilakukan dengan cara memodifikasi Pers. 3-9 dengan mengalikan kedua sisinya dengan  $\Delta g(x, y, z)$  dan lakukan ekspektasi atau perata-rataan, sehingga diperoleh

$$G_{pg}(\alpha, \beta, \gamma, \Delta\tau) = \sum_{x=-M}^{+M} \sum_{y=-N}^{+N} \sum_{z=0}^h C_w(x, y, z) R_{gg}(\alpha - x, \beta - y, \gamma - z, \Delta\tau) \quad (3-11)$$

dimana  $R_{gg}(\alpha - x, \beta - y, \gamma - z, \Delta\tau)$  adalah matrik korelasi diri,  $G_{pg}(\alpha, \beta, \gamma, \Delta\tau)$  adalah matrik korelasi silang. Pers. 3-11 dikenal sebagai persamaan Wiener-Hopf dalam bentuk diskrit. Matrik R bersifat Toplitz dengan semua elemen dalam diagonal utama adalah sama. Inversi dari matrik ini dapat dilakukan dengan sebuah algoritma yang dikenal sebagai algoritma Wiener-Levinson. Operator dekonvolusi  $C_w$  pada Pers.3-3 disebut operator Wiener.

Secara numerik, tidak ada perbedaan yang berarti antara persamaan dekonvolusi pada Pers.3-9 dengan Pers.3-11, tetapi sangat berbeda dalam landasan filosofis dimana persamaan dekonvolusi pada Pers.3-11 berdasarkan teori medan potensial yang mempertimbangkan koordinat sumber dan koordinat stasiun sedangkan Pers. 3-11 berdasarkan teori peluang yang mempertimbangan nilai rata-rata, standar deviasi dan fungsi korelasi dari rapat massa dan efek gayaberatnya. Kombinasi kedua sifat tersebut dapat digunakan untuk memperoleh hasil yang maksimal.

Cara lain untuk mendapatkan operator dekonvolusi data gayaberat adalah dengan meminimumkan perbedaan antara rapat massa yang diharapkan  $\Delta\rho(\alpha,\beta,\gamma)$  dengan rapat massa model  $\Delta\rho'(\alpha,\beta,\gamma)$ . Persamaan kesalahan energi E dapat ditulis

$$E = \sum \sum e^2 = \sum \sum \left[ \Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma) - \sum_{x=-M}^{+M} \sum_{y=-N}^{+N} \sum_{z=0}^h C(x, y, z) \Delta g(\alpha - x, \beta - y, \gamma - z) \right]^2 = \min. \quad (3-12)$$

dimana e adalah perbedaan rapat massa yang diharapkan dengan rapat massa model. Diffrensiasi Pers. 3-12 terhadap  $C(x,y,z)$  sehingga didapatkan

$$\Delta\rho\Delta g(\alpha, \beta, \gamma) = \sum_{x=-M}^{+M} \sum_{y=-N}^{+N} \sum_{z=0}^h C_w(x, y, z) \Delta g(\alpha - x, \beta - y, \gamma - z) \quad (3-13)$$

yang tak lain adalah Pers. 3-11.

Treitel dan Lines (1982) mengatakan bahwa kehadiran beberapa konstrain untuk meminimumkan nilai kuadrat terkecil pada Pers.3-13 dapat meningkatkan kinerja operator dekonvolusi, terutama dalam kasus data gayaberat terkontaminasi dengan bising. Pendekatan Backust-Gilbert dapat digunakan untuk meminimumkan nilai kuadrat terkecil (*norm l<sub>2</sub>*) yang harus memenuhi dua kondisi yaitu kendala energi operator dan kendala unimodular. Kendala pertama memberikan kontribusi terhadap kestabilan operator yang memberikan sebuah *prewhitening*. Kendala kedua bertujuan untuk memperoleh luaran luaran rapat massa yang mungkin terdistorsi oleh operator.

Kendala energi operator dekonvolusi diperoleh dengan menulis kembali Pers. (3-10g) sebagai berikut

$$\sum_{x=-\infty}^{\infty} \sum_{y=-\infty}^{\infty} \sum_{z=0}^h |C(x, y, z)|^2 = \text{konstanta} \quad (3-14)$$

Substitusikan Pers. 3-14 ke Pers. 3-12 sehingga persamaan energi E dapat ditulis

$$E = \sum \sum e^2 + \lambda \sum \sum |C(x, y, z)|^2 \quad (3-15)$$

dimana  $\lambda$  adalah perkalian Lagrange. Differensiasi pers. 3-5 terhadap  $C(x,y,z)$  sehingga didapatkan

$$G_{dg}(\alpha, \beta, \gamma) = \sum_{x=0}^{+M} \sum_{y=0}^{+M} \sum_{z=0}^h C_w(x, y, z) [R_{gg}(x - \alpha, y - \beta, z - \gamma) + I\lambda] \quad (3-16)$$

dimana I adalah matrik identitas. Penambahan faktor  $\lambda I$  ke semua diagonal elemen menambah nilai eigen. Pendekatan ini sama dengan inversi kuadrat terkecil yang teredam. Sehingga kinerja dari pers. Wiener-Hopf yang dimodifikasi lebih stabil dari pada pers. Wiener-Hopf. Untuk mencari nilai  $\lambda$ , kesalahan energi operator  $e^T e$  diplot terhadap energi operator  $C^T C$  dan nilai  $\lambda$  yang terbaik akan dicari berdasarkan metoda yang diusulkan Dimri (1992). Bila  $\lambda=0$ , Pers. 3-16 akan kembali ke bentuk semula yaitu Pers. 3-13.

Misalkan anomali gayaberat terkontaminasi dengan bising  $\epsilon$ , maka

$$\Delta g(x, y, z) = \Delta g'(x, y, z) + \epsilon \quad (3-17)$$

dimana  $\Delta g'(x, y, z)$  adalah anomali gayaberat bebas bising. Persamaan kesalahan energi dapat ditulis

$$E = \sum \sum e^2 + \lambda \sum \sum |\epsilon C(x, y, z)|^2 \quad (3-18)$$

Substitusikan Pers. 3-17 ke Pers. 3-18, hasilnya masukkan ke Pers. 3-18.

Diferensiasi Pers. 3-18 terhadap C didapatkan

$$G_{dg}(\alpha, \beta, \gamma) = \sum_{x=0}^{+M} \sum_{y=0}^{+M} \sum_{z=0}^h C_w(x, y, z) [R_{gg}(\alpha - x, \beta - y, \gamma - z) + (1 + \lambda)\sigma^2 I] \quad (3-19)$$

Asumsi bahwa ekspektasi  $\langle \epsilon \Delta \rho \rangle = \langle \epsilon \Delta g \rangle = \langle \Delta g \epsilon \rangle = \langle \epsilon \rangle = 0$  dan  $\langle \epsilon^2 \rangle = \sigma^2$ . Bila  $\lambda = 0$  maka Pers. 3-19 hanya terkontaminasi oleh bising, tetapi bisa bising ditiadakan maka Pers. 3-19 akan kembali bentuk semula yaitu Pers. 3-13.

Kendala kedua adalah unimodular



$$\sum_{\alpha=-\infty}^{\infty} \sum_{\beta=-\infty}^{\infty} \Delta\rho(\alpha, \beta, h) = 1 \quad (3-20)$$

Persamaan kesalahan energi untuk kasus konstrain unimodular dapat ditulis

$$E = \sum \sum e^2 + \lambda(U^T \rho U - 1) \quad (3-21)$$

dimana U adalah matrik uniter. Substitusi Pers. 3-20 ke Pers. 3-21 dan differensiasi terhadap C sehingga

$$G'_{\rho g}(\alpha, \beta, \gamma) = \sum_{x=0}^{+M} \sum_{y=0}^{+M} \sum_{z=0}^h C_w(x, y, z) [R_{gg}(\alpha - x, \beta - y, \gamma - z)] \quad (3-22a)$$

dimana

$$G'_{\rho g}(\alpha, \beta, \gamma) = G_{\rho g}(\alpha, \beta, \gamma) - \frac{1}{2} \lambda U^T g U \quad (3-22b)$$

Jelaslah bila  $\lambda = 0$ , maka Pers. 3-22a akan kembali ke bentuk semula seperti Pers. 3-13. Nilai  $\lambda$  terbaik dapat dicari menggunakan teknik yang diusulkan Treitel dan Lines (1982). Cara sederhana untuk mencari nilai  $\lambda$  adalah memilih nilainya riil, positif dan beberapa persen dari elemen diagonal dari matrik  $R_{gg}$  atau  $G_{\rho g}$ . Dimri (1992) menemukan kinerja operator yang diberi kendala unimodular lebih baik daripada tidak diberi kendala pada data seismik, khusus yang terkontaminasi dengan bising.

Kriteria desain operator dekonvolusi untuk mendapatkan hasil yang optimum telah diselidiki oleh beberapa peneliti terdahulu. Robinson dan Treitel (1980) menunjukkan bahwa kesalahan semakin kecil bila ukuran operator semakin besar. Dimri dan Srivastava (1987) menemukan kesalahan energi menjadi nol bila penampang anomali sebagai data masukan semakin panjang. Buttkus (2000) mengatakan bahwa operator dekonvolusi akan stabil bila mempunyai panjang tak hingga dan kesalahan dari hasil dekonvolusi akan berkurang bila panjang operator bertambah. Billing, dkk., (2003) mengatakan kunci desain operator dekonvolusi yang sukses adalah keseimbangan antara data dengan bising. Triempat, dkk., (2003) mendefenisikan bahwa bising adalah representasi dari *error*. Pengembangan metoda diperlukan bila data gayaberat terkontaminasi dengan bising.

### 3-5. Pemodelan numerik

Diskritisasi persamaan dekonvolusi dari fungsi *Green* memberikan sebuah matrik berstruktur Toeplitz dimana semua elemen diagonal bernilai sama (Hansen, 2002). Fokus utama penelitian ini pada aspek numerik adalah mengilustrasikan bagaimana rumusan matematika yang telah diturunkan sebelumnya dapat membantu menurunkan model numerik untuk mengeksploitasi masalah-masalah matrik yang berstruktur Toeplitz. Masalah konvolusi berdasarkan Pers. (3-8c) dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan matrik sebagai berikut

$$g_i = R_{ij} \rho_j \quad (3-23)$$

Rumusan masalah konvolusi pada Pers. (3-23) adalah identik dengan rumusan masalah inversi linier sehingga penyelesaiannya dapat dilakukan berdasarkan penyelesaian masalah-masalah inversi linier. Masalah dekonvolusi dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\rho_j = [R_{ij}^T R_{ij}]^{-1} R_{ij}^T g_i = C_{ji} g_i \quad (3-24)$$

dimana  $C_{ji} = [R_{ij}^T R_{ij}]^{-1} R_{ij}^T$ . Dengan mensubstitusikan pers. (3-24) ke pers. (3-23), peneliti utama menemukan sebuah kriteria baru untuk mengukur resolusi gayaberat hasil konvolusi sebagai berikut

$$g_i^{konv} = R_{ij} \rho_j^{obs} = R_{ij} C_{ji} g_j^{benar} = R_{ij} [R_{ij}^T R_{ij}]^{-1} R_{ij}^T g_j^{benar} = S_{jj} g_j^{benar} \quad (3-25)$$

dimana  $S_{jj} = R_{ij} [R_{ij}^T R_{ij}]^{-1} R_{ij}^T$  disebut resolusi matrik gayaberat ukuran  $M \times M$ . Nilai  $S_{jj}$  menggambarkan kecocokan antara  $g_i^{konv}$  dengan  $g_i^{benar}$ . Jika  $S_{jj} = I$  atau matrik identitas, maka  $g_i^{konv} = g_i^{benar}$ , ini berarti bahwa nilai gayaberat hasil konvolusi adalah nilai yang sebenarnya. Bhattaharyya and Novalio(1975) menemukan bahwa tanggapan anomali gayaberat hasil konvolusi adalah sama tanggapan anomali gayaberat teoritik bila sumber berada pada kedalaman  $h/s > 10$ .

Bracewell (1978) mengatakan bahwa proses konvolusi bersifat komutatif, sehingga Pers. (3-23) dapat ditulis

$$\rho_j = C_{ji} g_i = g_i \otimes c_j = c_j \otimes g_i = G_{ji} c_i \quad (3-26)$$

Kernel baru  $G_{ji}$  dapat ditentukan dari fungsi *Green* dengan menganggap rapat massa sebagai tanggapan impuls (Bichara and Laksmanan, 1979). Nilai  $c_i$  dapat diestimasi berdasarkan prinsip penyelesaian masalah-masalah inversi linier sebagai berikut

$$c_i = G_{ij}^{-g} \rho_j \quad (3-27)$$

Untuk kasus  $i=j$ ,  $i>j$  dan  $i<j$ , matrik  $G_{ij}^{-g}$  dapat ditulis sebagai berikut

$$G_{ij}^{-g} = G_{ij}^{-1}, i=j, \quad (3-28a)$$

$$G_{ij}^{-g} = [G_{ij}^T G_{ij}]^{-1} G_{ij}^T, i>j \text{ (overdetermined)} \quad (3-28b)$$

$$G_{ij}^{-g} = G_{ij}^T [G_{ij}^T G_{ij}]^{-1}, i<j \text{ (underdetermined)} \quad (3-28c)$$

Dalam penelitian ini, estimasi  $c_i$  dipilih menggunakan Pers. (3-28a) untuk menghindari masalah-masalah inversi yang rumit pada matrik  $G_{ij}^{-g}$ . Pers. (3-28) mengindikasikan bahwa estimasi set koefisien operator dekonvolusi  $c$  dikontrol oleh matrik  $G$  yang beroperasi pada rapat massa  $\rho$ . Karena matrik  $G$  memecahkan masalah inversi  $\rho=Gc$ , maka inversi dari matrik  $G$  sering disebut inversi tergeneralisasi dan disimbolkan dengan  $G^{-g}$ . Matrik kernel  $G$  dapat ditulis

$$G = \begin{pmatrix} g_0 & g_{-1} & g_{-2} & \cdots & g_{1-M} \\ g_1 & g_0 & g_{-1} & \cdots & g_{2-M} \\ g_2 & g_1 & g_0 & \cdots & g_{3-M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{M-1} & g_{M-2} & g_{M-3} & \cdots & g_0 \end{pmatrix} \quad (3-29a)$$

dimana  $g=[ \dots, g_{-2}, g_{-1}, g_1, g_0, g_1, g_2, g_3, \dots ]$  adalah vektor data gayaberat pengamatan yang disebabkan oleh rapat massa yang bertindak sebagai impuls. Jelaslah disini bahwa masalah dekonvolusi secara umum berhubungan dengan matrik kernel berstruktur Toeplitz dimana semua elemen diagonal bernilai sama.

Pengembangan teknik dekonvolusi dapat dilakukan dengan memodifikasi Pers.(3-29a) menjadi

$$G = \begin{pmatrix} g_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & g_2 & g_1 & \ddots & 0 \\ 0 & \vdots & g_2 & \dots & g_0 \\ 0 & 0 & \vdots & \dots & g_1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & g_2 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (3-29b)$$

dengan  $g = [g_0, g_1, g_2, g_3, \dots]$  adalah vektor data gayaberat. Besaran  $G^T G$  dan  $G^T \rho$  pada Pers. (3-29b) disebut matrik korelasi diri dari  $g$  dan vektor korelasi silang antara  $g$  dan  $\rho$  secara berturut-turut. Besaran  $G^T G$  pada pers. (3-29b) merupakan kernel yang berstruktur Toeplitz yang menjadi ciri utama penyelesaian masalah dekonvolusi secara umum. Modifikasi kernel pada Pers. (3-29b) dapat dipandang sebagai pengembangan baru dalam dekonvolusi data gayaberat mengikuti penyelesaian masalah dekonvolusi data seismik yang sudah lama dikembangkan oleh Robinson sehingga dalam literatur geofisika dikenal sebagai model seismik Robinson (Silvia and Robinson, 1979).

Pengembangan teknik dekonvolusi secara numerik dapat dilakukan cara memodifikasi Pers.(3-28b) sehingga matrik kernel  $G$  dapat tulis .

$$G_{ij}^{-s} = [G_{ij}^T G_{ij} + \lambda I]^{-1} G_{ij}^T, i > j \text{ (overdetermined)} \quad (3-30a)$$

$$G_{ij}^{-s} = [G_{ij}^T G_{ij} + (1 + \lambda) \sigma^2 I]^{-1} G_{ij}^T, i > j \text{ (overdetermined)} \quad (3-30b)$$

dimana Pes.(3-20a) adalah matrik kernel untuk anomali gayaberat bebas bising, Pes.(3-20b) adalah matrik kernel untuk anomali terkontaminasi dengan bising dan  $\lambda$  adalah perkalian Lagrange.

Istilah dekonvolusi mempunyai beberapa pengertian yang berbeda dalam beberapa kalangan ahli geofisika. Ada kalangan yang menganggap dekonvolusi berhubungan dengan operasi konvolusi dalam pemrosesan data sinyal-sinyal digital dan ada pula kalangan yang menganggap sebagai kasus khusus dari

masalah-masalah inversi linier. Dalam penelitian ini kedua pandangan ini diakomodasi dengan cara menyusun dua konsep kriteria kestabilan operator dekonvolusi berdasarkan analisa pemrosesan sinyal-sinyal digital dan penyelesaian masalah-masalah inversi linier.

Kriteria kestabilan operator dekonvolusi berdasarkan konsep pemrosesan sinyal-sinyal digital telah didiskusikan dalam pers. (3-10f) dan pers. (3-10g). Kedua persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk persamaan matrik sebagai berikut

$$C^T = \lambda U c U^T = \text{konstanta} \quad (3-31a)$$

$$C^T C = \lambda U c^T c U^T = \text{konstanta} \quad (3-31b)$$

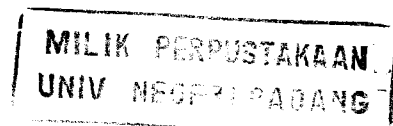
Jika  $c$  adalah vektor kolom operator dekonvolusi, maka Pers. (3-31) dapat ditulis  $C = U c$  dan  $C^T C = c^T c$  dengan asumsi  $\lambda = 1$ . Untuk kasus  $h/s \gg 1$ , nilai  $C^T$  dan  $C^T C$  biasanya sangat besar sehingga Pers. (3-31) dapat ditulis sebagai nilai ternormalisasi. Hal yang sama juga dilakukan oleh peneliti-peneliti lain seperti Robinson and Treitel (1980) dan Dimri (1992). Kriteria lain yang ditambahkan untuk menilai kinerja operator dekonvolusi adalah error RMS yaitu beda antara  $\rho^{\text{dekonv}}$  dan  $\rho^{\text{obs}}$ . Jika error RMS=0, maka  $\rho^{\text{dekonv}} = \rho^{\text{obs}}$ , tapi jika error RMS > 1 maka kesalahan proses dekonvolusi lebih dari 100%.

Kriteria kestabilan operator dekonvolusi berdasarkan konsep penyelesaian masalah-masalah inversi linier dapat ditulis dengan memodifikasi Pers. (3-26) sebagai berikut

$$\rho_j^{\text{dekonv}} = G_{ji} c_i^{\text{dekonv}} = G_{ji} [G_{ij}^{-g} \rho_j^{\text{obs}}] = N_{jj} \rho_j^{\text{obs}} \quad (3-32)$$

dimana  $N_{jj} = G_{ji} G_{ij}^{-g}$  adalah resolusi matrik rapat massa ukuran  $N \times N$ . Nilai  $N_{jj}$  menunjukkan kecocokan antara  $\rho_j^{\text{dekonv}}$  dengan  $\rho_j^{\text{obs}}$ . Jika  $N_{jj} = I$  atau matrik identitas, maka  $\rho_j^{\text{dekonv}} = \rho_j^{\text{obs}}$ . Dalam penelitian ini, matrik  $N_{jj}$  dimofikasi menjadi

$$n = U_j G_{ji} G_{ij}^{-g} U_j^T = 1 \quad (3-33)$$

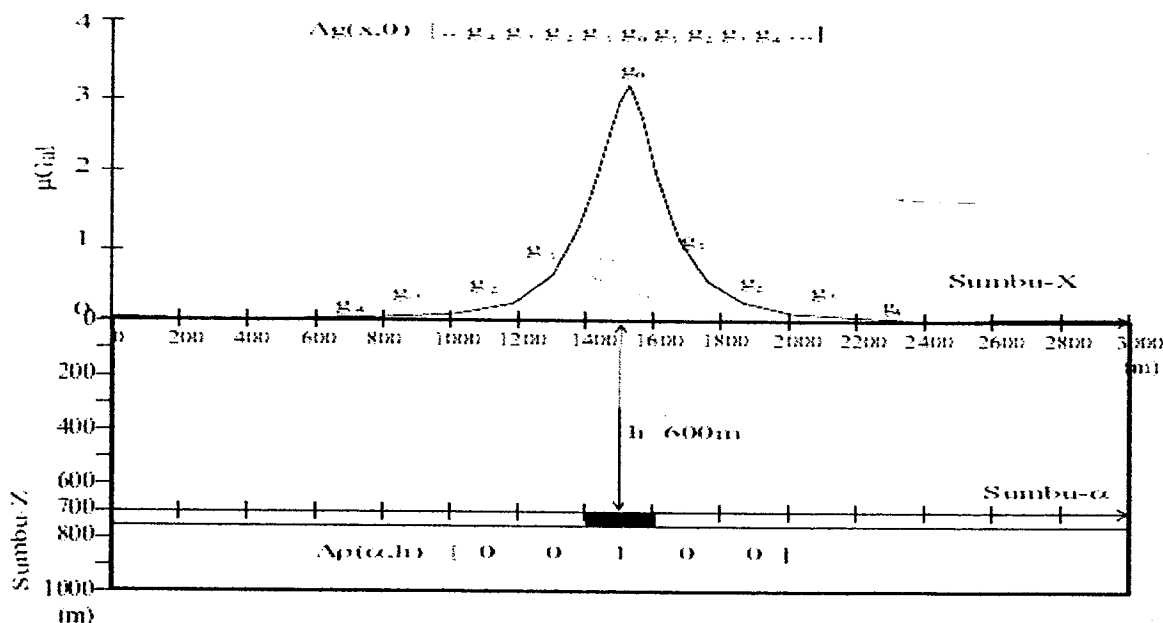


## BAB IV METODA PENELITIAN

Untuk mencapai tujuan penelitian maka dua pendekatan ilmiah dipilih yaitu pemodelan dan studi kasus. Pendekatan pemodelan bertujuan untuk mendesain operator dekonvolusi, menguji kinerja operator dekonvolusi, validitas metoda dan kasus pada data sintetik dan lapangan. Berikut ini akan dibahas masing-masing pendekatan tersebut.

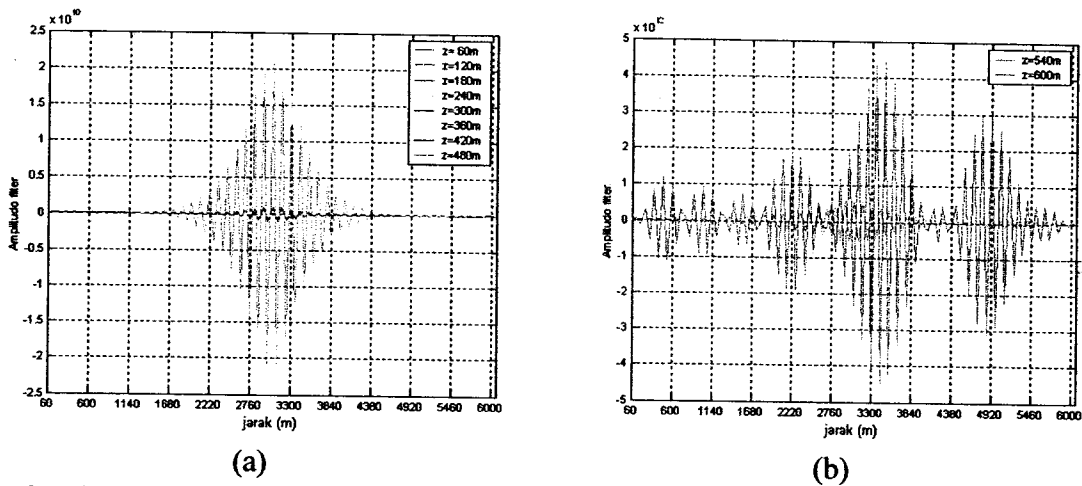
### 4.1 Desain operator dekonvolusi

Untuk menghitung tanggapan anomali gayaberat-mikro 4D secara teoritik dan menguji kriteria kestabilan operator dekonvolusi data gayaberat yang telah dikemukakan seperti pada Pers.(3-31), (3-33), (3-35) dan (3-36), maka didesain sebuah operator dekonvolusi data gayaberat yang diturunkan dari model prisma sisi tegak sesuai Pers. (3-8e). Algoritma dan pemograman ditulis berdasarkan Blakely (1996) dan proses perhitungannya menggunakan program MATLAB versi 7.0.1.24704 (Release 14). Prisma dipilih berukuran 60mx60mx50m, rapat massa adalah 1 g/cm<sup>3</sup>, ketebalan adalah 50m, jarak stasiun adalah 60m, kedalaman prisma adalah 600m atau (h/s=10). Penampang tanggapan anomali gayaberat prisma dapat dilihat pada Gambar 4.1



Gambar 4.1. Penampang anomali gayaberat dari prisma berukuran 60mx60mx50m ditempatkan pada kedalaman 600m.

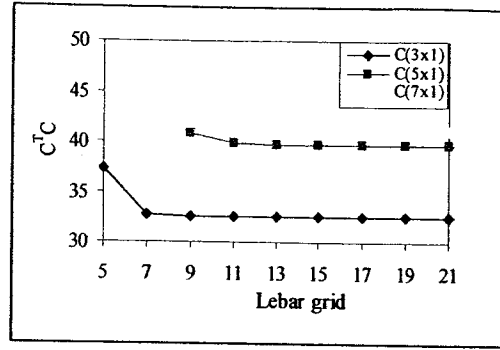
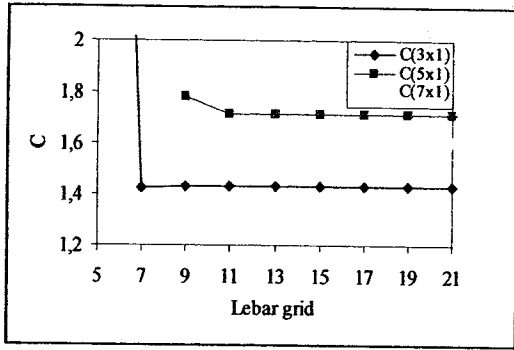
Nilai set koefisien operator dekonvolusi didesain dengan memecahkan persamaan simultan dari Bichara and Laksmanan (1979). Penyelidikan difokuskan pada operator dekonvolusi pada kedalaman  $1 \leq h/s \leq 10$ . Amplitudo dari operator diperlihatkan pada Gambar 4.2 dimana nilainya dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu amplitudo pada kedalaman  $1 \leq h/s \leq 8$  dan amplitudo pada kedalaman  $9 \leq h/s \leq 10$ .



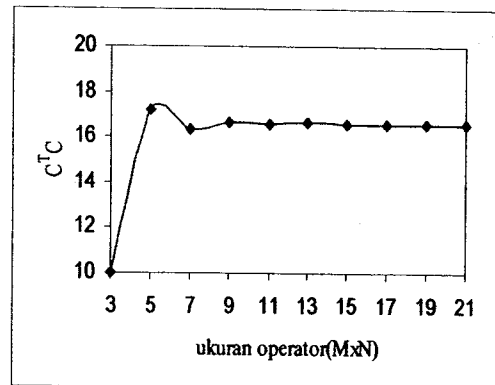
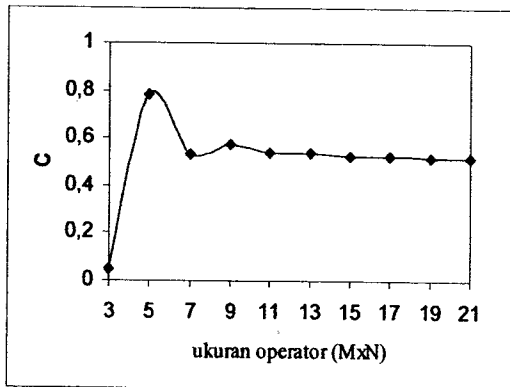
Gambar 4.2. Amplitudo operator dekonvolusi pada kedalaman (a)  $1 \leq h/s \leq 8$  dan (b)  $9 < h/s \leq 10$

Berdasarkan sifat simetri dan pelemahan amplitudo terhadap jarak horizontal maka dapat diduga bahwa operator dekonvolusi pada kedalaman  $1 \leq h/s \leq 8$  adalah stabil dan operator dekonvolusi pada kedalaman  $9 < h/s \leq 10$  adalah tidak stabil.

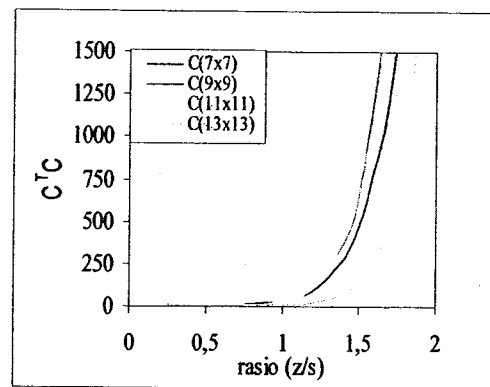
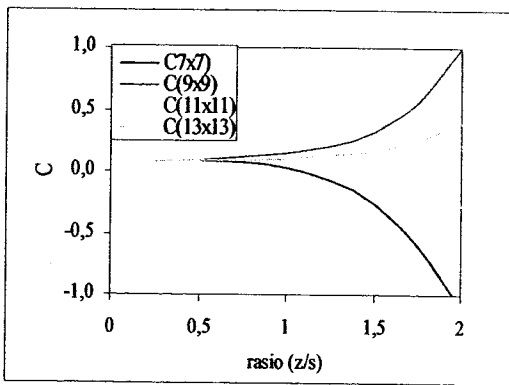
Untuk menguji kestabilan operator dekonvolusi, peneliti utama menggunakan dua kriteria yaitu  $C^T$  dan  $C^T C$ . Untuk kasus kedalaman  $h/s \leq 1$ , hubungan  $C^T$  dan  $C^T C$  terhadap ukuran grid  $(2M-1)(2N-1)$ , ukuran operator  $(M \times N)$  dan rasio kedalaman ( $h/s$ ) diperlihatkan pada Gambar 4.3 s/d Gambar 4.5.



(a) (b)  
Gambar 4.3. Hubungan (a)  $C^T$  dan, (b)  $C^T C$  terhadap ukuran grid (2M-1)



(a) (b)  
Gambar 4.4. Hubungan (a)  $C^T$  dan, (b)  $C^T C$  terhadap ukuran operator ( $M \times N$ ), dengan  $M=N$

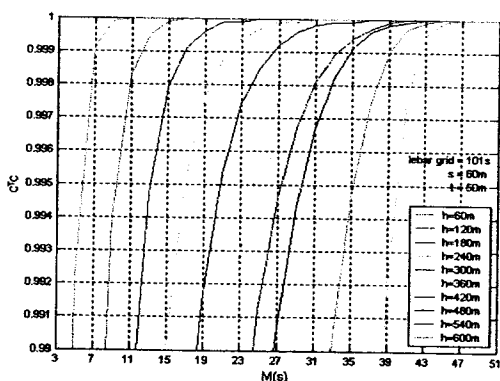


(a) (b)  
Gambar 4.5. Hubungan (a)  $C^T$  dan, (b)  $C^T C$  terhadap rasio ( $h/s$ ) dengan ketebalan tetap

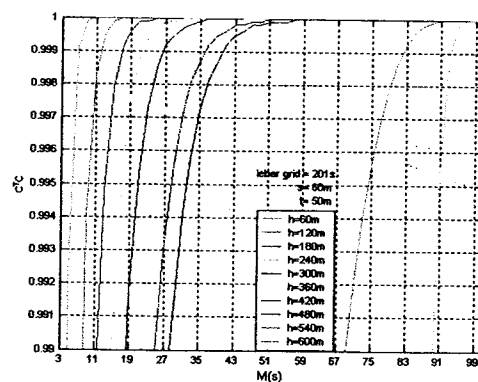


Temuan dari penelitian ini adalah panjang operator  $M$  yang diturunkan dari grid  $(2M-1)$  hanya valid untuk panjang operator  $>7s$ . Temuan lain adalah operator dekonvolusi ukuran diatas  $11s \times 11s$  dapat digunakan untuk mengestimasi rapat massa pada kedalaman  $h/s \leq 1$ .

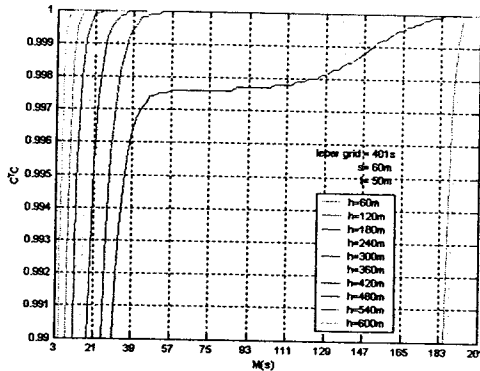
Peneliti utama mengembangkan operator dekonvolusi pada kasus kedalaman  $h/s \gg 1$ . Untuk mengatasi ketidak-stabilan numerik dari operator dekonvolusi, peneliti utama memperlebar ukuran grid sampai  $24060m$  atau  $401s$ . Untuk mencapai tujuan tersebut didesain operator dekonvolusi dari prisma berukuran  $60m \times 60m \times 50m$  yang ditempatkan pada kedalaman  $1 < h/s < 10$ , rapat massa  $1 \text{ g/cm}^3$ , jarak antar stasiun  $s=60m$ . Operator dekonvolusi diturunkan dari tiga lebar anomali/ukuran grid yaitu  $101s$ ,  $201s$  dan  $401s$  sehingga didapatkan tiga kelompok operator dekonvolusi dengan panjang  $3s \leq M \leq 51s$ ,  $3s \leq M \leq 101s$  dan  $3s \leq M \leq 201s$ . Kestabilan operator diuji menggunakan nilai  $C^T$  dan  $C^T C$  ternormalisasi dan hasilnya menunjukkan bahwa nilai  $C^T$  ternormalisasi memberikan hasil yang kurang baik sedangkan nilai  $C^T C$  ternormalisasi memberikan hasil yang sangat baik. Hubungan antara  $C^T C$  terhadap panjang operator pada kedalaman  $1 \leq h/s \leq 10$  untuk tiga lebar operator dekonvolusi yaitu  $3s \leq M \leq 51s$ ,  $3s \leq M \leq 101s$  dan  $3s \leq M \leq 201s$  yang diperlihatkan pada Gambar 4.6(a), (b) dan (c) secara berturut-turut. Lebih lanjut, tiga variasi ketebalan yaitu  $50m$ ,  $75m$  dan  $100m$  didesain untuk mendapatkan perilaku  $C^T C$  yang baru. Hubungan antara panjang operator terhadap rasio  $(h/s)$  diperlihatkan pada Gambar 4.6(d).



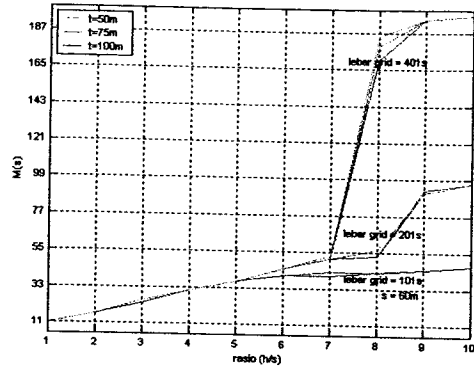
(a)



(b)



(c)



(d)

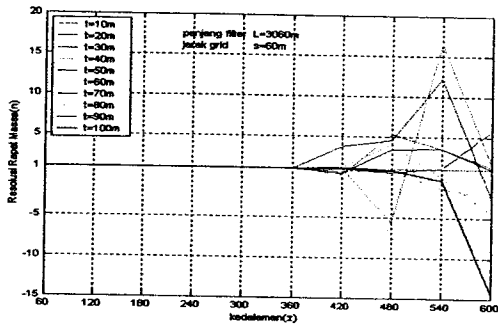
Gambar 4.6. Hubungan antara  $C^T C$  terhadap panjang operator (a)  $3s \leq M \leq 51s$ , (b)  $3s \leq M \leq 101s$ , (c)  $3s \leq M \leq 201$  dan (d) hubungan panjang operator terhadap rasio ( $h/s$ ).

Temuan penelitian ini adalah panjang operator bertambah secara linier terhadap kedalaman sampai  $h/s \leq 6$  dan bertambah secara tidak linier terhadap kedalaman diatas  $h/s > 6$ . Panjang operator minimum adalah 11s untuk kedalaman  $h/s \leq 1$  sesuai dengan hasil terdahulu. Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa batas kedalaman maksimum yang dapat dicapai dengan operator dekonvolusi adalah  $h/s \leq 6$ . Temuan ini sesuai dengan hasil penelitian dari Dampney (1969) dimana batas kedalaman sumber akhivalen model massa titik adalah  $2,5s < h - z_i < 6s$ . Fenomena lain yang ditemukan adalah pada kedalaman  $6 \leq h/s \leq 8$ , efek ketebalan terhadap  $C^T C$  teramati seperti diperlihatkan pada Gambar 4.6(d).

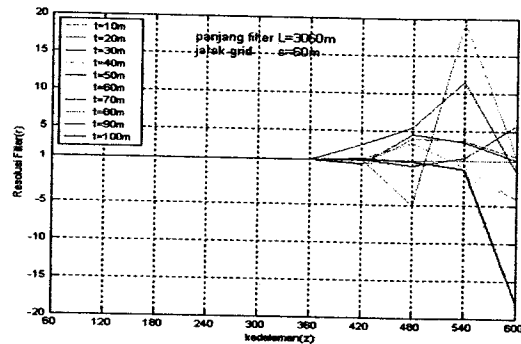
Selanjutnya peneliti utama menggunakan kriteria baru yaitu resolusi rapat massa ( $n$ ) dan resolusi operator dekonvolusi ( $r$ ) untuk mendukung temuan berdasarkan kriteria  $C^T$  dan  $C^T C$ . Kriteria yang digunakan adalah jika nilai  $n=1$ , atau  $r=1$  maka operator dekonvolusi berada dalam keadaan stabil. Implikasinya adalah bila operator dekonvolusi dioperasikan pada data anomali gayaberat-mikro 4D sintetik/lapangan maka nilai  $\rho^{\text{dekonv}} \approx \rho^{\text{obs}}$  pada kedalaman reservoir. Kriteria lain yang ditambahkan adalah error RMS yaitu mengukur beda antara  $\rho^{\text{dekonv}}$  dan  $\rho^{\text{obs}}$  pada saat kedalaman operator mendekati kedalaman reservoir. Disini kriteria error RMS berperan sebagai kriteria pendukung terhadap  $C^T$ ,  $C^T C$ ,  $n$  dan  $r$ .

Lebih lanjut, kriteria  $n$  dan  $r$  diterapkan untuk menilai kestabilan tiga operator dekonvolusi yaitu 51s, 101s dan 201s terhadap variasi kedalaman dan ketebalan. Hasil penelitian menemukan bahwa operator berada dalam keadaan stabil pada kedalaman

$1 < h/s \leq 6$  tetapi variasi ketebalan tidak berpengaruh terhadap nilai  $n$  dan  $r$ . Sedangkan pada kedalaman  $6 < h/s \leq 9$ , variasi ketebalan sangat berpengaruh terhadap nilai  $n$  dan  $r$  seperti diperlihatkan pada Gambar 4.7 s/d Gambar 4.9.

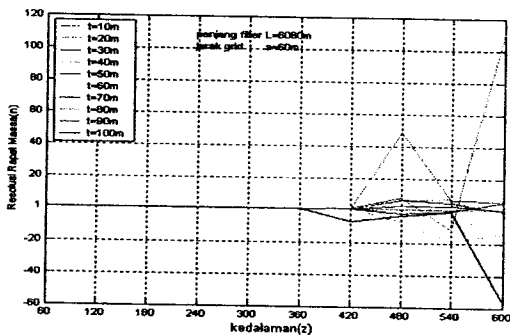


(a)

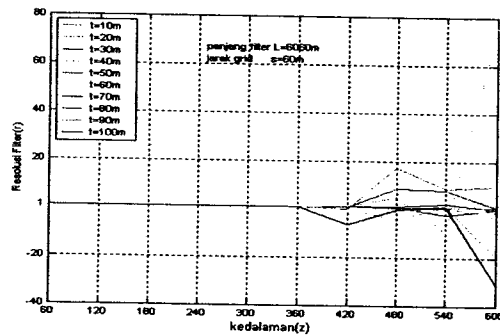


(b)

Gambar 4.7. Hubungan (a) resolusi rapat massa terhadap rasio ( $h/s$ ), (b) resolusi operator dekonvolusi ukuran 51s terhadap rasio ( $h/s$ ).

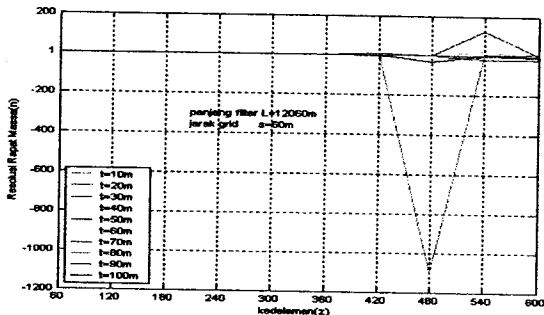


(a)

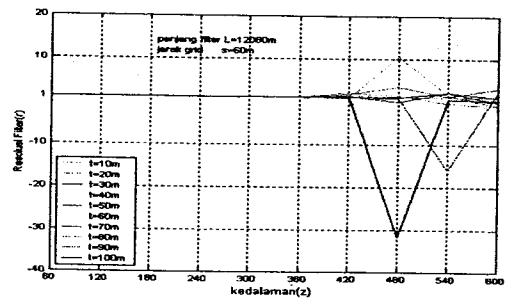


(b)

Gambar 4.8. Hubungan (a) resolusi rapat massa terhadap rasio ( $h/s$ ), (b) resolusi operator dekonvolusi ukuran 101s terhadap rasio ( $h/s$ ).



(a)



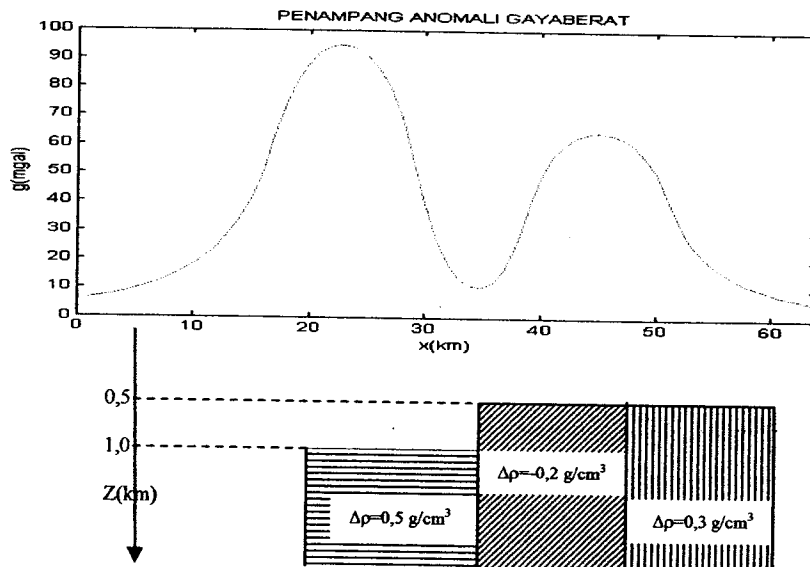
(b)

Gambar 4.9. Hubungan (a) resolusi rapat massa terhadap rasio ( $h/s$ ), (b) resolusi operator dekonvolusi ukuran 201s terhadap rasio ( $h/s$ ).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai  $n$  dan  $r$  tidak berpengaruh terhadap ukuran operator dekonvolusi. Hasil penelitian juga mendukung hasil penelitian sebelumnya berdasarkan kriteria  $C^T$  dan  $C^TC$  bahwa operator dekonvolusi berada dalam keadaan stabil pada kedalaman  $1 \leq h/s < 6$ . Hasil penting dari penelitian ini adalah operator dekonvolusi pada kedalaman  $6 \leq h/s \leq 9$  tidak hanya sensitif terhadap kedalaman tetapi juga ketebalan reservoir. Temuan penelitian ini mempunyai implikasi penting di lapangan karena berhubungan dengan salah satu masalah pokok yang dihadapi yaitu sulit memprediksi pergerakan uap baik secara horizontal dan maupun vertikal.

#### 4.2. Pengujian validitas metoda

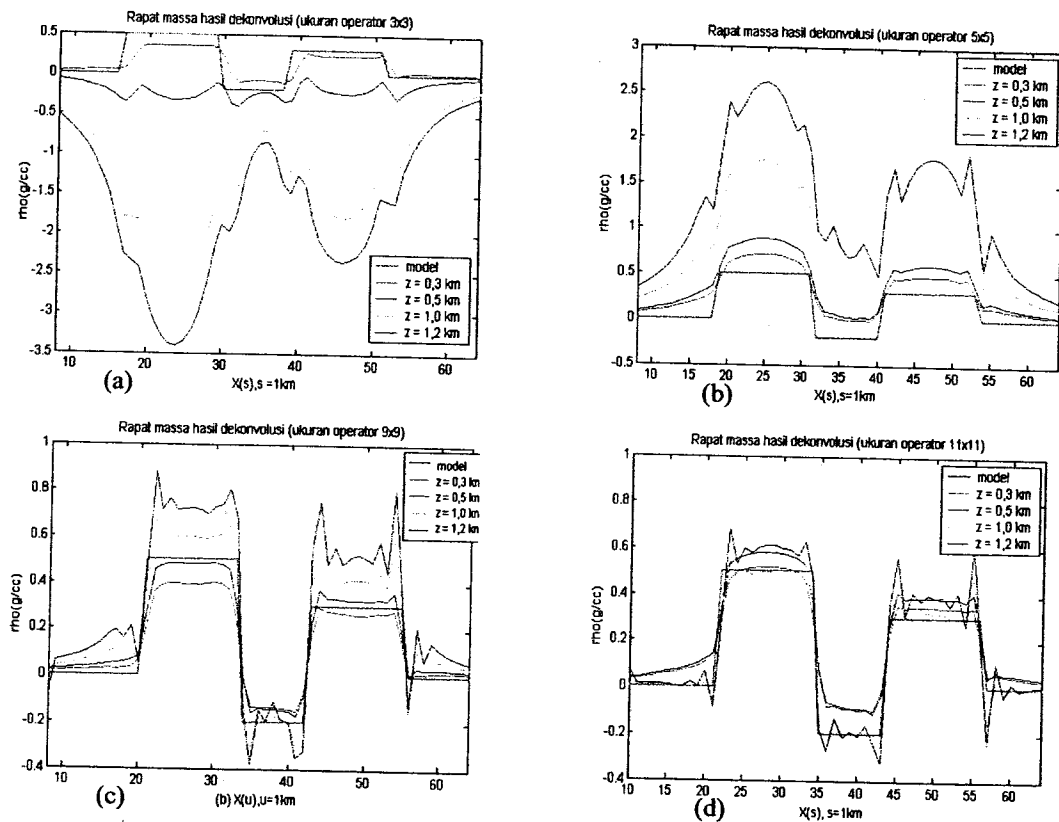
Untuk menguji validitas metoda pada kasus  $h/s \leq 1$  maka didesain tiga prisma dengan kedalaman, lebar dan rapat massa berbeda-beda seperti diperlihatkan pada Gambar 4-10.



Gambar 4.10. Tanggapan anomali gayaberat tiga buah prisma dengan kontras rapat massa masing-masing adalah  $0,5 \text{ g/cm}^3$ ,  $-0,2 \text{ g/cm}^3$  dan  $0,3 \text{ g/cm}^3$  disusun pada kedalaman 1 km dan 0,5 km dengan spasi grid 1 km (Kadir, dkk, 1995).

Untuk menafsirkan rapat massa ke tiga prisma didesain operator dekonvolusi ukuran  $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$  sampai  $21 \text{ km} \times 21 \text{ km}$ , spasi grid 1 km, rapat massa  $1 \text{ g/cm}^3$  dan ketebalan 40 km sesuai ketebalan lapisan Moho pada kerak benua. Kriteria yang digunakan untuk memilih rapat massa hasil dekonvolusi terbaik adalah "osilasi" pada

saat kedalaman iterasi melewati kedalaman atas prisma. Fenomena “osilasi” ini disebut juga fenomena Gibbs dan telah digunakan oleh peneliti-peneliti terdahulu seperti Bhattacharyya (1965), Ku,dkk., (1971) dan Kadir, dkk,(1995) untuk mengestimasi kedalaman sumber. Rapat massa hasil dekonvolusi dari model pada Gambar 4.10 diperlihatkan pada Gambar 4-11.

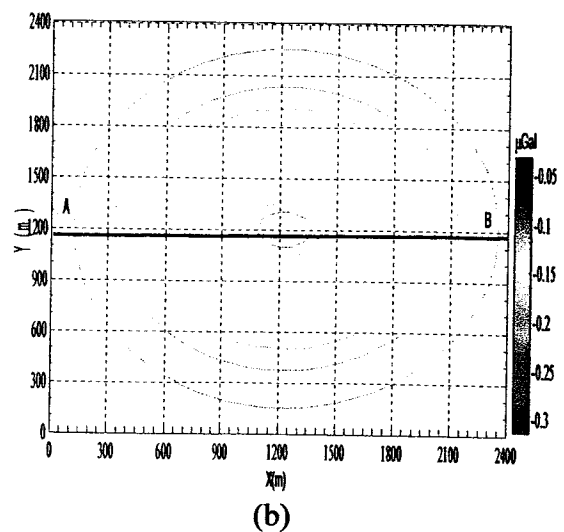
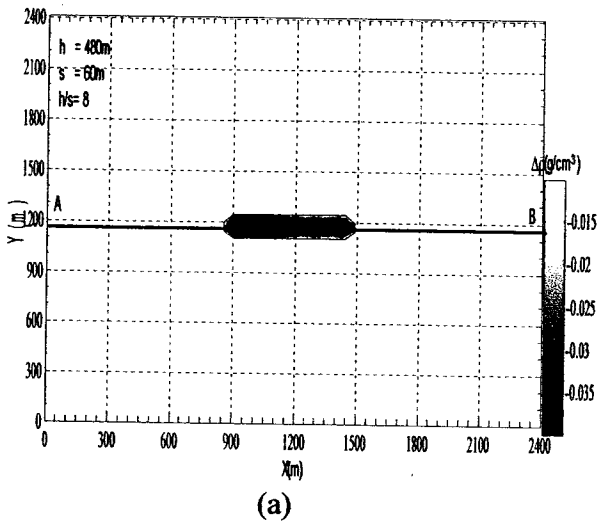


Gambar 4.11. Rapat massa hasil dekonvolusi menggunakan ukuran operator (a) 3km x 3km,(b) 5km x 5km,(c) 9km x 9km, dan (d) 11km x 11km.

Temuan dari penelitian ini adalah rapat massa hasil dekonvolusi untuk operator ukuran 3km x 3km, 5km x 5km dan 7km x 7km tidak berhasil pada saat kedalaman iterasi mencapai puncak prisma sedangkan operator ukuran 11km x 11km sampai 21km x 21km berhasil dengan baik. Ini berarti kriteria yang diberikan oleh Pers. (3-31a) dan (3-31b) yang diperlihatkan pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 adalah valid dimana ukuran operator optimum ditemukan diatas 11s x 11s dengan kedalaman berada dalam jarak grid ( $h/s \leq 1$ ). Semakin besar ukuran operator, rapat massa hasil dekonvolusi semakin baik. Hal

ini sesuai dengan temuan Robinson and Treitel (1980), Dimri (1992), dan Dimri and Srivastava (1987) bahwa panjang operator dapat mengurangi kesalahan estimasi.

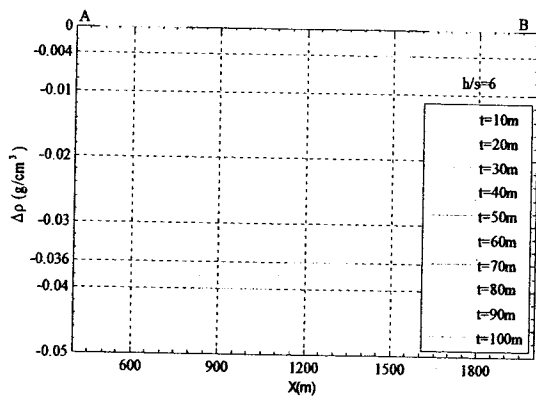
Untuk menguji validitas metoda untuk kasus  $h/s > 1$ , didesain sebuah model ideal zona *steamflood* berdasarkan dari tiga prisma berukuran  $60\text{m} \times 300\text{m} \times 50\text{m}$ ,  $60\text{m} \times 300\text{m} \times 50\text{m}$ , dan  $60\text{m} \times 180\text{m} \times 50\text{m}$ , jarak antar stasiun adalah  $60\text{m}$ , dan ketebalan adalah  $50\text{m}$ . Ketiga prisma diparameteri dengan kontras rapat massa  $-0,040 \text{ g/cm}^3$ ,  $-0,036 \text{ g/cm}^3$  dan  $-0,006 \text{ g/cm}^3$ , dalam penelitian ini disebut  $\rho^{\text{obs}}$ . dari tiga prisma berukuran  $60\text{m} \times 300\text{m} \times 50\text{m}$ ,  $60\text{m} \times 300\text{m} \times 50\text{m}$ , dan  $60\text{m} \times 180\text{m} \times 50\text{m}$ . Penyelidikan difokuskan pada operator dekonvolusi pada kedalaman  $6 \leq h/s \leq 9$ . Untuk mencapai tujuan tersebut. Pada kondisi awal, ketiga prisma ditempatkan pada kedalaman  $600\text{m}$ . Prisma pertama memodelkan zona *steamflood* setelah tiga bulan injeksi yang hanya terdiri dari zona uap pada temperatur dan tekanan tinggi kontras terhadap zona minyak pada temperatur dan tekanan rendah. Sedangkan prisma kedua dan ketiga memodelkan zona *steamflood* setelah enam bulan injeksi yang terdiri dari zona uap dan zona airpanas dengan asumsi 10% uap mengalami kondensasi menjadi air panas akibat bersentuhan dengan minyak dingin sehingga terjadi penguraian kontras rapat massa yang sebelumnya  $-0,04\text{g/cm}^3$  menjadi  $-0,036\text{cm}^3$  dan  $-0,004 \text{ g/cm}^3$ . Hal ini juga diikuti oleh perubahan dimensi reservoir yang semula hanya diisi oleh uap panas dan selanjutnya akan ditempati oleh airpanas dengan komposisi 90% uap panas dan 10% airpanas. Model ideal zona *steamflood* setelah tiga dan enam bulan injeksi diperlihatkan pada Gambar 4.12(a) dan tanggapan anomali gayaberat mikro 4D diperlihatkan pada Gambar 4.12(b).



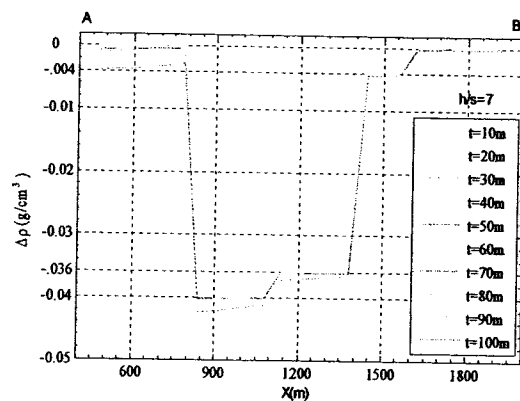
Gambar 4.12(a) Model rapat massa zona *steamflood* dan (b) anomali gayaberasat-mikro 4D

Oleh karena dimensi zona *steamflood* pada Gambar 4.12(a) dipilih cukup kecil, maka tanggapan anomali gayaberasat-mikro 4D juga kecil yaitu kurang dari  $1\mu\text{Gal}$ . Walaupun demikian model yang diusulkan ini cukup representatif untuk menilai kinerja operator dekonvolusi guna mendapatkan distribusi kontras rapat massa dengan ketelitian  $< -0,01 \text{ g/cm}^3$ .

Untuk menguji sensitivitas metode dekonvolusi terhadap kedalaman, ketebalan, jarak grid, dan lebar anomaly/lebar grid didesain operator dekonvolusi yang diturunkan dari tiga lebar grid yaitu 101s, 201s, dan 401s sehingga didapatkan tiga operator dekonvolusi lebar 51s, 101s, 201s. Operator dekonvolusi ditempatkan pada kedalaman 360m, 420m, 480m dan 560m dengan variasi ketebalan 10m-100m. Setelah diterapkan pada studi kasus, ditemukan bahwa operator 51s tidak dapat mengestimasi rapat massa dengan baik. Hal ini ditunjukkan adanya error RMS yang besar pada setiap iterasi baik terhadap kedalaman maupun ketebalan. Sedangkan operator 101s memberikan hasil estimasi rapat massa dengan baik seperti diperlihatkan pada Gambar 4.13.

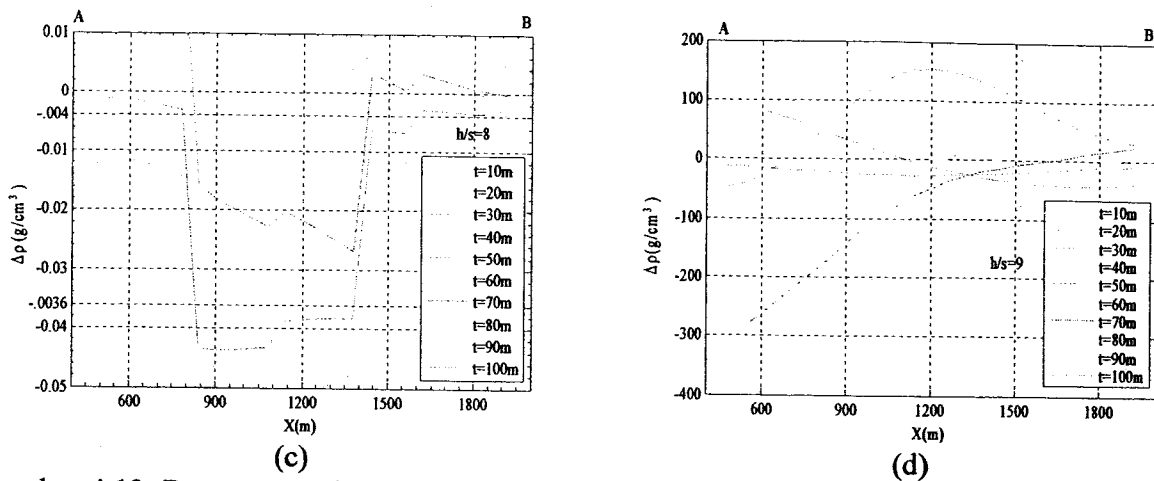


(a)



(b)

MILIT PERPUSTAKAAN  
UNIV. NEGERI PADANG

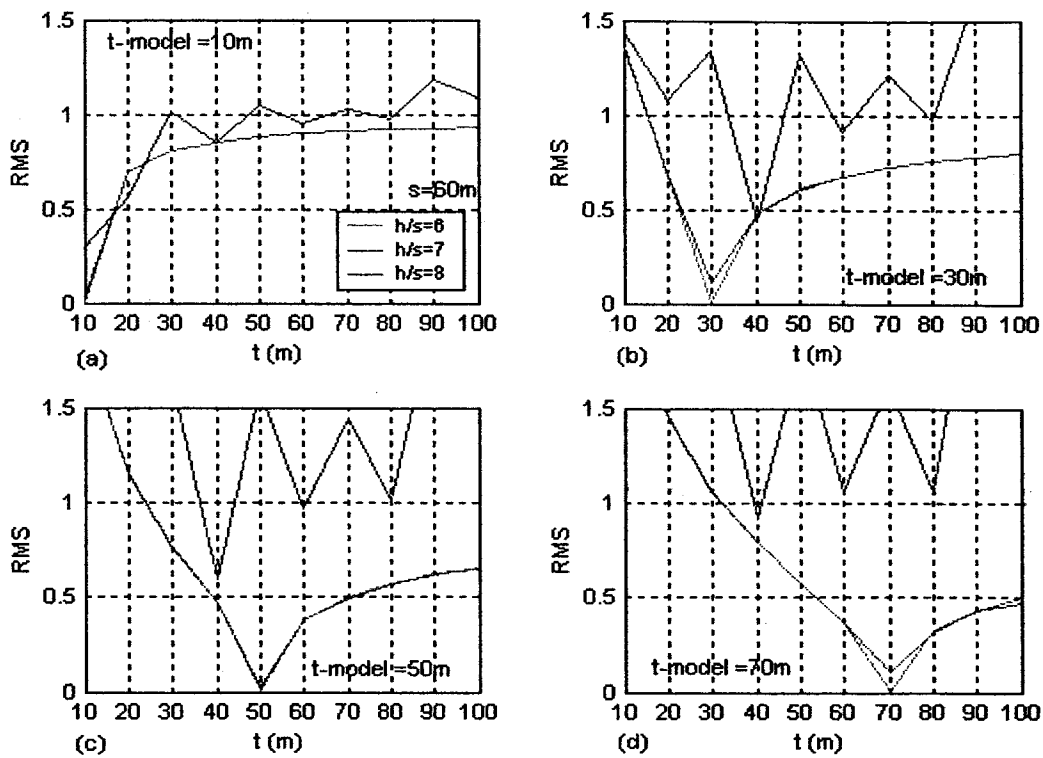


Gambar 4.13. Rapat massa hasil dekonvolusi pada rasio kedalaman (a)  $h/s=6$ , (b)  $h/s=7$ , (c)  $h/s=8$  dan (d)  $h/s=9$  menggunakan panjang operator 101s dimana  $s=60m$ . Ketebalan zona *steamflood* adalah 50m.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa operator 101s dapat mengestimasi rapat massa dengan baik pada kedalaman 360m dan 420m atau  $h/s=6$  dan  $h/s=7$  tetapi tidak sensitif terhadap ketebalan. Sedangkan pada kedalaman 480m atau  $h/s=8$ , operator dekonvolusi sangat sensitif terhadap perubahan ketebalan. Hal ini ditandai adanya kecocokan antara  $\rho^{dekonv}$  dengan  $\rho^{obs}$  pada ketebalan 50m seperti diperlihatkan Gambar 4.13(c). Pada kedalaman diatas 560m atau  $h/s>9$ , operator dekonvolusi tidak memberikan estimasi rapat massa yang baik.

Untuk mendukung temuan diatas, hasil penelitian ini akan diuji menggunakan kriteria error RMS yaitu melihat kecocokan antara  $\rho^{dekonv}$  dengan  $\rho^{obs}$ . Kriteria ini juga telah digunakan oleh Treitel and Lines (1982), Dimri and Srivastava (1987), Dimri (1992) dan Saggal and Toksoz (1999) untuk memperoleh luaran hasil dekonvolusi terbaik. Untuk itu ketebalan zona *steamflood* didesain dengan empat ketebalan yang berbeda yaitu 10m, 30m, 50m, dan 70m dan ditempatkan pada kedalaman yang sama seperti sebelumnya yaitu 360m, 420m, 480m dan 560m. Hasil pengujian error RMS terhadap ketebalan zona *steamflood* pada kedalaman tertentu diperlihatkan pada Gambar 10.





Gambar 4.14. RMS terhadap perubahan ketebalan operator dekonvolusi dimana zona *steamflood* diparameteri dengan ketebalan model (a) 10m, (b) 30m, (c) 50m dan (d) 70m.

Temuan yang menarik dari penelitian adalah operator dekonvolusi 101s yang ditempatkan pada kedalaman 360m, 420m, dan 480m atau kedalaman  $6 \leq h/s \leq 8$  sangat sensitif terhadap perubahan ketebalan. Hal ini ditandai dengan kecocokan antara  $\rho^{\text{dekonv}}$  dan  $\rho^{\text{obs}}$  dengan error  $\text{RMS} < 5\%$ . Hasil penelitian ini akan memberikan kontribusi penting didalam aplikasi untuk mengestimasi perubahan ketebalan uap selama operasi peningkatan produksi minyak. Jika ketebalan zona *steamflood* diasumsikan bertambah 10m setiap tiga bulan maka ketebalan uap dapat dideteksi berdasarkan data anomali gayaberat-mikro 4D menggunakan operator dekonvolusi 101s yang diturunkan dari lebar grid 201s dan kedalaman  $6 \leq h/s \leq 7$ . Penelitian yang dilakukan pada salah satu sumur injeksi menunjukkan bahwa ketebalan uap bertambah secara linier terhadap waktu tiba seismik refleksi setelah injeksi 1,5 tahun. Asumsi yang dapat dibuat adalah ketebalan zona “steamflood” bertambah 10m per tiga bulan disekitar sumur injeksi sehingga nilai

ini dapat dideteksi dengan operator dekonvolusi panjang 101s ditempatkan pada kedalaman  $6 \leq h/s < 8$ .

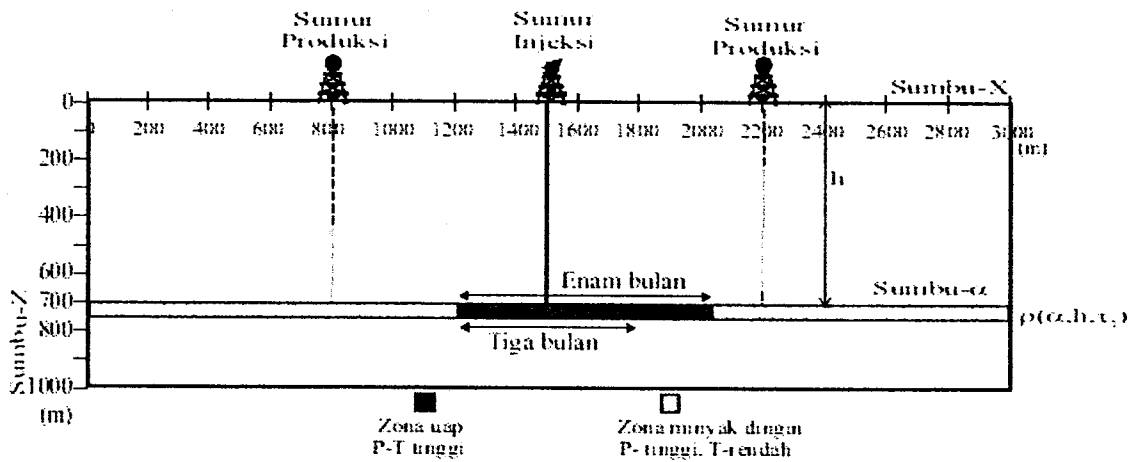
### 4.3. Studi kasus pada data sintetik

Untuk mengetahui kemampuan operator dekonvolusi pada ketelitian yang lebih terukur dalam mengestimasi distribusi rapat massa zona *steamflood*, maka dapat dilakukan pengujian metoda pada data sintetik. Oleh sebab itu pengembangan terhadap model ideal dilakukan agar mendekati kondisi nyata di lapangan seperti lapisan tipis, sesar, graben dan horts. Tanggapan anomali gayaberat dari model-model ini dihitung menggunakan prisma sisi tegak berdasarkan formula dari Plouff (1976), algoritma dari Blakely (1996) dan diimplementasikan dengan menggunakan paket program MATLAB versi 7.0.1.24704 (Release 14). Semua model yang didesain bertujuan untuk memprediksi anomali gayaberat-mikro 4D secara teoritik akibat pergantian minyak dengan uap selama operasi peningkatan produksi minyak. Model didesain dengan kontras rapat massa konstan yaitu  $-0,04 \text{ g/cm}^3$ . Kebanyakan model ditempatkan pada kedalaman antara 600m-800m. Ukuran atau dimensi model bervariasi sesuai dengan kondisi masing-masing studi kasus. Tujuan pemodelan adalah untuk menguji kemampuan teknik dekonvolusi terhadap variasi struktur geologi.

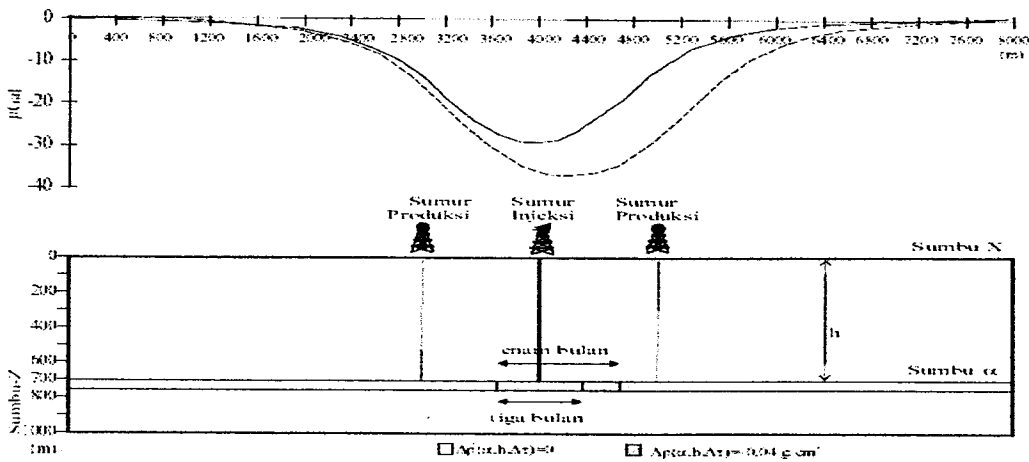
#### 4.3.1. Model lapisan tipis horizontal

Model lapisan tipis bertujuan untuk mendeteksi tanggapan anomali gayaberat-mikro yang disebabkan oleh pergerakan uap secara horizontal setelah reservoir minyak diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam bulan. Asumsi yang digunakan adalah produksi minyak di daerah 300.000 barrel/hari yang berasosiasi sebagai jumlah massa uap sebesar 4.239.420.935 kg yang diinjeksikan ke dalam reservoir. Dimensi atau ukuran zona yang tersaturasi uap atau zona *steamflood* dapat dihitung menggunakan konsep keseimbangan massa dari Hare, dkk., (1999) dimana jumlah massa uap yang diinjeksikan ke dalam reservoir akan mengisi sel-sel prisma yang besarnya sebanding dengan jumlah massa uap total. Jika kontras rapat massa batuan reservoir setelah dan sebelum injeksi adalah  $-0,04 \text{ g/cm}^3$  maka massa uap total akan mengisi seluruh volume reservoir berukuran  $1442\text{m} \times 1442\text{m} \times 50\text{m}$  atau  $24 \times 24 \times 1$  sel prisma untuk tiga bulan

injeksi atau 2040mx2040mx50m atau 34x34x1 sel prisma untuk enam bulan injeksi dimana satu sel prisma berukuran 60mx60mx50m. Sebaliknya, jika satu sel prisma dipilih berukuran 100mx100mx50m maka massa uap total akan mengisi volume berukuran 15x15x1 sel prisma untuk tiga bulan injeksi dan 20x20x1 sel prisma untuk enam bulan injeksi. Untuk kasus ini, ukuran prisma dipilih 15x15x1 sel dan kondisi ini disebut kondisi awal (tiga bulan injeksi). Selanjutnya ukuran prisma diperbesar menjadi 20x20x1 sel prisma dan kondisi ini disebut kondisi akhir (enam bulan injeksi). Prisma ditempatkan pada kedalaman 700m atau  $h/s=7$  dengan  $s=100m$ . Model penampang lapisan tipis setelah tiga dan enam bulan injeksi diperlihatkan pada Gambar 4.15(a) dan penampang anomali gayaberat-mikro setelah diinjeksi tiga dan enam bulan diperlihatkan pada Gambar 4.15(b) dimana diasumsikan uap bergerak dari kiri ke kanan.



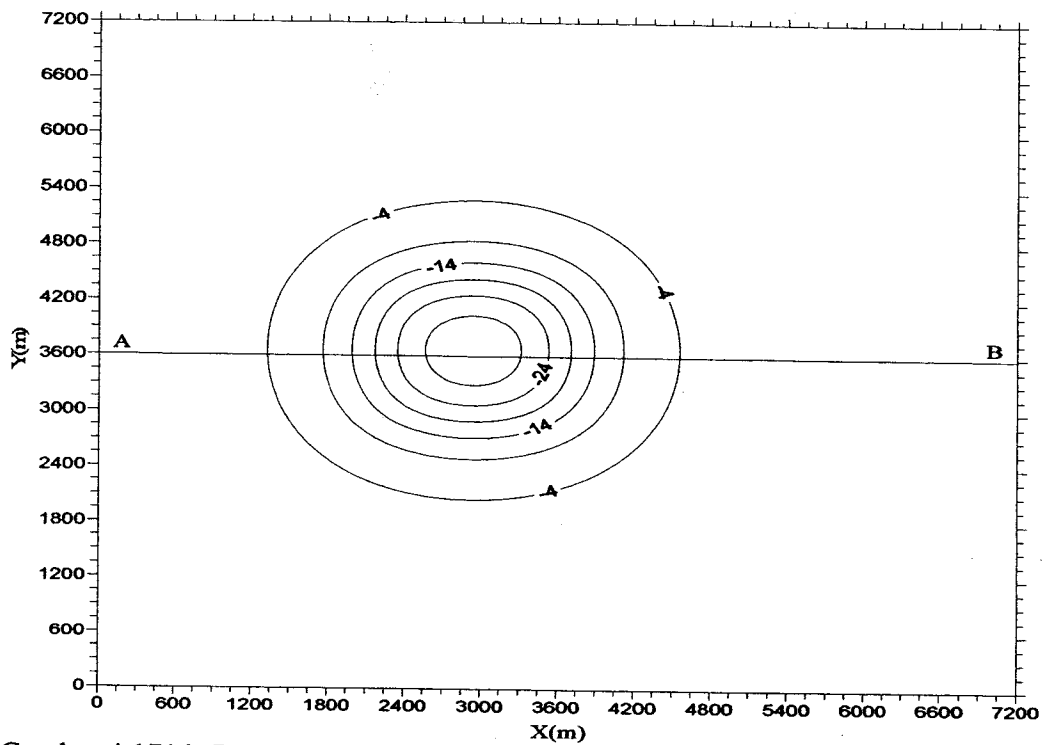
Gambar 4.15(a) Penampang lapisan tipis yang diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam.



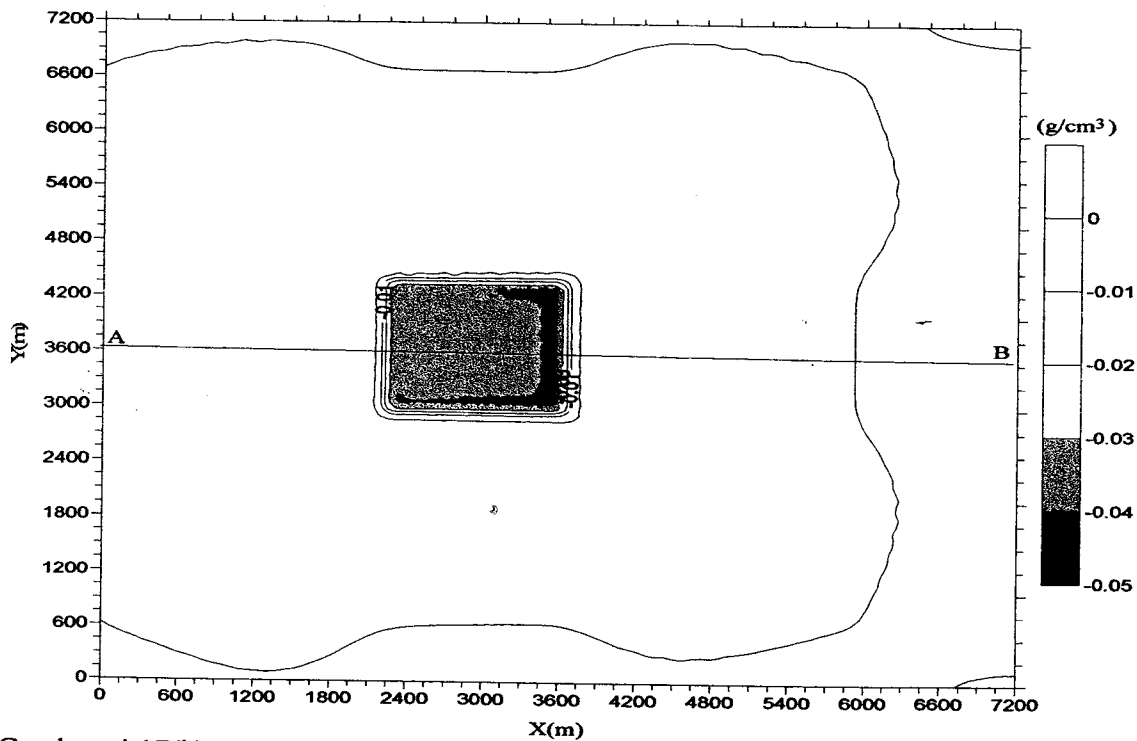
Gambar 4.16(b) Penampang anomali gayaberat-mikro dari lapisan tipis horizontal setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga bulan (garis hitam tebal) dan enam bulan (garis putus-putus).

Berdasarkan analisa pada Gambar 4.16(b) menunjukkan bahwa anomali gayaberat-mikro 4D yang dapat dicapai setelah tiga dan enam bulan injeksi adalah  $-28\mu\text{Gal}$  dan  $-38\mu\text{Gal}$  secara berturut-turut. Hasil ini memberikan sebuah kelayakan bagi survai gayaberat-mikro 4D untuk memantau proses injeksi uap dalam selang waktu diatas tiga bulan karena ketelitian gravimeter ( $5\mu\text{Gal}$ ) lebih kecil dari anomali gayaberat-mikro 4D hasil pemodelan.

Rapat massa dari penampang anomali gayaberat-mikro pada Gambar 4.16(b) dapat diestimasi dengan baik menggunakan operator dekonvolusi yang didesain dengan ukuran  $101s$ , ketebalan  $50m$ , kedalaman  $700m$  dan jarak grid  $100m$ . Hasilnya tidak ditampilkan karena dapat diwakili oleh kasus data sintetik pada Gambar 4.13. Selanjutnya peta rapat massa pada kasus lapisan tipis horizontal tidak dapat diestimasi menggunakan operator dekonvolusi yang didesain dengan ukuran  $101s \times 101s$  karena adanya keterbatasan komputasi pada paket program MATLAB versi 7.0.1.24704 (Release 14). Oleh karena itu dilakukan desain ulang terhadap operator dekonvolusi dan ditemukan bahwa ukuran operator  $61s \times 61s$  dapat digunakan untuk mengestimasi rapat massa pada kedalaman  $600m$  dan jarak grid  $120m$  atau  $h/s < 5$ . Untuk itu model lapisan tipis horizontal dimodifikasi menggunakan ukuran prisma  $1800m \times 1800m \times 50m$  dan ditempatkan pada kedalaman  $600m$  dengan jarak grid  $120m$ . Peta anomali gayaberat-mikro dari lapisan tipis horizontal setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga bulan diperlihatkan pada Gambar 4.17(a). Peta kontras rapat massa hasil dekonvolusi diperlihatkan pada Gambar 4.17(b).



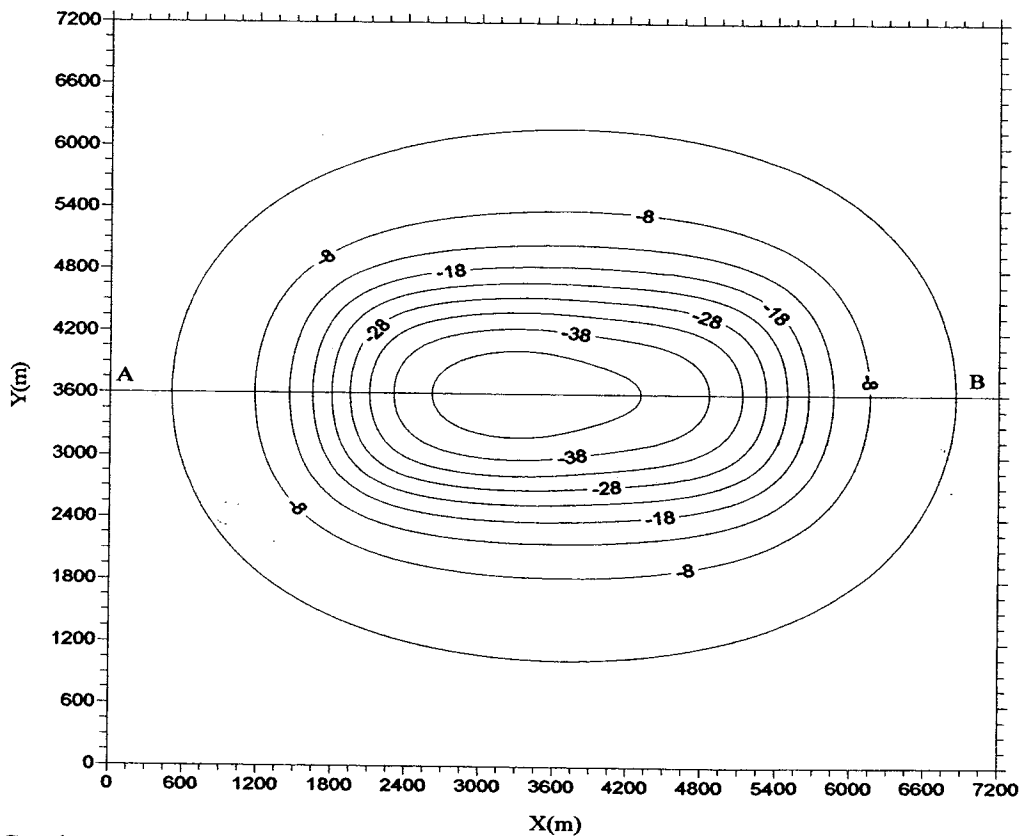
Gambar 4.17(a). Peta anomali gayaberat-mikro dari lapisan tipis horizontal setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga bulan.



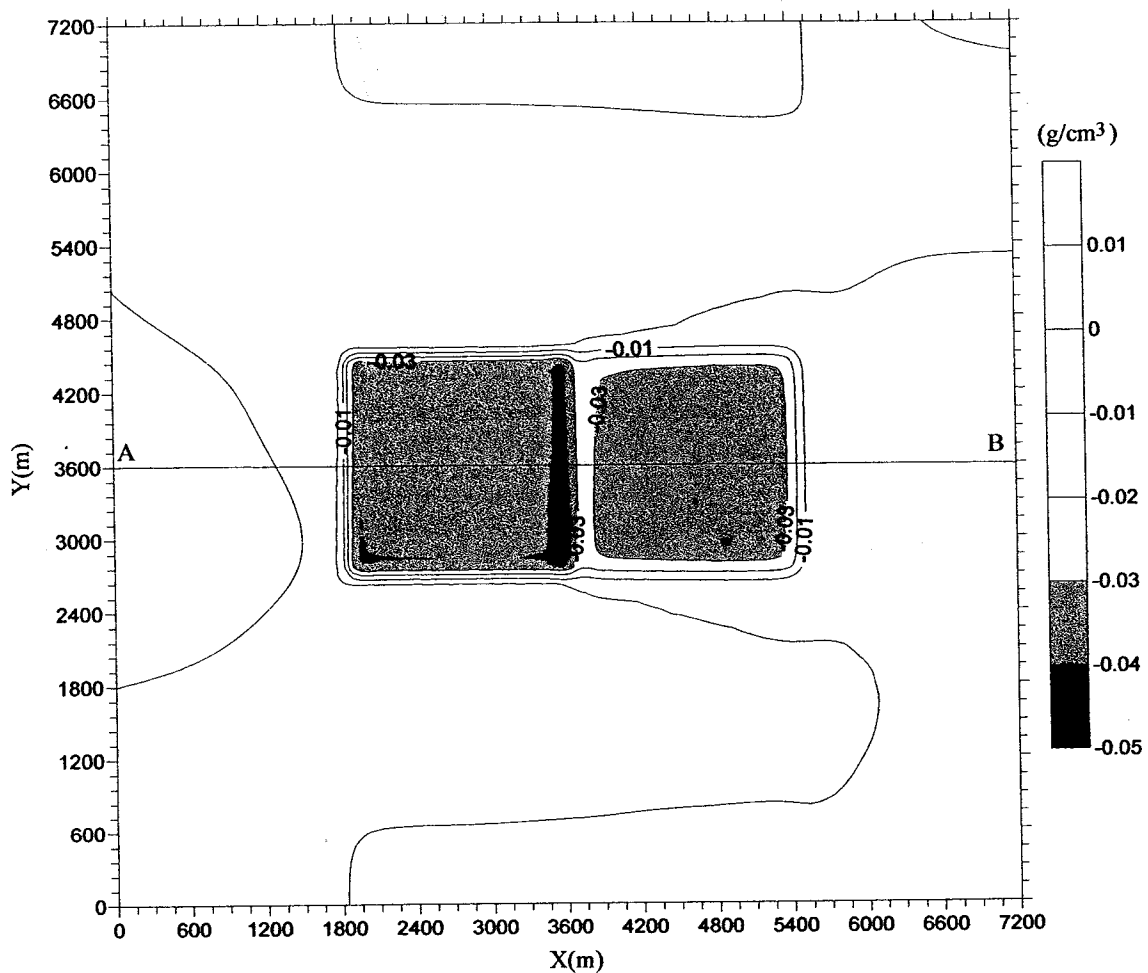
Gambar 4.17(b). Peta rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari anomali gayaberat-mikro lapisan tipis horizontal setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga bulan.

Peta anomali gayaberat-mikro selang waktu tiga bulan pada Gambar 4.17(a) memperlihatkan bahwa pergantian minyak dengan uap selama operasi peningkatan produksi minyak secara teoritik dapat dideteksi menggunakan metoda gayaberat-mikro 4D. Hal ini ditunjukkan adanya nilai anomali negatif disekitar titik pusat prisma. Sedangkan peta rapat massa hasil dekonvolusi pada Gambar 4.17(b) memperlihatkan bahwa nilai  $\Delta\rho \cong -0,04 \text{ g/cm}^3$  dapat dicapai menggunakan operator dekonvolusi ukuran  $61s \times 61s$ , ketebalan 50m, kedalaman 600m dan jarak grid 120m.

Untuk memodelkan gerakan uap secara horizontal setelah enam bulan injeksi, Gambar 4.17(a) dikembangkan dengan menambahkan sebuah prisma pada posisi sebelah kanan prisma pertama dengan ukuran dan kedalaman yang sama dengan prisma pertama. Peta anomali gayaberat-mikro setelah enam bulan injeksi diperlihatkan pada Gambar 4.18(a) sedangkan peta rapat massa hasil dekonvolusi diperlihatkan pada Gambar 4.18(b).



Gambar 4.18(a). Peta anomali gayaberat-mikro dari lapisan tipis horizontal setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu enam bulan.



Gambar 4.18(b). Peta rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari anomali gayaberat-mikro lapisan tipis horizontal setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu enam bulan.

Peta anomali gayaberat-mikro selang waktu enam bulan pada Gambar 4.18(a) memperlihatkan bahwa pergerakan uap secara horizontal akibat pergantian minyak dengan uap selama operasi peningkatan produksi minyak secara teoritik dapat dideteksi menggunakan metoda gayaberat-mikro 4D. Hal ini ditunjukkan adanya penambahan dan penyebaran nilai anomali negatif ke arah kanan bila dibandingkan dengan Gambar 4.18(a).

Nilai anomali gayaberat-mikro selang waktu tiga dan enam bulan pada Gambar 4.18(a) hampir sama dengan nilai anomali pada Gambar 4.17(a) meskipun ukuran dan kedalaman model sedikit berbeda. Sehingga kedua gambar dapat digunakan sebagai model pergerakan uap secara horizontal ke arah kanan dalam selang waktu tiga dan enam bulan.

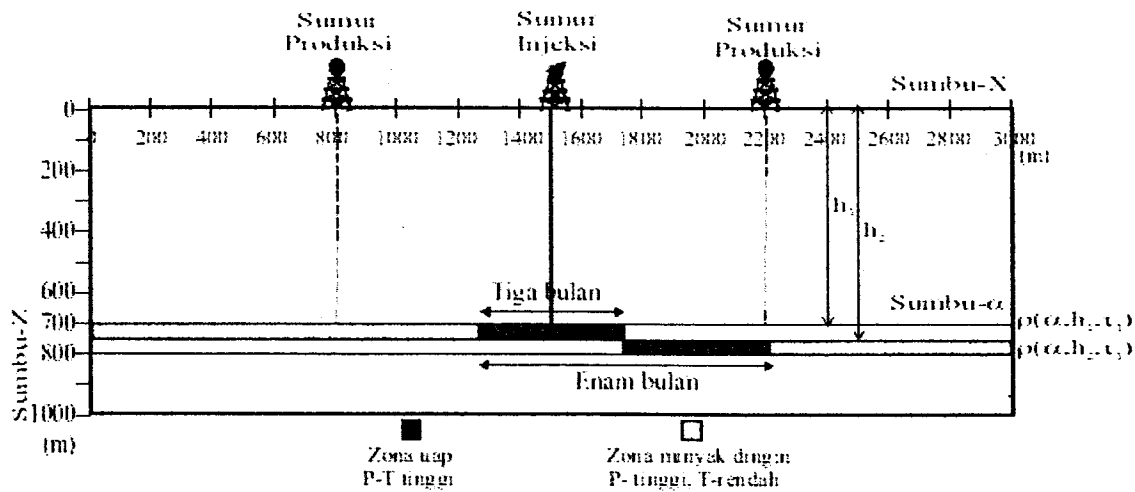
Sedangkan peta rapat massa hasil dekonvolusi pada Gambar 4.18(b) memperlihatkan bahwa nilai  $\Delta\rho \cong -0,04 \text{ g/cm}^3$  dapat dicapai menggunakan operator dekonvolusi ukuran 61sx61s, ketebalan 50m, kedalaman 600m dan jarak grid 120m. Warna hitam gelap dan hitam terang pada Gambar 4.18(b) memperlihatkan bahwa model disusun dari dua prisma yang didesain pada ukuran, kedalaman dan ketebalan yang sama, tetapi ditempatkan pada posisi yang berbeda. Namun hasilnya menunjukkan bahwa nilai rapat massa hasil dekonvolusi mendekati nilai rapat massa model.

#### 4.3.2. Model lapisan tipis tersesarkan

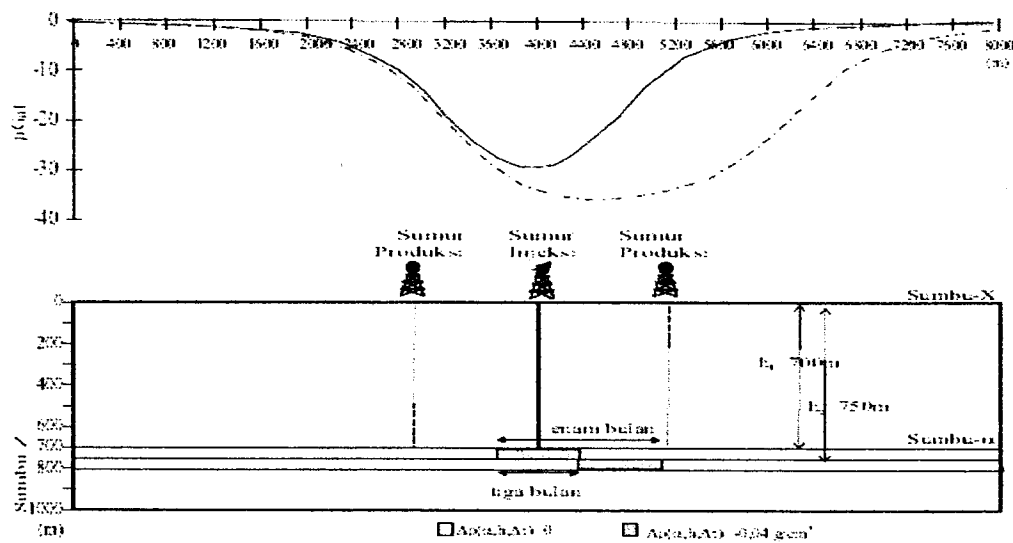
Model lapisan tipis tersesarkan bertujuan untuk menguji kemampuan operator dekonvolusi untuk mendeteksi distribusi rapat massa pada kasus reservoir lebih dari satu lapisan. Dalam hal ini, zona *steamflood* didekati menggunakan dua lapisan ekhivalen dengan ukuran dan ketebalan yang sama tapi ditempatkan pada kedalaman berbeda. Model ini dapat digunakan untuk membayangkan aliran fluida yang dikontrol oleh sesar.

Model lapisan tipis tersesarkan disusun dari dua buah prisma berukuran sama yaitu 1500mx1500mx50m dan kontras rapat massa  $-0,04 \text{ g/cm}^3$ . Pada kondisi awal prisma pertama ditempatkan pada kedalaman 700m sedangkan prisma kedua ditempatkan pada kedalaman 750m dengan posisi sebelah kanan dari prisma pertama. Kondisi ini menggambarkan pergerakan uap ke arah kanan yang dikontrol oleh sesar vertikal turun dan uap bergerak searah dengan bidang sesar. Penampang lapisan tipis tersesarkan secara vertikal turun setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam bulan diperlihatkan pada Gambar 4.19(a). Sedangkan penampang anomali gayaberasat-mikro selang waktu tiga dan enam bulan diperlihatkan pada Gambar 4.19(b).





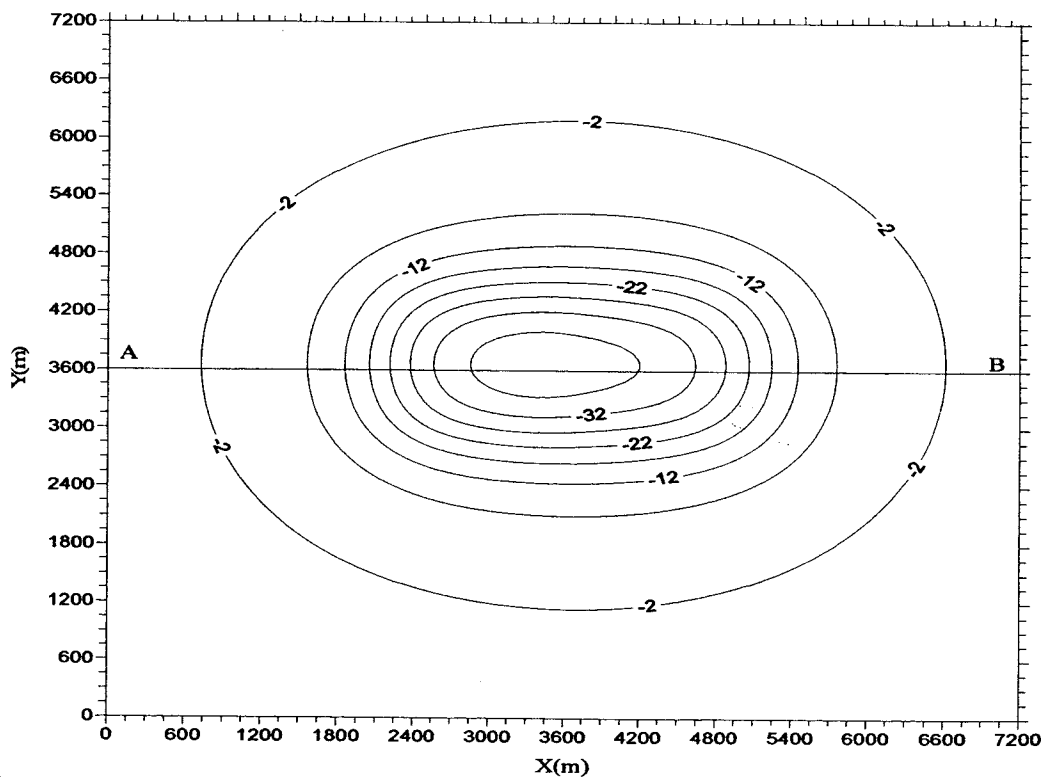
Gambar 4.19(a) Model penampang lapisan tipis tersesarkan secara vertikal turun setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam bulan.



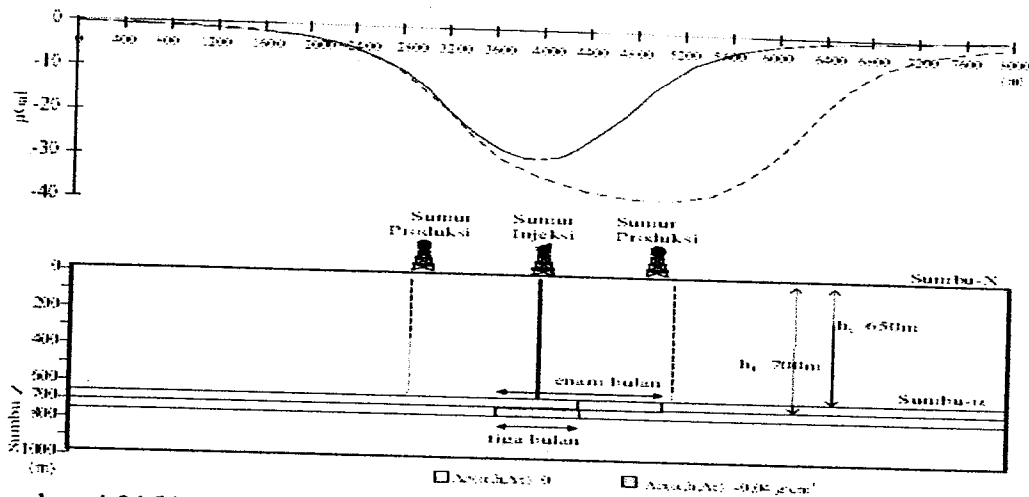
Gambar 4.19(b) Penampang anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan (garis hitam tebal) dan enam bulan (garis putus-putus) yang disebabkan oleh lapisan tipis tersesarkan secara vertikal turun.

Penampang anomali gayaberat-mikro selang waktu enam bulan pada Gambar 4.19(b) dapat menunjukkan adanya pergerakan uap yang dikontrol oleh sesar vertikal turun. Hal ini dibuktikan oleh adanya nilai anomali negatif pada daerah sebelah kanan lebih kecil nilai anomali yang disebabkan oleh lapisan tipis horizontal. Rapat massa dari penampang anomali gayaberat-mikro pada Gambar 4.19(b) dapat diestimasi dengan baik

menggunakan operator dekonvolusi yang didesain dengan ukuran 101s, ketebalan 50m, kedalaman 700m dan jarak grid 100m, tetapi peta rapat massa pada kasus lapisan tipis tersesarkan secara vertikal tidak dapat diestimasi menggunakan operator dekonvolusi yang didesain dengan ukuran 101sx101s karena adanya keterbatasan komputasi pada paket program MATLAB versi 7.0.1.24704 (Release 14). Oleh karena itu dilakukan desain ulang terhadap operator dekonvolusi dan ditemukan bahwa ukuran operator 61sx61s dapat digunakan untuk mengestimasi rapat massa pada kedalaman 600m dan jarak grid 120m atau  $h/s < 5$ . Untuk itu model lapisan tipis tersesarkan secara vertikal dimodifikasi menggunakan dua prisma berukuran 1800mx1800mx50m. Prisma pertama ditempatkan pada kedalaman 600m sedangkan prisma kedua ditempatkan pada kedalaman 650m dengan posisi sebelah kanan dari prisma pertama. Kondisi ini menggambarkan pergerakan uap pada lapisan tipis yang dikontrol oleh sesar vertikal turun. Peta anomali gayaberat-mikro dari model sesar vertikal turun setelah tiga bulan injeksi diperlihatkan pada Gambar 4.20(a). Sedangkan peta kontras rapat massa hasil dekonvolusi diperlihatkan pada Gambar 4.20(b).

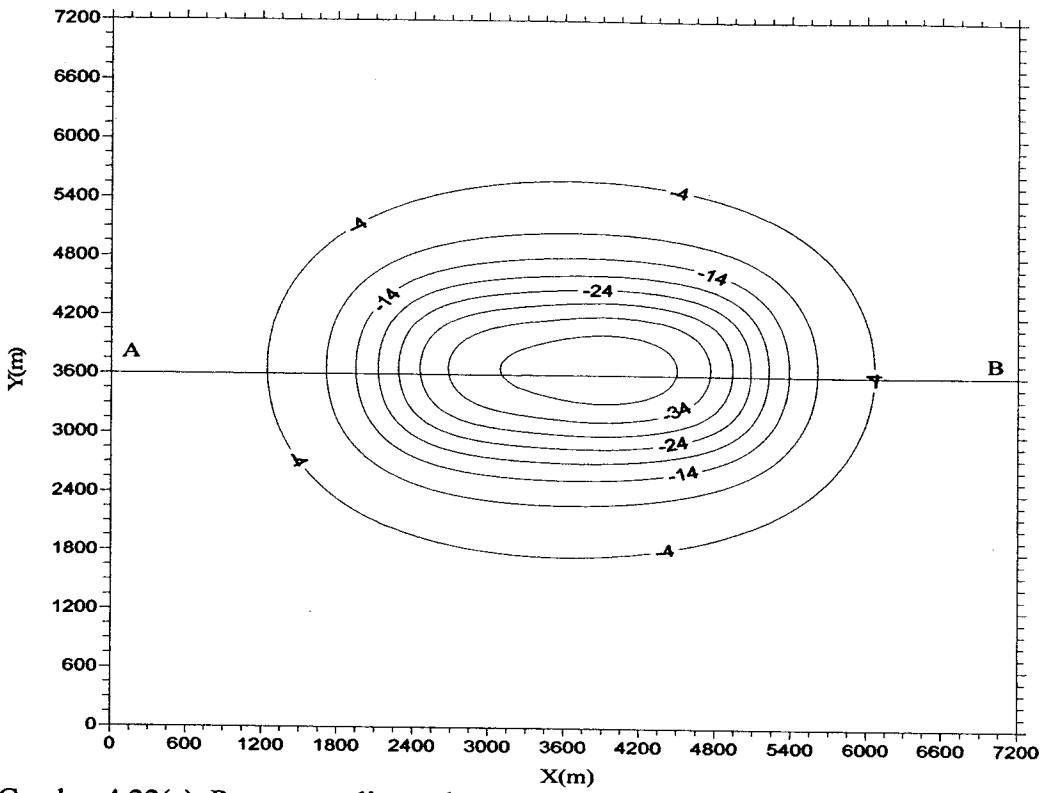


Gambar 4.20(a). Peta anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan yang disebabkan oleh lapisan tipis tersesarkan secara vertikal turun.

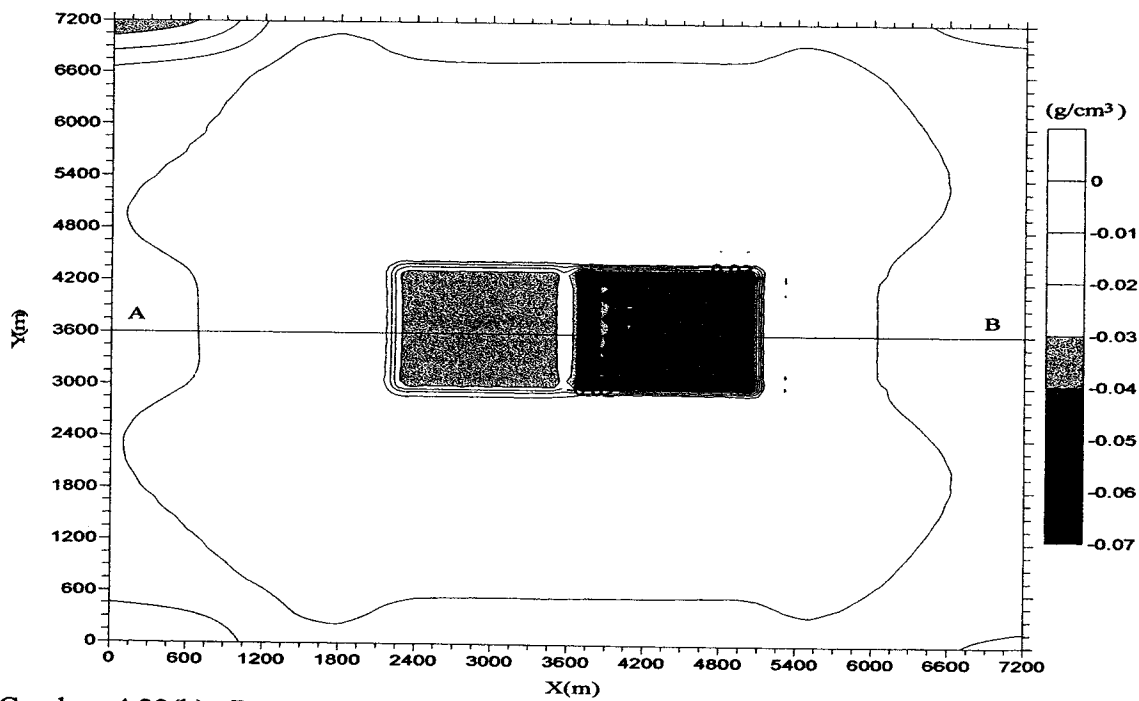


Gambar 4.21(b). Penampang anomali-gayabarat selang waktu tiga bulan (garis hitam tebal) dan enam bulan (garis putus-putus) yang disebabkan oleh lapisan tipis tersesarkan secara vertikal naik.

Penampang anomali gayabarat-mikro selang waktu enam bulan pada Gambar 4.22(b) dapat menunjukkan adanya pergerakan uap yang dikontrol oleh sesar vertikal naik. Hal ini dibuktikan oleh adanya nilai anomali negatif pada daerah sebelah kanan lebih besar dari nilai anomali yang disebabkan oleh lapisan tipis horizontal dan sesar vertikal turun. Tetapi rapat massa dari peta gayabarat-mikro selang waktu tiga dan enam bulan untuk kasus sesar vertikal naik tidak dapat diestimasi dengan baik menggunakan operator dekonvolusi yang didesain dengan ukuran  $101s \times 101s$ , ketebalan  $50m$ , kedalaman  $700m$  dan jarak grid  $s=100m$  karena adanya keterbatasan komputasi pada paket program MATLAB versi 7.0.1.24704 (Release 14). Oleh karena itu dilakukan desain ulang terhadap operator dekonvolusi dan ditemukan bahwa ukuran operator  $61s \times 61s$  dapat digunakan untuk mengestimasi rapat massa pada kedalaman  $600m$  dan jarak grid  $120m$  atau  $h/s < 5$ . Untuk itu model lapisan tipis tersesarkan secara vertikal naik dimodifikasi menggunakan dua prisma berukuran  $1800m \times 1800m \times 50m$ . Prisma pertama ditempatkan pada kedalaman  $600m$  sedangkan prisma kedua ditempatkan pada kedalaman  $550m$  dengan posisi sebelah kanan dari prisma pertama. Kondisi ini menggambarkan pergerakan uap pada lapisan tipis yang dikontrol oleh sesar vertikal naik. Peta anomali gayabarat-mikro setelah enam bulan injeksi yang disebabkan oleh lapisan tersesarkan secara vertikal naik diperlihatkan pada Gambar 4.22(a). Sedangkan peta kontras rapat massa hasil dekonvolusi diperlihatkan pada Gambar 4.22(b).



Gambar 4.22(a). Peta anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan yang disebabkan oleh lapisan tipis tersesarkan secara vertikal naik.



Gambar 4.22(b). Peta rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan yang disebabkan oleh lapisan tipis tersesarkan secara vertikal naik.

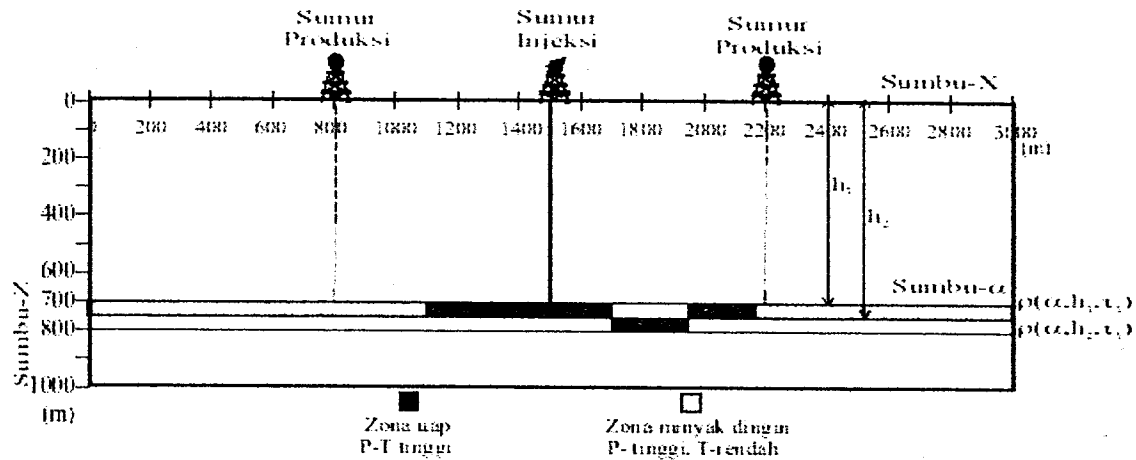
Peta anomali gayaberat-mikro selang waktu enam bulan pada Gambar 4.22(a) memperlihatkan bahwa pergerakan uap yang dikontrol oleh sesar vertikal naik selama operasi peningkatan produksi minyak secara teroritik dapat dideteksi menggunakan metoda gayaberat-mikro 4D. Perbedaan utama anomali gayaberat-mikro selang waktu enam bulan antara lapisan yang tersesarkan naik dan turun adalah perbedaan nilai anomali negatif lebih besar pada daerah yang mengalami sesar naik dari pada sesar turun. Hal ini disebabkan oleh posisi dari sesar naik lebih dangkal dari sesar turun sehingga pada nilai anomalnya lebih besar.

Peta rapat massa hasil dekonvolusi pada Gambar 4.22(b) memperlihatkan bahwa rapat masa model  $\Delta\rho \cong -0,04 \text{ g/cm}^3$  dapat dicapai menggunakan operator dekonvolusi ukuran 61sx61s, ketebalan 50m, kedalaman 600m dan jarak grid 120m pada lapisan yang tidak tersesarkan, tetapi tidak dapat dicapai pada daerah yang tersesarkan. Hal ini disebabkan adanya perbedaan kedalaman antara operator dekonvolusi dengan prisma yang memodelkan lapisan tersesarkan baik turun maupun naik. Meskipun demikian, rapat massa hasil dekonvolusi dapat menunjukkan bahwa pergerakan uap dikontrol oleh sesar turun dan sesar naik.

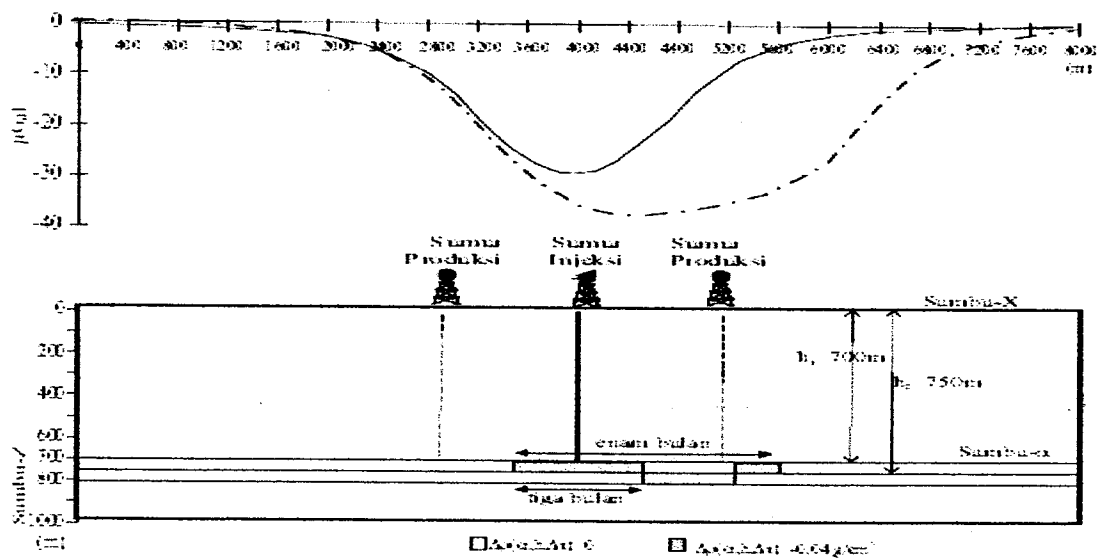
#### 4.3.3. Model graben

Model ini dapat digunakan untuk membayangkan aliran fluida yang dikontrol oleh sebuah blok sesar turun atau blok sesar naik. Blok sesar turun dimodel oleh struktur graben dan blok sesar naik digambarkan oleh struktur horts. Model graben dan horts disusun dari tiga buah prisma berukuran 1456mx1456mx50m, 1000mx1000mx50m, 500mx500mx50m dengan kontras rapat massa  $-0,04 \text{ g/cm}^3$ . Prisma pertama ditempatkan pada kedalaman 700m yang menggambarkan zona *steamflood* setelah tiga bulan injeksi. Prisma kedua dan ketiga ditempatkan pada kedalaman 750m dan 700m dan disusun pada posisi berurutan secara horizontal sehingga menggambarkan sebuah struktur graben. Jika prisma kedua dan ketiga ditempatkan pada kedalaman 650m dan 700m dan disusun pada posisi berurutan secara horizontal maka ia akan menggambarkan struktur horts. Penampang model graben setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam bulan diperlihatkan pada Gambar 4.23(a). Sedangkan penampang anomali gayaberat-

mikro selang waktu tiga dan enam bulan yang disebabkan oleh struktur graben diperlihatkan pada Gambar 4.23(b).



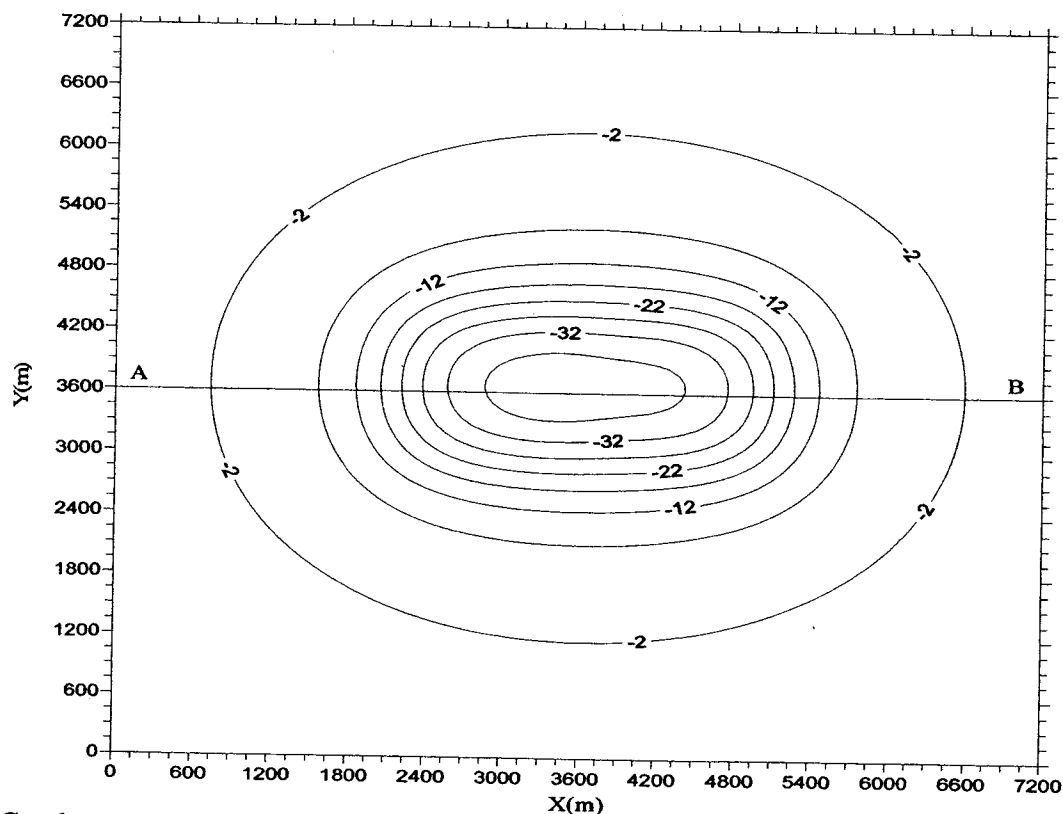
Gambar 4.23(a). Model penampang graben setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam bulan.



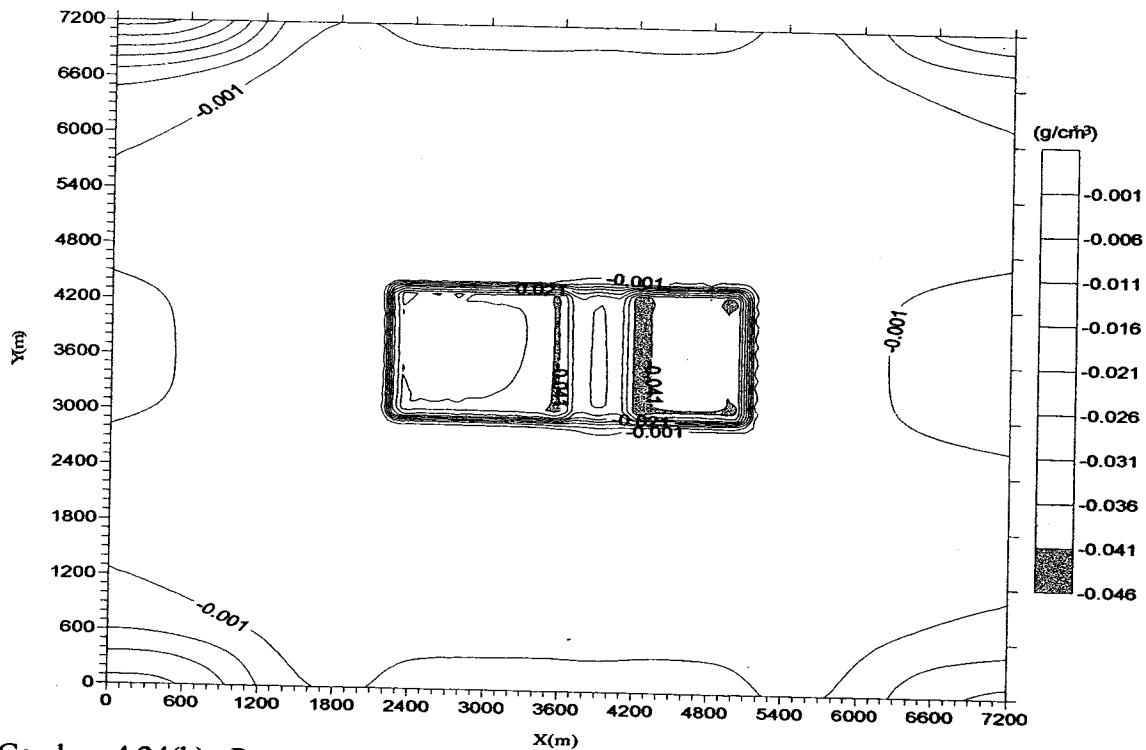
Gambar 4.23(b). Penampang anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan (garis hitam tebal) dan enam bulan (garis putus-putus) yang disebabkan oleh struktur graben.

Penampang anomali gayaberat-mikro selang waktu tiga dan enam bulan pada Gambar 4.23(b) dapat menunjukkan adanya pergerakan uap yang dikontrol oleh struktur graben. Hal ini dibuktikan oleh adanya perubahan pola anomali pada bagian tengah zona *steamflood* dibandingkan dengan anomali yang disebabkan oleh lapisan tipis horizontal,

sesar naik atau sesar turun. Tetapi rapat massa dari peta gayaberat-mikro selang waktu tiga dan enam bulan untuk kasus struktur graben tidak dapat diestimasi dengan baik menggunakan operator dekonvolusi yang didesain dengan ukuran 101s x 101s, ketebalan 50m, kedalaman 700m dan jarak grid  $s=100m$  karena adanya keterbatasan komputasi pada paket program MATLAB versi 7.0.1.24704 (Release 14). Oleh karena itu dilakukan desain ulang terhadap operator dekonvolusi dan ditemukan bahwa ukuran operator 61s x 61s dapat digunakan untuk mengestimasi rapat massa pada kedalaman 600m dan jarak grid 120m atau  $h/s < 5$ . Untuk itu model struktur graben dimodifikasi menggunakan tiga prisma berukuran 12s x 12s, 14s x 12s, 8s x 12s,  $s=120m$  dan kontras rapat massa  $-0,04 g/cm^3$ . Prisma pertama, kedua dan ketiga ditempatkan pada kedalaman 600m, 650m dan 600m sehingga menggambarkan menggambarkan sebuah struktur graben. Peta anomali gayaberat-mikro setelah enam bulan injeksi yang disebabkan oleh struktur graben diperlihatkan pada Gambar 4.24(a). Sedangkan peta kontras rapat massa hasil dekonvolusi diperlihatkan pada Gambar 4.24(b).



Gambar 4.24(a). Peta anomali-gayaberat selang waktu enam bulan yang disebabkan oleh struktur graben.



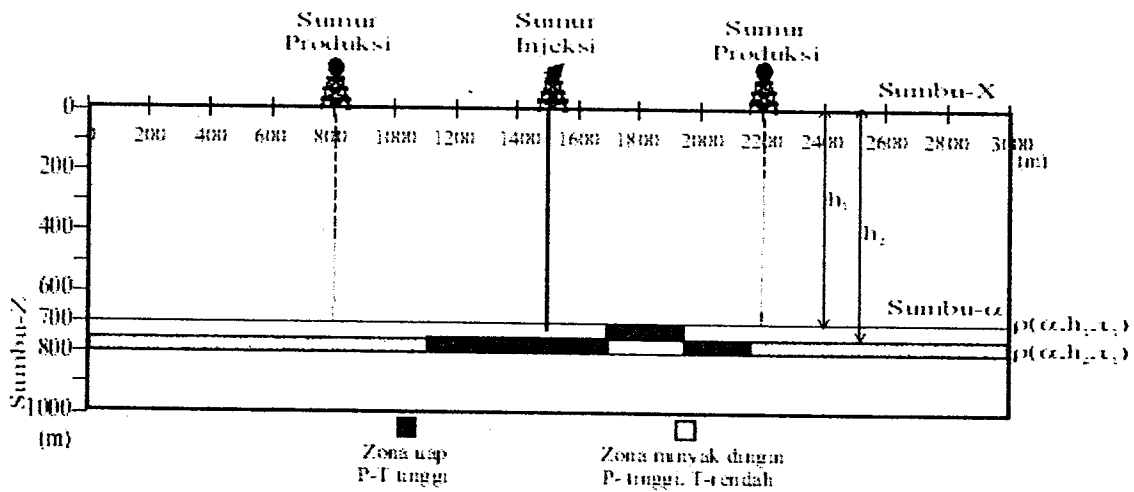
Gambar 4.24(b). Peta rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari anomali-gayaberat selang waktu enam bulan yang disebabkan oleh struktur graben.

Peta anomali gayaberat-mikro selang waktu enam bulan pada Gambar 4.24(a) tidak dapat memperlihatkan bahwa pergerakan uap yang dikontrol oleh struktur graben selama operasi peningkatan produksi minyak tetapi peta rapat massa hasil dekonvolusi pada Gambar 4.24(b) dapat menunjukkan bahwa peta anomali gayaberat-mikro selang waktu enam bulan pada Gambar 4.24(a) dikontrol oleh struktur graben. Hal ini ditandainya adanya nilai rapat massa hasil dekonvolusi kurang dari  $-0,04 \text{ g/cm}^3$  pada blok yang turun. Nilai rapat massa hasil dekonvolusi yang tidak mendekati rapat massa model pada kasus pada blok yang turun disebabkan disebabkan perbedaan kedalaman antara operator dekonvolusi dengan prisma yang memodelkan blok turun. Meskipun demikian, rapat massa hasil dekonvolusi dapat menunjukkan bahwa pergerakan uap dikontrol oleh struktur graben.

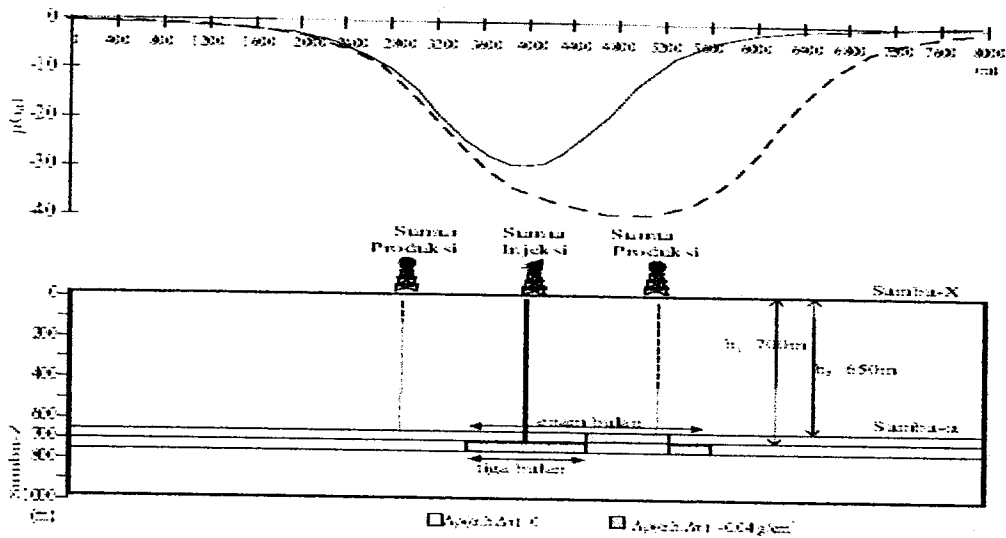


#### 4.3.4. Model horst

Model ini dapat digunakan untuk membayangkan aliran fluida yang dikontrol oleh sebuah blok sesar naik. Model horts disusun dari tiga buah prisma berukuran 1456mx1456mx50m, 1000mx1000mx50m, 500mx500mx50m dengan kontras rapat massa  $-0,04 \text{ g/cm}^3$ . Prisma pertama, kedua dan ketiga ditempatkan pada kedalaman 700m, 650m dan 700m dan disusun pada posisi berurutan secara horizontal sehingga menggambarkan sebuah struktur horts. Penampang model horts setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam bulan diperlihatkan pada Gambar 4.25(a). Sedangkan penampang anomali gayaberat-mikro selang waktu tiga dan enam bulan yang disebabkan oleh struktur horts diperlihatkan pada Gambar 4.25(b).

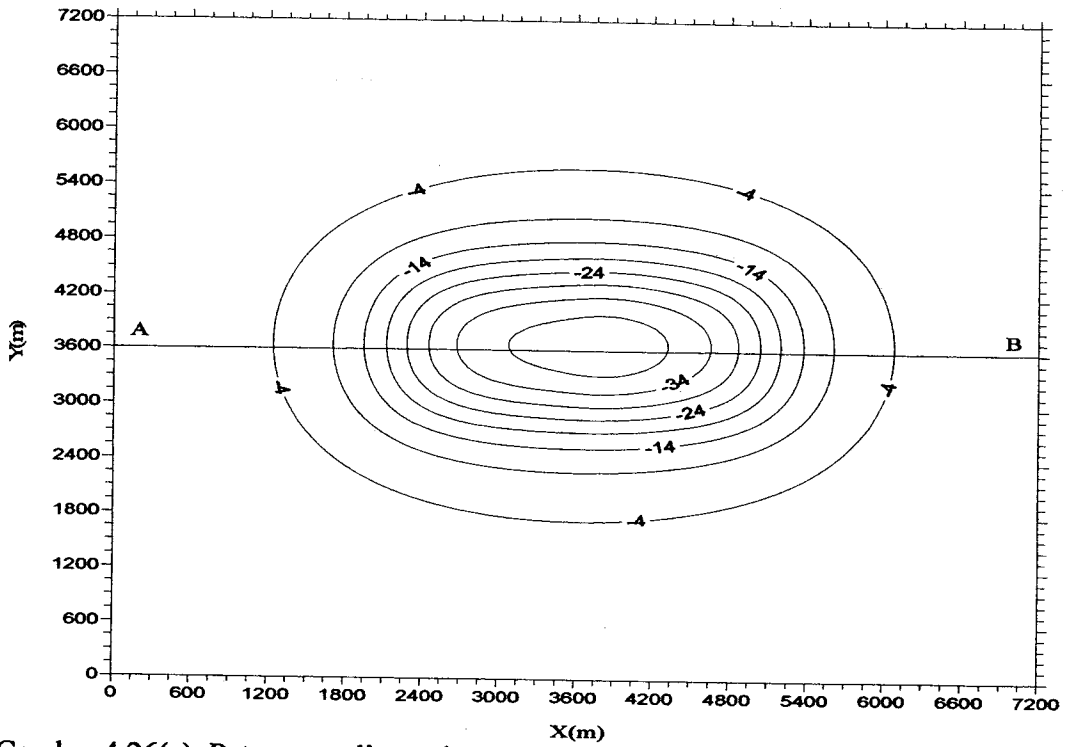


Gambar 4.25(a). Model penampang horst setelah diinjeksi dengan uap dalam selang waktu tiga dan enam bulan.

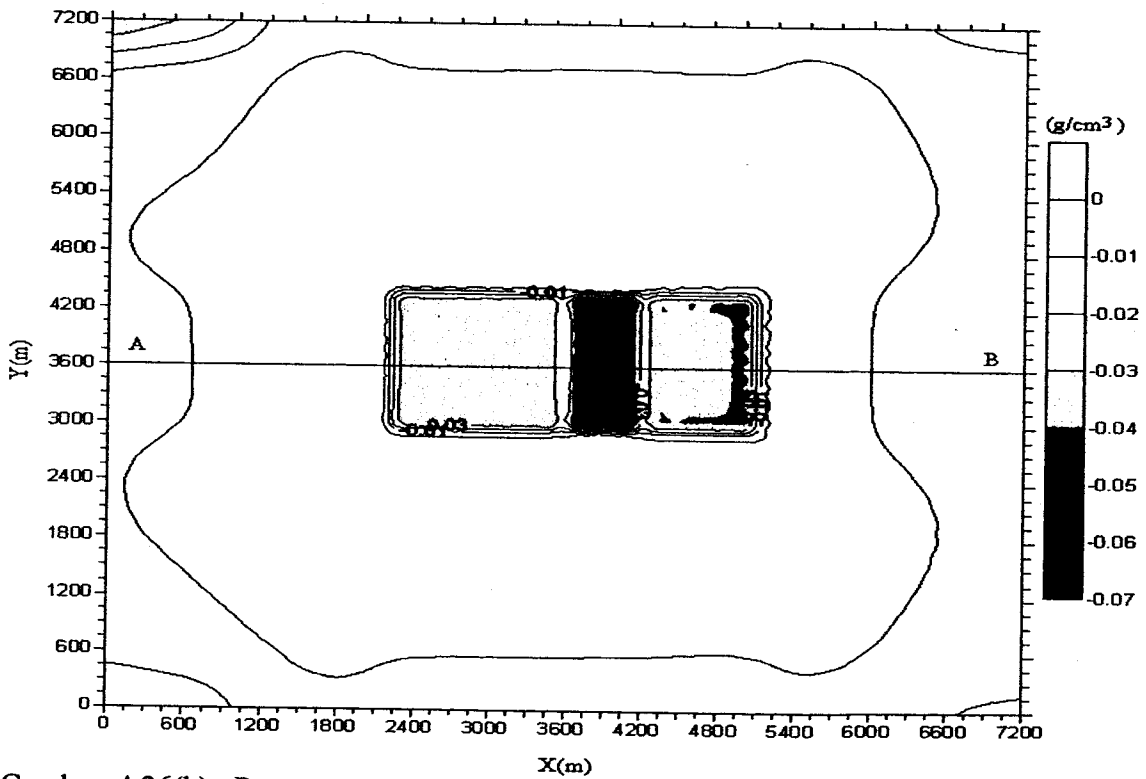


Gambar 4.25(b). Penampang anomali-gayaberat selang waktu tiga bulan (garis hitam tebal) dan enam bulan (garis putus-putus) yang disebabkan oleh struktur horts.

Penampang anomali gayaberat-mikro selang waktu tiga dan enam bulan pada Gambar 4.25(b) dapat menunjukkan adanya pergerakan uap yang dikontrol oleh struktur horts. Hal ini dibuktikan oleh adanya perubahan pola anomali negatif pada bagian tengah lebih besar dari anomali yang disebabkan oleh stuktur graben. Tetapi peta gayaberat-mikro selang waktu tiga dan enam bulan untuk kasus struktur graben tidak dapat diestimasi dengan baik menggunakan operator dekonvolusi yang didesain dengan ukuran  $101s \times 101s$ , ketebalan  $50m$ , kedalaman  $700m$  dan jarak grid  $s=100m$  karena adanya keterbatasan komputasi pada paket program MATLAB versi 7.0.1.24704 (Release 14). Oleh karena itu dilakukan desain ulang terhadap operator dekonvolusi dan ditemukan bahwa ukuran operator  $61s \times 61s$  dapat digunakan untuk mengestimasi rapat massa pada kedalaman  $600m$  dan jarak grid  $120m$  atau  $h/s < 5$ . Untuk itu model struktur graben horts menggunakan tiga prisma berukuran  $12s \times 12s$ ,  $14s \times 12s$ ,  $8s \times 12s$ ,  $s=120m$  dan kontras rapat massa  $-0,04 \text{ g/cm}^3$ . Prisma pertama, kedua dan ketiga ditempatkan pada kedalaman  $600m$ ,  $550m$  dan  $600m$  sehingga menggambarkan sebuah struktur horts. Peta anomali gayaberat-mikro setelah enam bulan injeksi yang disebabkan oleh struktur horts diperlihatkan pada Gambar 4.26(a). Sedangkan peta kontras rapat massa hasil dekonvolusi diperlihatkan pada Gambar 4.26(b).



Gambar 4.26(a). Peta anomali-gayaberat selang waktu enam bulan yang disebabkan oleh struktur horts.



Gambar 4.26(b). Peta rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari anomali-gayaberat selang waktu enam bulan yang disebabkan oleh struktur horts.

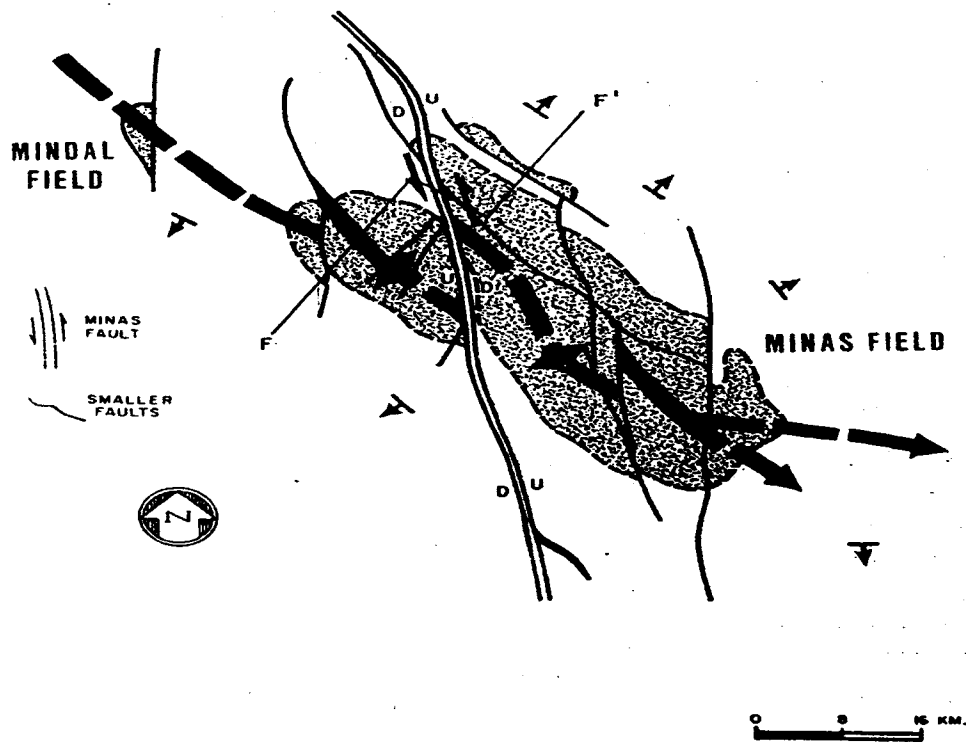
Peta anomali gayaberat-mikro selang waktu enam bulan pada Gambar 4.26(a) kurang dapat membedakan pergerakan uap yang dikontrol oleh struktur graben atau horts selama operasi peningkatan produksi minyak tetapi peta rapat massa hasil dekonvolusi pada Gambar 4.26(b) dapat menunjukkan bahwa peta anomali gayaberat-mikro selang waktu enam bulan pada Gambar 4.26(a) dikontrol oleh struktur horts. Hal ini ditandainya adanya nilai rapat massa hasil dekonvolusi lebih besar dari  $-0,04 \text{ g/cm}^3$  pada blok yang naik. Namun nilai rapat massa hasil dekonvolusi pada blok yang naik tidak mendekati rapat massa model karena adanya perbedaan kedalaman antara operator dekonvolusi dengan prisma yang memodelkan blok naik. Meskipun demikian, rapat massa hasil dekonvolusi pada 4.26(b) dapat menunjukkan bahwa pergerakan uap dikontrol oleh struktur graben.

#### **4.4. Kasus data lapangan**

##### **4.4.1. Geologi daerah penelitian**

Lapangan minyak Minas (LMM) terletak di Cekungan Sumatera Tengah dan berjarak kira-kira 30 km kearah utara kota Pekanbaru, Riau. LMM merupakan lapangan minyak terbesar yang pernah ditemukan di Asia Tenggara (Eubank and Makki, 1981). Secara struktur, LMM terletak pada atas antiklin Minas dari Cekungan Sumatera Tengah yang berasosiasi dengan sistem sesar mendatar utara-selatan dengan offset 1-3 km. Sesar utama membedakan LMM kedalam dua segmen yaitu segmen utara Minas dan segmen barat-laut. Komponen kompresi dari LMM disebabkan oleh pengangkatan dan penurunan batuan dasar Cekungan Sumatera Tengah selama periode Miosen (Hendrick dan Aulia 1993). Berdasarkan pengujian inti dari kelompok Sihapas, stratigrafi lapangan Minas merupakan sebuah siklus *regressive-transgressive* skala besar, diselingi beberapa sekuen skala kecil (Pujiyo dan Poernomo, 2000).

Struktur LMM adalah lebih lebar dibandingkan dengan struktur-struktur lain di Cekungan Sumatera Tengah. Gambaran struktur LMM diperlihatkan pada Gambar V-1.



Gambar 4.27. Gambaran struktur LMM (Sumber : Eubank dan Makki,1981)

Eubank dan Makki (1981) menjelaskan bahwa struktur Minas terpotong oleh sesar (*wrench*) sinistral berarah utara-selatan dengan sumbu offset 7 km. Sebuah penjelasan yang mungkin dari offset pada sistem sesar *dextral* ini ditunjukkan oleh keberadaan formasi Pematang yang terletak diatas batuan dasar pada sisi barat Sesar Minas dan ketiadaan formasi tersebut pada sisi timur. Hal ini mengindikasikan bahwa sesar aktif selama masa Paleogen. Lintasan seismik menunjukkan bahwa sesar menerus ke permukaan dengan gravel-gravel Minas yang cenderung naik menunjukkan offset sesar.

LLM ditemukan tahun 1944, dan dibor pertama kali oleh tentara Jepang pada akhir Perang Dunia II. Terpengaruhi oleh perang dan perjuangan Indonesia terhadap kemerdekaan, produksi baru dapat dimulai pada tahun 1952. Dalam tahun 1963, perusahaan berintegrasi kedalam Indonesia dengan nama PT.Caltex Pacific Indonesia atau PT.CPI. Dalam usahanya memelihara tekanan formasi di LMM yang turun akibat

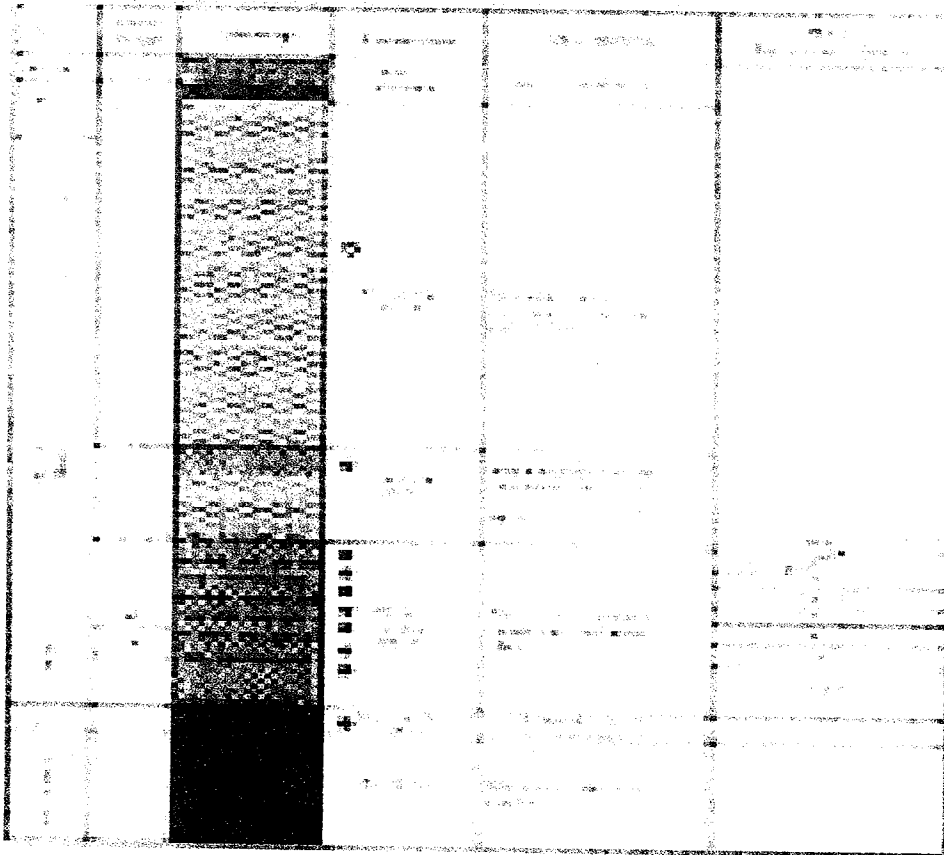
produksi minyak, PT.CPI telah melakukan penginjeksian air berpola atau *waterflood* kedalam reservoir untuk menambah produksi. Sampai tahun 2003, LMM telah memproduksi 109.000 barrel/hari.

Sejak lima tahun terakhir, PT.CPI telah mendemonstrasikan sebuah kinerja kelas dunia dalam penemuan, pengembangan dan pengoperasian setiap lapangan baru dan lama di lapangan minyak Duri dan LMM. Hal ini diperlihatkan adanya penempatan 400 unit pembangkit uap yang menginjeksikan 1,2 juta barrel uap setiap hari di lapangan Duri dan 7 juta barrel air di Minas. Untuk memaksimalkan perolehan minyak di lapangan Duri, uap tekanan tinggi diinjeksi kedalam formasi bawah permukaan, memanaskan minyak dan mengalirkannya ke sumur produksi. Proyek ini dikenal dengan nama *steamflood*. Bee,dkk., (1994) dan Jenkins, dkk.,(1997) melaporkan bahwa produksi minyak di lapangan Duri meningkat dari 40.000 barel/hari menjadi 350.000 barel/hari setelah reservoir minyak di injeksi dengan proses *steamflood*.

Terinspirasi dengan keberhasilan di lapangan Duri, PT.CPI melanjutkan proyek yang sama di LMM. Berbeda dengan kondisi minyak di lapangan Duri yang tergolong minyak berat (*heavy oil*), kondisi minyak di LMM tergolong minyak ringan (*light oil*) sehingga proyek ini dikenal dengan nama *Light Oil Steam Flood (LOSF)*. Proyek ini merupakan percontohan *steamflood* pertama di Asia dimana produksi minyak ringan ditingkatkan dengan injeksi uap.

#### **4.4.1. Stratigrafi umum daerah penelitian**

Stratigrafi umum di daerah penelitian diperlihatkan pada Gambar V-1. Stratigrafi daerah penelitian mempunyai beberapa kelompok batuan yaitu endapan alluvial Minas, formasi Petani, formasi Tellisa, kelompok Sihapas, formasi Pematang, dan batuan dasar. Deskripsi dari masing-masing litologi adalah sebagai berikut: endapan alluvial Minas (25m) terdiri atas kerikil, batupasir, dan lempung, formasi Petani (550m) terdiri atas batulanau berwarna abu-abu kehijauan, batupasi dan serpih, formasi Tellisa (125m) terdiri dari batupasir, batu lanau dan serpih berwarna coklat, formasi Sihapas (180m) terdiri dari batupasir berukuran halus dan menengah dan sedikit serpih, formasi Pematang (50m) terdiri dari konglomerat dan batuan dasar terdiri dari greywacke, kuarsit dan argilit.

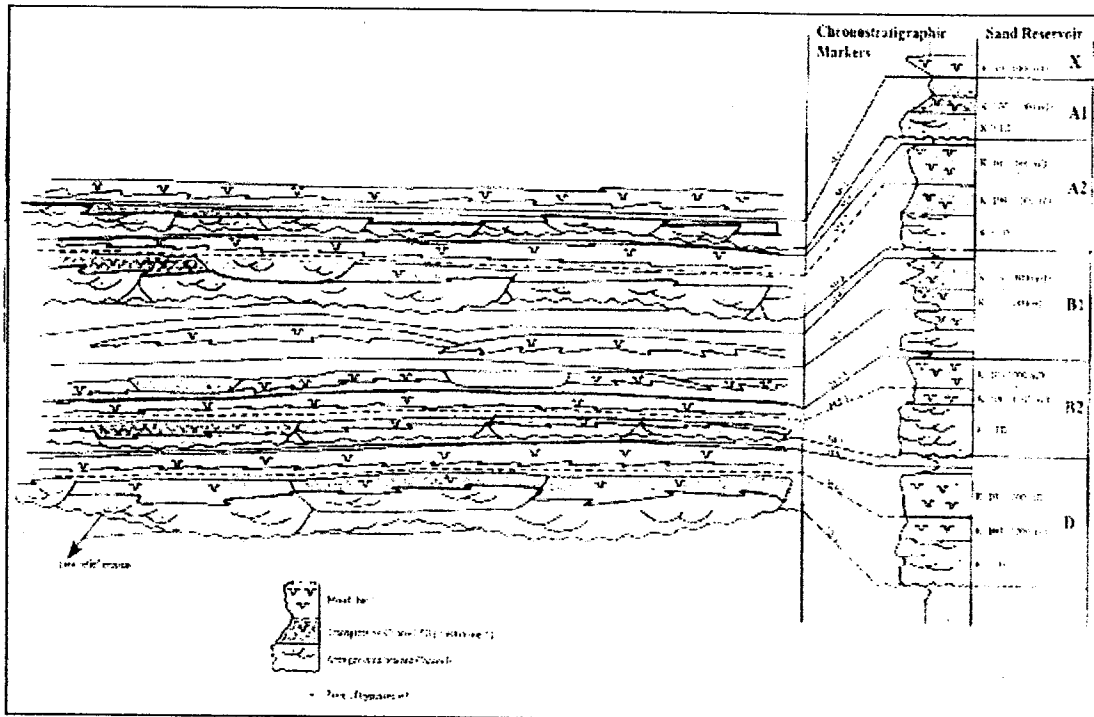


Gambar 4.28. Stratigrafi umum daerah penelitian

Berdasarkan hasil-hasil studi stratigrafi sekuen regional di Cekungan Sumatera Tengah mengindikasikan bahwa tidak semua formasi-formasi diatas berkembang di Minas. Hasan (1976) mengatakan bahwa reservoir minyak utama adalah kelompok Sihapas berumur Miosen. Kelompok Sihapas dapat dibagi menjadi enam satuan listostatigrafi informal yaitu A1, A2, B1, B2, D dan S dengan ketebalan masing-masing satuan reservoir dari beberapa sampai ~24 m. Setiap satuan reservoir dipisahkan oleh lapisan batu lempung dengan ketebalan beberapa sampai ~30,5 m. Di bagian utara lapangan Minas di jumpai batu pasir X yang berkembang diatas batupasir A1. Kelompok Sihapas diperkirakan berada pada kedalaman 600-700m dengan ketebalan sekitar 183m.

Toha, dkk., (1999) telah memodelkan konsep stratigrafi sekuen resolusi tinggi untuk pengelolaan reservoir dan pengembangan lapangan Minas, khususnya area LOSF dan sekitarnya. Tiga facies yang berbeda telah diidentifikasi dalam reservoir unit D, B2, A2, dan A1 yaitu *mouthbar*, *transgressive channel fill*, dan *amalgamated braided*

*channels*. Korelasi facies dengan stratigrafi reservoir diperlihatkan pada Gambar V-3.



Gambar 4.29. Stratigrafi area LOSF dan sekelilingnya (Sumber : Toha, dkk., 1999)

Berdasarkan ketiga facies, Toha, dkk., membedakan aliran menjadi tiga satuan yaitu aliran bawah (permeabilitas > 104 md), aliran tengah (permeabilitas < 103; lebih kecil dari 100 md pada bagian atas) dan aliran atas (permeabilitas > 103 mD pada bagian atas). Pengamatan facies dan karakterisasi reservoir menemukan bahwa endapan facies ukuran halus (finer-grained) seperti saluran *transgressive* dan *mouthbar* adalah saluran utama untuk produksi minyak. Endapan *mouthbar* yang menyelimuti bagian atas reservoir satuan D, B2 dan A2 adalah target yang baik untuk saluran minyak karena reservoir-reservoir tersebut membentuk sebuah permeabilitas cukup tinggi.

#### 4.4.3. Pengamatan gayaberat-mikro dan anomali gayaberat-mikro 4D lapangan

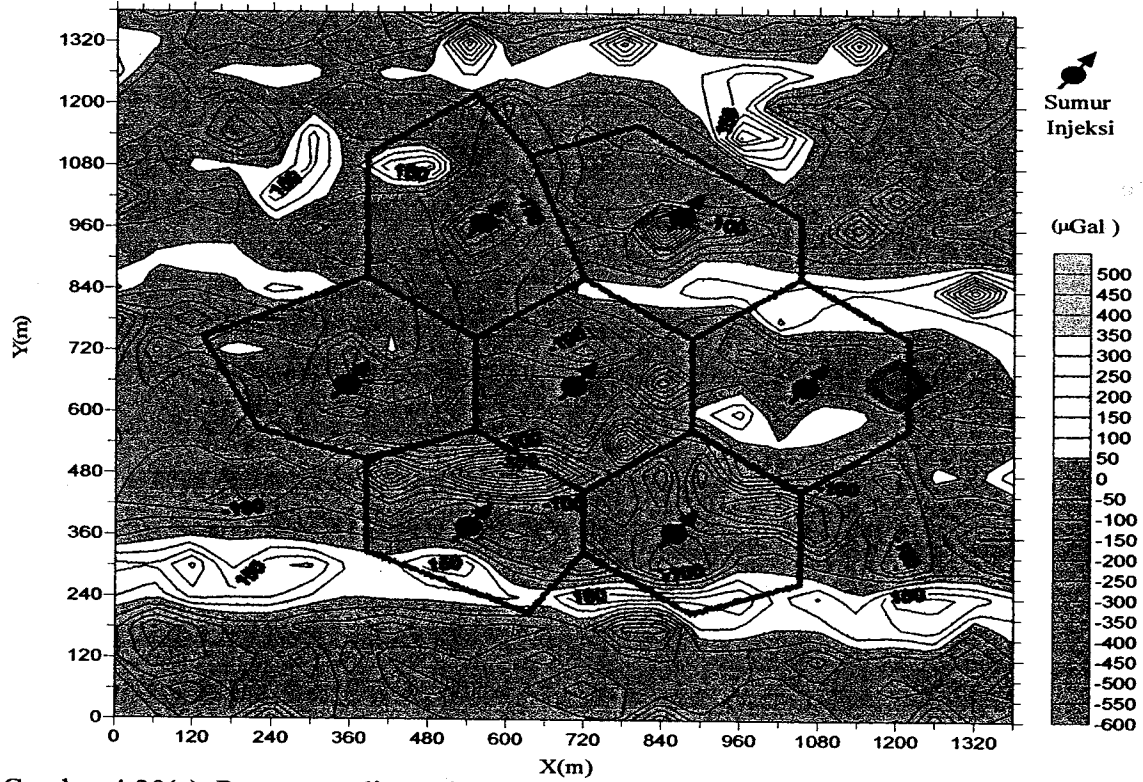
Pengamatan gayaberat-mikro lapangan telah dilaksanakan pada tahun 2001-2002. Daerah yang menjadi target penelitian adalah lintasan seismik 4D LOSF di lapangan Minas, Riau. Pengamatan gayaberat-mikro 4D bertujuan untuk memonitor gerakan uap di daerah LOSF dengan mengamati nilai-nilai gayaberat-mikro di lapangan dalam waktu



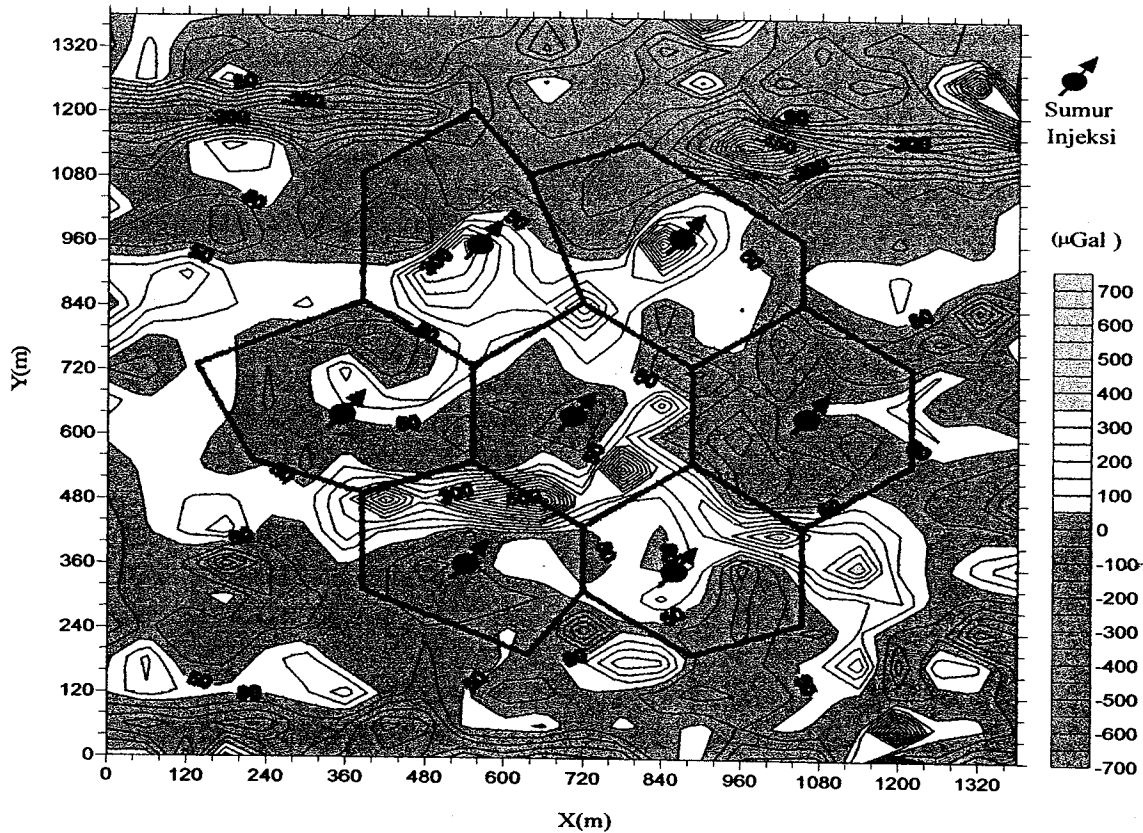
berbeda. Sampai saat ini, pengukuran gayaberat-mikro lapangan yang telah dilakukan adalah tiga kali. Pengukuran pertama dilakukan pada bulan Maret 2001, kedua pada bulan Agustus 2001 dan ketiga pada bulan Januari 2002. Pengumpulan data menggunakan tiga gravimeter LaCoste & Romberg yaitu (1) gravimeter model D nomor seri D117 dengan ketelitian  $5\mu\text{Gal}$ , (2) gravimeter model G nomor seri G 1118 yang dilengkapi dengan sistem feedback dengan ketelitian  $5\mu\text{Gal}$  dan (3) gravimeter model G nomor seri G 565 dengan ketelitian akurasi  $0,01\text{mGal}$  ( $10\mu\text{Gal}$ ). Dua gravimeter yaitu nomor seri G 1118 dan D 117 digunakan sebagai peralatan lapangan dan gravimeter nomor seri G 565 dipasang pada stasiun base untuk mengamati variasi diurnal akibat efek gayaberat yang disebabkan benda-benda angkasa luar. Efek ini biasanya disebut disebut efek tidal. Peralatan lain yang digunakan dalam survai ini adalah dua set GPS dan tiga set peralatan sistem komunikasi *handy talky*.

Pengumpulan data dalam penelitian ini menggunakan “teknik 4D” dimana masing-masing stasiun gaya berat yang tersebar secara teratur di seluruh area diukur dalam selang waktu berbeda. Perbedaan ini disebut anomali gayaberat-mikro 4D yang dapat diinterpretasi sebagai perubahan rapat massa akibat injeksi uap. Pengukuran gayaberat dikontrol dengan mengaplikasikan sistem pengukuran tertutup dimana stasiun base selalu diamati dua kali yaitu sebelum dan setelah pengukuran gayaberat di lapangan. Perbedaan dua pengukuran stasiun base yang telah dikoreksi oleh efek tidal disebut nilai drif dari gravimeter. Pada akuisi data pertama, BS1 dan stasiun Base Kenanga digunakan sebagai stasiun referensi, tetapi pada akuisisi data kedua, BS1 dan stasiun Base Kenanga tidak dapat digunakan sebagai stasiun referensi. Oleh karena itu stasiun base digerakan ke lokasi baru yang terletak ada Base Camp Cereme. Pergerakan ini dilakukan secara sangat hati-hati, karena jika ada perubahan nilai gayaberat sehubungan dengan perubahan nilai base stasiun, akan memberi efek kepada anomali gayaberat 4D area target. Perbedaan nilai gayaberat antara stasiun base Kenanga dan stasiun base yang baru (Cereme), diukur menggunakan dua gravimeter (G 1118 dan D 117) dengan sistem pengamatan tertutup. Perbedaan nilai gayaberat kedua stasiun base tersebut adalah  $0,3025\ \mu\text{Gal}$  yang berarti masih dalam rentangan resolusi alat (kurang dari  $5\mu\text{Gal}$ ).

Berdasarkan ketiga pengumpulan data, didapatkan dua peta anomali gayaberat-mikro 4D lapangan periode Maret 2001-Agustus 2001 dan periode Agustus 2001-Januari 2002 dan hasilnya diperlihatkan pada Gambar V-9.



Gambar 4.30(a). Peta anomali gayaberat-mikro 4D lapangan periode Maret 2001-Agustus 2001



Gambar 4.30(b). Peta anomali gayaberat-mikro 4D lapangan periode Agustus 2001-Januari 2002

Untuk membuktikan hipotesis bahwa tanggapan anomali gayaberat-mikro 4D akan bernilai negatif akibat penggantian minyak dengan uap selama operasi peningkatan produksi minyak dapat dilihat pada salah satu sumur periode Maret 2001-Agustus 2001. Nilai anomali negatif sebesar  $-300\mu\text{Gal}$  s/d  $-600\mu\text{Gal}$  pada salah satu sumur pada Gambar V-9(a) membuktikan hal tersebut. Hipotesis lain yang menyatakan bahwa tanggapan anomali gayaberat-mikro 4D akan bernilai positif bila fase uap berubah menjadi air juga dapat dilihat pada sumur yang sama pada periode Maret 2001-Agustus 2001 yaitu adanya anomali positif sebesar  $+300\mu\text{Gal}$  s/d  $+600\mu\text{Gal}$  pada Gambar V-9(b). Perubahan anomali gayaberat dari negatif menjadi positif berasosiasi sebagai penghentian proses injeksi pada bulan Desember 2001 yang menyebabkan penurunan temperatur dan tekanan di dalam reservoir selama periode penelitian. Seperti telah dibuktikan sebelumnya pada Gambar V-7 bahwa penurunan tekanan dan temperatur reservoir selama operasi peningkatan produksi minyak akan menaikkan nilai rapat massa batuan sehingga kontras rapat massa dalam selang waktu akan bernilai positif.

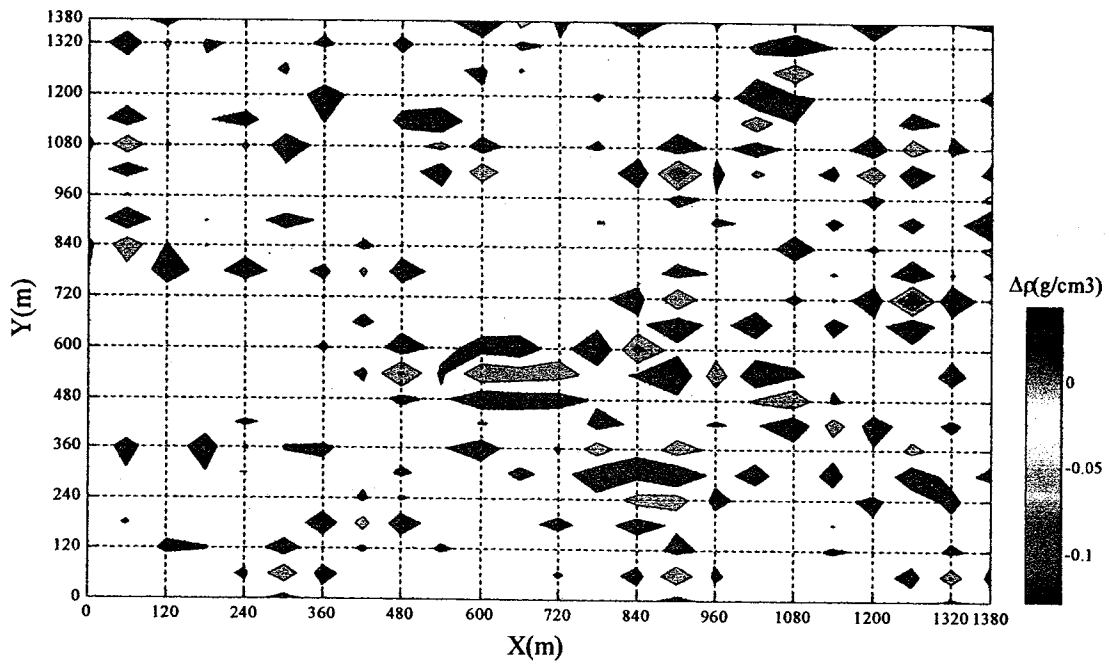
Sumber-sumber lain yang dianggap bising adalah efek tidal, drif, penurunan muka airtanah, subsiden, dan perubahan titik amat secara horizontal. Peta anomali gayabermikro 4D lapangan pada Gambar V-9 adalah peta yang telah dikoreksi terhadap tidal dan drif. Sedangkan efek penurunan muka airtanah sejauh 100cm adalah 12,58  $\mu\text{Gal}$ , subsiden sebesar 1 cm adalah 3,087  $\mu\text{Gal}$  dan perubahan titik amat secara horizontal sejauh 1cm adalah 1 $\mu\text{Gal}$  (Allis dan Hunt 1987, Hare, dkk., 1999; van Galderen, dkk.,1999). Karena efek bising terhadap data cukup kecil maka keberadaan bising dalam penelitian ini dapat diabaikan.

#### 4.4.4. Penafsiran rapat massa

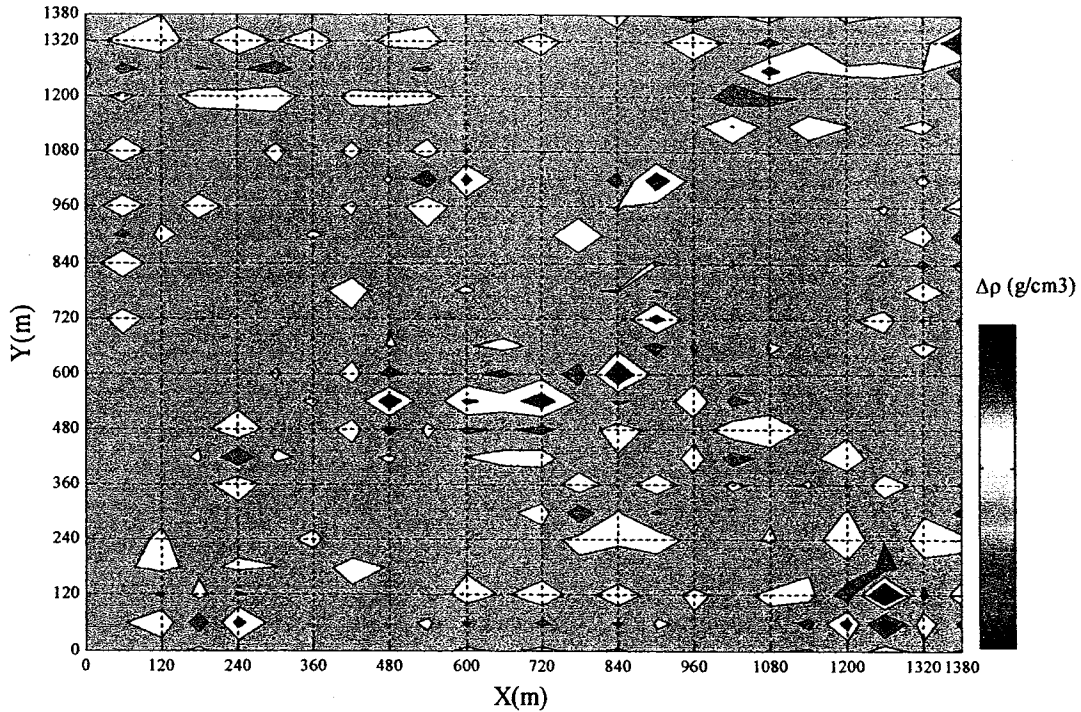
Untuk menggambarkan muka-muka fluida pada kedalaman reservoir, parameter fisika yang digunakan adalah kontras rapat massa. Dalam penelitian ini muka fluida dikontrol oleh nilai kontras rapat massa dalam rentangan  $-0,025 \text{ g/cm}^3$  s/d  $+0,015 \text{ g/cm}^3$  sesuai dengan data-data fisika batuan yang telah dijelaskan pada Gambar V-8. Pada pembahasan sebelumnya sudah dijelaskan bahwa distribusi fluida diperkirakan berada pada bagian atas dari batu pasir unit A2, B2 dan D dari kelompok Sihapas. Kelompok batu pasir tersebut diperkirakan berada pada kedalaman 600m dari permukaan dengan ketebalan 50m. Untuk mendapatkan penyebaran fluida pada kelompok batu pasir tersebut maka didesain sebuah operator dekonvolusi ukuran 61s x 61s dan ditempatkan pada kedalaman maksimum yaitu  $h/s \approx 5$  dimana s adalah jarak grid dengan nilai 120m.

Berdasarkan pengumpulan data pada area seluas 1400m x 1400m, didapatkan data gayabermikro sejumlah 576 stasiun dan data tersebar secara teratur pada grid berukuran 23s x 23s dimana s = 60m. Agar operator dekonvolusi dapat diterapkan pada data lapangan, maka dilakukan pengkisan ulang terhadap data lapangan sehingga didapatkan jarak grid data yang sama dengan jarak grid operator dekonvolusi dan pengkisan ulang mendapatkan grid data baru berukuran 13s x 13s dengan s = 120m. Selanjutnya operator dekonvolusi diterapkan pada grid data baru dan hasilnya memperlihatkan bahwa nilai rapat massa hasil dekonvolusi tidak realistis sehingga hasilnya tidak ditampilkan disini. Sebagai alternatif, upaya lanjutan yang dilakukan adalah memperkecil ukuran operator dekonvolusi sampai mendekati ukuran grid asli yaitu 23s x 23s. Untuk itu operator dekonvolusi didesain ulang pada jarak grid 60m dan ditempatkan pada kedalaman 300m

dengan ketebalan 50m. Untuk meningkatkan kinerja operator dekonvolusi, sebuah konstrain berupa konstanta Laplace  $\lambda=10^{-6}$  ditambahkan pada operator dekonvolusi sesuai dengan kriteria pada Pers. II-10f. Rapat massa hasil dekonvolusi diperlihatkan pada Gambar V-10.



Gambar 4.31(a). Peta kontras rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari peta anomali gayaberat-mikro 4D lapangan periode Maret 2001-Agustus 2001.



Gambar 4.31(b). Peta kontras rapat massa hasil dekonvolusi yang diturunkan dari peta anomali gayabarat-mikro 4D lapangan periode Agustus 2001-Januari 2002.

Nilai rapat massa cukup kecil dapat dicapai pada kedua peta seperti diperlihatkan pada Gambar V-10(a) dan (b), tetapi distribusinya tidak konsisten dengan distribusi data gayabarat lapangan. Hasil-hasil diatas memperlihatkan bahwa sangat sulit menerapkan operator dekonvolusi ideal pada data lapangan karena adanya berbagai keterbatasan pada operator dan pada data lapangan. Ada beberapa penyebab kesulitan tersebut antara lain (1) jumlah data atau ukuran grid data jauh lebih kecil dari ukuran operator dekonvolusi sehingga operator menjadi tidak stabil (2) data gayabarat lapangan kemungkinan terkontaminasi dengan efek benda-benda dangkal seperti ditunjukkan oleh adanya nilai anomali tinggi dengan panjang gelombang pendek di sekitar sumur injeksi. Untuk memecahkan masalah pertama perlu mengembangkan metoda dekonvolusi dengan cara memotong panjang operator sampai beberapa persen sambil menambah resolusi terhadap kedalaman. Untuk menghilangkan anomali gelombang pendek maka perlu menyaring data lapangan dengan teknik tertentu sehingga didapatkan sebuah anomali yang benar-

benar menggambarkan distribusi fluida pada kedalaman 600m. Oleh karena distribusi rapat massa hasil dekonvolusi tidak konsisten dengan distribusi anomali gayaberat lapangan, maka interpretasi pergerakan uap selama operasi peningkatan produksi minyak berdasarkan rapat massa dekonvolusi belum bisa dilakukan.

## BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebuah metoda untuk menganalisa pergerakan uap selama operasi peningkatan produksi minyak dari data anomali gayaberat-mikro 4D telah berhasil dikembangkan. Analisa sifat-sifat fisika batuan dapat memberikan sebuah prediksi terhadap perubahan nilai rapat massa batuan setelah injeksi. Pengujian pada data sintetik menunjukkan bahwa terdapat bentuk pola dan nilai anomali gayaberat-mikro 4D yang berbeda-beda yang disebabkan oleh variasi struktur geologi seperti lapisan tipis horizontal, sesar, graben dan horst dengan asumsi kontras rapat massa adalah konstan. Pemodelan pada data sintetik menunjukkan bahwa nilai anomali gayaberat-mikro selang waktu diatas tiga lebih besar dari ketelitian gravimeter LaCoste & Romberg tipe D yaitu  $10\mu\text{Gal}$ , sehingga rancangan penelitian ini dapat digunakan sebagai studi kelayakan untuk memantau distribusi uap selama operasi peningkatan produksi minyak. Rapat massa hasil dekonvolusi dapat digunakan untuk mendeteksi distribusi fluida pada kedalaman reservoir dibawah kontrol variasi struktur geologi.

Penerapan metoda pada data lapangan menunjukkan bahwa hasil penelitian ini menemukan bahwa anomali gayaberat-mikro 4D bernilai negatif pada periode Maret 2001-Agustus 2001 sebesar  $-300\mu\text{Gal}$  s/d  $-600\mu\text{Gal}$  teramati pada salah satu sumur seperti telah diperlihatkan pada Gambar 4.30(a). Nilai anomali tersebut berubah menjadi  $+300\mu\text{Gal}$  s/d  $+600\mu\text{Gal}$  pada periode Agustus 2001-Januari 2002 seperti telah diperlihatkan pada Gambar 4.30(b). Hal ini dapat diinterpretasi sebagai adanya pergerakan uap dari sumur injeksi ke sumur produksi selama periode Maret 2001-Agustus 2001 dan uap berhenti bergerak selama periode Agustus 2001-Januari 2002 akibat penghentian proses injeksi pada bulan Desember 2001 sehingga uap berubah menjadi air.

Hasil penelitian ini didukung oleh beberapa peneliti sebelumnya yang telah memodelkan dan mengamati tanggapan anomali gayaberat dari zona atau lapisan yang tersaturasi dengan fluida-fluida reservoir seperti gas, minyak dingin, minyak panas, air dingin, air panas, air asin, uap,  $\text{CO}_2$  pada kondisi tekanan, temperatur, saturasi dan salinitas tertentu. McCulloh (1980) dalam Zeng, et.al.,(2002) mencatat bahwa batuan



reservoir berpori tersaturasi dengan minyak dan batuan yang sama juga tersaturasi dengan air dibawah kondisi reservoir yang mempunyai kontras rapat massa cukup besar yaitu ( $0,1-0,3 \text{ g/cm}^3$ ) sehingga dimungkinkan untuk dideteksi dengan gravimeter ketelitian sampai  $10\mu\text{Gal}$ . Yuan, dkk, (1995) dalam Zeng, dkk., (2002) mendeteksi anomali gayaberat-mikro sebesar  $700\mu\text{Gal}$  di lapangan minyak Henan di pusat China yang disebabkan oleh batuan reservoir tersaturasi gas pada bagian yang dangkal dan ia juga mendeteksi anomali gayaberat-mikro sebesar  $257\mu\text{Gal}$  di lapangan minyak Shuanghe yang disebabkan oleh batuan reservoir tersaturasi minyak.

Allis dan Hunt (1986) telah mengamati perubahan anomali gayaberat-mikro sampai  $-1000\mu\text{Gal}$  di lapangan panas bumi Wairakei, Selandia Baru. Perubahan tersebut disebabkan oleh pengurangan saturasi pada zona uap dari 70% pada tahun 1962 menjadi 60% pada tahun 1972. Pertambahan anomali gayaberat pada salah satu sumur bor di bagian utara dan selatan lapangan Wairakei sejak awal tahun 1970-an disebabkan oleh air dingin memasuki zona uap. Selanjutnya, van Galderen, dkk., (1999) mengamati penurunan nilai gayaberat sampai  $45\mu\text{Gal}$  berassosiasi sebagai penurunan tekanan akibat pengambilan gas dilapangan Groningen selama periode 1978-1996. Penurunan nilai anomali gayaberat ini berkorelasi dengan data produksi gas. Lebih lanjut, Eiken, dkk., (2000) mengamati anomali gayaberat-mikro sebesar  $60\mu\text{Gal}$  yang berassosiasi sebagai bidang kontak air-gas sebagai efek kenaikan gelombang air setinggi 10m pada reservoir gas lepas pantai di lapangan Troll.

Penggunaan rapat massa untuk menggambarkan pergerakan fluida pada kedalaman reservoir telah dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu. Schults (1989) telah mendeteksi kontras rapat massa sebesar  $-0,05 \text{ g/cm}^3$  dan  $+0,02 \text{ g/cm}^3$  akibat penggantian minyak dengan gas dan penggantian minyak dengan air selama operasi (sebelum dan setelah) pemompaan minyak menggunakan metoda gayaberat "borehole". Penurunan massa gas dan kenaikan massa air pada salah satu lubang produksi yang sejajar lapisan tersaturasi minyak setelah pemompaan diinterpretasi sebagai penyebab kontras rapat massa bernilai negatif dan positif pada data gayaberat "borehole". Selanjutnya, Hare, dkk., (1999) telah menggunakan konstrain rapat massa antara 0,0 sampai dengan  $0,15 \text{ g/cm}^3$  untuk memodelkan zona "waterflood" pada peningkatan produksi gas dilapangan Prodhoe Bay, Alaska. Muka "waterflood" dikonstruksi menggunakan kontras rapat massa

0,05 g/cm<sup>3</sup> atau saturasi 40%. Penelitian ini menggunakan nilai kontras rapat massa 0,0 s/d -0,04 g/cm<sup>3</sup> untuk memodelkan zona *steamflood* dan nilai kontras rapat massa 0,0 s/d +0,04 g/cm<sup>3</sup> untuk memodelkan zona *waterflood* . Hasil penelitian menemukan bahwa kedua nilai kontras rapat massa dapat diidentifikasi dari rapat massa hasil dekonvolusi seperti yang terlihat pada Gambar 4.31(a) dan (b).

## BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1. Kesimpulan

Berdasarkan kajian pustaka, perumusan metoda dan penerapan metoda pada data sintetik dan lapangan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hubungan antara potensial gayaberat di permukaan dengan rapat massa dibawah permukaan dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan differensial yang mempunyai banyak kemungkinan solusi dimana fungsi Green adalah salah satu solusinya. Jika rapat massa adalah sebuah impuls dan fungsi Green adalah tanggapan dari impuls maka potensial gayaberat di permukaan dapat dinyatakan sebagai hasil konvolusi antara rapat massa dengan fungsi Green dari potensial gayaberat tersebut. Medan gayaberat yang terukur di permukaan dapat diturunkan dari potensial gayaberat dimana hasilnya adalah proses konvolusi antara rapat massa dengan fungsi Green dari medan gayaberat .
2. Kontras rapat massa dibawah permukaan juga dapat diturunkan dari anomali gayaberat yang terukur di permukaan berdasarkan teknik dekonvolusi dimana operator dekonvolusi juga berhubungan dengan fungsi Green.
3. Dua pendekatan ilmiah dipilih untuk mencapai tujuan penelitian yaitu pemodelan dan studi kasus. Pendekatan pemodelan bertujuan untuk mendesain operator dekonvolusi, menguji kinerja operator dekonvolusi, validitas metoda. Sedangkan pendekatan studi kasus bertujuan untuk menerapkan metoda pada kasus data sintetik dan kasus data lapangan.
4. Deskritasi persamaan dekonvolusi data gayaberat berdasarkan fungsi Green memberikan sebuah matrik berstruktur Toeplitz dimana semua elemen-elemen diagonalnya bernilai sama. Pemberian konstrain pada elemen-elemen diagonal matrik berstruktur Toeplitz meningkatkan kinerja dari operator dekonvolusi.
5. Perumusan model numerik memberikan empat kriteria utama untuk menilai kinerja operator dekonvolusi yaitu jumlah total dan jumlah kuadrat total set

koefisien operator dekonvolusi adalah konstan serta resolusi matrik rapat massa dan resolusi matrik operator dekonvolusi adalah satu.

6. Pengujian pada data sintetik berdasarkan kriteria jumlah total dan jumlah kuadrat total set koefisien operator dekonvolusi menemukan bahwa operator ukuran  $11 \times 11$  adalah optimum untuk menafsirkan rapat massa pada kedalaman  $h/s \leq 1$ . Sedangkan pengujian pada data sintetik berdasarkan kriteria resolusi matrik rapat massa dan resolusi matrik operator dekonvolusi menemukan bahwa operator dekonvolusi ukuran  $10 \times 10$  adalah optimum untuk menafsirkan rapat massa pada kedalaman  $h/s \cong 6$ , ukuran  $61 \times 61$  adalah optimum untuk menafsirkan rapat massa pada kedalaman  $h/s \cong 5$ .
7. Pemodelan pada data sintetik menemukan bahwa terdapat bentuk pola dan nilai anomali gayabarat-mikro 4D yang berbeda-beda untuk struktur geologi yang berbeda seperti lapisan tipis horizontal, sesar, graben dan horst. Geometri struktur geologi dapat diidentifikasi berdasarkan rapat massa hasil dekonvolusi dengan asumsi rapat massa model adalah konstan. Hasil pemodelan juga menemukan bahwa nilai anomali gayabarat-mikro 4D selang waktu tiga bulan (sesuai kondisi-kondisi reservoir pada daerah studi kasus) lebih besar dari ketelitian gravimeter LaCoste & Romber tipe D yaitu  $10 \mu\text{Gal}$  sehingga rancangan penelitian ini dapat digunakan untuk memantau penyebaran uap selama peningkatan produksi minyak.
8. Penerapan metoda pada data lapangan menunjukkan bahwa hipotesis yang menyatakan bahwa tanggapan anomali gayabarat-mikro 4D akan bernilai negatif akibat penggantian minyak dengan uap selama operasi peningkatan produksi minyak dapat dibuktikan pada salah satu sumur pada pengamatan selama periode Maret 2001-Agustus 2001. Nilai anomali negatif sebesar  $-300 \mu\text{Gal}$  s/d  $-600 \mu\text{Gal}$  pada salah satu sumur membuktikan hal tersebut. Hipotesis lain yang menyatakan bahwa tanggapan anomali gayabarat-mikro 4D akan bernilai positif bila fase uap berubah menjadi air juga dapat dibuktikan pada pengamatan berikutnya. Hal ini

dibuktikan adanya anomali positif sebesar  $+300\mu\text{Gal}$  s/d  $+600\mu\text{Gal}$  pada sumur yang sama tapi diamati dalam selang waktu berbeda yaitu Maret 2001-Agustus 2001. Perubahan anomali gayabarat dari negatif menjadi positif berassosiasi sebagai penghentian injeksi pada bulan Desember 2001 yang menyebabkan penurunan temperatur dan tekanan di dalam reservoir. Penurunan tekanan dan temperatur reservoir selama operasi peningkatan produksi minyak dapat menaikkan nilai rapat massa batuan.

9. Untuk mendapatkan penyebaran fluida pada kedalaman reservoir 600m didesain sebuah operator dekonvolusi ukuran  $61s \times 61s$  dan ditempatkan pada kedalaman maksimum yaitu  $h/s \cong 5$  dimana  $s$  adalah jarak grid dengan nilai 120m. Namun penerapan operator dekonvolusi pada data lapangan sangat sulit karena adanya berberbagai keterbatasan pada operator dan data lapangan seperti jumlah data atau ukuran grid data jauh lebih kecil dari ukuran operator dekonvolusi sehingga operator menjadi tidak stabil dan data gayabarat lapangan mungkin terkontaminasi dengan efek benda-benda dangkal.
10. Oleh karena distribusi rapat massa hasil dekonvolusi tidak konsisten dengan distribusi anomali gayabarat lapangan, maka interpretasi pergerakan uap selama operasi peningkatan produksi minyak berdasarkan rapat massa dekonvolusi belum bisa dilakukan.
11. Sumbangan utama dari penelitian ini adalah didapatkan sebuah rancangan penelitian baru tentang penerapan metoda gayabarat-mikro 4D untuk memantau penyebaran uap selama operasi peningkatan produksi minyak. Diagram alir dari rancangan penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 2-1.

## **6.2. Saran**

Ada beberapa saran dalam penelitian ini untuk pengembangan metoda lebih lanjut

1. Penelitian pemodelan untuk memperkirakan tanggapan anomali gayaberat-mikro 4D secara teoritik sesuai kondisi-kondisi reservoir sebaiknya dilakukan sebelum pengambilan data lapangan. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan atau memperkirakan efek bising terhadap data.
2. Persamaan umum dekonvolusi perlu dimodifikasi untuk mendapatkan ukuran operator dekonvolusi sesuai dengan kondisi/ukuran lapangan sambil menambah resolusi terhadap kedalaman.
3. Sebagai verifikasi, hasil penelitian ini mesti dibandingkan dengan hasil penelitian geofisika lain di daerah studi kasus seperti survai seismik 4D.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Chalaby, M., 1992, When least-squares squares least: Geophysical Prospecting, 40, p.359-378.
- Allis, R.G., and Hunt, T.M., 1986, Analisis of exploitation-induced gravity changes at Airakei Geothermal Field, Geophisics, 51, 1647-1660
- Allis, R.G., and Hunt, T.M., 1986, Analisis of exploitation-induced gravity changes at Airakei Geothermal Field, Geophisics, 51(8), hal.1647-1660.
- Bee, M.F., Jenkins, S.D., Lyle, J.H., and Murhanto, E., 1994, 4-D Seismic: A powerpul new technology for monitoring steam movement in Duri Field-Dumai-Central Sumatra: 23rd Ann.Conv., Proceedings, Indonesian Petro.Assoc.
- Bhattacharyya, B.K., and Navolio, E., 1975, Digital convolution for computing gravity and magnetic anomalies due to arbitrary bodi, geophysics,40(6), p.981-992.
- Bhattacharyya,B.K., and Chan, K.C., 1977, Computation of gravity and magnetic anomalies due to inhomogeneous distribution of magnetization an density in a localized region, Geophysics, 42(3),1977,p.602-609.
- Bhattacharyya,B.K., and Novalio,M.E., 1976, A fast fourier transform method for rapid computation of gravity and magnetic aniomalies due to arbitrary bodies, Geophysical Prospecting, 24, p. 633-649.
- Bichara., M., and Lakshmanan, J., 1979, Automatic deconvolution of gravimetric anomalies: Geophysical Prospecting, 27, p. 798-807
- Billing., S.D., Minty, B.R., and Newsam, G.N., 2003, Deconvolution and spatial resolution of airborne gamma ray surveys, Geophysics, 68(4), p.1257-1266.
- Blakely, R. J., 1996, Potential theory in gravity dan magnetic application: Cambridge University Press.
- Boas, M.L., 1983, Mathematical methods in the physical sciences, John Wiley & Sons, Singapore.
- Bracewell, N.B., 1978, The Fourier transform and its applications:McGraw-Hill Book Company.
- Buttkus, B., 2000, Spectral analysis and filter theory in applied geophysics, Springer, Berlin..

- Chai, Y., and Hinze, W.J., 1988, Gravity inversion of an interface above which the density contrast varies exponentially with depth, *Geophysics*, 53(6), p.837-845.
- Dimri, V.P., 1992, *Deconvolution and inverse theory: Application to geophysical problems*, Elsevier, Amsterdam
- Dimri, V.P., and Srivastava, K., 1987, Ideal performance criteria for deconvolution operator, *Geophysical Prospecting*, 35, p.539-547
- Eiken, O., Zumberge, M., and Sasagawa, G., 2000, Gravity monitoring of offshore gas reservoir, *Geophysics, The Leading Edge Of Exploration*,
- Eubank, R.T., and Makki, A. C., 1981 Structural geology of the central Sumatra back-arc basin, *Proceedings Indonesian Petroleum Association, Tenth annual Convention*, May, p. 154-196.
- Granser, H., 1985, Deconvolution of gravity data due to lateral density distributions: *Geoexploration*, 23, p.537-547.
- Grant, F. S., dan G. F. West, 1965, *Interpretation theory in applied geophysics*: McGraw-Hill Book Company.
- Hansen, P.C., 2002, Deconvolution and regularization with Toeplitz matrices: *Numerical Algorithms*, 29, p.323-378.
- Hare, J.L., Ferguson, J.F., Aiken, C.L.V., and Brady, J.L., 1999, The 4-D microgravity method for waterflood surveillance: a model study for the Prudhoe Bay reservoir, Alaska, *Geophysics*, 64, 78-87.
- Heidrick, T.L., and Aulia, K, 1993, A Structural and tectonic model of the coastal plains block, central Sumatra Basin, Indonesia, *Proceedings Indonesian Petroleum Association, Twenty Second Annual Convention*, October, p.286-317.
- Hornby, A. S., 1997, *Oxford advanced learner's English-Chinese dictionary*: The Commercial Press dan Oxford University Press.
- Jenkins, S.D. and Atte., M.W.W. and EE, PB., 1997, Time-lapse monitoring for the Duri steamflood : A pilot and case study: *The Leading Edge*, 16(1), p.1267-1274.
- Kadir, W.G.A., Zen, M.T., Hendrajaya, L., Santoso, J., and Sukmono, S., 1995, Peta Variasi Densitas Berdasarkan Dekonvolusi Anomali Gayabarat dan Aplikasinya pada Daerah Tarutung dan Sekitarnya, *Jurnal Teknologi Mineral*, No.3 Vo.II, hal. 51-60.



- Kadir, W.G.A., Zen, M.T., Hendrajaya, L., Santoso, J., dan Sukmono, S., 1995, Peta Variasi Densitas Berdasarkan Dekonvolusi Anomali Gayabarat dan Aplikasinya pada Daerah Tarutung dan Sekitarnya: Jurnal Teknologi Mineral, 2(3). p.51-60.
- La Porte, M., 1963, Calcul de la forme d'une structure homogène à partir de son champ gravimétrique, *Geophysical Prospecting*, 11, p.1271-291
- Menke, W., 1989, *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*: Academic Press.
- Nagy, D., 1966, The gravitational attraction of a right rectangular prism, *Geophysics*, 31(2), p.362-371.
- Plouff, D., 1976, Gravity and magnetic field of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections: *Geophysics*, 41(4), p.727-741.
- Pujiyono and Poernomo, B., 2000, Core-log porosity permeability transform (Minas case study), Proceeding of the twenty-ninth annual convention Indonesian Association of Geologists, Bandung, November 21-22, p. 24-33.
- Rao, B. S., Rama, dan I. V. R. Murthy, 1978, Gravity dan magnetic methods of prospecting: Arnold-Heinemann.
- Robinson, E.A., and Treitel, S., 1980, *Geophysical signal analysis*, Prentice-Hall, Singapore.
- Saggal, M.M., and Toksoz, M.N., 1999, An analysis of deconvolution : modeling reflectivity by fractionally integrated noise: *Geophysics*, 64(4), p.1093-1107.
- Schults, A.K., 1989, Monitoring fluid movement with the *borehole* gravimeter, *Geophysics*, V.54, hal.
- Sheriff, R. E., 2002, *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics*, 4th ed.: SEG.
- Silvia, M.T., and Robinson, E.D., 1979, *Deconvolution of geophysical time series in the exploration for oil and natural gas*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Taylor, H.L., Banks, S.C., McCoy, J.F., 1979, Deconvolution with the  $l_1$ -norm: *Geophysics*, 44(1), p.39-52.
- Telford, W. M., L. P. Geldart, dan R. E. Sheriff, 1990, *Applied geophysics*, 2nd ed.: Cambridge University Press.
- Toha, B, Aulia, K, and Primadi, H, 1999, High resolution sequence stratigraphy of the Minas oil field : A key reference for reservoir management and EOR field development., Proceeding of Indonesian Association of Geologists, Volume III, The

28th Annual Convention, Jakarta, Indonesia, 30 November – 1 Desember, p. 167-182.

Treitel, S., and Lines, L.R., 1982, Linear inverse theory and deconvolution, *Geophysical*, 47(8), p.1153-1159.

Van Galderen, M., Haagmans, R., and Bilker, M., 1999, Gravity changes and natural gas extraction in Groningen, *Geophysical Prospecting*, 47, 979-993.

Watson, O., ed., 1976, *Longman modern English dictionary*: Longman Group Limited.

Wei., W.W.S., 1990, *Time Series Analysis*, Addison-Wesley Publishing Company, Singapore.

Zeng, H., dan Wan, T., 2004, Clarification of the geophysical definition of a gravity field  
Three-dimensional crustal structure in central Taiwan from gravity,  
*Geophysics*,69(5),p.1225-1224

Zhang, J., Wang, C.Y., Shiz, Y., Cai, Y., Chi, W.C., Dreger, D., Cheng, W.B., dan Yuan, Y.H., 2004, Three-dimensional crustal structure in central Taiwan from gravity inversion with a parallel genetic algorithm, *Geophysics*,69(4),2004,p.917-924.

**ANALISIS OPERATOR DEKONVOLUSI DATA GAYABERATMIKRO 4D DAN  
APLIKASINYA UNTUK PEMANTAUAN INJEKSI UAP**

Ahmad Fauzi<sup>a,b</sup>, Wawan Gunawan A.Kadir<sup>b</sup>, Darharta Dahrin<sup>b</sup> dan Djoko Santoso<sup>b</sup>  
a. Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Padang

Jl. Prof Dr. Hamka Air Tawar Padang, 25131, Telp (0751)57420, Fax (0751)55628,

b. Jurusan Teknik Geofisika FIKTM Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha No.10 Bandung, 40132, Telp/Fax.(022)2509168,

e-mail: afz\_id@yahoo.com, wawan@gf.itb.ac.id, dahrin@gf.itb.ac.id, dsantoso@indo.net.id

**Abstrak**

Anomali gayaberat yang terukur dipermukaan dapat dinyatakan sebagai hasil konvolusi antara kontras rapat massa dengan fungsi Green yang berhubungan dengan faktor-faktor geometri seperti kedalaman sumber, ketebalan sumber, spasi grid, dan ukuran grid. Berdasarkan kriteria tertentu, kontras rapat massa dapat pula diturunkan dari anomali gayaberat berdasarkan metode dekonvolusi. Masalah utama yang berhubungan dengan proses dekonvolusi adalah ketidakstabilan akibat inversi. Untuk mengatasi masalah ini, dua kriteria diusulkan yaitu jumlah koefisien dan kuadrat jumlah koefisien adalah konstan. Pengujian pada data sintetik menunjukkan bahwa ukuran operator 9x9s dengan kedalaman z berada pada satu-dua spasi grid s adalah optimum untuk menghasilkan kesalahan terkecil pada penafsiran kontras rapat massa. Penerapan pada data lapangan menunjukkan bahwa operator dekonvolusi memerlukan konstrain-konstrain tertentu untuk mengestimasi kontras rapat massa yang berhubungan dengan penggantian minyak oleh uap selama peningkatan produksi minyak.

*Kata-kata kunci:* Anomali gayaberatmikro 4D, operator dekonvolusi, konstrain, rapat massa, saturasi dan tekanan.

**Abstract**

The gravity anomaly observed in surface can be expressed as the result convolution between the density contrast and Green function related the geometry factors such as the source depth, the source thickness, grid spacing and grid dimension. Base on a given criteria, the density contrast can be so derived from the gravity anomaly using deconvolution method. The principal problem related the deconvolution process is unstable cause inversion. To exceed this problem, two criteria proposed such as the coefficient numbers and the coefficient numbers squared are constant. The synthetics test showed that 9x9s window size with depth z exceeds one-two grid spacing s are optimum to produces the lowest error in the estimated contrast density. Application for the field data showed that the deconvolution operator of time-lapse microgravity data needs some constrains to estimate the contrast density related replacing oil by steam during enhancement oil recovery.

*Key words :* the time-lapse microgravity anomaly, deconvolution operator, constraints, density contrast, saturation and pressure

**I. Pendahuluan**

Pada saat ini telah terjadi perubahan secara mendasar dalam metoda gayaberat karena adanya peningkatan ketelitian alat dan perbaikan teknik survai sehingga metoda ini dikenal dengan metoda gayaberat mikro 4D. Dengan kemampuan seperti ini, metoda gayaberat mikro 4D telah menjadi alternatif baru dalam memecahkan masalah-masalah dinamika dekat permukaan seperti pemantauan reservoir minyak, gas, panas bumi, injeksi uap, injeksi air, penurunan muka air tanah, penurunan muka tanah, dan lain-lain.

Akan tetapi peningkatan dalam ketelitian alat dan perbaikan dalam teknik survai dari metoda tersebut belum ditunjang oleh perbaikan dalam teknik pengolahan dan interpretasi data sehingga penerapannya dirasa masih belum optimal. Oleh karena itu, pengembangan teknik pengolahan dan interpretasi data merupakan hal yang sangat mendesak untuk meningkatkan akurasi metoda tersebut. Salah satu teknik akuisisi dan pengolahan data gayaberat yang paling berkembang pada saat ini adalah teknik dekonvolusi. Hal ini didasarkan atas kenyataan bahwa anomali gayaberat yang terukur dipermukaan dapat dinyatakan sebagai hasil konvolusi antara kontras rapat massa dengan fungsi Green. Penelitian-penelitian terakhir menunjukkan bahwa kontras rapat massa berhubungan dengan perubahan rapat massa minyak, rapat massa uap, porositas, saturasi minyak, saturasi uap, dan tekanan uap didalam reservoir. Sedangkan fungsi

Green berhubungan dengan kedalaman reservoir, ketebalan reservoir, spasi pengukuran dan luas area survei (ukuran grid). Di dalam industri minyak, hasil dekonvolusi dari data gayaberat mikro 4D menjadi sangat penting karena luarannya berupa rapat massa pada kedalaman reservoir lebih mudah berhubungan dengan sifat-sifat fisika batuan seperti porositas, saturasi minyak, saturasi uap dan tekanan uap dari pada nilai anomali gayaberat itu sendiri.

Masalah utama yang berhubungan dengan proses dekonvolusi adalah ketidakstabilan dari operator dekonvolusi karena masalah inversi. Ini berarti diperlukan sebuah persyaratan untuk menurunkan fungsi operator dekonvolusi berdasarkan kriteria dan asumsi tertentu. Beberapa peneliti terdahulu seperti Bichara and Laksmanan (1979) telah menurunkan fungsi operator dekonvolusi data gayaberat 3D dalam kawasan ruang. Sedangkan Granser (1985) dan Kadir, dkk., (1995) telah merumuskan fungsi operator dekonvolusi data gayaberat 2D dan 3D dalam kawasan bilangan gelombang. Meskipun demikian sampai saat ini belum ada peneliti yang secara tegas mendefinisikan ukuran operator dekonvolusi data gayaberat yang optimum agar dapat diterapkan secara langsung pada data lapangan. Tulisan ini mengungkap sebuah analisis operator dekonvolusi data gayaberat 4D dan hasilnya akan diterapkan untuk memantau distribusi rapat massa uap selama operasi peningkatan produksi minyak pada salah satu lapangan minyak di Indonesia.

#### I. Persamaan Dekonvolusi Data Gayaberat Mikro 4D

Efek gayaberat akibat adanya variasi rapat massa bawah permukaan dapat diungkapkan sebagai

$$\Delta g(x, y, z, \Delta t) = G \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta \rho(\alpha, \beta, \gamma, \Delta t)(z - \gamma)}{[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2]^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (1)$$

dimana G adalah konstanta gayaberat umum,  $\Delta \rho(x, y, z, \Delta t)$  adalah kontras rapat massa dalam selang waktu t, (x, y, z) dan ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) adalah koordinat stasiun dan sumber. Integral konvolusi pada pers. (1) dapat ditulis dalam bentuk diskrit

$$\Delta g(x, y, z, \Delta t) = \sum_{\alpha=-\infty}^{+\infty} \sum_{\beta=-\infty}^{+\infty} \sum_{\gamma=0}^{+\infty} \Delta \rho(x, y, z, \Delta t) R(x - \alpha, y - \beta, z - \gamma) \quad (2)$$

atau

$$\Delta g(x, y, z, \Delta t) = \Delta \rho(x, y, z, \Delta t) * R(x, y, z) \quad (3)$$

dimana \* adalah symbol konvolusi, dan  $R(x, y, z) = \frac{Gz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}$  adalah operator konvolusi yang

berhubungan dengan fungsi Green. Proses pengambilan kembali rapat massa dari medan gayaberat disebut dekonvolusi, sehingga pers. (3) dapat ditulis

$$\Delta \rho(x, y, z, \Delta t) = \sum_{\alpha=-M}^{+M} \sum_{\beta=-N}^{+N} \sum_{\gamma=0}^h C(\alpha, \beta, \gamma) \Delta g(x - \alpha, y - \beta, z - \gamma, \Delta t) \quad (4)$$

dimana  $C(\alpha, \beta, \gamma)$  disebut operator dekonvolusi.

Secara analitik, beberapa peneliti terdahulu telah merumuskan fungsi operator dekonvolusi gayaberat baik dalam kawasan ruang maupun bilangan gelombang. Bichara dan Laksmanan (1979) berdasarkan hasil kerja dari La Porte (1963) merumuskan fungsi operator dekonvolusi data gayaberat dalam kawasan ruang menggunakan model lapisan tak hingga

$$\sum_{k=-M}^{+M} \sum_{l=-N}^N C(x, y) = \frac{3}{4\pi l} \quad (5)$$

dimana l adalah ketebalan lapisan. Granser (1985) merumuskan fungsi operator dekonvolusi data gayaberat dalam domain bilangan gelombang menggunakan model lapisan tak hingga

$$C(k) = \frac{1}{2\pi G} \frac{ke^{kh}}{1 - e^{-k}} \quad (6)$$

dimana  $l = h_2 - h_1$  dan  $k = \sqrt{u^2 + v^2}$  adalah bilangan gelombang. Sedangkan Kadir, dkk., (1995) menurunkan fungsi operator dekonvolusi data gayaberat dalam kawasan ruang menggunakan model prisma sisi tegak

$$C(u, v) = \frac{1}{8\pi G} \frac{kuve^{kh}}{(1 - e^{-k}) \sin(\frac{au}{2}) \sin(\frac{bv}{2})} \quad (7)$$



dimana (a,b,l) adalah panjang, lebar dan tinggi prisma. Dengan bantuan hukum Hospital, pendekatan asimtotis terhadap pers. (6) dan (7) dapat ditulis

$$\lim_{k \rightarrow 0} C(k) = \frac{1}{2\pi G} \frac{1}{t} \quad (8)$$

dan

$$\lim_{u \rightarrow 0, v \rightarrow 0} C(u, v) = \frac{1}{2\pi G} \frac{1}{abl} \quad (9)$$

Berdasarkan definisi yang diberikan pers.(6), (8) dan (9) dapat disimpulkan bahwa respon operator dekonvolusi data gayaberat adalah ruang balik dari efek gayaberat yang disebabkan prisma atau lapisan dengan rapat massa satu. Jika ukuran prisma atau tebal lapisan tidak berubah maka respon operator dekonvolusi akan bernilai konstan pada harga limit tertentu.

Wei (1990) mengungkapkan bahwa operator dekonvolusi dikatakan stabil bila set koefisien operator dekonvolusi dapat dijumlahkan secara mutlak, sebagai contoh  $\sum_{\alpha=-\infty}^{+\infty} |C(\alpha)| < \infty$ . Sedangkan Robinson and Treteil (1980) mengungkapkan bahwa operator dekonvolusi akan stabil bila energi atau jumlah kuadrat dari set koefisien operator dekonvolusi berhingga, sebagai contoh,  $\sum_{\alpha=-\infty}^{+\infty} |C(\alpha)|^2 < \infty$ . Berdasarkan kedua kriteria tersebut, kami mengusulkan sebuah kriteria baru untuk kestabilan operator dekonvolusi data gayaberat sebagai berikut

$$\lambda \sum_{\alpha=-M}^{+M} \sum_{\beta=-N}^{+N} \sum_{\gamma=0}^h C(\alpha, \beta, \gamma) = \text{konstanta} \quad (10)$$

dan

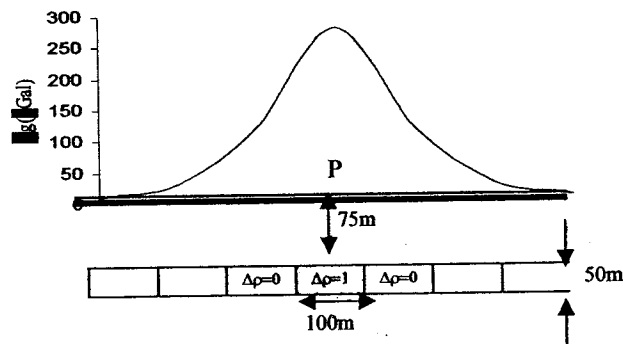
$$\lambda \sum_{\alpha=-M}^{+M} \sum_{\beta=-N}^{+N} \sum_{\gamma=0}^h |C(\alpha, \beta, \gamma)|^2 = \text{konstanta} \quad (11)$$

dimana  $\lambda$  adalah perkalian Lagrange.

### III. Kasus Sintetik, Pembahasan dan Diskusi

#### 3.1. Desain operator dekonvolusi

Untuk menguji kriteria kestabilan operator dekonvolusi data gayaberat pada pers.(10) dan (11) didesain sebuah prisma sisi tegak dengan formula dari Plouff(1976) dan algoritma dari Blakely (1996) serta implementasinya menggunakan MATLAB v.6.1. Sebuah prisma sisi tegak berukuran 100mx100mx50m, rapat massa 1 g/cm<sup>3</sup> dan spasi grid 100m, kedalaman 75m akan digunakan untuk mendesain operator dekonvolusi data gayaberat ukuran tertentu. Respon anomali gayaberat prisma dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Respon anomali gayaberat sebuah prisma sisi tegak  
Untuk memecahkan pers.(4), persamaan ini dapat ditulis sebagai berikut

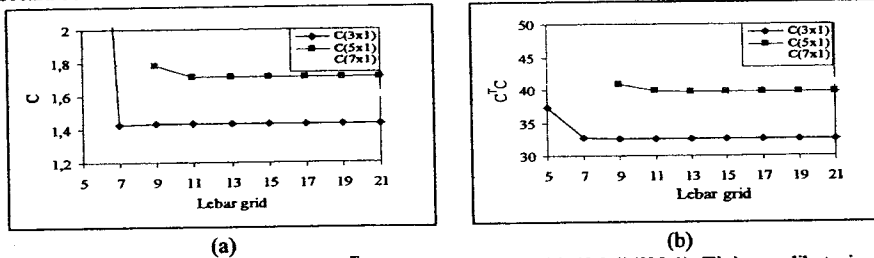
$$\sum_{\alpha=-M}^{+M} \sum_{\beta=-N}^N C(\alpha, \beta) \Delta g(x - \alpha, y - \beta) = 0 \quad \forall (x, y) \neq (\alpha, \beta) \quad (12)$$

$$\sum_{\alpha=-M}^{+M} \sum_{\beta=-N}^N C(\alpha, \beta) \Delta g(x-\alpha, y-\beta) = 0 \quad \forall (x, y) \neq (\alpha, \beta) \quad (12)$$

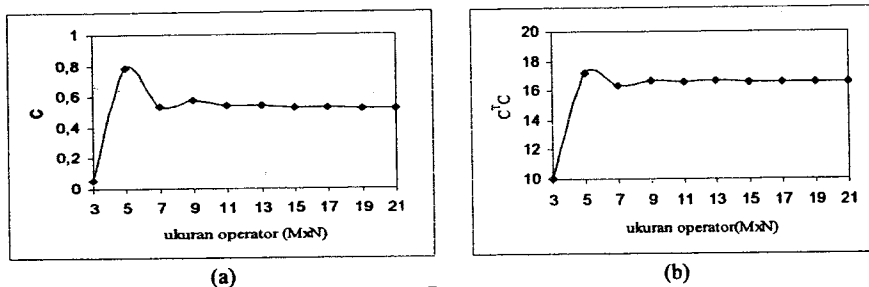
$$\sum_{\alpha=-M}^{+M} \sum_{\beta=-N}^N C(\alpha, \beta) \Delta g(x-\alpha, y-\beta) = 1, \quad (13)$$

dimana  $C(\alpha, \beta)$  adalah matrik ukuran  $(M \times N)$  yang tidak diketahui. Bichara dan Laksmanan (1979) mengatakan jika pers. (4) adalah valid, maka operator dekonvolusi data gayaberat  $C(M \times N)$  hanya bergantung kepada faktor-faktor geometri seperti ukuran grid  $(2M-1)(2N-1)$ , kedalaman prisma  $z$ , ketebalan prisma  $l$ , dan spasi grid  $s$ .

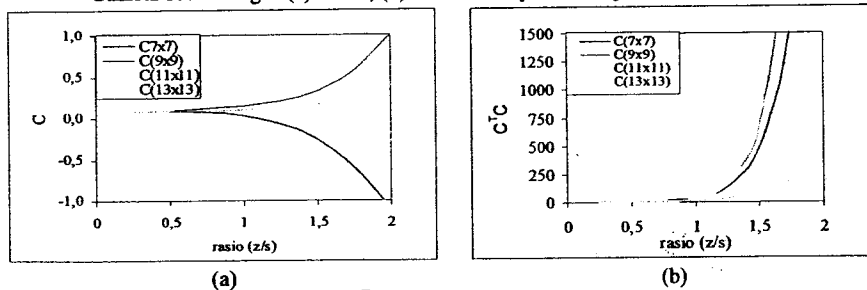
Penelitian ini akan mempelajari perubahan perilaku operator dekonvolusi data gayaberat terhadap variasi ukuran grid, ukuran operator, kedalaman prisma, ketebalan prisma dan spasi grid untuk mendapatkan hasil yang optimum. Perubahan perilakunya diukur menggunakan dua kriteria yaitu jumlah total koefisien operator dekonvolusi ( $C$ ) adalah konstan dan jumlah kuadrat total dari koefisien operator dekonvolusi ( $C^T C$ ) adalah juga konstan. Hubungan antara  $C$  dan  $C^T C$  terhadap ukuran grid  $(2M-1)(2N-1)$ , ukuran operator  $(M \times N)$  dan rasio kedalaman terhadap spasi grid ( $z/s$ ) diperlihatkan pada Gambar 4, Gambar 5 dan Gambar 6, secara berturut-turut.



Gambar 2. Hubungan (a)  $C$  dan, (b)  $C^T C$  terhadap ukuran grid  $(2M-1)(2N-1)$ . Tinjauan dibatasi pada kasus satu dimensi



Gambar 3. Hubungan (a)  $C$  dan, (b)  $C^T C$  terhadap ukuran operator  $(M \times N)$ , dengan  $M=N$ .



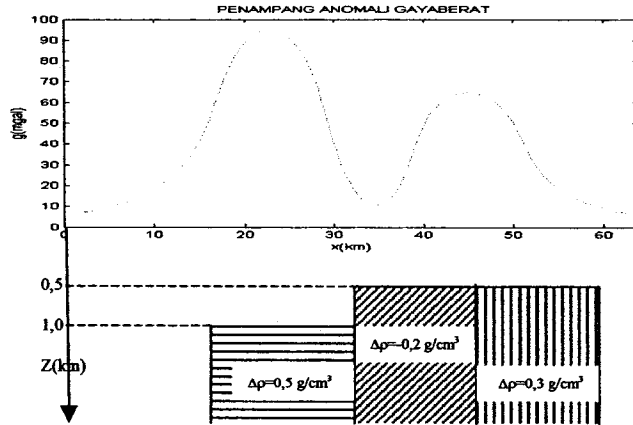
Gambar 4. Hubungan (a)  $C$  dan, (b)  $C^T C$  terhadap rasio kedalaman versus spasi grid ( $z/s$ ) dengan batasan ketebalan  $l$  adalah tetap

Gambar 2 memperlihatkan perilaku  $C$  dan  $C^T C$  terhadap ukuran grid  $(2M-1)(2N-1)$  memberikan hasil relatif konsisten untuk keduanya. Temuan dari penelitian ini adalah ukuran operator  $(M \times N)$  yang diturunkan dari ukuran grid  $(2M-1)(2N-1)$  hanya valid untuk ukuran operator  $7 \times 7$  ke atas, sedangkan

operator ukuran 3x3s dan 5x5s sebaiknya diturunkan dari ukuran grid minimal 7x7s dan 9x9s secara berturut-turut. Hal ini sesuai dengan anjuran inversi bahwa jumlah data gayaberat > jumlah koefisien dekonvolusi yang akan dicari (*overdetermined*)

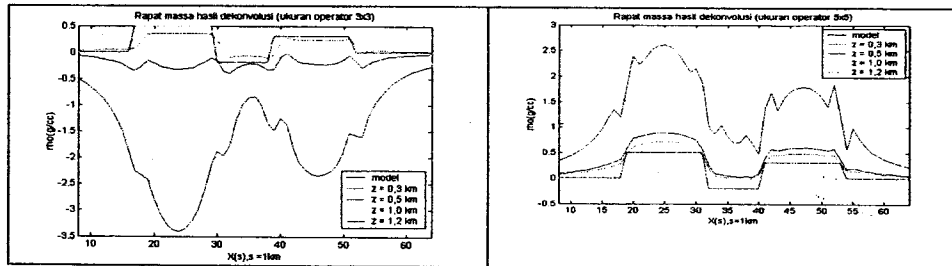
Gambar 3 dan Gambar 4 memperlihatkan hubungan C dan  $C^T C$  terhadap ukuran operator(MxN dan rasio kedalaman versus spasi grid(z/s). Ukuran operator optimum ditemukan diatas 9x9s dengan syarat kedalaman prisma berada dalam rentang spasi grid ( $z/s \leq 1$ ). Hasil ini sesuai dengan peneliti-peneliti terdahulu, seperti Reid, dkk (1990) menemukan ukuran jendela 10x10 untuk mendapatkan hasil-hasil yang bagus. Kadir, dkk, (2000) mendesain operator 10km x 10km untuk menurunkan rapat massa pulau Sumatera pada kedalaman 5 km berdasarkan data gayaberat 3D yang diukur pada jarak 5-10 km. Elawadi et.al., (2002) menemukan ukuran operator optimum untuk model bola pada jarak 10 m untuk data penampang dan 13m x 13m untuk data grid dengan spasi grid 1 m. Sedangkan Fauzi dan Kadir, (2000), Fauzi, dkk., (2000) memperlihatkan parameter-parameter sesar di segmen Kerinci dan Singkarak efektif ditafsirkan pada kedalaman didalam spasi pengukuran 1 km.

Untuk menguji validitas apakah ukuran operator di atas 9x9s dengan kedalaman dalam spasi grid ( $z/s \leq 1$ ) efektif digunakan untuk menafsirkan rapat massa model maka didesain tiga prisma dengan kedalaman, lebar dan rapat massa berbeda-beda seperti diperlihatkan pada Gambar 5.



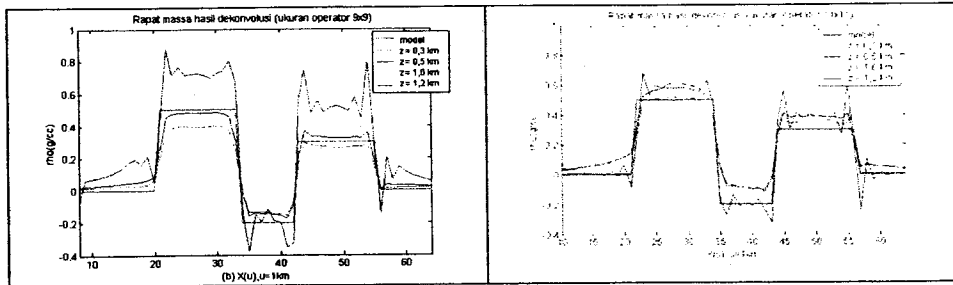
Gambar 5. Respon tiga buah prisma dengan kontras rapat massa masing-masing adalah 0,5 g/cm<sup>3</sup>, -0,2 g/cm<sup>3</sup> dan 0,3 g/cm<sup>3</sup> disusun pada kedalaman 1 km dan 0,5km dengan spasi grid 1 km(Kadir, dkk, 1995).

Untuk menafsirkan rapat massa ke tiga prisma didesain operator dekonvolusi ukuran 3km x 3km sampai 21km x 21km, spasi grid 1 km, rapat massa 1 g/cm<sup>3</sup> dan ketebalan tak hingga. Kriteria yang digunakan untuk memilih rapat massa hasil dekonvolusi terbaik adalah "osilasi" pada saat kedalaman iterasi melewati kedalaman atas prisma. Fenomena "osilasi" ini disebut juga fenomena Gibbs dan telah digunakan oleh peneliti-paneliti terdahulu seperti Bhattacharyya (1965), Ku, dkk., (1971) dan Kadir, dkk., (1995) untuk mengestimasi kedalaman sumber.



(a)

(b)



(c) (d)  
Gambar 6. Rapat massa hasil dekonvolusi menggunakan ukuran operator (a) 3km x 3km, (b) 5km x 5km, (c) 9km x 9km, dan (d) 11km x 11km

Temuan dari penelitian ini adalah rapat massa hasil dekonvolusi untuk operator ukuran 3km x 3km, 5km x 5km dan 7km x 7km tidak berhasil pada saat kedalaman iterasi mencapai puncak prisma sedangkan operator ukuran 9km x 9km sampai 21km x 21km berhasil dengan baik. Ini berarti kriteria yang diberikan oleh pers. (11) dan (12) yang diperlihatkan pada Gambar 2 dan Gambar 3 adalah valid dimana ukuran operator optimum ditemukan di atas 9x9s dengan kedalaman dalam spasi grid ( $z/s \leq 1$ ). Semakin besar ukuran operator, rapat massa hasil dekonvolusi semakin baik. Hal ini sesuai dengan temuan Robinson and Treitel (1980), Dimri (1992), dan Dimri and Srivastava (1987) bahwa panjang operator dapat mengurangi kesalahan estimasi.

### 3.2. Model reservoir

Sesuai dengan tujuan penelitian maka didesain sebuah reservoir yang didekati dengan model prisma sisi tegak. Parameter-parameter prisma seperti kedalaman, ketebalan dan rapat massa prisma berasosiasi sebagai parameter-parameter reservoir yang diturunkan dari sifat-sifat baik reservoir. Tiga konstrain digunakan untuk mempelajari efek gayabarat akibat penggantian minyak dengan uap, perubahan fase uap menjadi air dan perubahan tekanan uap didalam reservoir.

Pertama, massa model dikonstrains menggunakan konsep kesimbangan massa dari Hare, dkk. (1999)

$$\sum_{i=1}^m \rho_i V_i \geq M \quad (14)$$

dimana M adalah massa uap total yang diinjeksikan yang berasosiasi dengan massa minyak yang diproduksi,  $\rho_i$  adalah rapat massa sel-sel prisma dan  $V_i$  adalah volume sel-sel prisma. Misalkan produksi minyak dapat didekati 350.000 barrel/hari (Jenkins, dkk, 1999), maka jumlah massa minyak yang diproduksi diasumsikan sama dengan 4.945.591.091kg massa uap yang diinjeksi selama tiga bulan produksi. Ini akan mengisi volume prisma 660x660x50 m<sup>3</sup> pada kedalaman reservoir 700m dimana rapat massa uap diasumsikan 0,252 g/cm<sup>3</sup>.

Kedua, kontras rapat massa akibat penggantian minyak dengan uap dari Allis & Hunt, (1986), Schon (1996) dan Kadir dan Setianingsih (2003) sebagai berikut

$$\Delta\rho = (\rho_o - \rho_s)\phi(S_o - 1) \quad (15)$$

dimana  $\rho_o$  adalah rapat massa minyak,  $\rho_s$  adalah rapat massa uap dengan  $\rho_o > \rho_s$ ,  $\phi$  adalah porositas batuan reservoir,  $S_o$  adalah saturasi minyak. Misalkan rapat massa minyak pada temperatur 30°C dan 70°C adalah 0.88 g/cm<sup>3</sup> dan 0,70 g/cm<sup>3</sup>, secara berturut-turut, rapat massa uap pada temperatur 93°C dan tekanan 48Mpa adalah 0,252 g/cm<sup>3</sup> dan rapat massa air adalah 1,00 g/cm<sup>3</sup> (Schon, 1996). Dengan asumsi porositas adalah 30%, maka konstrain kontras rapat massa maksimum dapat diprediksi yaitu  $0.00 > \rho_{max} > -0,19$  (g/cm<sup>3</sup>) akibat penggantian minyak oleh uap atau  $0.09 > \rho_{max} > 0,00$  (g/cm<sup>3</sup>) akibat perubahan fase uap menjadi air.

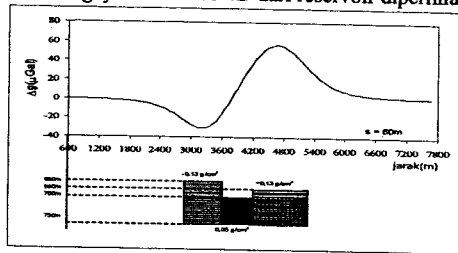
Ketiga, kontras rapat massa akibat perubahan tekanan dari Van Galderen, dkk., (1999) dan Ogata (1995)

$$\Delta\rho = \frac{m}{RT} \Delta P \quad (16)$$

dimana R adalah konstanta gas umum, T adalah temperatur reservoir, m adalah berat molekul fluida, dan P adalah tekanan. Bila terjadi kenaikan tekanan selama operasi peningkatan produksi dengan asumsi temperatur dan berat molekul fluida tetap maka akan menimbulkan efek gayabarat positif di permukaan bila di ukur dalam waktu berbeda.

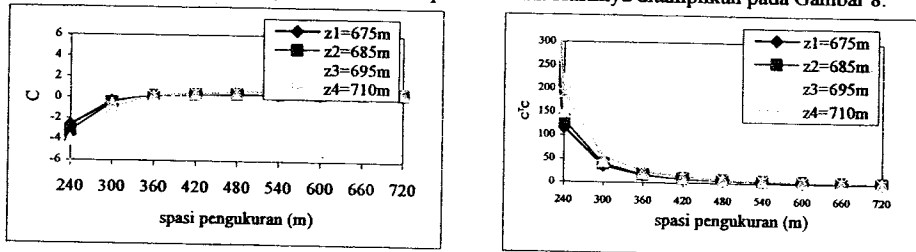


Sebagai studi kasus, penelitian ini akan mengkonstruksi tiga sel prisma ukuran 660mx660mx70m, 540x540x50m dan 900x900x60m pada spasi 60m dan kedalaman reservoir 680m, 700m and 690m secara berturut-turut. Nilai kontras rapat massa adalah  $-0,13\text{g/cm}^3$ ,  $0,05\text{g/cm}^3$  and  $+0,13\text{g/cm}^3$ , secara berturut-turut dan nilai ini menggambarkan efek penggantian minyak dengan uap, perubahan fase uap menjadi air dan perubahan tekanan. Respon anomali gayabermikro 4D dari reservoir diperlihatkan pada Gambar 7.



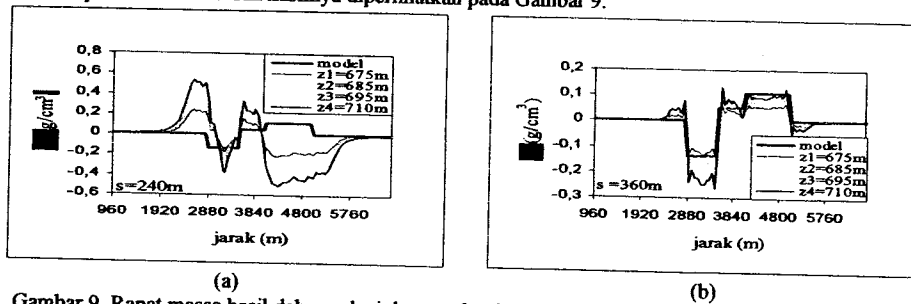
Gambar 7. Respon gayabermikro 4D dari reservoir pada kedalaman 600m-700m dari permukaan dengan ketebalan rata-rata 60m.

Untuk menafsirkan rapat massa pada Gambar 7 didesain sebuah operator dekonvolusi ukuran 660mx660m (11sx11s), spasi grid 60m, rapat massa  $1\text{g/cm}^3$ , ketebalan 60m-70m dengan iterasi kedalaman 675m, 685m, 695m, dan 710m. Sebelum diterapkan, perilaku operator C dan  $C^T C$  dipelajari terhadap spasi grid atau spasi pengukuran dengan iterasi terhadap kedalaman. Hasilnya ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan (a) C dan, (b)  $C^T C$  terhadap spasi pengukuran (dalam spasi grid 60m)

Berdasarkan Gambar 8 nilai C dan  $C^T C$  konstan pada spasi pengukuran diatas 360m, maka dapat disimpulkan bahwa operator dekonvolusi akan efektif bila spasi pengukuran diatas 360m untuk mencapai target kedalaman 700m atau ( $z/s \leq 2$ ). Hasil ini sesuai dengan hasil dari Bhattacharyya (1965), Aldham (1967) dan Ku et al., (1971) bahwa operator lanjutan dibawah akan efektif bila kedalaman sumber berada dalam 1-2 spasi grid. Untuk menguji apakah hasil ini valid, kriteria ini diterapkan untuk menafsirkan rapat massa reservoir pada Gambar 7 dan hasilnya diperlihatkan pada Gambar 9.

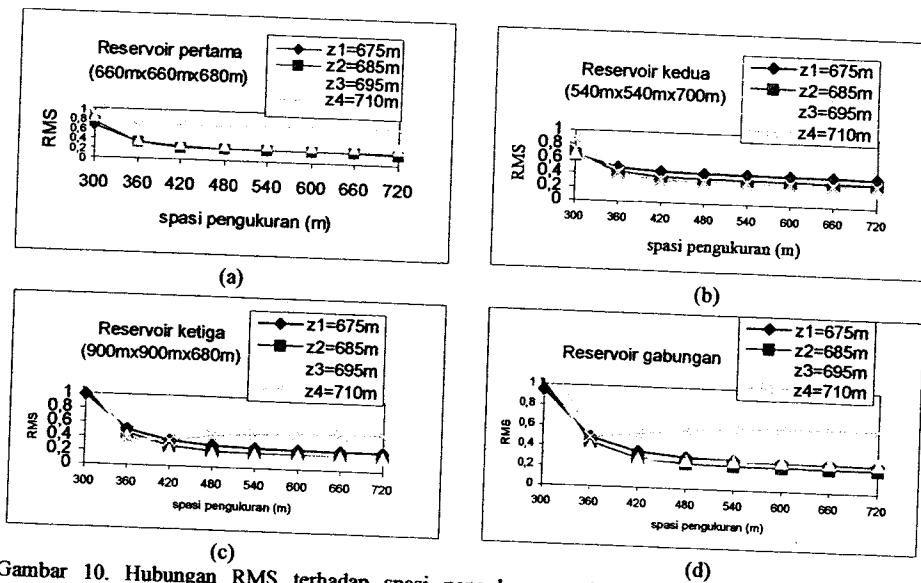


Gambar 9. Rapat massa hasil dekonvolusi dengan desain operator pada (a) spasi grid 240m, (b) spasi grid 360 m.

Temuan dari penelitian ini adalah rapat massa hasil dekonvolusi terbaik ditemukan pada spasi pengukuran diatas 360m sesuai dengan prediksi semula seperti terlihat pada Gambar 9(b) dan spasi grid lebih kecil seperti 240m, hasilnya dapat dilihat pada Gambar 9(a). Tapi kriteria osilasi sulit diterapkan untuk menentukan rapat massa reservoir karena rapat massa berosilasi pada setiap iterasi terhadap kedalaman.

Oleh karena digunakan kriteria tambahan berupa akar kuadrat rata-rata atau RMS (*Root Means Squares*) untuk mengukur perbedaan minimum antara rapat massa hasil dekonvolusi dengan rapat massa model. Kriteria ini juga telah digunakan Lines and Treitel (1982), Dimri and Srivastava (1987), Dimri (1992) dan Saggal and Toksoz (1999) untuk memperoleh luaran hasil dekonvolusi terbaik.

Untuk memudahkan pembahasan, kriteria RMS diterapkan pada masing-masing reservoir seperti diperlihatkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Hubungan RMS terhadap spasi pengukuran pada reservoir (a) 660m x 660m x 70m, (b) 550m x 550m x 50m, (c) 900m x 900m x 60m, dan (d) reservoir gabungan.

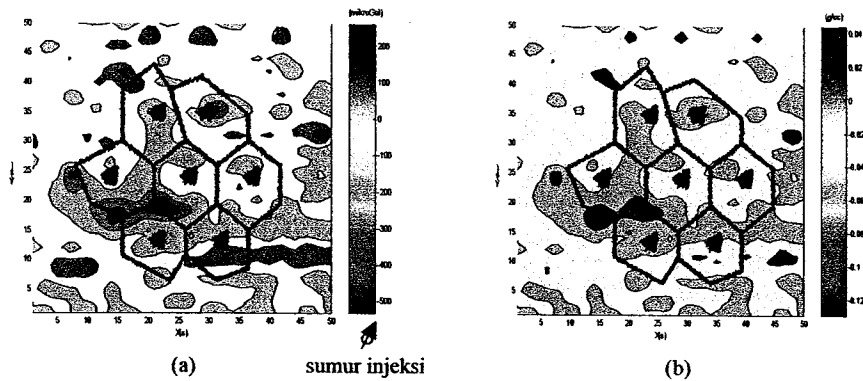
Temuan dari penelitian ini adalah RMS berubah secara berarti pada saat kedalaman iterasi melewati kedalaman atas reservoir dan perubahannya sangat mencolok spasi pengukuran 360m. Berdasarkan hasil-hasil yang diungkapkan diatas dapat disimpulkan bahwa teknik dekonvolusi akan efektif digunakan bila rasio kedalaman reservoir versus spasi pengukuran adalah ( $z/s \leq 2$ ).

#### IV. Contoh Lapangan

Sebagai studi kasus, data gayaberatmikro telah diamati selama periode Maret 2001 dan Oktober 2001 pada salah satu lapangan minyak di Indonesia. Survei mengcover area seluar 1400x1400 m<sup>2</sup> atau (21s x 21s) dengan spasi pengukuran s adalah 60m. Gravimeter yang digunakan terdiri dari gravimeter model G dan D dengan nomor seri D117 dan G1118, secara berturut-turut, dengan akurasi kurang dari 5 $\mu$ Gal. Pengukuran gayaberat dikontrol dengan menerapkan system pengukuran tertutup. Peta anomali gayaberatmikro selang waktu tiga bulan setelah dikoreksi efek tidal dan efek drif ditampilkan pada Gambar 11(a).

Nilai negatif dari anomali gayaberatmikro 4D terlihat pada salah satu sumur. Hal ini mengindikasikan bahwa telah terjadi penggantian minyak dengan uap selama operasi peningkatan produksi minyak, khususnya selama penelitian. Nilai positif dari data anomali gayaberatmikro 4D pada sumur yang lain diduga berhubungan dengan perubahan fase uap menjadi air atau kenaikan tekanan. Ada tiga sumber bising yang mempengaruhi data gayaberatmikro 4D seperti hidrologi dekat permukaan, subsiden, perubahan elevasi. Kadir dan Setianingsih (2003) memprediksi efek gayaberat akibat perubahan hidrologi dekat permukaan adalah 12,58  $\mu$ Gal/m, subsiden adalah 3,087 $\mu$ Gal/cm, dan perubahan elevasi arah horisontal adalah 1,624 $\mu$ Gal/cm sehingga efek bising dapat diabaikan terhadap data. Bila bising mengikuti model *white noise*(WN), maka efek bising dapat dieliminasi menggunakan model stokastik (Fauzi, dkk., 2004).

Untuk mengestimasi rapat massa uap pada daerah studi kasus, didesain sebuah operator dekonvolusi pada kedalaman 700m dan ketebalan 50m. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa operator dekonvolusi tidak efektif bila spasi pengukuran 60m untuk mencapai target pada kedalaman 700m, tetapi bila data digrid pada spasi 360m, hasilnya juga tidak akan efektif karena jumlah data sangat sedikit. Sebagai alternatif, distribusi rapat massa tetap diestimasi dengan teknik dekonvolusi tetapi dengan memasukkan konstrain baru yaitu perkalian Lagrange  $\lambda=10^{-6}$  pada pers. (10) dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 11(b)



Gambar 11 (a) Data anomali gayaberatmikro 4D periode Maret 2001-Okttober 2001 pada salah satu lapangan minyak, dan (b) distribusi rapat massa berdasarkan teknik dekonvolusi.

Nilai kontras rapat massa negatif 0 s/d  $-0,18 \text{ g/cm}^3$  pada salah satu sumur mengindikasikan adanya penggantian minyak dengan uap dan nilai kontras rapat 0 s/d  $0,04 \text{ g/cm}^3$  pada sumur yang lain diduga berhubungan dengan perubahan fase uap menjadi air atau kenaikan tekanan. Tetapi hasil-hasil ini belum diverifikasi terhadap data-data sumur seperti data temperatur dan tekanan.

#### V. Penutup

Metoda gayaberatmikro 4D telah berhasil digunakan untuk memantau peningkatan produksi minyak yang diinjeksi uap pada salah satu lapangan minyak di Indonesia. Hal ini dibuktikan adanya anomali gayaberatmikro 4D negatif yang teramati pada salah satu sumur. Distribusi rapat massa dapat diturunkan dari data gayaberat dengan mendesain sebuah operator dekonvolusi ukuran tertentu. Untuk mendapatkan ukuran yang optimum, operator dekonvolusi didesain menggunakan dua kriteria utama yaitu jumlah total dari koefisien operator dekonvolusi (C) adalah konstan dan jumlah kuadrat total dari koefisien operator dekonvolusi ( $C^T C$ ) juga tetap. Telah diselidiki perubahan perilaku C dan  $C^T C$  terhadap variasi ukuran grid, ukuran operator, kedalaman prisma, ketebalan prisma dan spasi grid. Hubungan antara ukuran operator ( $M \times N$ ) yang diturunkan dari ukuran grid  $(2M-1)(2N-1)$  hanya terpenuhi untuk ukuran operator minimal  $7 \times 7$ s dengan asumsi rasio ( $z/s \leq 1$ ). Sedangkan ukuran operator optimum ditemukan ukuran lebih besar dari  $9 \times 9$ s dengan kedalaman prisma berada dalam rentangan spasi grid ( $z/s \leq 1$ ) atau ( $z/s \leq 2$ ) untuk kasus reservoir. Disamping fenomena "osilasi", perubahan RMS pada saat kedalaman iterasi melewati kedalaman atas reservoir dapat digunakan untuk memilih rapat massa hasil dekonvolusi terbaik. Penerapan pada data lapangan menunjukkan bahwa operator dekonvolusi memerlukan konstrain-konstrain tertentu sehingga distribusi rapat massa dapat ditafsirkan secara akurat. Efek-efek lain seperti perubahan muka air tanah, amblesan, dan perubahan titik amat perlu dipertimbangkan untuk membebaskan bising dari data.

#### Daftar Pustaka

- Allis, R.G., and Hunt, T.M., 1986, Analisis of exploitation-induced gravity changes at Airakei Geothermal Field, *Geophysics*, 51(8), p.1647-1660
- Bhattacharyya, B.K., 1965, Two-dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation, *Geophysics*, 36, p.829-857.
- Bichara, M., and Lakshmanan, J., 1979, Automatic deconvolution of gravimetric anomalies, *Geophysical Prospecting*, 27, hal. 798-807
- Blakely, R.J., 1996, *Potential theory in gravity and magnetic applications*, Cambridge University Press, New York.
- Dimri, V.P., 1992, *Deconvolution and inverse theory: Application to geophysical problems*, Elsevier, Amsterdam
- Dimri, V.P., and Srivastava, K., 1987, Ideal performance criteria for deconvolution operator, *Geophysical Prospecting*, 35, p.539-547
- Elawadi, E., Salem, A., and Ushijima, K., 2003, Imaging of subsurface cavities from microgravity survey data using Euler deconvolution, *Proceeding of SEGJ*.

- Fauzi, A., dan Kadir, W.G.A., 2000, Dekonvolusi Gayaberat 2-D untuk Menafsirkan Kedalaman Sesar di Segmen Kerinci, Kontribusi Fisika Indonesia, Vol.11-Januari 2000
- Fauzi, A., Kadir, W.G.A., Dahrin, D., dan Santoso, D., 2000, Dekonvolusi Gayaberat 2-D untuk Menafsirkan Kedalaman Sesar di Segmen Singkarak, PIT-HAGI ke-25, Bandung, 3-4 Oktober 2000
- Fauzi, A., Kadir, W.G.A., Dahrin, D., and Santoso, D., 2004, A Stochastic Model of Time Lapse Microgravity to Detect the Steam Movement in Minas Field, Riau, Indonesia, the 7th SEGJ International Symposium, Tohoku University, Sendai, Japan, November 24-26, 2004 (accepted)
- Granser, H., 1985, Deconvolution of gravity data due to lateral density distributions, *Geoexploration*, 23, p.537-547
- Hare, J.L., Ferguson, J.F., Aiken, C.L.V., and Brady, J.L., 1999, The 4-D microgravity method for waterflood, surveillance : A model study for the Prudhoe Bay reservoir, Alaska, *Geophysics*, 64(1), p.78-87.
- Jenkins, S.D. and Atte., M.W.W. and EE, PB., 1997, Time-lapse monitoring for the Duri steamflood : A pilot and case study: *Geophysics*, The Leading Edge Of Exploration, September 1997
- Kadir, W.G.A., dan Setianingsih, 2003, Penerapan metoda gayaberat mikro 4D untuk proses monitoring, *Journal JTM Vol. X No.3*, 2003.
- Kadir, W.G.A., Zen, M.T., Hendrajaya, L., Santoso, J., and Sukmono, S., 2000, Density variation with depth of Sumatra (Indonesia) and Its geodynamic implications, *Jurnal Geofisika*, Edisi Tahun 2000, No.1
- Kadir, W.G.A., Zen, M.T., Hendrajaya, L., Santoso, J., and Sukmono, S., 1995, Peta Variasi Densitas Berdasarkan Dekonvolusi Anomali Gayaberat dan Aplikasinya pada Daerah Tarutung dan Sekitarnya, *Jurnal Teknologi Mineral*, No.3 Vo.II, hal. 51-60.
- Ku, C.C., Telford, W.M., and Lim, S.H., 1971, The use of linear filtering in gravity problems, *Geophysical*, 36(6), p.1174-1203.
- La Porte, M., 1963, Calcul de la forme d'une structure homogène à partir de son champ gravimétrique, *Geophysical Prospecting*, 11, p.1271-291
- Ogata, K., 1995, *Modern control engineering*, Second Edition, Printice-Hall, Singapore.
- Oldham, C.H.G., 1967, The  $(\sin x/x)(\sin y/y)$  method for continuation of potential fields, *Mining Geophys.*, 2, p.591-605
- Plouff, D., 1976, Gravity and magnetic field of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections, *Geophysics*, 41(4), p.727-741.
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.J., and Somerton, I.W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, *Geophysics*, 55, p.80-91.
- Robinson, E.A., and Treitel, S., 1980, *Geophysical signal analysis*, Prentice-Hall, Singapore.
- Saggal, M.M., and Robinson, E.A., 2000, A unified framework for the deconvoluiton of traces of nonwhite reflectivity, *Geophysics*, 65(5), p.1660-1676
- Saggal, M.M., and Toksoz, M.N., 1999, An analysis of deconvolution : modeling reflectivity by fractionally integrated noise, *Geophysics*, 64(4), p.1093-1107
- Schon, J.H., 1996, *Physical properties of rocks; fundamentals and principles of petrophysics*, Pergamon
- Treitel, S., and Lines, L.R., 1982, Linear inverse theory and deconvolution, *Geophysical*, 47(8), p.1153-1159.
- Van Galderen, M., Haagmans, R., and Bilker, M., 1999, Gravity changes and natural gas extraction in Groningen, *Geophysical Prospecting*, 47, p.979-993.
- Wei, W.W.S., 1990, *Time Series Analysis*, Addison-Wesley Publishing Company, Singapore.

**TENAGA PENELITIAN**

No.	Nama/Keahlian	Gelar Kesarjanaan (S0,S1,S2,S3)	Tugas Dalam Penelitian	Pria/ Wanita Alokasi Waktu	Unit Kerja Lembaga
1.	Ahmad Fauzi/ Geofisika dan modeling	Drs, M.Si S2	Peneliti utama: Pengarah, koordinator, modeling, evaluasi, penulisan laporan	Pria 30 jam/ minggu	Jurusan Fisika, MIPA UNP, Padang

**TENAGA TEKNISI**

No.	Nama dan Keahlian	Gelar Kesarjanaan (S0,S1,S2,S3)	Tugas Dalam Penelitian	Pria/ Wanita Alokasi Waktu	Unit Kerja Lembaga
1.	Dedy Sukamayadi	SLTA	Operator gravimeter	Pria 15 jam/ minggu	Dept. Teknik Geofisika-ITB