

TOMOGRAPHY



LAPORAN PENELITIAN
DIP UNIVERSITAS AIRLANGGA
TAHUN ANGGARAN 1999/2000

KKC
KK
551. 220 287
Ast.
S-1.

SEISMIK TOMOGRAFI V DENGAN METODE INVERSI ART UNTUK MEREKONTRUKSI STRUKTUR LAPISAN BATUAN BUMI



Peneliti :

SURYANI DYAH ASTUTI, S.Si., M.Si.
Drs. SISWANTO, M.Si.
Drs. DJONI IZAK R., M.Si.

LEMBAGA PENELITIAN UNIVERSITAS AIRLANGGA

Dibiayai oleh : DIP Universitas Airlangga 1999/2000
Nomor SK. Rektor 8402/J03/PP/1999
Nomor Urut : 80

3000 05200 3141

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS AIRLANGGA

Februari, 2000

SEISMIK TOMOGRAFI V DENGAN METODE INVERSI ART UNTUK MEREKONSTRUKSI STRUKTUR LAPISAN BATUAN BUMI

(Suryani Dyah Astuti, Siswanto, Djoni Izak Rudyardjo : 2000, 40 halaman)

RINGKASAN

Tomografi merupakan teknik khusus yang dapat digunakan untuk mendapatkan gambaran bagian dalam dari suatu obyek berupa benda padat tanpa memotong atau mengirisnya. Caranya dengan melakukan pengukuran-pengukuran di luar obyek tersebut dari berbagai arah (atau membuat proyeksi-proyeksi), kemudian merekonstruksi. Di dunia kedokteran, proyeksi dapat dilakukan ke segala arah (360°) sehingga rekonstruksi jaringan dari obyek memberikan hasil yang cukup baik. Tomografi seismik memerlukan cara tersendiri karena keterbatasan dalam melakukan proyeksi. Analisis tomografi seismik merupakan proses inversi yang secara matematis melibatkan optimisasi penyelesaian persamaan linier simultan dan dikerjakan secara iteratif. Satu persamaan mewakili satu sinar seismik yang merambat dari sumber ke penerima melintasi medium yang dibagi dalam bentuk sel-sel kecil. Masing-masing sel mempunyai nilai kecepatan awal tertentu. Optimisasi penyelesaian persamaan linier simultan akan menyebabkan proses iterasinya mengkonvergen secara cepat dan memberikan nilai kecepatan yang diharapkan di setiap sel. Dari rekonstruksi nilai kecepatan tiap sel dapat dipetakan struktur pelapisan batuan berdasarkan besarnya kecepatan gelombang yang melewati batuan tersebut. Hasil dari pencitraan tomografi ini diharapkan dapat menjadi langkah awal pembuatan perangkat lunak prediksi tak langsung sifat reservoir secara lengkap.

Metode tomografi dapat digunakan untuk membantu interpretasi eksplorasi seismik. Metode ini mampu merekonstruksi citra dari struktur dalam bumi berdasarkan perambatan waktu (*travel time*) gelombang seismik antara sumber seismik dan penerima yang diletakkan di permukaan bumi dan di dalam lobang bor. Metode tomografi terdiri dari dua tahapan yaitu pemodelan ke depan (*forward modelling*) yang berupa penelusuran sinar dari sumber ke penerima yang diasumsikan berbentuk garis lurus (*straight line*) dan pemodelan ke belakang (*inversion modelling*) dengan menggunakan metode inversi ART (*Algebraic Reconstruction Technique*).

Dari analisa data lapangan dan hasil rekonstruksi tomografi V dengan metode inversi ART diperoleh citra tomografi berupa pelapisan batuan yang mendatar, yaitu adanya citra dua lapis di mana lapisan teratas mempunyai kecepatan lebih rendah (sekitar 0-200 meter) dibandingkan dengan lapisan di bawahnya (sekitar 600-950 meter). Hasil rekonstruksi cukup baik pada iterasi 1 dan 2 dengan kesalahan rekonstruksi sekitar 0,2. Selanjutnya semakin banyak iterasi, semakin tidak konvergen.

(L.P. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Airlangga :

Nomor SK Rektor : 8402/I03/PP/1999 Tanggal 6 September 1999)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian yang didanai oleh proyek DIP Unair ini.

Dari seluruh kegiatan penelitian yang telah dilakukan penulis, meliputi penelusuran pustaka, persiapan penelitian, pengambilan data, pembahasan dan diskusi serta penulisan laporan hasil penelitian.

Sehubungan dengan terselesaikannya penelitian ini, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ketua proyek DIP Unair, atas kesempatan dan dana yang diberikan pada penulis untuk melaksanakan penelitian ini.
2. Ketua Lembaga Penelitian Unair, selaku pengelola penelitian.
3. Dekan FMIPA Unair, yang telah memberikan ijin dan membantu terlaksanakannya penelitian ini.
4. Laboratorium Fisika Bumi ITB beserta seluruh staf dan asisten fisika bumi atas kesediaannya untuk menyewakan alat dan tempat untuk pengambilan data beserta bantuannya dalam pengambilan data.
5. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya penelitian ini.

Semoga amal baik beliau diterima oleh Tuhan Yang Maha Esa.

Penulis mengharapkan, semoga hasil penelitian ini bermanfaat bagi kemajuan pendidikan dan penelitian, khususnya di Universitas Airlangga.

Laporan penelitian ini tidak luput dari berbagai kesalahan dan kekurangan, maka kritik dan saran yang bersifat positif sangat penulis harapkan demi sempurnanya laporan penelitian ini.

Surabaya, 24 Pebruari 2000

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR IDENTITAS DAN PENGESAHAN.....	ii
RINGKASAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang permasalahan	1
1.2. Perumusan masalah	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Sejarah tumbuhnya teknik tomografi secara umum	10
2.2. Aplikasi tomografi secara umum	11
2.3. Teori dasar seismik tomografi	12
2.4. Transformasi Radon	13
2.5. Teknik ekspansi deret	16
2.6. Proyeksi balik (<i>back projection</i>)	18
2.7. Inversi tomografi metode ART (<i>Algebraic Reconstruction Technique</i>)	19
BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	23
3.1. Tujuan penelitian	23
3.2. Manfaat penelitian	23
BAB IV. METODE PENELITIAN	24
4.1. Pengambilan Data	24
4.2. Tomografi V	24
4.2.1. Pemodelan ke depan (<i>forward modelling</i>).....	24
4.2.2. Pemodelan ke belakang (<i>inversion modelling</i>).....	29
4.2.3. Algoritma pemrograman	29

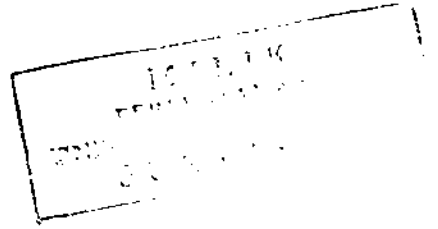
BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN	32
5.1. Data pengukuran di lapangan	32
5.2. Hasil rekonstruksi	33
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN	38
6.1. Kesimpulan	38
6.2. Saran	38
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN I	
LAMPIRAN II	
LAMPIRAN III	
LAMPIRAN IV	

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1. Perbedaan tomografi seismik dengan tomografi di bidang medis	10
Tabel 5.1. Hasil pembacaan seismogram data lapangan setelah dikoreksi	32

BAB I

PENDAHULUAN



1.1. Latar belakang permasalahan

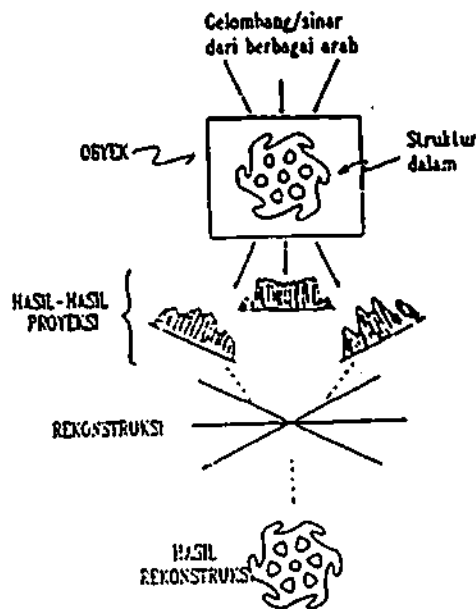
Tomografi seismik merupakan metode pemetaan bawah permukaan yang belum lama digunakan dalam eksplorasi migas, akan tetapi saat ini makin banyak diminati. Metode ini tidak hanya diterapkan untuk kepentingan eksplorasi, akan tetapi juga dapat dipakai untuk kepentingan eksploitasi, misalnya untuk pemetaan porositas reservoir sebelum dan sesudah *CO₂ flooding*. Analisis data seismik secara tomografi dapat diterapkan terhadap gelombang-gelombang transmisi seperti dalam *crosshole seismology* maupun terhadap gelombang-gelombang refleksi. Rekah-rekah (*fracture*) dalam reservoir yang sangat sukar dipetakan dengan refleksi menjadi jelas terpetakan dengan tomografi transmisi. Perkembangan studi mengenai sifat gelombang seismik dalam batuan mengalami kemajuan yang pesat sehingga dapat mendeskripsikan reservoir lebih lengkap, baik struktur batuanya maupun sifat reservoir in situ.

Bahasan mengenai sifat seismik batuan dapat dilakukan pada data lapangan, tetapi akan muncul beberapa ambiguitas dalam memprediksi sifat seismik batuan. Sehingga diperlukan teknik rekonstruksi yang mencerminkan domain spasial. Selain itu studi tentang sifat gelombang seismik berkaitan erat dengan banyak parameter khususnya porositas, saturasi, suhu, kandungan lempung, modulus elastik, permeabilitas, dan frekuensi gelombang. Beberapa parameter tidak bergantung satu dengan lainnya. Penelitian tentang sifat-sifat gelombang seismik dalam lapangan maupun dalam laboratorium diharapkan dapat memberikan informasi lebih banyak tentang karakteristik reservoir, khususnya dalam menentukan sifat reservoir dari gelombang seismik yang melaluinya dengan parameter-parameter di atas.

Tomografi sebenarnya sudah lama dipakai di bidang-bidang lain di luar seismik. Dalam radio astronomi, tomografi telah digunakan sejak tahun 1956, dalam dunia kedokteran, tomografi telah dipraktekkan sejak tahun 1961, dalam mikroskop elektron tiga dimensi, tomografi juga telah dipakai sejak tahun 1968, dalam CT-scanner sinar-X, tomografi mulai dipakai sejak tahun 1973, dalam geotomografi dengan gelombang

elektromagnetik sejak tahun 1977, dan dalam seismology bola bumi, tomografi telah dimanfaatkan sejak tahun 1984.

Pemetaan bagian dalam suatu obyek dapat dilakukan dengan cara memotong atau mengirisnya. Akan tetapi hal ini tidak selalu dapat dilakukan, sehingga diperlukan suatu metode pemetaan bagian dalam tanpa memotong atau merusak obyeknya. Tomografi yang dalam bahas Yunani berarti memotong atau mengiris kemudian diartikan sebagai membuat proyeksi obyek ke suatu arah tertentu. Proyeksi dapat dilakukan dengan jalan memasukkkn gelombang (sinar) ke dalam obyek itu dan mengukur tanggapan (*response*) di luar obyek yang diselidiki tadi.



Gambar 1.1. Prinsip tomografi. Dari sekian banyak hasil-hasil pengukuran (proyeksi) dari berbagai arah ingin digambar struktur dalam obyek

Salah satu teknik rekonstruksi adalah tomografi. Tomografi merupakan teknik khusus yang dapat digunakan untuk mendapatkan gambaran bagian dalam dari suatu obyek berupa benda padat tanpa memotong atau mengirisnya. Caranya dengan melakukan pengukuran-pengukuran di luar obyek tersebut dari berbagai arah (atau membuat proyeksi-proyeksi), kemudian merekonstruksi. Di dunia kedokteran, proyeksi dapat dilakukan ke segala arah (360°) sehingga rekonstruksi jaringan dari obyek memberikan hasil yang cukup baik. Tomografi seismik memerlukan cara tersendiri karena keterbatasan dalam melakukan proyeksi. Analisis tomografi seismik merupakan proses inversi yang secara matematis melibatkan optimisasi penyelesaian persamaan linier simultan dan dikerjakan secara iteratif. Satu persamaan mewakili satu sinar seismik yang merambat dari sumber ke penerima melintasi medium yang dibagi dalam bentuk sel-sel kecil. Masing-masing sel mempunyai nilai kecepatan awal tertentu. Optimisasi penyelesaian persamaan linier simultan akan menyebabkan proses iterasinya mengkonvergen secara cepat dan memberikan nilai kecepatan yang diharapkan di setiap sel. Dari rekonstruksi nilai kecepatan tiap sel dapat dipetakan struktur pelapisan batuan berdasarkan besarnya kecepatan gelombang yang melewati batuan tersebut. Hasil dari pencitraan tomografi ini diharapkan dapat menjadi langkah awal pembuatan perangkat lunak prediksi tak langsung sifat reservoir secara lengkap.

Adapun beberapa keunggulan yang dimiliki metode seismik tomografi adalah sebagai berikut (Aji, 1999),

1. type transmisi data akuisisi bersifat sederhana
2. tertutup terhadap target bawah permukaan
3. algoritma inversinya mempunyai kesamaan inheren
4. hasilnya memiliki presisi dan akurasi yang tinggi

Selain itu, tomografi seismik juga berhasil menggambarkan model struktur kecepatan lapisan bumi, dan model atenuasi batuan, serta migrasi kedalaman yang lebih akurat, memberikan kalibrasi inversi seismik. dan *crosswell* dengan resolusi tinggi (Hariyanto, 1996).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Ide dasar tomografi diawali secara teoritis pada tahun 1917, di mana Radon menunjukkan bahwa jika diketahui proyeksi/penjumlahan lengkap dari semua parameter-parameter suatu obyek, maka dapat dihitung parameter obyek yang bersangkutan. Selanjutnya perkembangan tomografi lebih pesat dalam penerapannya di bidang kedokteran.

Tomografi seismik berarti membuat peta dari potongan melintang bumi dengan menggunakan data seismik. Tomografi seismik merupakan metode pemetaan bawah permukaan yang dapat digunakan untuk eksplorasi migas maupun untuk eksploitasi yaitu pemetaan porositas reservoir. Rekah-rekah (*fracture*) dalam reservoir yang sukar dipetakan dengan refleksi menjadi jelas terpetakan dengan tomografi seismik yang didasarkan pada gelombang transmisi (Sanny dan Sassa, 1996). Seismik tomografi transmisi dianalisis berdasarkan hubungan antara waktu datang gelombang-gelombang yang ditransmisikan dan cepat rambat gelombang di dalam medium yang dilalui (Dines dan Lythe, 1979).

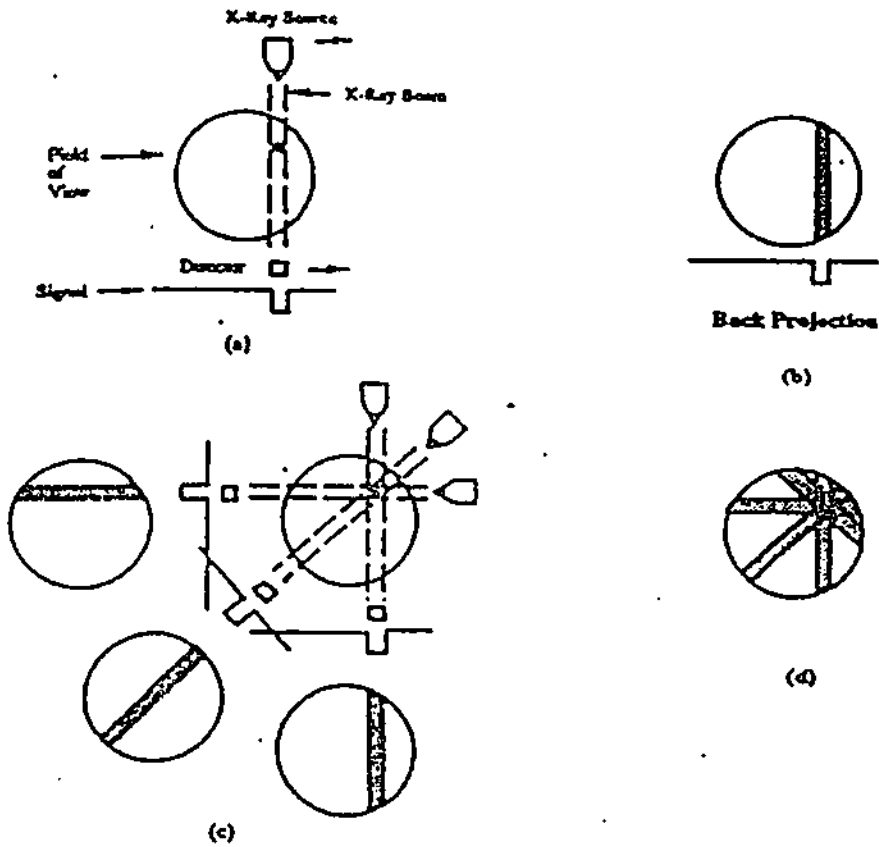
Dalam seismik dikenal tiga macam tomografi, yaitu tomografi yang berdasarkan pada gelombang transmisi (*transmission tomography*), tomografi yang berdasarkan pada gelombang refleksi (*reflection tomography*), dan tomografi yang berdasarkan pada gelombang difraksi (*diffraction tomography*). Tomografi yang berdasarkan gelombang transmisi adalah yang mula-mula dikembangkan sehingga saat ini telah banyak peranannya di industri. Tomografi refleksi yang belakangan dikembangkan lebih dikhususkan untuk memproses atau menganalisis data seismik refleksi. Tomografi yang berdasarkan gelombang difraksi secara konseptual lebih mendasar dan lebih sempurna daripada tomografi refleksi, akan tetapi tidaklah mudah mengisolasi gelombang-gelombang terdifraksi dari rekaman yang ada. Tomografi transmisi dianalisis berdasarkan hubungan antara waktu datang gelombang-gelombang yang ditransmisikan dan cepat rambat gelombang di dalam medium yang dilalui (Bois, et.al., 1971; Dines & Lytle, 1979; Ivanson, 1986). Tomografi refleksi dianalisis berdasarkan hubungan antara waktu datang gelombang-gelombang terpantul dan kedalaman reflektor serta cepat rambat gelombang di dalam medium (Bishop, et.al., 1985; Siword, 1987; Dyer & Worthington, 1988).

Tomografi difraksi dianalisis berdasarkan hubungan antara obyek dan medan gelombang yang terdifraksi (Pan & Kak, 1983; Pratt & Worthington; Justice & Vassiliou, 1990).

Adapun perbedaan antara analisis seismik konvensional dan tomografi seismik, antara lain adalah bahwa seismik konvensional bertumpu pada amplitudo gelombang, sedang tomografi seismik bertumpu pada waktu rambat gelombang. Pada seismik konvensional, lapisan-lapisan batuan dimodelkan sebagai blok-blok yang horisontal dengan sifat-sifat elastik tertentu, sedang pada tomografi seismik model perlapisan batuan berupa sel-sel yang jauh lebih kecil dari pada blok yang masing-masing juga mempunyai sifat-sifat elastik tertentu. Selain itu tomografi seismik sangat memperhitungkan pengaruh sudut datang gelombang (arah proyeksi), sedangkan pada seismik konvensional, pengaruh tersebut hanya dikoreksi (Munadi, 1992).

Tomografi merupakan tipe masalah inversi. Pengukuran pertama kali dibuat dari penjalaran energi melewati suatu medium tertentu. Sifat yang dideteksi oleh penerima (misalnya waktu tempuh) digunakan untuk menduga nilai-nilai yang berhubungan dengan medium yang dilewati. Dalam banyak kasus, perambatan energi melalui medium dapat digambarkan oleh integral atau jumlah parameter-parameter medium. Sehingga permasalahan tomografi adalah menemukan integran dari integral yang diketahui (Stewart, 1991):

Sebagai ilustrasi konsep tomografi, akan ditinjau suatu proyeksi dan rekonstruksi (gambar 2.1). Di sini digunakan sumber sinar-X, obyek dan detektor sinar-X yang terletak berhadapan. Penerima mengukur atenuasi energi dari sinar-X setelah melewati obyek. Total energi sinar-X yang hilang sepanjang lintasannya disebut *projection*. Jadi diproyeksikan kehilangan energi sinar-X setiap titik pada lintasannya dalam medium sampai pada detektor. Pengukuran dan proyeksi ini merupakan bagian observasi atau *forward problem* dari tomografi. Sinar-X yang melewati obyek pada suatu lintasan (*path*) akan memberikan pola (*pattern*) yang sesuai dengan sifat medium yang dilaluinya. Dengan mengubah arah sumber sinar-X dan penerima, akan diperoleh banyak pola dan orientasi yang berbeda-beda. Kombinasi pola-pola ini akan diperoleh tumpukan pola yang menunjukkan gambaran dari obyek yang ditinjau. Walaupun hasil citra yang direkonstruksi dengan proyeksi balik ini tidak pernah sempurna, namun cukup untuk menjelaskan secara garis besar beberapa kasus tertentu.



Gambar 2.1. Proyeksi balik sederhana, (a) penurunan intensitas (atenuasi) sinyal sinar-X direkam ketika suatu obyek menghalangi penjarannya dari sumber ke penerima, (b) hasil atenuasi total sinar-X dari satu obyek diproyeksibalikkan sehingga terdistribusi sepanjang garis pengukuran yang dilakukan, (c) berbagai orientasi sumber-penerima pada anomali obyek yang sama, (d) hasil penggabungan semua garis atenuasi yang menghasilkan pola kabur dari obyek yang bersangkutan

Adapun masalah dasar dalam bidang geofisika adalah menemukan kecepatan yang melewati medium (dalam hal ini bumi) dari waktu tempuh gelombang seismik. Misalnya : waktu tempuh pulsa seismik melalui daerah yang dianggap diskret dalam sel-sel berbentuk persegi panjang. Maka perumusan matematisnya dapat-ditulis sebagai berikut :

$$t = \sum_{i=1}^N p_i d_i \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan t = waktu tempuh dari sumber ke penerima

$p_i = \frac{1}{v_i}$ = *slowness* (kelambatan) yang lewat sel ke-i

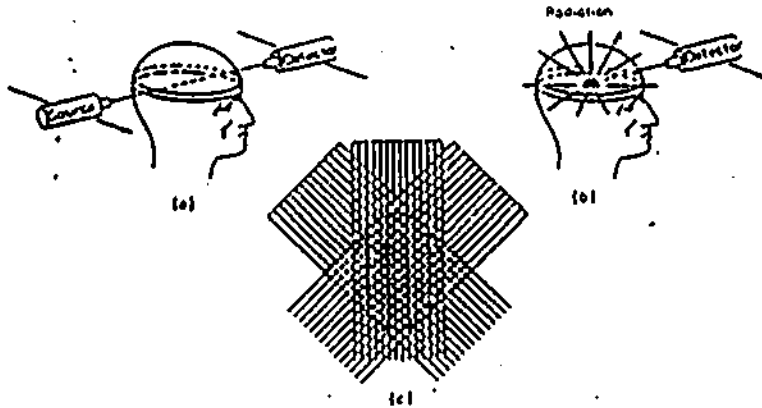
d_i = jarak lintasan pada sel ke-i

N = jumlah sel yang dilewati gelombang

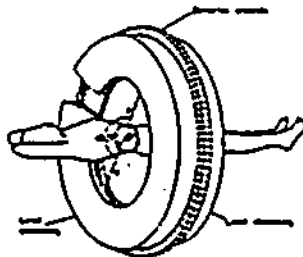
Masalah tomografi waktu tempuh adalah menemukan kelambatan p_i dari beberapa nilai t yang terukur. Jika ada banyak lintasan, maka akan didapatkan satu set persamaan linier yang bisa diselesaikan dengan metode inversi matriks. Masalah inilah yang disebut tomografi atau masalah inversi *travel-time*.

Beberapa alasan mengapa tomografi seismik berkembang lebih lambat dari pada tomografi dalam bidang kedokteran adalah sebagai berikut (Hariyanto, 1996)'

- Tomografi klasik memerlukan distribusi sumber dan penerima yang lengkap mengelilingi obyek, hal ini sulit dilakukan untuk seismik.
- Tomografi di kedokteran biasanya menggunakan sumber sinar-X , pengukuran dan rekonstruksi sistem menggunakan sifat transmisi energi, sedang dalam gelombang seismik selain dipantulkan , gelombang juga dibiaskan dan dilenturkan.
- Ketidaklinearan yang timbul dalam geotomografi yaitu waktu tempuh dari sumber ke penerima adalah integral dari kelambatan sepanjang jejak sinar, namun jejak sinar tergantung pada distribusi kecepatan medium, sehingga untuk melinearisasi diperlukan jejak sinar dengan mengasumsikan bahwa jejak berkas memenuhi persamaan garis lurus.



Gambar 2.2. Prinsip tomografi yang digunakan di kedokteran untuk memetakan struktur di dalam kepala, misalkan otak ; (a) sumber di luar obyek ; (b) sumber di dalam obyek ; (c) contoh proyeksi dari tiga arah



Gambar 2.3. Tomografi untuk memetakan bagian dalam perut manusia. Peralatannya memungkinkan mengitari obyek secara penuh (proyeksi 0-360°)

Adapun perbedaan antara tomografi seismik dengan tomografi di bidang medis diperlihatkan pada tabel 2.1 di bawah ini.

HAL	TOMOGRAFI DI BIDANG MEDIS	TOMOGRAFI DI BIDANG GEOFISIKA
Sumber radiasi	Sinar X atau sinar γ yang mempunyai sifat menjalar dalam lintasan lurus	Gelombang akustik yang mempunyai sifat terpantul, terbias, atau terbaaur oleh perbatasan medium
Parameter terukur	Intensitas radiasi yang terukur pada penerima	Waktu tempuh dari sumber ke penerima untuk energi yang datang pertama kali
Jarak sumber ke penerima	Puluhan sentimeter	Puluhan sampai ratusan meter
Resolusi spasial dari citra	Sub milimeter	meter
cakupan	360°	Secara umum hanya daerah di antara dua sisi (konfigurasi <i>cross-hole</i>) atau 3 sisi (kombinasi <i>cross-hole</i> dan <i>surface-hole</i>)
Geometri	Tertentu (<i>fixed</i>)	Bervariasi untuk tiap aplikasi

Tabel 2.1. Perbedaan tomografi seismik dengan tomografi di bidang medis (Roberts, et al., 1989)

2.1. Sejarah tumbuhnya teknik tomografi secara umum

Ide dasar tomografi diawali secara teoritis pada tahun 1917, di mana Radon menunjukkan bahwa dengan diketahuinya proyeksi atau penjumlahan lengkap dari semua parameter-parameter suatu obyek, maka dapat dihitung parameter obyek yang bersangkutan. Selanjutnya perkembangan tomografi lebih pesat dalam penerapannya di bidang kedokteran. Namun tomografi di bidang geofisika juga berkembang, yang dimulai oleh (Haryanto, 1996),

1. Bois, et.al., 1972, yang menggunakan hasil pengukuran seismik antar sumur (*well to well*) untuk menduga struktur kecepatan medium yang ada di antar kedua sumur,
2. Bernabini dan Borelli, 1974, yang menggunakan data pengukuran *crosswell* antar banyak lubang bor untuk menduga parameter elastisitas dari batuan yang berada di dekat permukaan bumi,
3. Dines dan Lytle, 1979, mempublikasikan tulisan berjudul "*Computerized Geophysical Tomography*",
4. Lytle dan Dines, 1980, mendiskusikan *ray tracing* antar lubang bor untuk menduga citra bawah tanah,
5. Mason, 1981, mencitrakan kecepatan pada lapisan batu bara,
6. McMechan, 1983, mencetuskan ide tomografi untuk *borehole*,
7. 1984, tomografi seismik dibahas secara resmi pada pertemuan SEG di Atlanta,
8. berkembang dengan pesatnya berbagai algoritma rekonstruksi citra, misalnya RAYPT (Singh & Singh, 1991), pemakaian algoritma genetik untuk inversi tomografi dengan menggunakan data seismik refraksi (Boschetti, et.al., 1995). Sehingga rekonstruksi tomografi menjadi teknik standar dalam analisa *crosswell*, di samping digunakan pada analisa kecepatan (data permukaan atau data lubang bor) dan pencitraan.

2.2. Aplikasi tomografi secara umum

Adapun penerapan tomografi secara umum antara lain (Hariyanto, 1996),

1. Pencitraan medis

Dengan menggunakan *computer tomographic scanner* (CT-scan) sebagai bagian dari unit radiologi dan ortopedi. Di sini digunakan sinar-X dan pengukuran atenuasi intensitasnya setelah sinar melewati obyek. Atenuasi ini berkaitan dengan densitas/rapat massa obyek yang bersangkutan

2. Fisika batuan (*petrophysics*)

Rapat massa batuan dapat digambarkan dengan menggunakan atenuasi yang terukur, sehingga dengan mengamati peta rapat massa ini untuk *core*, maka dapat diketahui komposisi mineral dan tekstur dari sampel yang bersangkutan. Atenuasi yang terukur menggambarkan rapat massa batuan atau mineral penyusun *core*

3. Elektromagnetic *crosswell*

Di sini menggunakan dua tipe energi yaitu seismik (elastik) dan elektromagnetik. Gelombang seismik berhubungan dengan parameter elastik dan atenuasi batuan,

sedangkan gelombang elektromagnetik berhubungan dengan sifat konduktivitas dan konstanta dielektrik bahan

4. Kemungkinan keberadaan minyak dalam serpih minyak

Teknik elektromagnetik berguna dalam memonitor proses pematangan termal dalam *oil shale*. Konduktivitas dalam *oil shale* bergantung pada suhu, sehingga dengan merekonstruksi atenuasi yang terdapat dalam pixel-pixel medium dan dilakukan pendugaan konduktivitas masing-masing pixel dapat dipetakan suhunya.

5. Sifat akustik lautan

Kecepatan suara dalam lautan merupakan fungsi dari suhu, salinitas (kadar garam), dan kedalaman. Salah satu tujuan dari tomografi akustik laut adalah menemukan kecepatan air dan kemudian menduga rapat massa dari air tersebut berdasarkan kecepatannya

6. Geofisika bumi secara global

Untuk menduga secara tiga dimensi bumi sebagai obyek, maka dibayangkan sumber dan penerima tersebar mengelilingi bumi dan survey dapat dilakukan. Sumber yang digunakan adalah gempa bumi atau ledakan besar, sedangkan penerima yang digunakan adalah *geophone* atau *accelerometer*. Dengan mengambil data waktu datang dari energi yang melewati bumi oleh gempa dan stasiun pendeteksi, model kecepatan gelombang dalam bumi dapat disusun.

2.3. Teori dasar seismik tomografi

Tomografi merupakan teknik khusus yang dapat digunakan untuk mendapatkan gambaran bagian dalam dari suatu obyek berupa benda padat, tanpa memotong atau mengirisnya, melainkan dengan melakukan pengukuran-pengukuran diluar obyek tersebut dari berbagai arah dan merekonstruksinya.

Tomografi seismik adalah metode untuk merekonstruksi struktur bawah permukaan bumi dengan menghitung waktu tempuh atau amplitudo gelombang seismik yang menyebar ke segala arah, di antara sumber seismik dan penerima yang diletakkan di permukaan bumi atau di dalam lobang bor. Metode ini digunakan untuk mendapatkan penyebaran profil detil dari sifat-sifat fisik batuan seperti kecepatan dan redaman.

Analisa tomografi seismik merupakan proses inversi. Pengukuran pertama diperoleh dari penjalaran energi melewati suatu medium tertentu. Sifat yang dideteksi



penerima (misal waktu tempuh) digunakan untuk menduga nilai-nilai yang berhubungan dengan medium yang dilewatinya.

Metode tomografi terdiri atas dua bagian utama, yaitu pemodelan ke depan (*forward modelling*) dan pemodelan ke belakang (*inversion modelling*). Pemodelan ke depan didasarkan atas perhitungan model, sedang pemodelan ke belakang didasarkan atas selisih keluaran antara hasil pemodelan ke depan dengan data lapangan. Kedua metode perhitungan tersebut dipecahkan dengan metode-metode yang beragam.

Perhitungan pemodelan ke depan dalam tomografi dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa metode di antaranya adalah,

- metode elemen hingga
- metode beda hingga
- metode penelusuran sinar (*ray tracing*)

Sedang perhitungan inversi tomografi terdiri atas beberapa pendekatan matematis, antara lain adalah,

- filter proyeksi balik (*filter back projection*)
- ART (*algebraic reconstruction technique*)
- SIRT (*simultaneous reconstruction reconstruction technique*)
- SART (*simultaneous algebraic reconstruction technique*)
- ILST (*iterative least square technique*)
- SVD (*single value decomposition*).

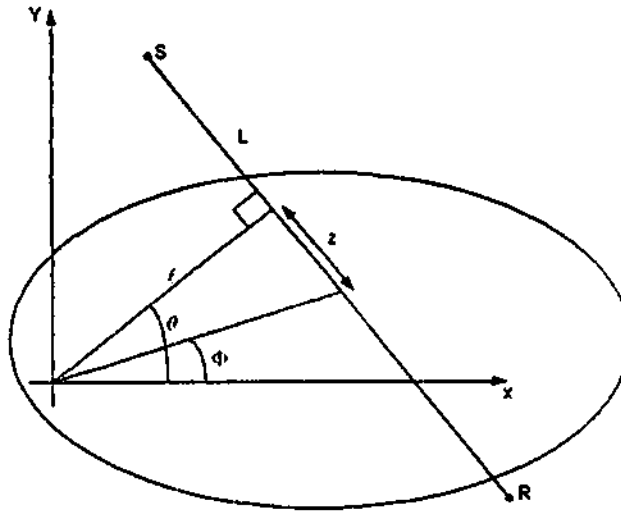
Dalam penelitian ini untuk pemodelan ke depan (*forward modelling*) menggunakan metode penelusuran sinar (*ray tracing*) dan pemodelan ke belakang (*inversion modelling*) menggunakan metode ART (*algebraic reconstruction technique*).

2.4. Transformasi Radon (*Radon Transform*)

Proyeksi ke suatu arah tertentu adalah tanggapan (*response*) obyek terhadap sinar yang dimasukkan ke dalamnya. Tanggapan ini merupakan superposisi dari tanggapan sel-sel yang ada dalam obyek. Proyeksi sepanjang lintasan sumber ke penerima adalah jumlah (integral) dari tanggapan sel-sel obyek yang dilalui sinar.

Secara metodologi, ide geotomografi didasarkan pada proyeksi atau integral dari suatu parameter (kecepatan, amplitudo, atenuasi) sepanjang penjalaran berkas. Proyeksi adalah jumlah dari parameter-parameter obyek sepanjang lintasan energi. Jumlah atau

integral ini dikenal sebagai transformasi Radon. Secara skematik proyeksi atau pengukuran gelombang melintasi medium dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.4. Diagram skematik dari berkas yang menjalar sepanjang medium

Persamaan integral garis dari transformasi Radon sebagai fungsi f adalah (Stewart, R.R., 1991):

$$\{Rf\}(\ell, \theta) = \int_S^R f(r, \Phi) dz \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan $f(r, \Phi)$ = fungsi yang menggambarkan aspek dari obyek yang bersangkutan

ℓ = jarak berkas dari pusat

θ = sudut antara garis ℓ yang tegak lurus L terhadap sumbu-x

$\Phi = \theta - \text{arc tan}(z/l)$

z = jarak dari titik potong dengan garis normal sepanjang berkas L

Dari geometri diperoleh $r^2 = \ell^2 + z^2 = |r|^2$, dengan r adalah vektor posisi pada garis yang didefinisikan sebagai (ℓ, θ) Persamaan 1 dapat dituliskan sebagai :

$$\{Rf\}(l, \theta) = \int_{r, \theta=l} f(\vec{r}) d\vec{r} \dots\dots\dots (2.2)$$

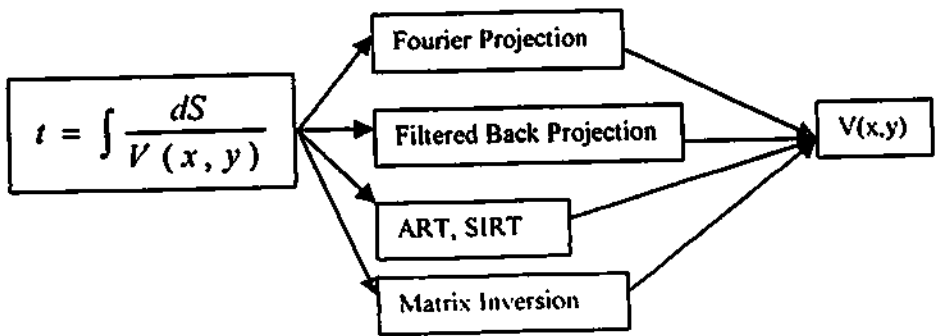
dengan $\hat{\theta}$ = vektor sepanjang garis normal ke L melalui titik pusat.

Untuk mendefinisikan integral garis, transformasi Radon dapat dituliskan sebagai fungsi δ yaitu :

$$[Rf](l, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - l) dx dy \dots\dots\dots (2.3)$$

Transformasi Radon atau proyeksi adalah pengumpulan data (*forward*) dari masalah tomografi. Untuk dapat memetakan bagian dalam dari obyek, hasil-hasil dari proyeksi tadi harus direkonstruksi kembali. Karena proyeksi adalah transformasi Radon langsung, maka untuk merekonstruksi digunakan transformasi Radon balik (*inverse transform Radon*).

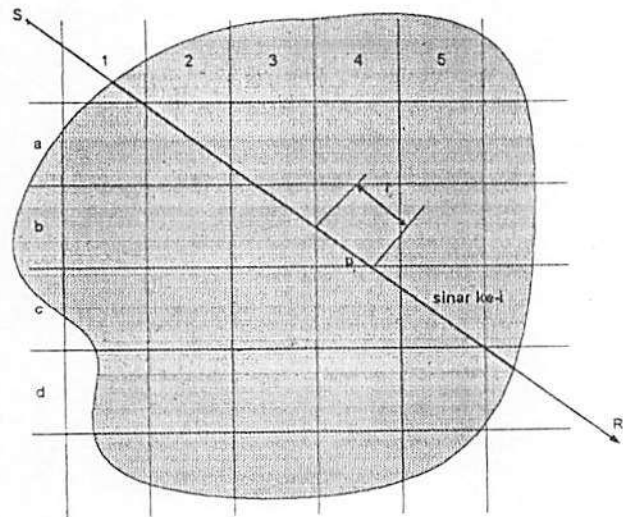
Jadi secara prinsip, tomografi seismik adalah suatu metode inversi data seismik yang bertolak dari suatu rambat gelombang yang teramati (t), kemudian dipetakan secara teliti distribusi kecepatan di bawah permukaan $V(x,y)$.



Gambar 2.5. Skema metode tomografi secara umum.

2.5. Teknik ekspansi deret

Teknik ekspansi deret mengasumsikan obyek sebagai kumpulan dari pixel-pixel atau titik-titik diskret. Energi yang dirambatkan (berbentuk berkas) menuju penerima melewati pixel yang memberikan proyeksi dari nilai-nilai pada masing-masing pixel tersebut. Nilai-nilai pixel dihubungkan secara linear. Berikut skema proyeksi dari sumber ke penerima :



Gambar 2.6. Proyeksi dari sumber S ke penerima R merupakan jumlah beberapa fungsi dari pixel-pixel yang dilewati sinar tersebut.

Pixel ke-j mempunyai tinggi h_j dan panjang l_j . l_j^i menunjukkan jarak yang ditempuh sinar ke-i melewati pixel ke-j, dan p_j merupakan parameter yang menggambarkan sifat pixel (pada aplikasi seismik p adalah kelambatan). Jika panjang total sinar ke-i adalah L^i , waktu tempuh sinar ke-i yang datang ke penerima adalah jumlah waktu tempuh masing-masing pixel yang dinyatakan :

$$t^i = l_1^i p_1 + l_2^i p_2 + \dots + l_M^i p_M \dots \dots \dots (2.4)$$

$$= \sum_{j=1}^M l_j^i p_j \dots \dots \dots (2.5)$$

dengan M : jumlah pixel dalam obyek.

i : sinar

j : pixel

Sinar tidak menjalar melewati setiap pixel pada obyek yang ditinjau, melainkan hanya melewati sebagian kecil dari pixel yang ada, sehingga banyak l'_i bernilai nol.

Jika ada N konfigurasi posisi sumber-penerima, maka waktu tempuh yang dihasilkan masing-masing konfigurasi posisi tersebut diberikan oleh deretan persamaan linear sejumlah N buah yaitu :

$$l^1 = l^1_1 p_1 + l^1_2 p_2 + \dots + l^1_M p_M$$

$$l^2 = l^2_1 p_1 + l^2_2 p_2 + \dots + l^2_M p_M$$

$$l^N = l^N_1 p_1 + l^N_2 p_2 + \dots + l^N_M p_M \dots\dots\dots(2.6)$$

Dalam representasi matriks dapat ditulis sebagai :

$$T = A p \dots\dots\dots(2.7)$$

Dengan T = vektor waktu tempuh
 A = matriks lintasan geometri
 p = vektor kelambatan

Jika yang dicari kelambatannya (p), maka ;

$$p = A^{-1} T \dots\dots\dots(2.8)$$

Yang berarti bahwa persoalan geofisika mencari nilai-nilai kelambatan (p) berubah menjadi persoalan matematik menyelesaikan matriks inversi. Dalam prakteknya persamaan (2.8) sukar diselesaikan karena matriks inversinya tidak stabil, sehingga penyelesaiannya didekati dengan azas kuadrat terkecil (*least square error*).

$$p = (A^T A)^{-1} A^T T \dots\dots\dots(2.9)$$

$$D_1 p_1 = l_1^1 p^1 + l_1^2 p^2 + \dots + l_1^N p^N$$

$$D_2 p_2 = l_2^1 p^1 + l_2^2 p^2 + \dots + l_2^N p^N$$

$$D_M p_M = l_M^1 p^1 + l_M^2 p^2 + \dots + l_M^N p^N \dots\dots\dots (2.11)$$

Dalam bentuk matriks :

$$D_p = A_T p \dots\dots\dots (2.12)$$

Sehingga :

$$D_j p_j = \sum_1^N L_j^i p^i \dots\dots\dots(2.13)$$

$$D_j p_j = \frac{\sum_1^N l_j^i p^i}{\sum_{i=1}^N l_j^i} \dots\dots\dots(2.14)$$

2.7. Inversi tomografi metode ART (*Algebraic Reconstruction Technique*)

Inversi tomografi ART didasarkan pada pemecahan sekumpulan persamaan linear. Pada algoritma ART, pertama dihitung selisih antara data lapangan dengan data sintetik yang dibuat dengan pemodelan ke depan. Perbedaan keluaran antara kedua metode tersebut ditambahkan pada parameter metode ke depan (kecepatan pada tomografi V dan atenuasi pada tomografi Q). Hasil koreksi parameter tersebut ditambahkan pada parameter model dan dilakukan perhitungan dengan pemodelan ke depan untuk sinar gelombang berikutnya. Proses tersebut dilakukan lengkap hingga sebagian besar sinar menjangkau setiap pixel. Jika sumber telah didegenerasi pada seluruh kedalaman lobang, maka satu langkah iterasi telah dikerjakan.

Penurunan matematik algoritma ART dinyatakan oleh persamaan-persamaan berikut :

$$t^i = \sum_j l'_j p_j \dots\dots\dots (2.15)$$

dengan t^i = waktu tempuh sinar ke-i melewati pixel ke-j
 l'_j = panjang lintasan sinar pada pixel ke-j sinar ke-i
 p_j = kelambatan dari pixel ke-j

Selanjutnya :

$$\Delta t^i = \sum_j \frac{\partial t^i}{\partial p_j} \Delta p_j \dots\dots\dots (2.16)$$

Persamaan (2.15) dapat dinyatakan sebagai :

$$\Delta t^i = \sum_j l'_j \Delta p'_j \dots\dots\dots (2.17)$$

Sehingga :

$$\frac{\partial t^i}{\partial p_j} = l'_j \dots\dots\dots (2.18)$$

Untuk sinar ke-i, Δt^i adalah perubahan dalam t^i (misal $t^i_{k+1} - t^i_k$) yang berhubungan dengan perubahan parameter p'_j untuk waktu k+1 dimana p'_j berubah (misal $\Delta p'_j = p'_j(k+1) - p'_j(k)$).

Persamaan (2.17) diselesaikan dengan kendala (*constraint*) bahwa magnitudo dari perubahan dalam p'_j harus diminimalisasi.. Sehingga minimalisasi fungsi :

$$M = \sum_j (\Delta p'_j)^2 \dots\dots\dots (2.19)$$

Persamaan (2.17) harus diminimasi dengan menggunakan Lagrange Multiplier (Al-Yahya, 1985 op.cit Stewart, 1991), sehingga persamaan (2.19) menjadi :

$$K = \sum_j [(\Delta p_j)^2 - \lambda l'_j \Delta p'_j] + \lambda \Delta t' \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

Dengan memperhatikan parameter-parameter yang berubah, maka :

$$\frac{\partial K}{\partial \Delta p'_j} = [2(\Delta p_j) - \lambda l'_j] = 0 \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

Substitusi persamaan (2.21) ke dalam persamaan (2.17) diperoleh :

$$\Delta t' = \sum_j \frac{\lambda l'_j{}^2}{2} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

Dengan λ konstanta, maka :

$$\lambda = \frac{2\Delta t'}{\sum_j l'_j{}^2} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

Substitusi persamaan (2.23) ke persamaan (2.22) diperoleh :

$$\Delta p'_j = \frac{\Delta t' l'_j}{\sum_j l'_j{}^2} \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

Persamaan (2.24) adalah persamaan dasar inversi tomografi dengan metode ART. Setiap kali sinar selesai dibuat, parameter kelambatan diubah dengan menambahkan perubahan yang dihitung dari persamaan (2.24). Proses tersebut diulang dengan mengubah posisi sumber gelombang. Setelah selesai satu set penembakan dengan menempatkan sumber pada setiap posisi kedalaman, proses diulangi ke posisi sumber semula. Demikian proses tersebut dilakukan berulang-kali hingga tercapai konvergen.

BAB III

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1. Tujuan penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah ,

- (1). membuat perangkat lunak metode tomografi seismik untuk rekonstruksi pelapisan batuan.
- (2). merekonstruksi pelapisan batuan dengan metode seismik tomografi V dan inversi ART (*Algebraic Reconstruction Technique*)
- (3). mempelajari karakteristik batuan dengan gelombang seismik.

3.2. Manfaat penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi langkah awal pembuatan perangkat lunak prediksi tak langsung sifat reservoir secara lengkap. Selain itu dengan metode tomografi seismik diharapkan dapat dicitrakan lapisan bumi dalam tiga dimensi, sehingga dapat digunakan untuk kepentingan eksplorasi dan eksploitasi sumber daya alam.



BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1. Pengambilan data

Pada penelitian ini akan digunakan tomografi V dengan metode inversi ART untuk analisa data. Adapun pengambilan datanya menggunakan konfigurasi *surface - hole* yaitu menggunakan satu lubang sumur. Sumber gelombang bunyi diletakkan pada permukaan tanah dan hidrophone untai sebagai penerima diletakkan dalam lubang sumur. Lubang sumur ini mempunyai kedalaman maksimum 40,6 meter. Sumber getaran digunakan palu dan mercon. Jumlah sumber yang diberikan 12 kali dengan delta jarak sebesar 1 meter. Penerima yang digunakan adalah berupa hidrophone untai sejumlah 12 buah. Waktu tempuh sinar gelombang untuk menjalar dari sumber ke penerima direkam dengan seismogram. Data yang diolah adalah waktu tiba pertama (*first break arrival*) dari rekaman seismogram. Waktu tiba pertama ini sebagai waktu tempuh untuk input pada program pemodelan ke depan. Skema pengambilan data di lapangan untuk skala eksplorasi yang besar ditunjukkan oleh gambar 4.1.

4.2. Tomografi V

4.2.1. Pemodelan ke depan (*Forward Modelling*)

Pemodelan ke depan tomografi V menggunakan metode penelusuran sinar (*ray tracing*). Penelusuran sinar dengan menggunakan *grid point* secara umum dibuat dengan menggunakan penyelesaian persamaan defferensial sinar. Persamaan sinar ini diturunkan dari persamaan Eikonal:

$$\nabla\left(\frac{1}{V}\right) = \frac{d}{dS}\left(\frac{1}{V} \frac{dr}{dS}\right) \dots\dots\dots(4.1)$$

dengan : V = kecepatan penyebaran
 r = vektor posisi dari sinar
 S = panjang sinar

Dan persamaan yang dikenalkan oleh Bois et.al. (1971) sebagai berikut :

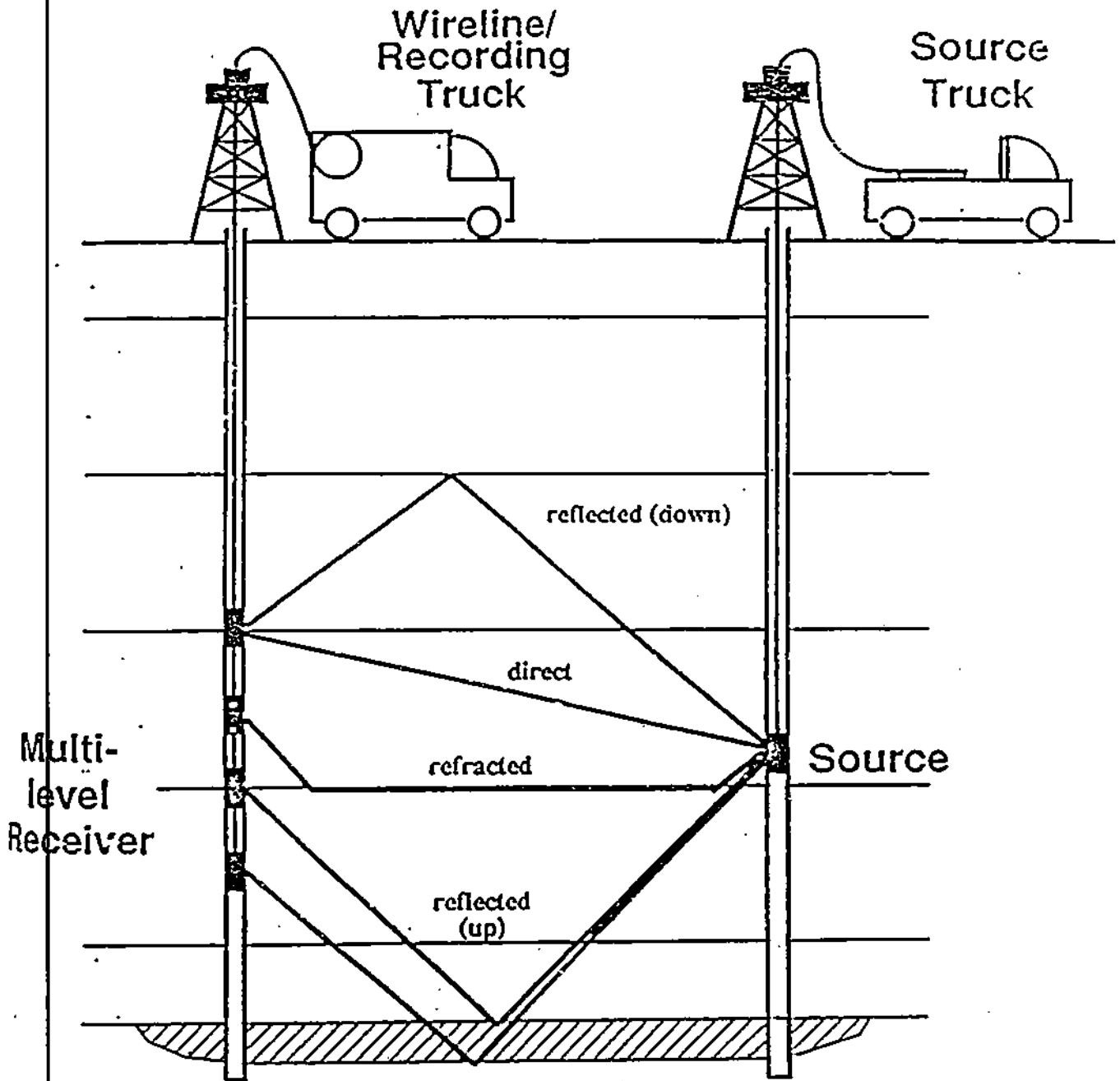
$$d\alpha = |\nabla V \cdot dS|/V \dots\dots\dots(4.2)$$

dengan α = sudut kemunculan
 dS = vektor elemen sinar

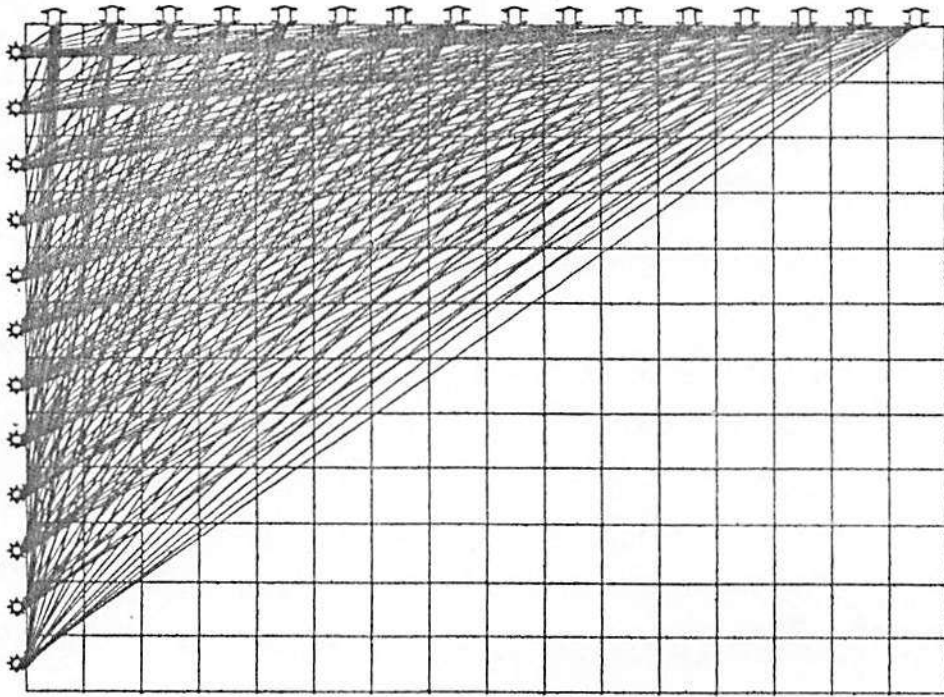
Penelusuran gelombang untuk mendapatkan waktu rambat gelombang seismik dan mengetahui lintasan gelombang pada suatu model di bawah permukaan bumi umumnya masih sederhana dan diasumsikan sebagai garis lurus. Kehomogenan distribusi lintasan gelombang baik densitas, kecepatan, maupun orientasi adalah faktor utama keakuratan rekonstruksi citra bawah permukaan, meskipun kondisi ideal ini secara aplikatif masih belum memungkinkan (Sanny, 1996)

Dalam perhitungannya, model ditentukan oleh struktur sel dimana setiap sel diasumsikan mempunyai kecepatan konstan. Metode penelusuran sinar yang digunakan menggunakan prinsip Huygens dan prinsip Fermat. Daerah penyelidikan dibagi atas sel-sel, di mana tiap sel mempunyai kecepatan yang sama dan diasumsikan homogen dan isotropik. Titik sumber dan penerima terletak di tengah-tengah grid, Gelombang seismik memancar dari sumber ke penerima, dan waktu perambatan antar sel dihitung. Prosedur ini diulang terus untuk tiap sel. Nilai minimum dari semua perhitungan waktu rambat ditentukan untuk setiap sel. Lintasan gelombang yang memberikan nilai waktu minimum dari sumber seismik ke penerima ditetapkan sebagai nilai lintasan gelombang dan waktu rambatnya (Sassa et. al, 1996).

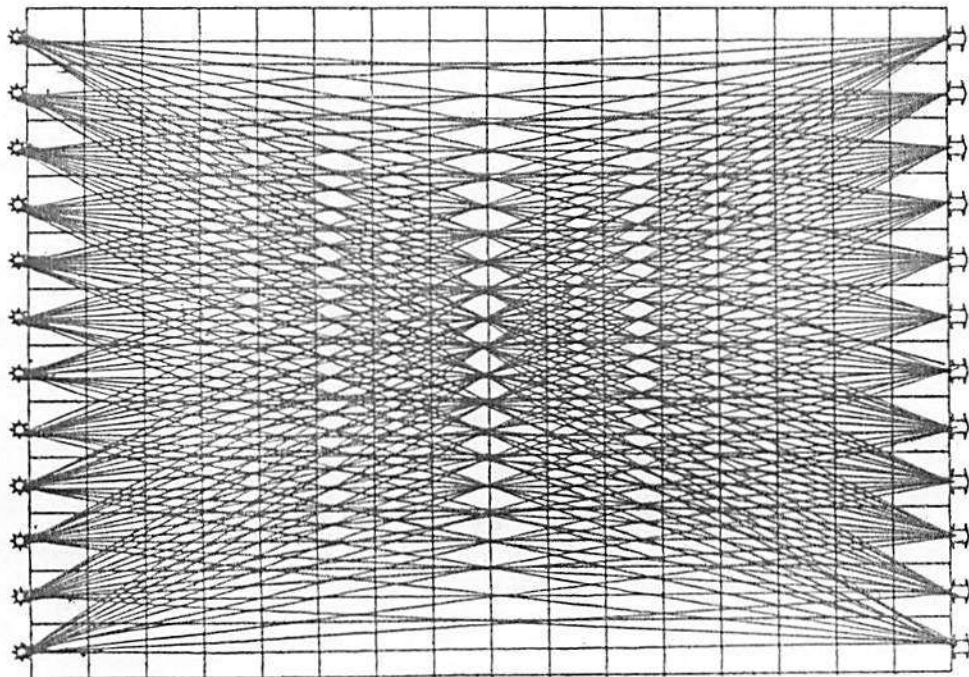
Dalam seismik data lapangan, gerakan sinar sebetulnya tidak lurus seperti sinar X, melainkan ada lengkungannya, sehingga dengan pengaturan titik-titik gridnya dalam ruang analitik memungkinkan untuk meninjau gerak melengkung dari sinar (Haryu, 1992).



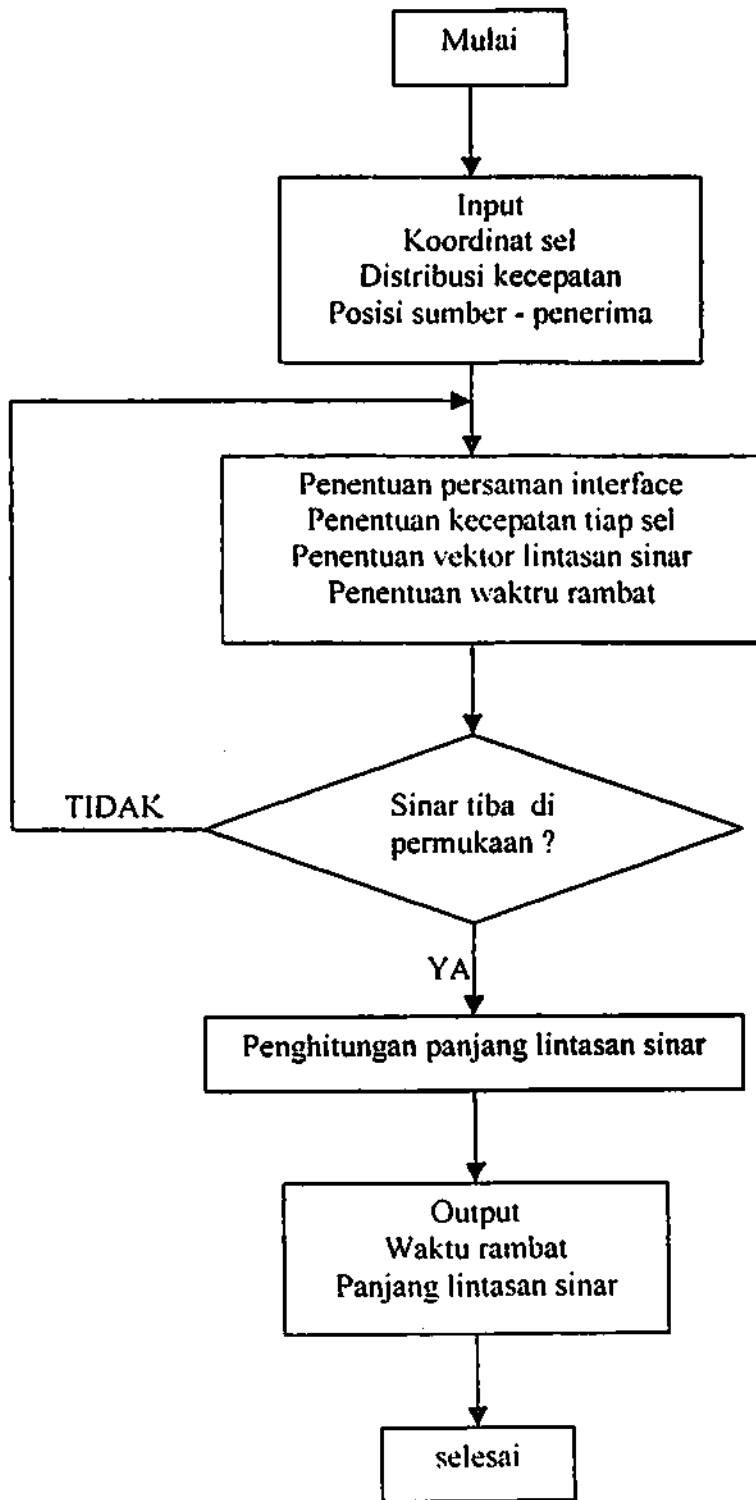
Gambar 4.1. Prosedur pengambilan data di lapangan pada skala eksplorasi yang besar



Gambar 4.2. Konfigurasi *surface-hole*



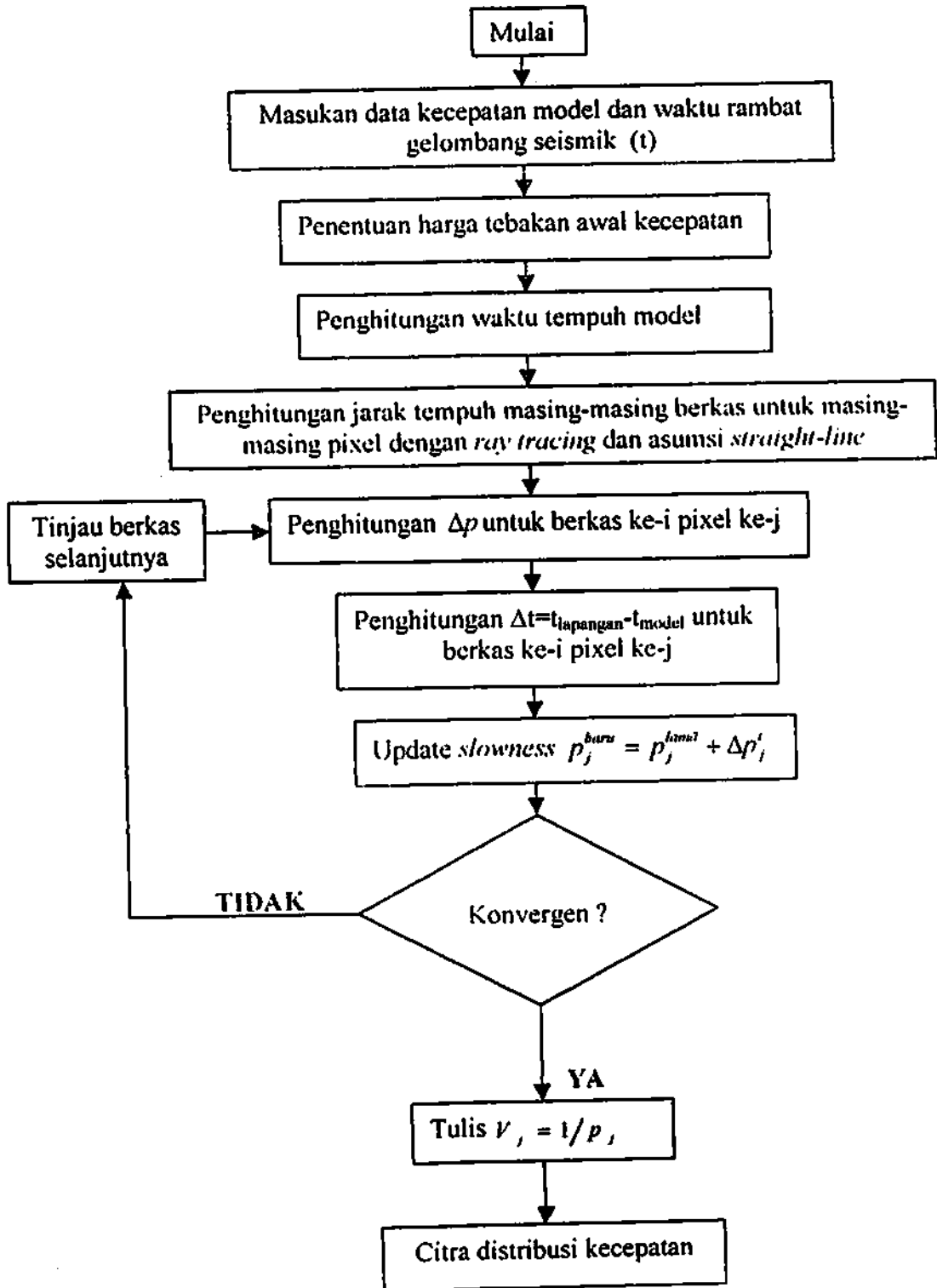
Gambar 4.3. Konfigurasi *cross-hole*



Gambar 4.4. Diagram alir penelusuran sinar (*ray tracing*)

penghentian eksekusi, namun rekonstruksi kecepatan tetap memberikan nilai kecepatan $n \times n$ pixel.

Parameter inversi meliputi waktu tempuh dan panjang lintasan sinar. Pada tahap inversi ini dilakukan pembaharuan nilai slowness tiap sel. Proses iterasi tidak disyaratkan sampai batas tertentu, tetapi akan berhenti setelah sebelumnya kita tetapkan jumlah iterasinya. Berikut diagram alir tomografi V dengan metode inversi ART :



Gambar 4.5. Diagram alir seismik tomografi V dengan metode inversi ART

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Data pengukuran di lapangan

Data hasil pengukuran dapat dilihat pada lampiran 1 sampai lampiran 4 berupa data rekaman seismogram. Pembacaan data tersebut dilakukan secara manual, sehingga timbul banyak sekali kesalahan dan perlu dilakukan koreksi-koreksi. Koreksi ini diperlukan mengingat pengasumsian penjalaran sinar gelombang berupa garis lurus (*straight-line*). Di bawah ini ditampilkan tabel waktu tempuh hasil pembacaan seismogram yang telah dikoreksi (tabel 5.1)

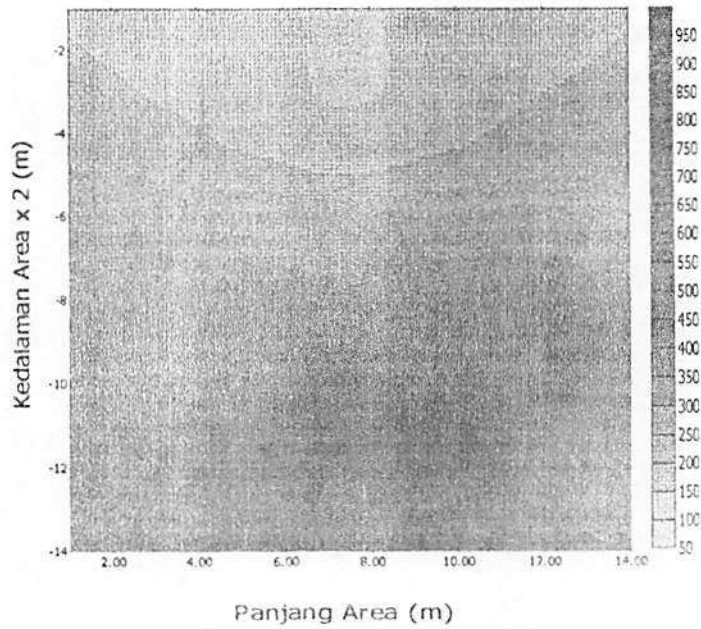
Penerima (m)	S u m b e r											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	0.017	0.019	0.030	0.029	0.033	0.039	0.039	0.041	0.044	0.046	0.043	0.052
6	0.017	0.021	0.031	0.031	0.034	0.041	0.041	0.044	0.046	0.049	0.045	0.054
8	0.019	0.022	0.033	0.032	0.036	0.042	0.044	0.046	0.047	0.049	0.046	0.056
10	0.021	0.026	0.036	0.037	0.041	0.045	0.045	0.050	0.051	0.053	0.049	0.061
12	0.023	0.029	0.039	0.041	0.044	0.048	0.049	0.054	0.055	0.057	0.053	0.065
14	0.025	0.029	0.041	0.043	0.046	0.049	0.050	0.056	0.058	0.059	0.055	0.066
16	0.026	0.030	0.043	0.044	0.046	0.051	0.052	0.059	0.060	0.061	0.057	0.068
18	0.026	0.032	0.044	0.046	0.049	0.052	0.054	0.061	0.063	0.063	0.060	0.069
20	0.027	0.033	0.045	0.049	0.050	0.054	0.056	0.066	0.064	0.066	0.061	0.071
22	0.028	0.034	0.049	0.051	0.052	0.057	0.058	0.066	0.067	0.068	0.064	0.072
24	0.031	0.036	0.050	0.052	0.053	0.058	0.060	0.069	0.070	0.069	0.066	0.073
26	0.032	0.036	0.052	0.054	0.055	0.060	0.061	0.071	0.074	0.071	0.069	0.075

(ket: *travel-time* dalam detik)

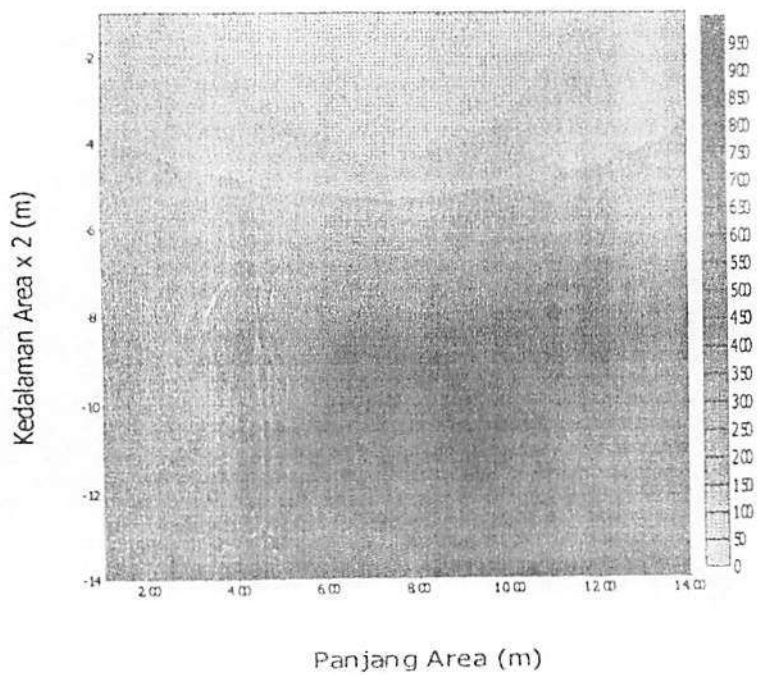
Tabel 5.1 Hasil pembacaan seismogram data lapangan setelah dikoreksi

5.2. Hasil rekonstruksi

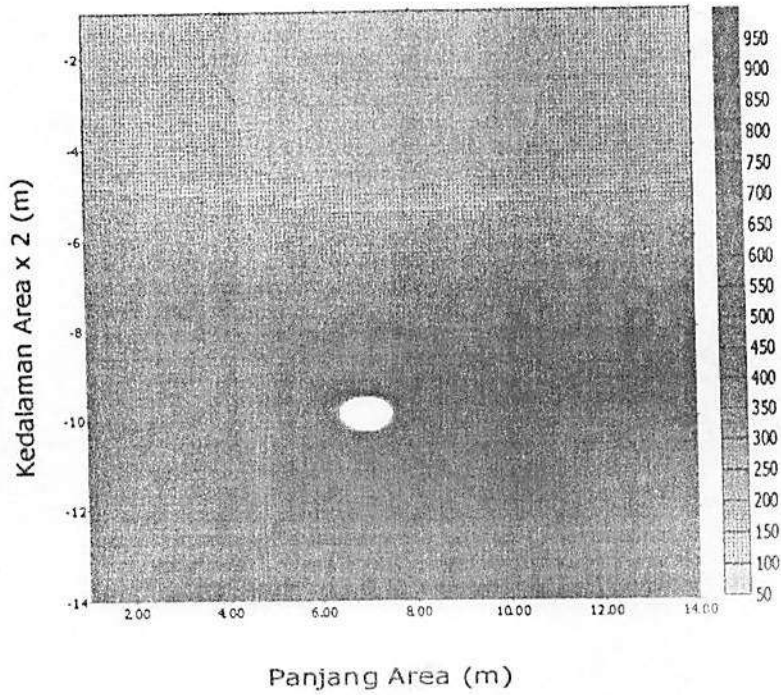
Adapun hasil rekonstruksi tomografi V dengan metode inversi ART untuk data lapangan adalah sebagai berikut :



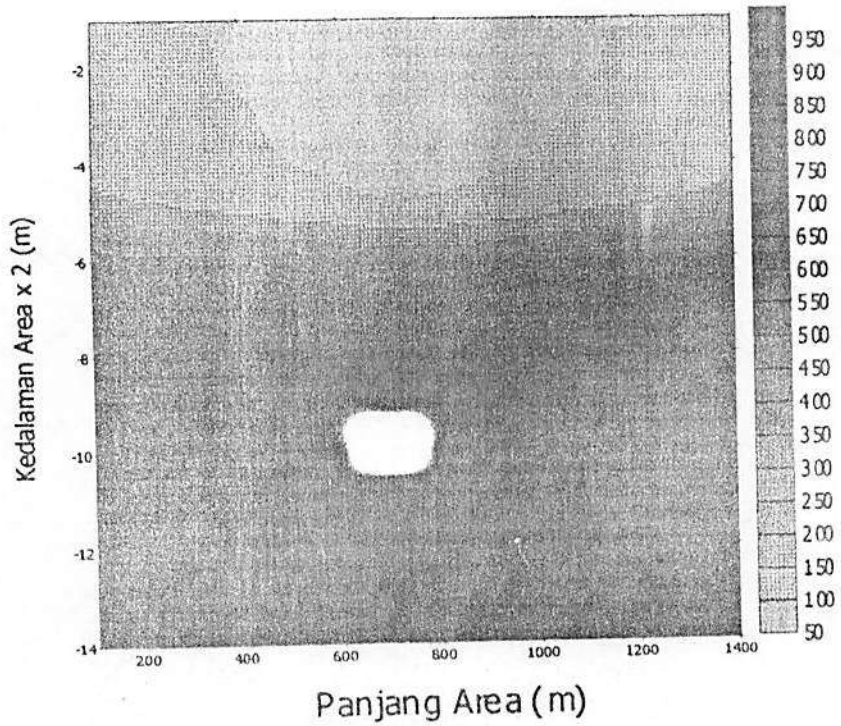
Gambar 5.1. Hasil rekonstruksi dengan metode inversi ART pada iterasi 1



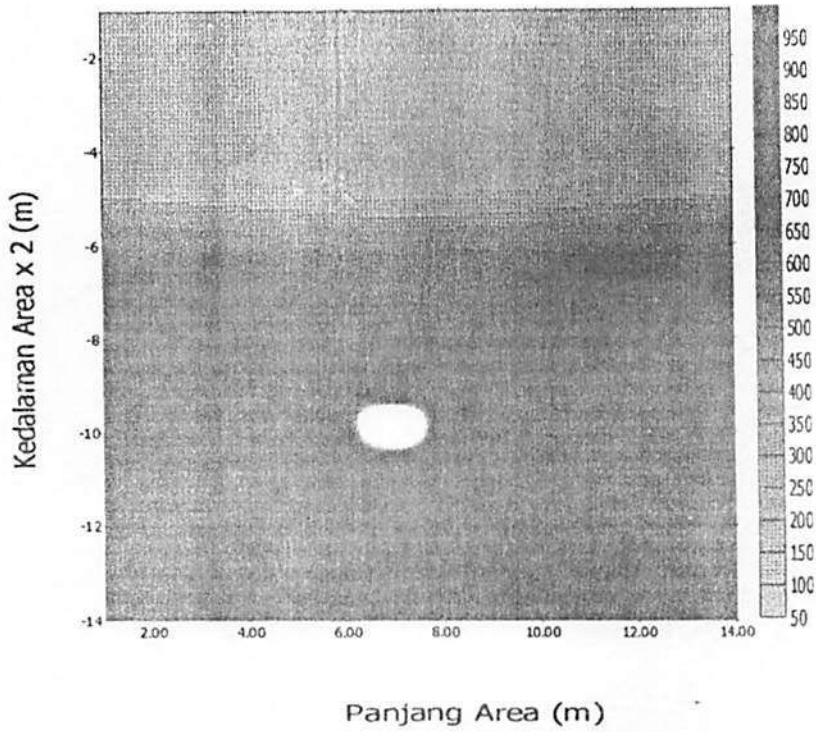
Gambar 5.2. Hasil rekonstruksi dengan metode inversi ART pada iterasi 2



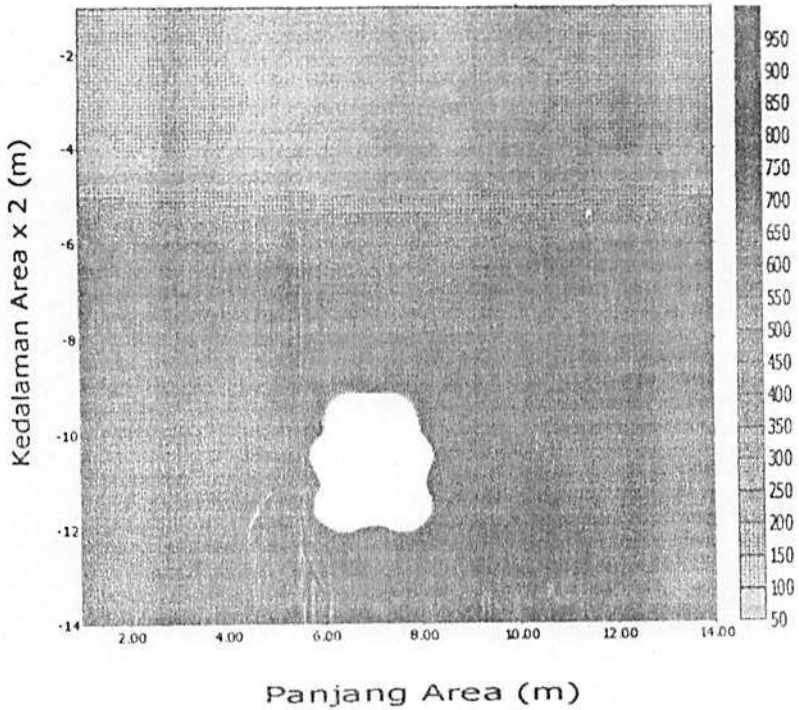
Gambar 5.3. Hasil rekonstruksi dengan metode inversi ART pada iterasi 3



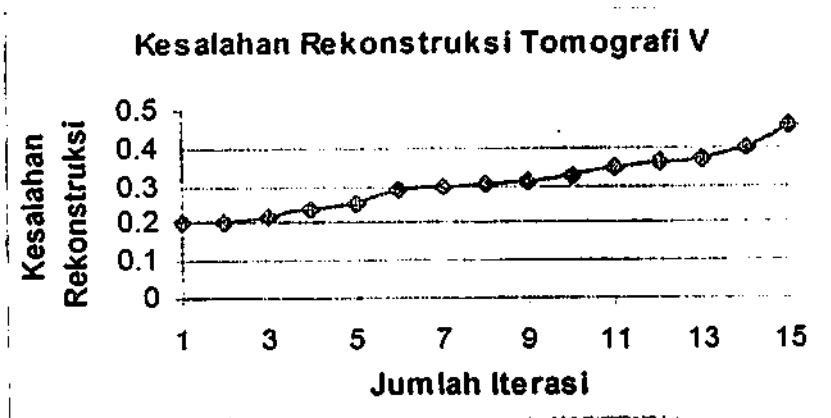
Gambar 5.4. Hasil rekonstruksi dengan metode inversi ART pada iterasi 5



Gambar 5.5. Hasil rekonstruksi dengan metode inversi ART pada iterasi 8



Gambar 5.6. Hasil rekonstruksi dengan metode inversi ART pada iterasi 10



Gambar 5.7. Kesalahan Rekonstruksi Tomografi V dengan metode inversi ART sampai iterasi 15.

Dari hasil rekonstruksi diperoleh citra lapisan kecepatan yang cukup baik pada iterasi 1 dan 2, yang menunjukkan adanya dua lapisan kecepatan, di mana lapisan teratas mempunyai kecepatan yang lebih rendah dari lapisan di bawahnya. Hal ini sesuai dengan data log sumur fisika ITB tahun 1980, yang menunjukkan adanya perubahan kecepatan gelombang seismik di sekitar kedalaman 8-12 meter. Dari hasil rekonstruksi terlihat bahwa nilai kecepatan pada lapisan atas berkisar antara 0-200 m/detik, dan lapisan di bawahnya sekitar 600-900 m/detik. Namun di sini masih terdapat keraguan tentang ketebalan tiap lapisan batuan untuk kedalaman 4-26 meter, disebabkan karena terdapatnya banyak lapisan yang relatif lebih tipis jika dibandingkan dengan spasi antar hidrophone.

Kesalahan rekonstruksi tomografi V dengan metode inversi ART diperlihatkan pada gambar 5.7. Dari gambar terlihat bahwa semakin banyak iterasi semakin tidak konvergen. Kesalahan rekonstruksi terkecil pada iterasi 1 dan 2 yaitu sekitar 0,2. Kesalahan rekonstruksi ini cukup besar, hal ini disebabkan karena untuk data lapangan terdapat noise yang tidak dapat dihindari pada saat pengambilan data dan juga adanya kesalahan pada pembacaan seismogram yang sifatnya manual meski telah diadakan koreksi-koreksi. Sehingga untuk perbaikan hasil rekonstruksi, data lapangan sebaiknya mempunyai bacaan yang lebih eksak (digital) dan tidak banyak mengalami koreksi.

Pada sisi lateral kanan dan kiri kurang tajam terekonstruksi, karena konfigurasi sumber dan penerima hanya di dua sisi lobang bor (*cross-hole*). Untuk mempertajam perlu kombinasi konfigurasi dengan sumber dan penerima di permukaan tanah dan sisi vertikal di dalam bumi (*surface-hole*), sehingga tiap sel akan dilewati sinar gelombang yang sama yang menyebabkan up-date kecepatan tiap sel juga sama.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Dari analisa data lapangan dan hasil rekonstruksi tomografi V dengan metode inversi ART dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Berdasarkan citra tomografi pada daerah penelitian terlihat adanya pelapisan batuan yang mendatar, yaitu adanya citra dua lapis di mana lapisan teratas mempunyai kecepatan lebih rendah (sekitar 0-200 meter) dibandingkan dengan lapisan di bawahnya (sekitar 600-950 meter).
2. Hasil rekonstruksi cukup baik pada iterasi 1 dan 2 dengan kesalahan rekonstruksi sekitar 0,2. Selanjutnya semakin banyak iterasi, semakin tidak konvergen.

6.2. SARAN

Beberapa hal yang dapat disarankan adalah sebagai berikut :

1. Untuk lebih memperjelas citra obyek penyelidikan akan lebih baik jika jumlah sel diperbanyak, dengan konsekuensi membutuhkan memori komputer yang cukup besar dan waktu penghitungan numerik yang cukup lama
2. Untuk mempertajam hasil rekonstruksi di bagian tepi anomali lateral kiri dan kanan, perlu penambahan jumlah sumber dan penerima di permukaan (*surface-hole*)

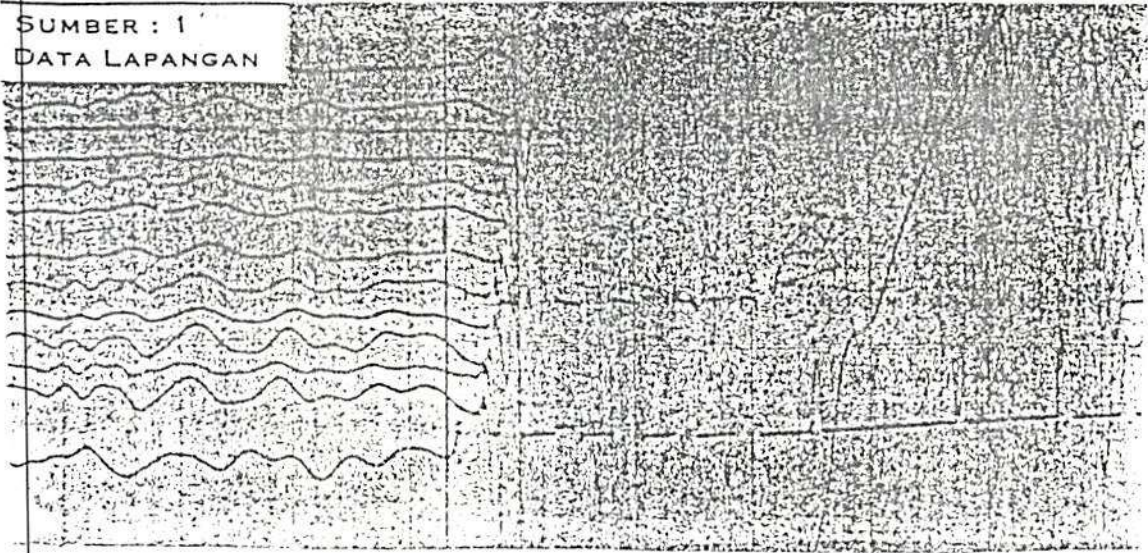
DAFTAR PUSTAKA

- Astuti, S.D., 1999, "*Studi Sintetik Seismik Tomografi Q Dengan Metode Inversi ART Dan Pendekatan Fungsi Atenuasi*", Jurnal MIPA UNAIR, Surabaya.
- Aji, S.D., 1999, "*Seismik Tomografi Studi Kasus Pada Jalur Terowongan*", Tesis, ITB, Bandung.
- Bernabini & Borelli, 1974, "*Crosshole Seismic Tomography*", *Geophysics*, 54 : 200-215
- Bishop, 1985, "*Overview of Computerized tomography with emphasis on Future Development*", *Proc. IEEE*, 71 : 356-372
- Bois, et.al., 1972, "*Well to Well Seismic Measurement*", *Geophysics*, 26 : 331-335
- Boschetti, et.al., 1995, "*A Staged Genetic Algorithm for Tomographic Inversion of Seismic Refraction Data*", *Exploration Geophysics*, 26 : 331-335
- Dines, K. and Lytle, J., 1979, "*Computerized Geophysical Tomografi*", *Proc. Inst. Elect. Eng.*, 67, 1065-1073, 1979.
- Hariyanto, S., 1996, "*Rekonstruksi Tomografi Seismik Dengan Metode Algebraic Reconstruction Technique (ART)*", Skripsi, Jurusan Fisika ITB, Bandung.
- Haryu, et.al., 1992, "*Ray Tracing Algorithm for Grid Point Methode Geotomography*", *The Second SEGJ/SEG International Symposium on Geotomography*, vol.2, Japan
- Ivansson, S., 1986, "*Seismic Borehole Tomography Theory and Computational Methods*", *Proceeding of The IEEE*, 2, 328-338
- Lytle & Dines, 1980, "*Iterative Ray Tracing Between Boreholes for Underground Image Reconstruction*", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 18 : 234-240
- Mason, 1981, "*Exploration Seismic Tomography*", *Geophysics*, 29 : 95-115
- Mc Mechan, 1983, "*Seismic Borehole Tomography-Theory und Computational Methods*", *Proc. IEEE*, 74 : 328-338
- Munadi Suprajitno, 1992, "*Mengenal Tomografi Seismic*", Lembaran Publikasi Lemigas, no. 3
- Roberts, et.al., 1989, "*An Evaluation of Computerized Tomography for Near Surface Geophysical Exploration*", *Computer and Geoscience*, 15 : 727-737

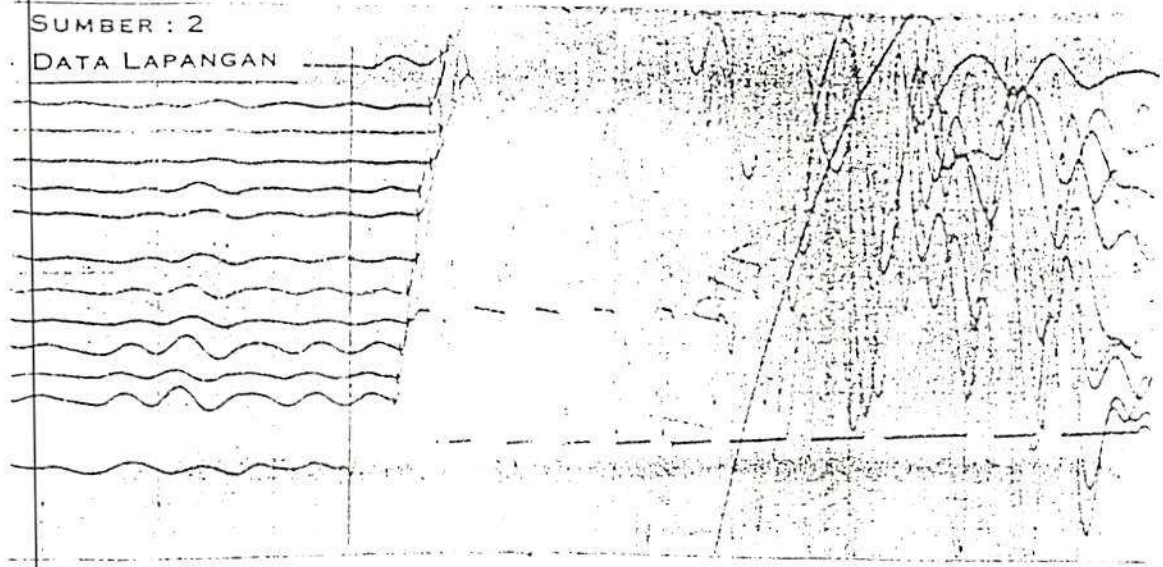
- Sanny, T.A. and Sassa Koichi, 1996, "*Detection of Fault Structure a Near -Surface Low Velocity Layer by Seismic Tomography : Syntetic Studies*", J. Applied Geophysics, V. 35, p. 117-131, Elsevier Sciences.
- Sanny, T.A., 1996, "*Aplikasi Geotomografi Dalam Penyelidikan Struktur Bawah Permukaan*" Proc. XVI Th National Symposium On Physics And Asean Regional Seminar On The Physics Of Metal Alloys.
- Sanny, dkk., 1996, "*Aplikasi Geotomografi Dalam Penyelidikan Geologi*", Pro. PIT HAGI ke-25, Bandung
- Sassa K., et.al., 1996, "*Improvement in The Accuracy of Seismic Tomography by Use of an Effective Ray Tracing Algorithm*", Proc. MMIJ/IMM, Join Symposium, Kyoto, Japan
- Singh & Singh, 1991, "*RAYPT- A New Inversion Technique for Geotomographic Data*", Geophysics, 56 : 1215-1227
- Stewart, R.R., "*Exploration Seismic Tomography : Fundamentals*", S.N. Domenico, Series Editor Course Note Series, Volume 3

LAMPIRAN I

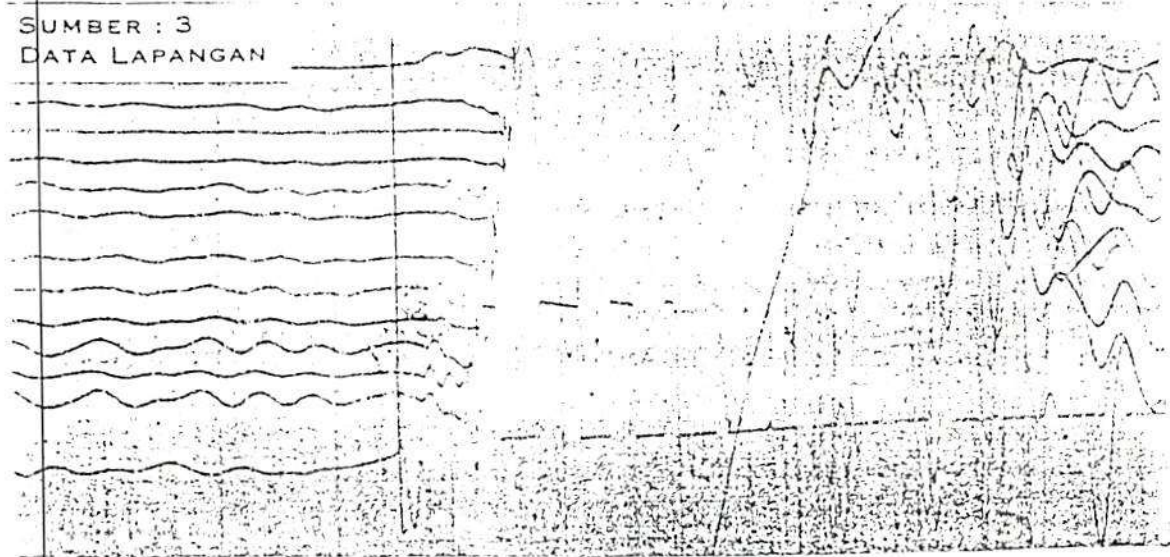
SUMBER : 1
DATA LAPANGAN



SUMBER : 2
DATA LAPANGAN

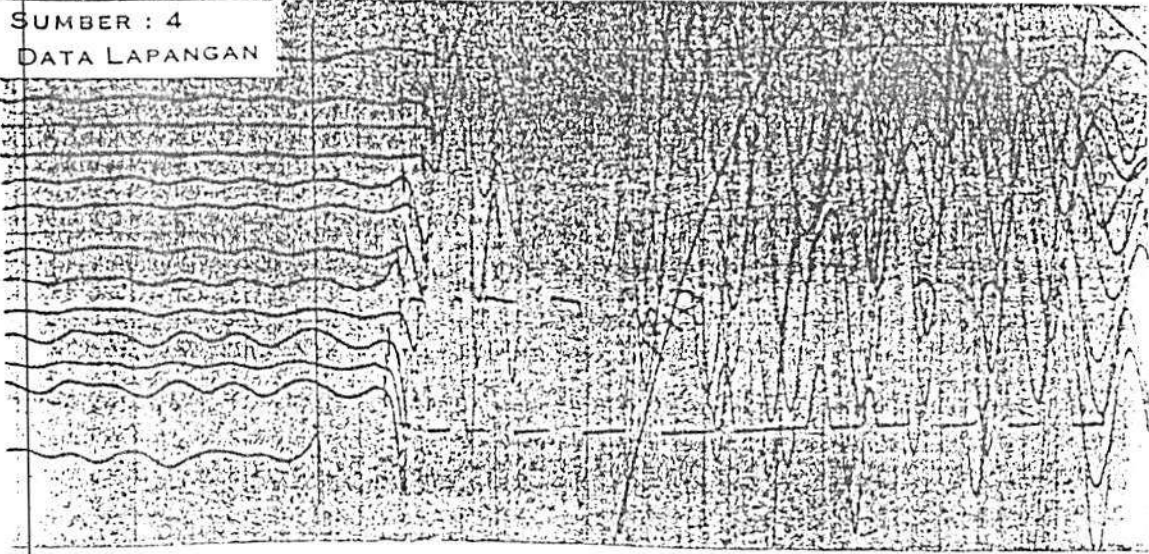


SUMBER : 3
DATA LAPANGAN

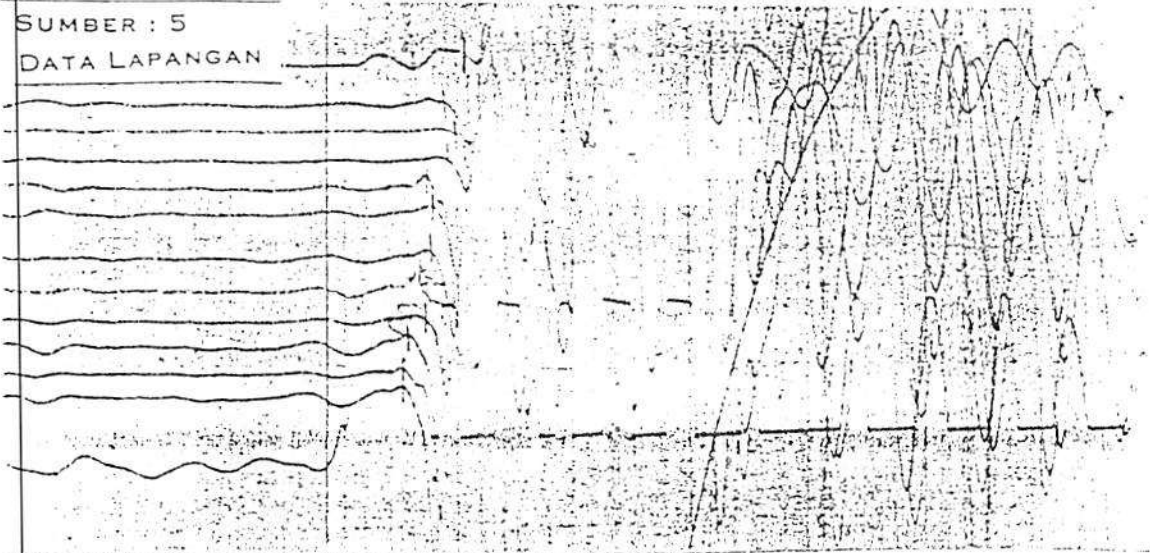


LAMPIRAN II

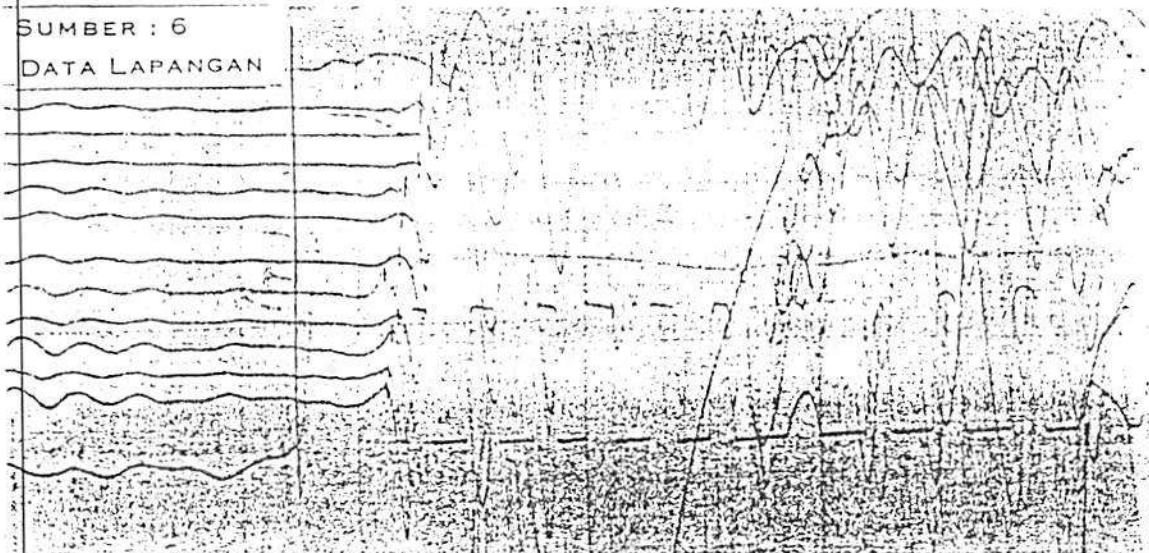
SUMBER : 4
DATA LAPANGAN



SUMBER : 5
DATA LAPANGAN

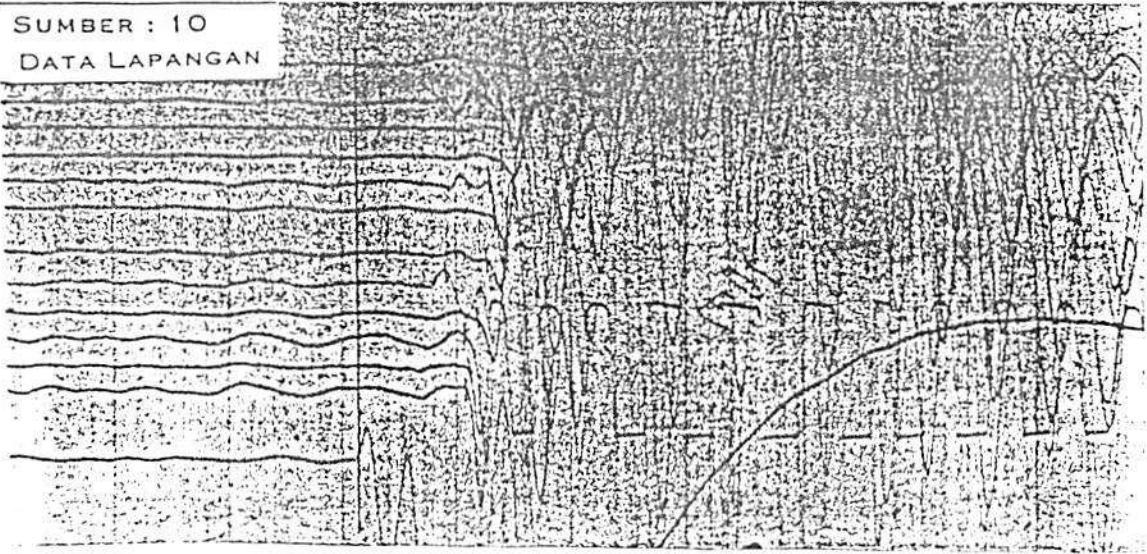


SUMBER : 6
DATA LAPANGAN

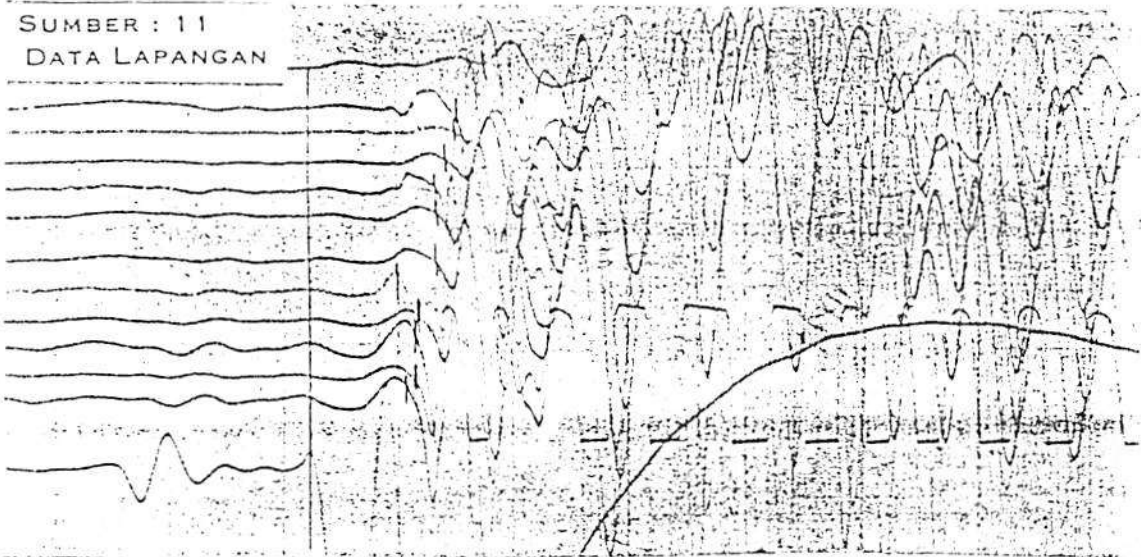


LAMPIRAN IV

SUMBER : 10
DATA LAPANGAN



SUMBER : 11
DATA LAPANGAN



SUMBER : 12
DATA LAPANGAN

