

# PROCEEDING

1<sup>ST</sup> EARTH SCIENCE INTERNATIONAL SEMINAR  
YOGYAKARTA, 29<sup>TH</sup> - 30<sup>TH</sup> NOVEMBER 2012

"INCREASING ROLE OF EARTH SCIENCE AND TECHNOLOGY TO  
SUPPORTING ACCELERATION OF MINERAL AND ENERGY  
RESOURCES CONSERVATION"



Faculty of Mineral Technology UPN "Veteran" Yogyakarta  
Indonesia

# PROCEEDING

## 1<sup>ST</sup> EARTH SCIENCE INTERNATIONAL SEMINAR

YOGYAKARTA, 29<sup>TH</sup> - 30<sup>TH</sup> NOVEMBER 2012

### Theme :

"**INCREASING ROLE OF EARTH SCIENCE AND TECHNOLOGY TO SUPPORTING ACCELERATION OF MINERAL AND ENERGY RESOURCES CONSERVATION"**

### Reviewers :

1. Prof. Dr. Isao Takashima (Japan)
2. Prof. Dr. Colin R. Ward (Australia)
3. Prof. Dr. Bambang Prastiso, MSc. (Indonesia)
4. Prof. Dr. Mohd Shafeea Leman, FASc. (Malaysia)
5. Prof. D. Haryanto, MSc., Ph.D (Indonesia)
6. Prof. Dr. Kamal Roslan Mohamed (Malaysia)

### Editors :

1. Dr. Ir. Sudarmoyo, SE., MS.
2. Dr. Ir. Y. Sumantri, MT.
3. Dr. Ir. Jatmiko Setiawan, MT
4. Nurhamim, ST, MT
5. Ika Wahyuning W., S.Si., M. Eng.
6. Edgie Yuda Kaesti, ST., MT.

Faculty of Mineral Technology  
UPN "Veteran" Yogyakarta  
2012

## CONTENS

### Part-1

#### Engineering and Geoscience

	Page
1. Fold Characteristic and Transposition in Tanjung Balau Shear Zone, Peninsular Malaysia. <i>Achmad Rodhi, Ibrahim Abdullah, Jatmika Setiawan, Tajul Anuar Jamaluddin</i>	I-1
2. Geology, Characteristics and an Organic Geochemistry of Coal from Warukin Formation, Tabalong Area, South Kalimantan <i>Edy Nursanto, Arifudin Idrus, Hendra Amijaya, Subagyo Pramumijoyo, Koichiro Watanabe</i>	I-9
3. Sistem Hydrothermal Manifestasi Panas Bumi Candi Umbul, Kartoharjo, Magelang <i>Udi Harmoko, Gatot Yulianto, Sugeng Widada</i>	I-14
4. Geostatistical Analysis on Distribution of Gold Veins <i>Nur Ali Amri, Abdul Aziz Jemain, Wan Fuad Wan Hassan, Jatmika Setiawan</i>	I-19
5. Paleogeografi Formasi Tapak pada Sub – Cekungan Banyumas. <i>Ali Achmad, Suyoto, Kuwat Santoso</i>	I-28
6. Studi Atribut Seismik Formasi Upper Red Bed Cekungan Sumatera Tengah Untuk Penentuan Distribusi dan Kualitas Reservoir <i>Ratna Putri, Sugeng Widada, Bambang Triwibowo</i>	I-42
7. Model Deteksi Sistem Peringatan Dini Aktivitas Gunungapi Semeru dengan Jaringan Sensor Nirkabel Terintegrasi : In Study <i>Yudianto, D., Istiyanto, J.E., Broto K.S., Sismanto</i>	I-53
8. Peningkatan Produksi dengan Metode Flumping <i>Edgie Yuda Kaesti &amp; Adek Satim</i>	I-59
9. The Continuity of Quartz Veins Based on Fracture System Occured in The Level of 500 – 600 m in Pongkor Area, Bogor Regency, West Java <i>Heru Sigit Purwanto &amp; Herry Riswandi</i>	I-67
10. Analisis Geokimia dan Studi Biomarker terhadap Maturitas Batuan Induk Formasi Ngimbang pada Lapangan "Pangea" Cekungan Lepas Pantai Jawa Timur Utara <i>Luthfi Fahlevi, Kuwat Santoso, Salatun Said</i>	I-77
11. Studi Zona Alterasi, <i>Firdaus Maskuri</i>	I-86
12. Coal Mining Mine Closure Penambangan Batubara PT. Tri Aryani Musi Rawas Sumatera Selatan <i>Gunawan Nusanto</i>	I-94

13.	Water Geochemical Analysis Within Air Klinsar Geothermal Area in Empat Lawang District South Sumatra, Indonesia <i>F. Virgo, Karyanto, Ady Mara, Agus S, Wahyudi, Suharno, W. Suryanto</i>	I-100
14.	Determination of Ancient Volcanic Eruption Based Of Regional Gravity Methods in Gunungkidul Area Yogyakarta <i>Agus Santosa</i>	I-105
15.	Study of The Implementation of Good Mining Practises <i>Waterman Sulistyana B,</i>	I-114
16.	Studi Tomografi Struktur Anomali Zona Kecepatan Rendah di Bawah Gunung Kelud <i>Indriati Retno P.</i>	I-121
17.	Mapping of Lateritic Nickel Deposit Using Resistivity Method at Gunung Tinggi Talaga Piru, Western Seram Regency, Moluccas Province <i>Sisca M. Sepulete, Sismanto, M. Souisa</i>	I-132 ✓
18.	Optimasi Cadangan Batubara Peringkat Rendah dengan Aktivitas Rantai Tambang Melakukan Pencucian Batubara <i>Wahyu Sasongko &amp; Barlian Dwinagara</i>	I-139
19.	GGR Study of Talang Akar Formation Talang Jimar Fieldsouth Sumatra Basin <i>Premonowati, Susanto Budi Nugroho, Dedy Kristianto</i>	I-147
20.	Geophysical (magnetic) Evidence of impact structure at lenggong Perak, Malaysia <i>Abdul Rahim Samsudin, Mokhtar Saidin, Siti Hafizah Ramli, Abdul Rahim Harun, Moh. Hariri Arrifin, Umar Hamzah, M. Syeh Sahibul Karamah</i>	I-158
21.	Influence of Metal Minerals Content on the Time Domain Induced Polarization (TDIP) Response : Preliminary Result <i>Yatini, Santoso, D. Laesapura A</i>	I-164
22.	Oil Reserve Estimates and The Economic Analysis Using Monte Carlo Simulation Approach In Reservoir "X" <i>Sudarmoyo</i>	I-172
23.	The Evolution Pattern of Turritelline Shell Morphology in Java; Relation with Geochronological Aspects <i>Hita Pandita, Yahdi Zaim, Aswan, Yan Rizal</i>	I-187
24.	Teluk Marina: One of An Ancient Caldera in Lampung? <i>Sri Mulyaningsih</i>	I-198
25.	Analisa Keakuratan Metode Perhitungan Klasik Dykstra Parson dan Metode Stiles Dalam Meramalkan Kinerja Waterflooding <i>Harry Budihardjo S, Sunindyo, Muham. Rasyid Ridlah</i>	I-209
26.	Perkiraan Potensi Panas Bumi dengan Menggunakan Simulasi Monte Carlo di Dataran Tinggi Ungaran <i>Dyah Rini Ratnaningsih, Ekowidi, Ib Jagranatha</i>	I-217

27.	Zonasi Bentuk Lahan Karst Menggunakan Interpretasi Foto Udara Pankromatik sebagai Kawasan Geowisata Daerah Gombong Selatan Kabupaten Kobumen Provinsi Jawa Tengah <i>Hadi Pumomo, Sugeng Raharjo, Wildan, Gilang Damar Setiadi</i>	I-225
28.	Hubungan Kualitas Batubara terhadap Kandungan Gas Metana Batubara Studi Kasus Lapangan Batubara di Berau, Kalimantan Timur <i>Sugeng Raharjo, Ketut Gunawan</i>	I-238
29.	Study on Mineralization Zone of Biltar District by Means of Simple Bouguer Anomaly <i>Sunaryo &amp; Suwanto Marsudi</i>	I-246
30.	Studi Sesar Opak: Mengenali Indikasi Keaktifannya <i>C.Prasetyadi &amp; Achmad Subandrio</i>	I-253
31.	The Evaluation Formation for Coal-bed Methane Based on the Gea-1 Well of the "X" Area, Barito Basin <i>Sari wulandari Hafsan &amp; Salatun Said</i>	I-263
32.	Pemanfaatan Liquefaction untuk Mengurangi Dampak Negatif Gempa Tektonik di Wilayah Sleman Timur Yogyakarta <i>Suharwanto</i>	I-273
33.	Pemodelan Struktur Regional Daerah Menggala Menggunakan Step Model <i>Wahyu Hidayat &amp; Suharsoro</i>	I-282
34.	Optimization of Sand and Rock Boulder Resources from Mount Merapi Eruption Using the Photometry Models of Particle Size Distribution <i>Nurkhamim, Rika Ernawati, Ika Wahyuning W.</i>	I-294
35.	Petrology and Geochemistry Volcanic Rocks of Volcanic Complex Kamojang Geohermal Field West Java Indonesia <i>Dwi Fitri Yudiantoro, Emmy Suparka, Suyatno Yuwono, Isao Takashima, Yustin Kamah</i>	I-304
36.	Kontrol Strata Batuan terhadap Pola Penyebaran Air Lindi di Sekitar Area Penimbunan Sampah, Studi Kasus TPA Tambakboyo Sleman Yogyakarta <i>S. Koesnaryo</i>	I-316
37.	Melacak Paleoenvironment Kompleks Percandian Muaro Jambi Menggunakan Citra IKONOS <i>Herwin Lukito</i>	I-324
38.	Study of the Baturaja Formation Well Sw-1 Based on Wireline Log Data <i>Sugeng Widada &amp; J.J. Lambiase</i>	I-333

## Part-2

### Geoheritage

1. *Geoheritage Resources within Pahang River Basin: Preliminary Study on Their Sustainable Development Potential*  
*Mohd Shafeea Leman, Kamal Roslan Mohamed, Juhari Mat Akhir, Mohd Rozi Umam, Che Aziz Ali & Tanot Unjah* .....
2. *Wisata Alam Geologi Kota Indah Kaimana-Papua Barat-Indonesia*  
*Jatmika Setiawan & Rusli Ufnia* .....
3. *Geosite Gunung Senyum - Jebak Puyuh: Warisan Tabii Batu Kapur Negeri Pahang, Malaysia*  
*Kamal Roslan Mohamed & Che Aziz Ali* .....
4. *Exploring Jogja Geoheritage: The Lifetime of an Ancient Volcanic Arc of Java*  
*C.Prasetyadi* .....
5. *Geo-Warisan Tapak Bukit Bunuh, Lenggong, Perak, Malaysia: Bukti Batuan Suevit*  
*Nur Asikin Rashidi & Mokhtar Saidin* .....
6. *Geo-Heritage and Geo-Tourism in the Lenggong Valley, Perak, Malaysia: Management, Challenges and Opportunities*  
*Shaful Shahidan & Mokhtar Saidin* .....
7. *Bahan Induk Tanah Sebagai Warisan Geologi di Perbukitan Jiwo Timur Bayat*  
*Mohammed Nurcholis & Hadi Purnomo* .....
8. *Geo-Warisan Lembah Lenggong, Perak: Granit Tatimpak*  
*Catur Cahyaningsih & Mokhtar Saidin* .....
9. *Geowarisan Tapak Impak Meteorit Bukit Bunuh, Lenggong, Perak, Malaysia: Bukti Lapisan Sub Permukaan*  
*Shyeh Sahibul Karamah & Mokhtar Saidin* .....

# Studi Tomografi Struktur Anomali Zona Kecepatan Rendah di Bawah Gunung Kelud

Indriati Retno P

Program Studi Teknik Geofisika  
Fakultas Teknologi Mineral UPN "Veteran" Yogyakarta

## Abstrak

Gunung Kelud merupakan salah satu gunungapi yang masih aktif di Indonesia, termasuk dalam jenis gunungapi stratovolcano dengan letak geografis  $7,93^{\circ}$ LS dan  $112,308^{\circ}$ BT, terletak di Kabupaten Blitar, Provinsi Jawa Timur. Aktivitasnya tercatat pada abad ke-15, yaitu pada tahun 1588. Erupsi hebat dalam sejarah erupsi Gunung Kelud terjadi pada tahun 1919 yang mengakibatkan banyak korban akibat lahar dingin yang menyapu pemukiman. Sedangkan erupsi terakhir yang terjadi di Gunung Kelud terjadi pada bulan November 2007.

Aktivitas vulkanik Gunung Kelud pada erupsi bulan November tahun 2007, mulai teramati pada September 2007, dengan ciri-ciri diantaranya dengan meningkatnya jumlah kejadian gempa vulkanik. Pada penulis melakukan pengamatan terhadap peningkatan aktivitas vulkanik ini dengan studi tomografi. Tomografi merupakan salah satu cara untuk mencitrakan struktur bawah permukaan bumi, dalam hal ini aktivitas vulkanik dengan melakukan proses inversi untuk mengetahui anomali kecepatan rendah dari gelombang P. Untuk melakukan proses inversi, dibutuhkan data pengamatan berupa letak hypocenter dan travel time dari gelombang P. Untuk menentukan letak hypocenter, penulis menggunakan metode three circle, yang selanjutnya direlokasi dengan metode grid search sedangkan untuk memperoleh data travel time perhitungan, penulis menggunakan proses forward modelling menggunakan metode ray tracing pseudo bending.

Dari penelitian ini yaitu didapatkannya struktur anomali kecepatan rendah gelombang P di sekitar Gunung Kelud, terutama di sekitar mean sea level, yang menandakan adanya pergerakan material panas dari dalam gunungapi ke permukaan, akibat peningkatan aktivitas magma sebelum erupsi. Hasil ini kemudian di cek kembali menggunakan metode checkerboard test dan target block test untuk mengetahui tingkat keakuratan hasil tomografi.

**Keywords:** hypocenter, travel time, metode tiga lingkaran, grid search, ray tracing pseudo bending, inversi

## Abstract

Gunung Kelud is one of the active volcano in Indonesia, that is located at geographical position of  $7,93^{\circ}$ LS and  $112,308^{\circ}$ BT, in Blitar Regency, East Java. In 1919 eruption, many people were killed because of cold lava. The last eruption of Kelud volcano occurred in November 2007.

The activity is started in last September 2007, with the characteristics is increased of volcanic earthquake. In this research, we conduct seismic tomography using volcanic earthquake to image velocity structure beneath Kelud volcano.

Seismic tomography is one method for imaging the subsurface structure, especially about the low velocity zone which may associated with the magma activity using inversion scheme. For the input of the Inversion process, the hypocenter position and the travel time of P wave is required. To determine the hypocenter position, we used a three circle method and then relocated by applying a grid search method. To determine travel time data calculation, ray tracing pseudo bending is used.

The results, low velocity zone anomaly structure around Kelud volcano, that is located mainly in mean sea level. This phenomenon indicated that there is of hot material beneath the Kelud volcano close to the surface due to enhancement of magma activity before eruption. The resolution of the tomography results were tested by using the checkerboard and target block test to determine the level of accuracy of the result.

**Keywords:** hypocenter, travel time, three circle method, grid search, ray tracing pseudo bending, inversion

## 1. Pendahuluan

Studi tomografi gelombang seismik baik untuk gelombang P maupun gelombang S saat ini telah banyak dilakukan untuk melihat struktur geologi bawah permukaan dari suatu daerah penelitian

melalui karakteristik gelombang P dan S pada daerah tersebut. Selain itu, khususnya untuk daerah vulkanik (gunungapi), melalui tomografi gelombang P dan S, dapat diketahui pergerakan material panas ke permukaan dan adanya struktur thermal di bawah permukaan suatu gunungapi.

Gunung Kelud (Gambar 1) yang memiliki letak geografis  $7,93^{\circ}\text{LS}$  dan  $112,308^{\circ}\text{BT}$  merupakan salah satu gunungapi aktif yang ada di Indonesia yang berada di Provinsi Jawa Timur, terletak di perbatasan antara Kabupaten Kediri dan Kabupaten Blitar, tepatnya sekitar 27 km di sebelah timur pusat kota Kediri. Gunung Kelud termasuk dalam gunungapi tipe *stratovolcano* dan termasuk dalam busur cincin api Pasifik. Sejarah letusan Gunung Kelud mulai teramati pada tahun 1901, 1919, 1930, 1966, 1990 dan terakhir pada tahun 2007. Pada letusan tahun 2007, peningkatan aktivitas Gunung Kelud teramati mulai bulan September sampai November yang ditandai oleh meningkatnya jumlah gempa vulkanik dan naiknya suhu air danau kawah.



Gambar 1. Lokasi Gunung Kelud (Situation Report, 2007)

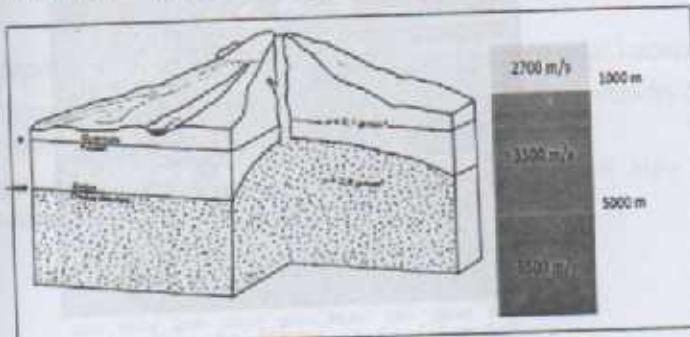
Gempa vulkanik disebabkan oleh proses naiknya magma menuju permukaan dimana terjadi gesekan antara magma dan batuan di sekitar pipa kepundan sehingga menimbulkan getaran yang sebagai pemicu gempa vulkanik. Salah satu metode untuk mengetahui sejauh mana kenaikan magma adalah dengan studi tomografi gelombang P, dimana proses naiknya material panas ke permukaan berhubungan dengan proses naiknya magma dapat diketahui dengan melihat daerah yang memiliki anomali kecepatan rendah di bawah gunungapi.

## 2. Metode dan Data

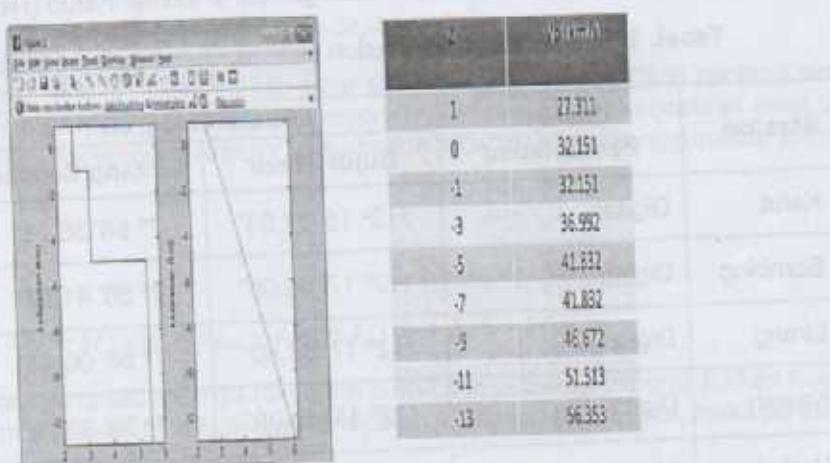
Penelitian mengenai Studi tomografi ini dilakukan untuk mengetahui struktur anomali kecepatan rendah di bawah Gunung Kelud sebelum terjadinya erupsi pada tahun 2007 yang diduga merupakan proses naiknya material panas yang berhubungan dengan magma. Lokasi hiposenter dari gempa vulkanik Gunung Kelud oleh empat stasiun pencatat gempa ditentukan terlebih dahulu dengan menggunakan metode tiga lingkaran dengan asumsi bahwa lapisan di bawah Gunung Kelud homogen dan menggunakan model kecepatan awal gelombang P yang berlaku pada gunungapi pada umumnya yaitu sebesar  $2,7 \text{ km/s}$ . Setelah lokasi hiposenter diketahui, langkah selanjutnya adalah menghitung waktu tempuh gelombang P dari hiposenter ke stasiun pengamatan dengan menggunakan metode *ray tracing pseudo bending* dan model kecepatan awal Gunung Kelud (Gambar 2) yang interpolet terlebih dahulu agar didapatkan model kecepatan tiap lapisannya (Gambar 3).

Hiposenter yang telah diketahui letaknya direlokasi menggunakan metode grid search dan dilakukan proses *forward modelling* dengan metode *ray tracing pseudo bending* untuk mendapatkan waktu tempuh gelombang P hasil perhitungan ( $T_{\text{cal}}$ ) yang akan digunakan untuk menghitung waktu tempuh gelombang P di tiap lapisan menggunakan metode inversi *Least Square* yang hasilnya digunakan dalam bentuk tomografi untuk tiap lapisannya. Pada metode inversi *Least Square*, diperlukan minimum antara waktu tempuh gelombang P hasil observasi (pengamatan) dengan waktu tempuh gelombang P hasil perhitungan yang didapatkan dari metode *ray tracing pseudo bending*, sedangkan waktu tempuh gelombang P hasil pengamatan ( $T_{\text{obs}}$ ) didapatkan dengan cara mencari selisih antara waktu

di setiap stasiun seismik dengan waktu terjadinya gempa (*origin time*).

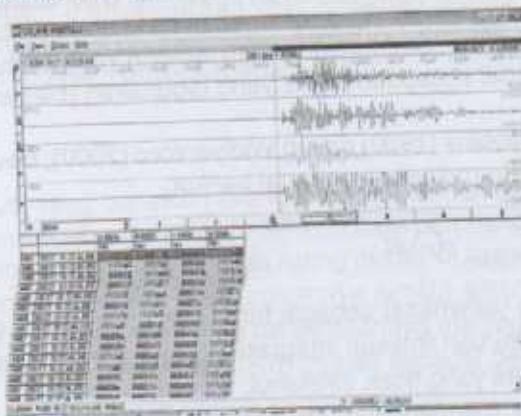


Gambar 2. Model kecepatan Gunung Kelud (Zainudin, 1992 dalam Sahara, 2009)

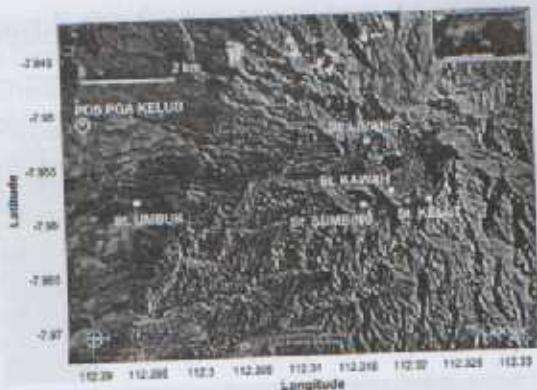


Gambar 3. Model Kecepatan awal hasil interpolasi

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data gempa vulkanik Gunung Kelud mulai bulan September dengan pertengahan Oktober 2007 merupakan periode sebelum terjadinya erupsi pada Oktober 2007. Jumlah gempa vulkanik yang didapatkan sebanyak 194 kejadian dimana peningkatan besar terjadi dari akhir September hingga pertengahan Oktober 2007. Adapun contoh data dan proses pengamatan diperlihatkan pada Gambar 4 dan Gambar 5 sebagai berikut:



Gambar 4. Contoh rekaman gempa vulkanik dari 4 stasiun pencatat gempa



Gambar 5. Letak stasiun pencatatan gempa di sekitar Kelud (Hidayati, 2007)

Tabel 1. Posisi Geografis stasiun seismik Gunung Kelud (Hidayati, 2007)

Stasiun	Sistem Pemantauan	Posisi Geografi		Ketinggian (meter)
		Bujur Timur	Lintang Selatan	
Kelut	Digital	112° 18' 37,03"	7° 56' 36,05"	1444
Sumbing	Digital	112° 17' 55,06"	7° 56' 41,07"	1268
Lirang	Digital	112° 17' 58,80"	7° 56' 00,46"	1288
Kawah	Digital dan Analog	112° 18' 13,09"	7° 56' 32,08"	1349
Umbuk	Digital	112° 15' 23,05"	7° 56' 35,04"	763

### 3. Waktu tunda dan parameterisasi model

Dalam tomografi, masukan (*input*) yang biasa digunakan adalah waktu tunda dari gelombang P maupun gelombang S. Waktu tunda adalah selisih antara waktu tiba gelombang yang diamati dan waktu tempuh gelombang yang dihitung berdasarkan pada model bumi tertentu. Waktu tempuh yang diamati ( $T_{obs}$ ) merupakan hasil dari pembacaan (picking) gelombang P dan S pada seismogram. Sedangkan waktu tempuh yang dihitung ( $T_{cal}$ ) merupakan tempuh sintetik berdasarkan model kecepatan bumi yang digunakan (biasanya model 1-D, bisa menggunakan model 3-D).

Menurut Spencer dan Gubbins (1980) dalam Widiyantoro (2000), travel time ( $T$ ) antara sumber dan stasiun pengamat  $j$  dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$T_{ij} = \int_{L_{ij(3D)}} s(r) dl T_{ij} = \int_{L_{ij(3D)}} s(r) dl$$

dimana  $s(r)$  adalah perlambatan (slowness) sebagai fungsi dari posisi dan  $dl$  adalah panjang sinar seismik (ray-segment length) dari lintasan integrasi  $L_{ij(3D)}$  yang bergantung pada lokasi sumber, hypocenter serta struktur 3D bumi yang tidak diketahui.

Waktu tunda biasanya mengandung kesalahan yang berasal dari kesalahan posisi hypocenter dan origin time yang disebabkan oleh:

- (a). Kesalahan pembacaan waktu tiba gelombang dan penentuan fasa (*mispicking*)
- (b). Kesalahan sistematis yang timbul akibat efek stasiun atau instrumen pengamat tunggal

dan/atau kurangnya distribusi azimuth dari stasiun-stasiun pengamat.

Kelebihan teknik kecepatan lateral rata-rata bumi relatif terhadap model kecepatan awal adalah hasil dari prosedur penentuan lokasi *hypocenter* yang dikarenakan oleh asumsi *a priori* mengenai statistik dari waktu tunda (Widiyantoro, 2000)

waktu tunda (3.1) dalam bentuk model parameterisasi atau model blok dapat dituliskan persamaan (3.2) berikut ini:

$$\Delta s_1 d l_1^1 + \Delta s_2 d l_2^1 + \cdots + \Delta s_i d l_i^1 = \Delta t^1$$

$$\Delta s_1 d l_1^2 + \Delta s_2 d l_2^2 + \cdots + \Delta s_i d l_i^2 = \Delta t^2$$

$$\Delta s_1 d l_1^j + \Delta s_2 d l_2^j + \cdots + \Delta s_i d l_i^j = \Delta t^j \quad (3.2)$$

dalam persamaan blok ke-i, indeks j menyatakan sinar seismik ke-j, dan *dl* adalah panjang sinar di blok ke-i. Deviasi perlambatan ( $\Delta s$ ) hasil inversi tomografi terhadap model kecepatan awal dapat dituliskan dalam deviasi kecepatan (*velocity perturbation* =  $Dv$ ) dengan menggunakan formulasi

$$-s_{cal} = 1/(v_0 + \Delta v) - 1/v_0 \quad (3.3)$$

$$-s_{obs} = 1/(v_0 + \Delta v) - 1/v_0 \quad (3.4)$$

Deviasi perlambatan yang sebenarnya (di dalam bumi) dan subskrip 0 menunjukkan kuantitas yang bersifat absolut berdasarkan model awal. Untuk deviasi kecepatan ( $Dv$ ) yang cukup kecil, maka persamaan (3.4) dapat dituliskan juga sebagai berikut:

$$-s_{obs} = -\Delta s \cdot v_0^2 \quad (3.5)$$

Dalam studi tomografi yang biasa disajikan adalah deviasi kecepatan relatif terhadap model kecepatan awal. Hal ini berguna untuk menggambarkan bumi secara lebih jelas (Widiyantoro, 2000).

#### • Teknik Inversi LSQR

Salah satu teknik dalam menyelesaikan permasalahan inversi adalah dengan teknik inversi LSQR. Pada umumnya untuk permasalahan tomografi dengan pendekatan linier, persamaan (3.2) dituliskan dalam notasi matriks sebagai berikut:

$$Ax = \delta t \quad (3.6)$$

dimana  $x$  adalah vektor solusi yang berisikan bilangan yang tidak diketahui dan  $\delta t$  adalah vektor data yang merupakan selisih antara waktu tempuh hasil perhitungan ( $T_{cal}$ ) dengan waktu tempuh aktual ( $T_{obs}$ ). Matriks A memproyeksikan ruang model ke ruang data yang biasanya berisikan banyak sinar. Dalam inversi tomografi, umumnya jumlah sinar lebih banyak daripada jumlah bilangan yang tidak diketahui, sehingga persamaannya menjadi *over determined* dan matriks A tidak sangkar dan solusi dari persamaan (3.6) adalah sebagai berikut:

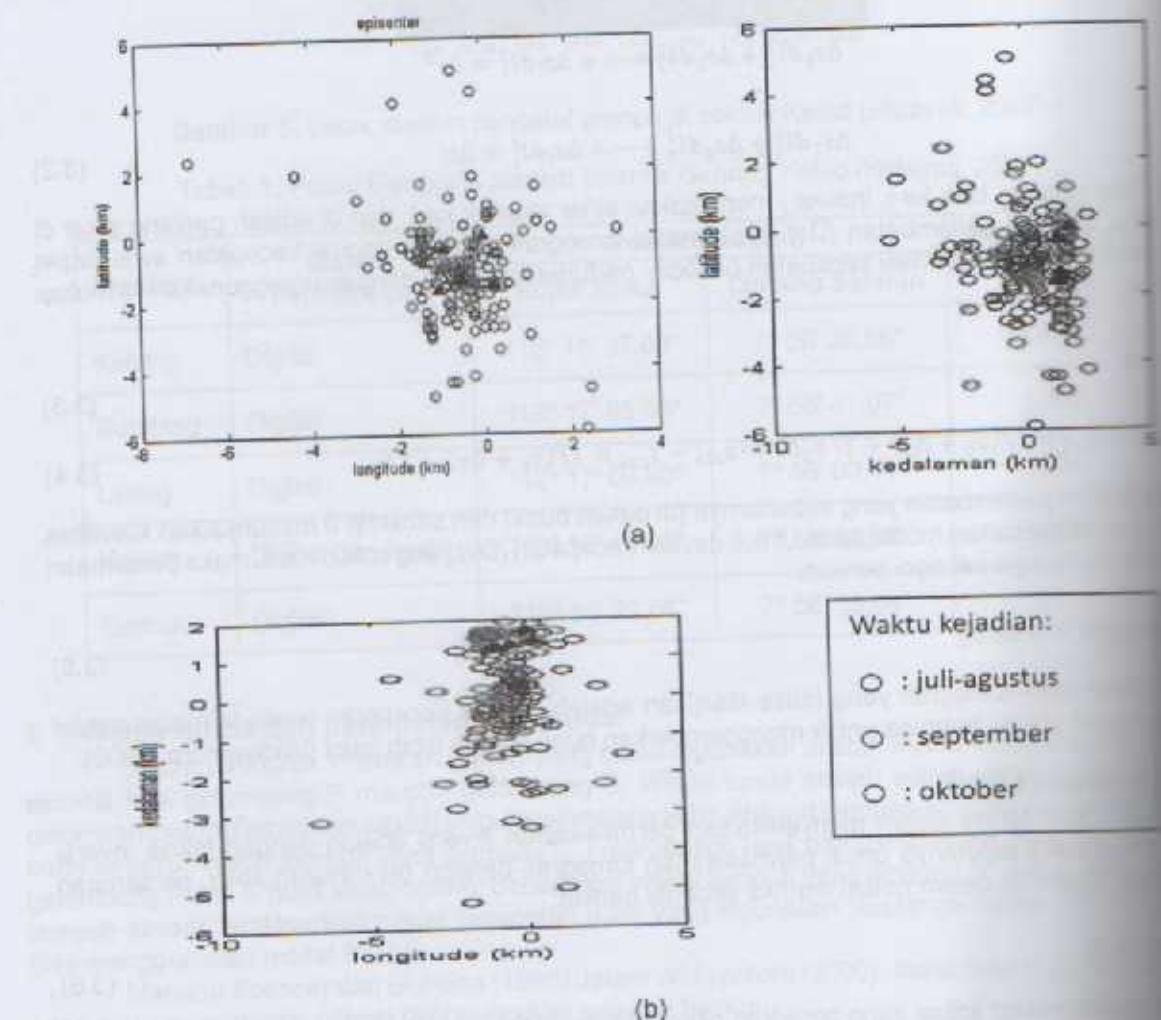
$$(A^T A)x = (A^T \delta t) \quad (3.7)$$

$$(A^T A)^{-1}(A^T \delta t)x = (A^T A)^{-1}(A^T \delta t) \quad (3.8)$$

Persamaan (3.8) merupakan persamaan normal dari permasalahan *least square linear*.

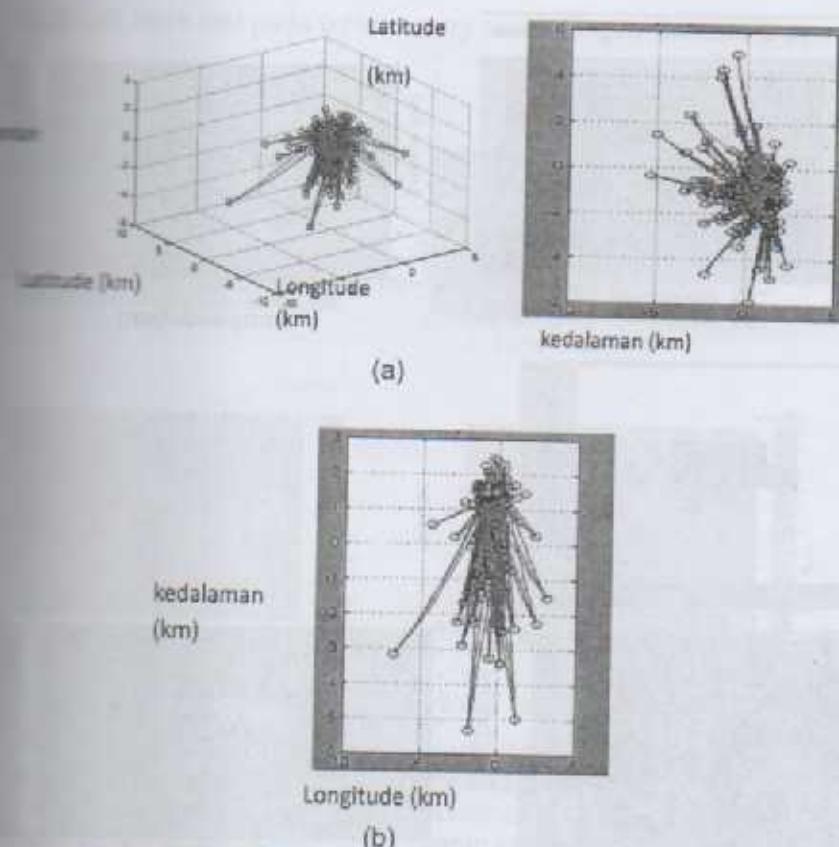
## 5. Hasil dan Pembahasan

Data gempa yang telah melalui proses *picking* terhitung mulai bulan Juli sampai dengan pertengahan Oktober 2007, yang merupakan periode sebelum terjadinya erupsi pada November 2007 didapatkan 194 gempa vulkanik, baik vulkanik dalam maupun vulkanik dangkal. Jumlah gempa vulkanik dalam lebih sedikit dibandingkan dengan jumlah gempa vulkanik dangkal, dimana peningkatan aktivitas Gunung Kelud mulai meningkat dari akhir September 2007 sampai dengan pertengahan Oktober 2007. Dari 194 gempa vulkanik yang telah didapatkan, kemudian dicari letak episenter dan hiposenter masing-masing gempa dengan menggunakan metode tiga lingkaran. Sebaran episenter dan hiposenter untuk seluruh gempa tersebut disajikan pada Gambar.6 berikut ini:



Gambar 6. (a) episenter gempa (kiri) dan hiposenter gempa penampang utara selatan (latitude) (kanan). (b) hiposenter gempa penampang timur barat (longitude). Segitiga merah menandakan lokasi puncak Gunung Kelud dan segitiga hitam menandakan letak stasiun seismik.

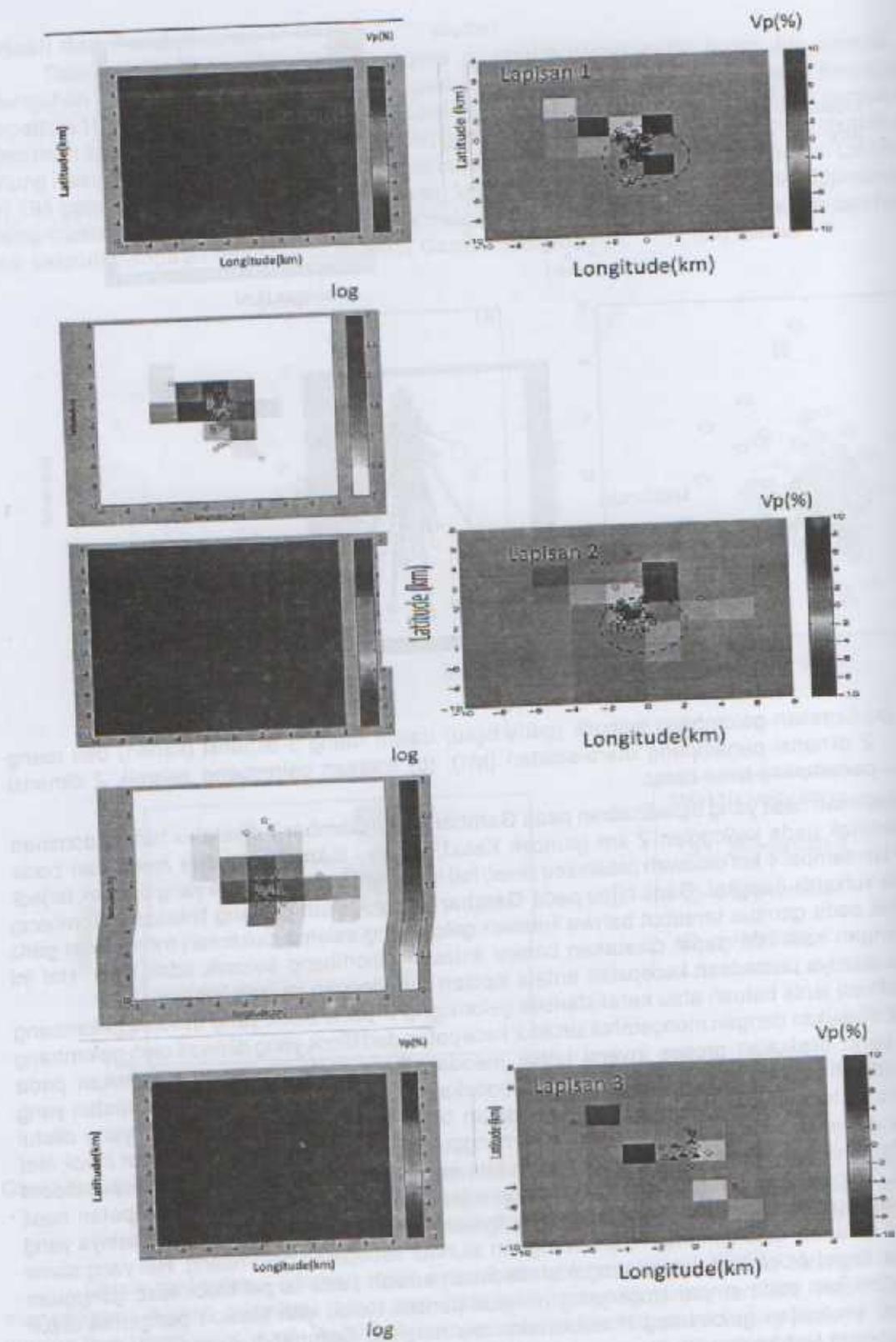
Untuk mengetahui lintasan sinar seismik dari hiposenter ke stasiun seismik, maka menganggap daerah penelitian berukuran  $20 \times 20 \times 16$  km<sup>3</sup> yang terdiri dari 800 block yang masing berukuran  $2 \times 2 \times 2$  km<sup>3</sup>. Dari hasil metode *forward modelling ray tracing pseudo* digambarkan lintasan seinar seismik dari hypocenter ke stasiun seismik sebagai berikut:



Lintasan gelombang seismik (garis hijau) dalam ruang 3 dimensi (kanan) dan ruang 2 dimensi penampang utara-selatan (kiri); (b) lintasan gelombang seismik 2 dimensi penampang timur barat.

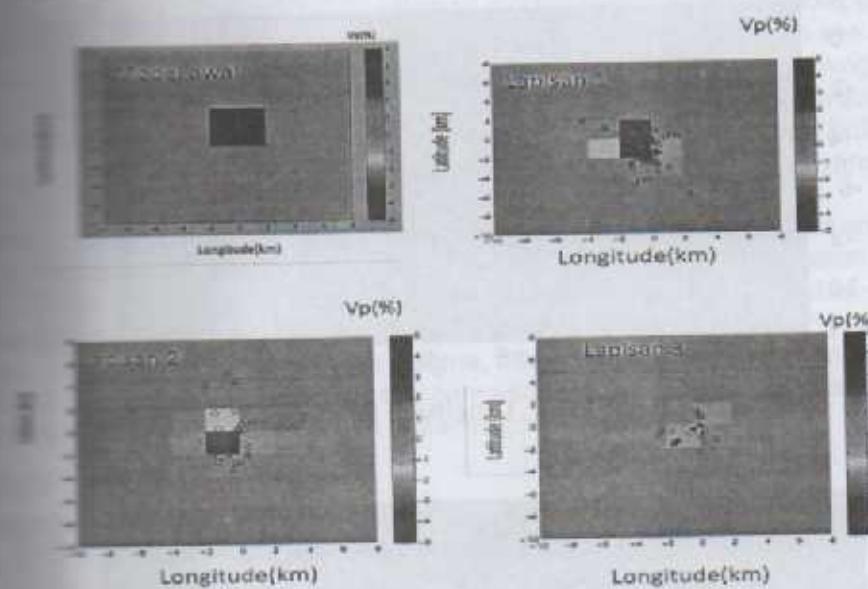
Menurut hasil yang diperlihatkan pada Gambar 6 dan Gambar 7 diketahui bahwa dominan gelombang P pada ketinggian 2 km (puncak Kelud) diatas 0 km (*mean sea level*) dan pada ketinggian sampai 4 km dibawah *mean sea level*, hal ini berarti bahwa gempa yang banyak terjadi di Gunung Kelud dangkal. Garis hijau pada Gambar 7 merupakan panjang lintasan gelombang seismik pada gambar tersebut bahwa lintasan gelombang seismik bukanlah merupakan garis lurus. Dapat juga kita latakan bahwa lintasan gelombang seismik tidak linier. Hal ini menunjukkan perbedaan kecepatan antara lapisan satu dengan lapisan lainnya.

Untuk mengetahui jenis batuan atau karakteristik gelombang P pada block yang dilewati gelombang seismik dilakukan dengan mengetahui struktur kecepatan dari block yang dilewati oleh gelombang seismik. Untuk itu dilakukan proses inversi untuk mendapatkannya. Inversi yang digunakan pada metode tomogram menggunakan pendekatan *Least Square*. Struktur kecepatan yang diperoleh pada tomogram (gambar) menggambarkan besarnya kecepatan tiap block yang dilalui oleh gelombang P yang selanjutnya hasil ini di cek menggunakan *checkerboard* dan *target block test* untuk sejauh mana hasil tomogram struktur kecepatan dapat dipercaya. *Checkerboard* merupakan memberi gangguan (dalam penelitian ini sebesar 10%) pada kecepatan hasil tomogram, kemudian dilakukan proses *forward modelling* dan inversi seperti halnya yang dilakukan pada data real dalam memperoleh tomogram struktur kecepatan gelombang. Hal yang sama dilakukan pada *target block test*, tetapi yang membedakan adalah pada *target block test*, gangguan yang diberikan pada empat block yang meliputi puncak Kelud dan stasiun pengamat untuk mengetahui kecepatan gelombang P akibat aktivitas magma. Gambar 8 memperlihatkan hasil *checkerboard test* berupa struktur gelombang P dan densitas untuk tiga lapisan Gunung Kelud yang diperoleh pada ketinggian 2 km (puncak Kelud) sampai 0 km (*mean sea level*), 0 km sampai 2 km sampai 4 km dibawah *mean sea level*.



**Gambar 8.** Model checkerboard test dan densitas pada lapisan 1, 2 dan 3. Lingkaran dengan garis putus-putus berwarna merah menunjukkan pola checkerboard pada block yang bersifat dilalui oleh gelombang P akan kembali ke model awal setelah dilakukan inversi

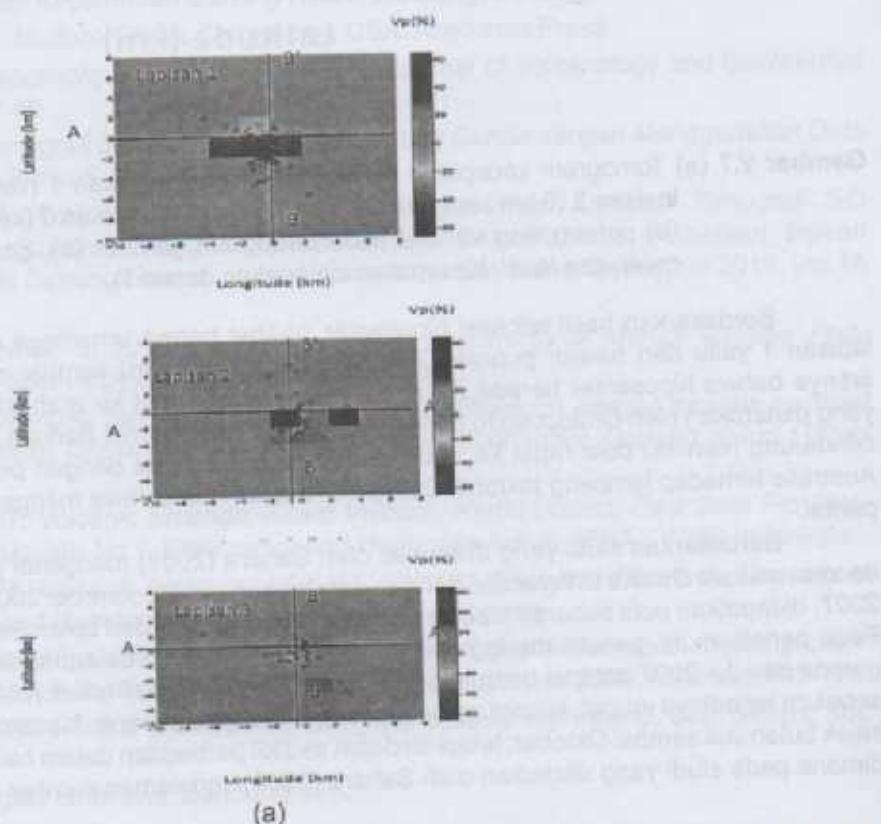
target block test pada lapisan yang sama dengan Gambar 8 diperlihatkan pada



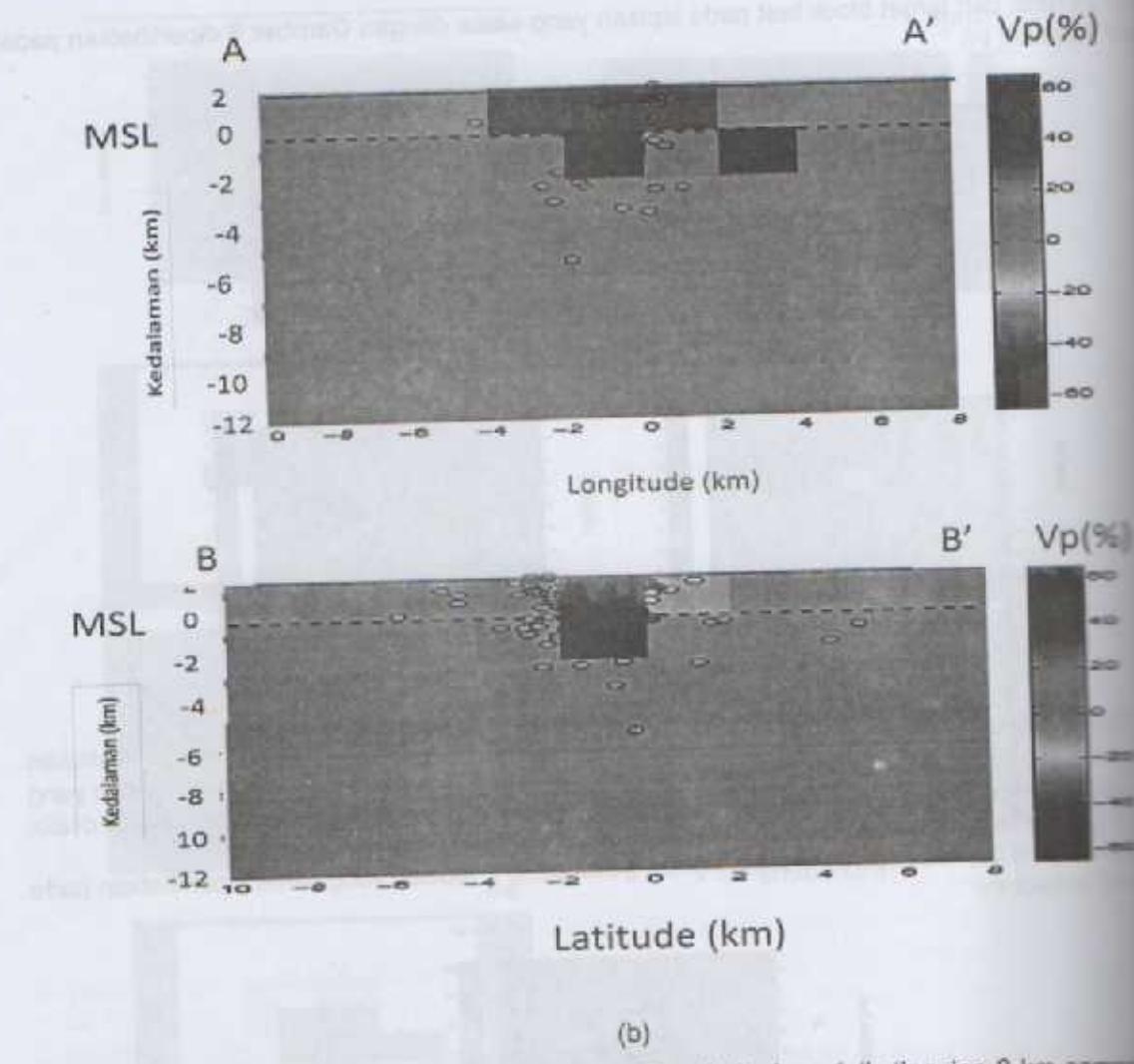
Gambar 9. Target block test

Dari Gambar 9 diketahui bahwa pada block yang diberi gangguan -5 % setelah dilakukan smearing dan inversi, model tomogram yang dihasilkan menunjukkan struktur kecepatan yang tersusun terdapat *smearing* di sekelilingnya hal ini menandakan bahwa block yang banyak dilalui gelombang P dapat mengembalikan struktur kecepatan ke model awal.

Sementara itu, hasil dari inversi tomogram gelombang P lapisan yang sama diperlihatkan pada Gambar 10 berikut ini:



(a)



Gambar V.7 (a) Tomogram kecepatan gelombang P pada lapisan 1 (ketinggian 2 km sampai lapisan 2 (0 km sampai kedalaman 2km) dan lapisan 3 (kedalaman 2 km sampai mean sea level. Kecepatan dinyatakan dalam %

Berdasarkan hasil relokasi hiposenter, terlihat bahwa umumnya sumber gempa berada di lapisan 1 yaitu dari bawah puncak Gunung Kelud (1.731 km) sampai *mean sea level* (0 km) yang artinya bahwa hiposenter berada dekat permukaan dan rapat ke arah selatan Gunung Kelud yang diutarakan oleh Brotopuspito & Wahyudi (2007) dalam jurnal Berkala MIPA 2007. Hiposenter cenderung memiliki pola rapat ke arah selatan ini berasosiasi dengan penyusupan lempeng Australia terhadap lempeng tektonik Eurasia di bawah Pulau Jawa mengarah ke utara dan tenggara pantai.

Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Sahara (2009) mengenai penentuan lokasi hiposenter dengan metode *Double Differential*, dengan data gempa dari September 2007 sampai dengan November 2007, didapatkan pola sebaran hiposenter yang naik terhitung dari bulan September sampai November. Pada penelitian ini, penulis menggunakan metode *grid search* dalam relokasi hiposenter dengan data gempa dari Juli 2007 sampai dengan pertengahan Oktober 2007 untuk melihat aktivitas Gunung Kelud sebelum terjadinya erupsi, secara umum penulis mendapat sebaran hiposenter yang juga naik terhitung sejak bulan Juli sampai Oktober, tetapi terdapat sedikit perbedaan dalam hal kedalaman sumber gempa dimana pada studi yang dilakukan oleh Sahara (2009) kedalaman sumber gempa yang

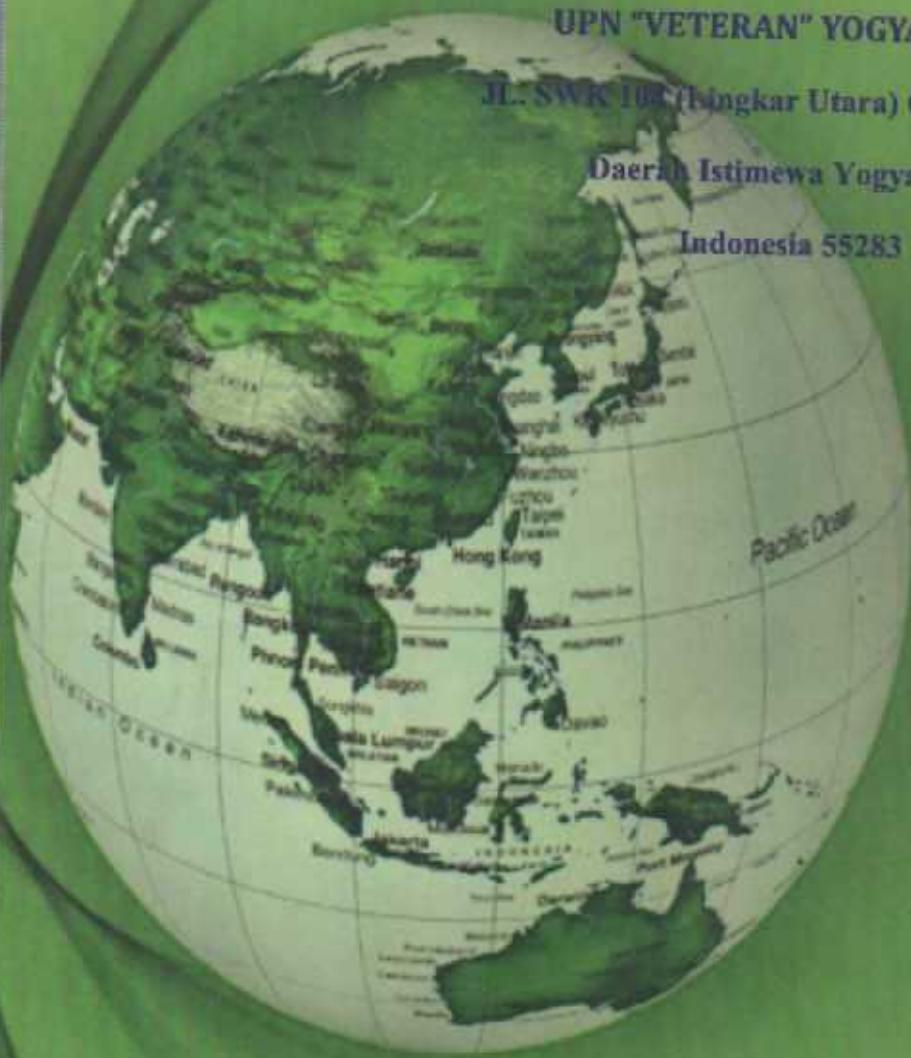
berada pada 5 km di bawah *mean sea level* (0 km) dan dalam penelitian ini pada didapatkan kedalaman terdalam sumber gempa berada pada 3 km di bawah *mean sea level*. Pada Oktober 2007, kedalaman sumber gempa terdalam pada penelitian ini sama yang dilakukan oleh Sahara (2009) yaitu pada 2 km di bawah *mean sea level*.

Posisikan hiposenter yang cenderung naik dari Juli 2007 sampai dengan pertengahan dengan kedalaman acuan 5 km di bawah *mean sea level* untuk bulan Juli, 3 km di bawah untuk bulan September dan 2 km di bawah *mean sea level* untuk bulan Oktober yang gempa dalam berkorelasi dengan adanya pergerakan material panas yang bersumber dari naik ke permukaan.

Inversi tomografi waktu tunda terhadap data real menunjukkan bahwa anomali kecepatan di lapisan 1, tepatnya di bawah puncak Gunung Kelud, merupakan lapisan dangkal dengan permukaan. Anomali kecepatan rendah ini dapat berasosiasi dengan naiknya Gunung Kelud ke permukaan sebelum terjadinya erupsi pada November 2007 yang dengan peningkatan aktivitas magma, dikarenakan adanya tekanan yang sangat tinggi gunungapi yang menerobos ke permukaan melalui saluran yang berupa rekahan yang puncak gunungapi dengan dapur magma (Lees, 2007).

## Pustaka

- Sahara, K.S. & Wahyudi, 2007. *Erupsi Gunung Kelud dan Nilai-B Gempa bumi di sekitarnya*. MPA, 17(3), September 2007
- L., Papazachos, C., Panagiotopoulos, D., Hatzidimitriou, P., Bonhoff, M., Rische, M., and T., 2008. *P and S velocity structure of the Santorini-Colombo volcanic system (Aegean Sea, Greece) obtained by non-linier inversion travel times and its tectonic implications*. Journal of Geophysics,
- H. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).
- S., 2007. *Pengamatan Kegempaan Gunung Kelud*. Bandung: PVMBG.
- T.C., 1995. *Modern Global Seismology*. USA: Academic Press.
2007. *Seismic tomography of magmatic systems*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 167 (2007) 37-56
- A.D., 2005. *Studi Tomografi 3-D Non Linier Untuk Gunung Guntur dengan Menggunakan Data Waktu Tiba Gelombang P dan S (Tesis)*. Bandung: ITB
- A., Suantika, G., & Widiantoro, S. 2010. Perbandingan Hasil Atenuasi Tomografi 3-D Menggunakan metode Spectral Fitting & Spectral Radio Dalam Usaha Pemetaan Bawah Permukaan (Studi Kasus Gunung Guntur). Jurnal Matematika dan Sains, Desember 2010, Vol.15 No.3
- Merapi, A. dan Poupinet, G. 2000. *An Overview of the seismicity of Merapi Volcano Java, Indonesia*. Journal of Volcanology and Geothermal Research.
- D.P., 2009. *Pengembangan dan Aplikasi metode double difference dengan analisis multiplet clustering untuk penentuan lokasi hypocenter yang akurat: studi kasus Gunung Kelud (Tugas Akhir)*. Bandung: ITB.
- Report (SR-1), 2007. *Volcanic Eruption, Kelud Volcano, Kediri District, East Java Province, Republic of Indonesia, Update No.1*. Emergency and Humanian Action, (EHA), WHO Indonesia.
- Report (SR-4), 2007. *Volcanic Activities, Mt Kelud Volcano, East Java Peovince, Republic of Indonesia*. Emergency and Humanian Action, (EHA), WHO Indonesia.
- Sutiyakto, 2000. *Kajian dan Mitigasi Bencana Gempa Bumi: Studi Kasus Gempa Bumi Bengkulu, 4 Juni 2000*. Jurnal Geografi Indonesia, Volume 14, Nomor 2, September 2000, Halaman 105-120.
- J. dan Thurber,C.H., 1987 : *A fast algorithm for two-point seismic ray tracing*, Bull. Seism. Soc. Am., 77,972-986.
- Widiantoro, S. 2000. *Tomografi Geofisika*. Bandung: ITB.



## **FACULTY OF MINERAL TECHNOLOGY**

UPN "VETERAN" YOGYAKARTA

JL. SWK 100 (bingkar Utara) Condongcatur

Daerah Istimewa Yogyakarta

Indonesia 55283

ISBN: 978-602-19765-1-7