

## RELOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI DI SULAWESI TENGAH DENGAN MENGGUNAKAN METODE *GEIGER* DAN *COUPLED VELOCITY-HYPOCENTER*

Sherly Ardhya Garini, Madlazim, Endah Rahmawati

Jurusan Fisika, FMIPA Universitas Negeri Surabaya

e-mail : [sherly.ardhyagarini@gmail.com](mailto:sherly.ardhyagarini@gmail.com)

### Abstrak

Kondisi geografis pulau Sulawesi terletak pada zona pergerakan tiga lempeng tektonik besar dunia yaitu: lempeng Hindia-Australia, Eurasia dan Pasifik. Sejarah gempa bumi dan adanya patahan Palu-Koro yang berada di pulau Sulawesi menunjukkan bahwa ketepatan parameter gempa bumi sangatlah penting. Tujuan penelitian ini adalah merelokasi hiposenter di daerah Sulawesi Tengah dengan koordinat  $0,53^{\circ}$ - $1,52^{\circ}$ LS dan  $119,71^{\circ}$ - $120,12^{\circ}$ BT. Metode yang digunakan adalah *Geiger's Method with Adaptive Damping* (GAD) dan *Coupled Velocity-Hypocenter Method*. Data penelitian yang digunakan 42 data gempa bumi tektonik. Hasil relokasi menggunakan metode GAD secara matematis lebih baik dengan nilai RMS rata-rata 0,12 detik dibandingkan dengan metode *Coupled Velocity-Hypocenter* dengan nilai rata-rata RMS 0,43 detik. Hal tersebut dikarenakan formula yang digunakan untuk menentukan waktu residual yang berbeda, dimana model kecepatan pada metode *Coupled Velocity-Hypocenter* telah di perbaharui menggunakan persamaan *Kissling*. Posisi hiposenter hasil relokasi menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter* lebih sesuai dengan kondisi seismotektonik daerah penelitian dibandingkan dengan hasil relokasi menggunakan GAD. Hiposenter hasil relokasi menggunakan *Coupled Velocity-Hypocenter* sebagian besar terkonsentrasi tepat di sesar-sesar kecil yang berada di area penelitian.

**Kata kunci :** relokasi hiposenter, *Geiger*, *Coupled Velocity-Hypocenter*.

### Abstract

Sulawesi island is geographically located in the movement zone of three tectonic plates of the world, namely : the Indian-Australia plate, Eurasian and Pasific. History of earthquake and presence of Palu-Koro fault in Sulwesi island, showed that the accuracy of earthquake parameters is very important. This study purposed to relocate hypocenter in Central Sulawesi which has coordinates of  $0,53^{\circ}$  $1,52^{\circ}$ S and  $119,7^{\circ}$  $120,12^{\circ}$ E. The method used are *Geiger's Method with Adaptive damping* (GAD) and *Coupled Velocity-Hypocenter Method*. This study used data of 42 tectonic earthquake events. The result of the GAD relocation was mathematically better with an average RMS of 0,12 second instead of the *Coupled Velocity-Hypocenter* relocation with an average RMS of 0,43 second. The difference result/RMS of two methods is caused by the different formula used to calculate the residual time. Furthermore, *Coupled Velocity-Hypocenter* method also update velocity model by *Kissling* equation. The hypocenter relocation using *Coupled Velocity-Hypocenter* method is more appropriate with seismotectonic conditions of regional study compared with the result relocation of using GAD. Hypocenter relocation using *Coupled Velocity-Hypocenter* mostly concentrated in small faults in the area of research.

**Keywords:** *hypocenter relocation, Geiger, Coupled Velocity-Hypocenter.*

Universitas Negeri Surabaya

### PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar dunia. Selain itu, Indonesia juga merupakan salah satu daerah rawan bencana. Hal ini karena posisi negara Indonesia yang terletak di antara pertemuan lempeng tektonik besar Hindia-Australia, Eurasia, dan Pasifik, yang menjadikan negara ini rawan gempa bumi tektonik dan letusan gunung api.

Pergerakan relatif dari lempeng-lempeng tersebut juga menimbulkan terjadinya sesar-sesar yang selanjutnya dapat berkembang menjadi daerah pusat sumber gempa bumi (BMKG, 2010). Salah satu daerah

yang rawan mengalami gempa bumi di Indonesia adalah daerah Sulawesi.

Sehubungan dengan kondisi tektonik tersebut, maka terdapat beberapa daerah yang harus diwaspadai yakni daerah perpotongan atau persinggungan di antara patahan, karena pada dasarnya gempa dapat berpotensi dan bergenerasi menimbulkan bencana geologi. Sulawesi memiliki banyak sesar-sesar lokal aktif yang dapat memicu terjadinya bencana gempa bumi. Salah satu sesar aktif tersebut adalah sesar Palu-Koro. Patahan atau sesar Palu-Koro adalah salah satu sesar yang terdapat di Sulawesi Tengah yang memanjang dari utara (kota Palu) ke selatan (Malili) hingga teluk Bone sepanjang  $\pm 240$

km yang bersifat *sinistral* dan aktif dengan kecepatan sekitar 25-30 mm/tahun (Kaharuddin dkk, 2011).

Pergerakan sesar yang sangat aktif di wilayah Sulawesi Tengah menjadikan daerah ini sering diguncang gempa bumi. Berdasarkan informasi BMKG beberapa catatan sejarah gempa bumi dan tsunami yang berlangsung sejak tahun 1927, seperti gempa bumi dan tsunami Palu 1927, Parigi 1938, Tambu 1968, Toli-Toli dan Palu 1996, dan gempa bumi terakhir yang cukup besar dirasakan di daerah Sulawesi Tengah adalah gempa bumi 6,2 SR pada tanggal 18 Agustus 2012 (Daryono, 2011). Gempa bumi tersebut terjadi pada pukul 16:41:53 WITA dengan koordinat 1,21° LS – 120,08° BT dengan kedalaman 10 km. Data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) menyebutkan bahwa gempa tersebut mengakibatkan 5 orang meninggal dunia, 17 orang luka berat, 25 orang luka ringan, 344 kepala keluarga mengungsi serta menimbulkan kerusakan di antaranya 165 rumah rusak berat, 120 rumah rusak sedang dan 296 rumah rusak ringan (BNPB, 2012).

Catatan sejarah gempa bumi dan banyaknya patahan atau sesar lokal yang berada pada daerah Sulawesi Tengah menunjukkan bahwa ketepatan dan akurasi informasi parameter gempa bumi yang terjadi adalah hal yang sangat penting. Fakta di lapangan menunjukkan bahwa penelitian dalam menentukan ketepatan parameter gempa bumi pada daerah Sulawesi Tengah masih jarang dilakukan. Informasi ketepatan parameter gempa bumi akan membantu upaya mitigasi gempa bumi melalui kajian lanjut identifikasi sesar atau patahan lokal yang menjadi penyebab terjadinya gempa bumi tektonik. Studi ini juga dapat digunakan untuk menentukan daerah potensi panas bumi. Salah satu upaya untuk meningkatkan akurasi dan ketepatan informasi parameter gempa bumi adalah dengan melakukan relokasi hiposenter gempa bumi.

Salah satu metode relokasi yang dapat digunakan adalah metode Geiger dengan menggunakan piranti lunak Geiger's Method with Adaptive Damping (GAD) yang merupakan metode penentuan hiposenter tunggal, yakni menghitung waktu residual yaitu selisih antara waktu pengamatan (*observed time*) dan waktu perhitungan (*calculated time*). Menurut Madrinovella dkk (2012), hasil penentuan lokasi hiposenter menggunakan metode GAD lebih banyak yang sesuai dengan data keadaan geologi (lebih dekat dengan sumber, yaitu sesar dan gunung api) dibandingkan dengan menggunakan metode tiga lingkaran. Namun, perhitungan dengan menggunakan metode tersebut umumnya masih mengandung kesalahan dari struktur kecepatan gelombang seismik yang tidak termodelkan (Rohadi dkk, 2012). Oleh karena itu, kelemahan metode tersebut

membutuhkan pembaharuan model struktur kecepatan gelombang 1-D.

Pembaharuan model kecepatan dan relokasi hiposenter dapat dilakukan menggunakan piranti lunak VELEST 3.3 dengan menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter*. Metode ini merupakan metode relokasi gempa dan koreksi stasiun secara bersamaan menggunakan prinsip metode Geiger, di mana pembaharuan model kecepatan menggunakan persamaan *Kissling*. Menurut Madrinovella dkk (2012), hasil pembaharuan menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter* didapatkan model kecepatan baru dengan  $v_p/v_s$  yang berbeda di setiap lapisan. Sedangkan menurut Iswati dkk (2013), hasil relokasi hiposenter menggunakan *Coupled Velocity-Hypocenter* menghasilkan nilai *Root Mean Square (RMS) error* sebesar 0,50 dan terdapat kesesuaian dengan zona subduksi (laut) dan pada penelitian di daerah zona sesar Tengah-Durance (South-Eastern France) di dapatkan nilai akhir RMS 0.27 detik dengan GAP maksimum 220° dan menghasilkan lokasi hiposenter yang lebih tepat dan konsisten. Secara umum, lokasi pusat gempa menunjukkan hubungan antara kegempaan dan sesar tektonik utama (Imposa *et al.*, 2009).

Sebelum melakukan relokasi diperlukan informasi tentang parameter-parameter gempa bumi, yang meliputi : (1) Waktu kejadian gempa bumi (*Origin Time*); (2) Episenter; (3) Kedalaman sumber gempa bumi; dan (4) Kekuatan gempa bumi atau magnitudo.

Relokasi hiposenter merupakan koreksi dari parameter hiposenter gempa bumi. Relokasi hiposenter dilakukan untuk memperbaharui lokasi hiposenter gempa bumi dari instansi yang bergerak di bidang geofisika. Faktor penting untuk menentukan hiposenter gempa bumi adalah waktu tiba gelombang, waktu tempuh gelombang, kecepatan gelombang dan *origin time*.

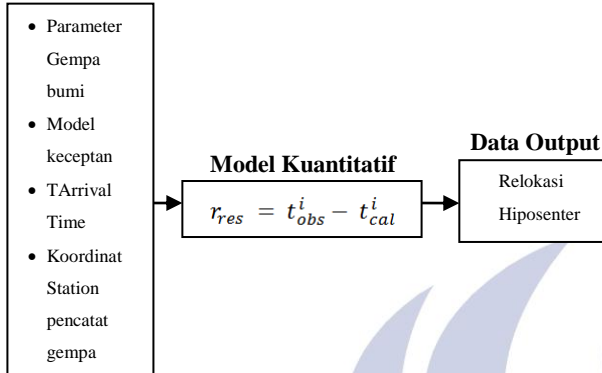
Gelombang primer merupakan gelombang yang tercatat pertama kali di seismogram dan dapat merambat pada semua medium yakni padat, cair dan gas. Sedangkan gelombang sekunder merupakan gelombang tercepat kedua yang tercatat oleh seismogram yang hanya dapat merambat pada medium padat saja.

Meninjau dari permasalahan tersebut maka diperlukan upaya-upaya untuk meningkatkan keakurasian informasi ketepatan parameter gempa (hiposenter). Pada penelitian ini data hiposenter gempa bumi di daerah Sulawesi Tengah akan direlokasi menggunakan dua metode yaitu Geiger dan *Coupled Velocity-Hypocenter*. Hasil relokasi dari kedua metode akan dibandingkan dan dianalisa, sehingga dapat ditarik kesimpulan metode yang lebih sesuai dengan kondisi seismotektonik Sulawesi Tengah. Metode *Coupled Velocity-Hypocenter* yang diterapkan akan menghasilkan model kecepatan baru.

## METODE

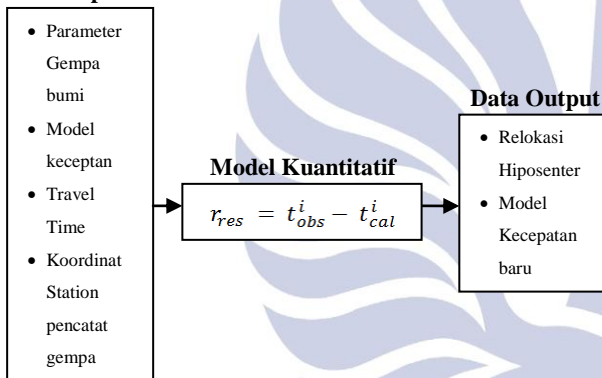
Relokasi yang pertama pada penelitian ini merupakan relokasi hiposenter tunggal akan dilakukan dengan menggunakan piranti lunak GAD ver.1 (Nishi., 2005) dan relokasi kedua menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter* menggunakan piranti lunak VELEST 3.3

### Data Input



Gambar 1. Skema rancangan metode Geiger.

### Data Input



Gambar 2. Skema rancangan metode Coupled Velocity-Hypocenter.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari *origin time*, lokasi episenter, kedalaman pusat gempa, magnitudo dan waktu tiba gelombang gempa di setiap stasiun yang diperoleh dari katalog data BMKG. Data gempa yang digunakan  $\pm 42$  data untuk gempa-gempa lokal yang terjadi di wilayah penelitian  $0,53^{\circ}$ - $1,52^{\circ}$  LS dan  $119,71^{\circ}$ - $120,12^{\circ}$ BT, dengan magnitudo  $\geq 3,8$  ML dan kedalaman 0-25 km. Stasiun perekam gelombang seismik yang digunakan diantaranya adalah SDTA, PMBB, BASE, LBAN dan PCI.

Pada penelitian ini sebagai model awal kecepatan gelombang P ( $V_p$ ) yang digunakan untuk relokasi menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter* adalah model kecepatan hasil penelitian Rochman dkk (2012) untuk model kecepatan 1-D gelombang P daerah Minahasa, Sulawesi Utara. Model awal struktur kecepatan dibuat dengan asumsi model bumi berlapis.

Tabel 1. Model awal 1-D kecepatan gelombang P daerah Minahasa, Sulawesi Utara (Rochman dkk, 2012)

Kedalaman (Km)	Kecepatan Gel. P (Km/s)
0,00 - 1,00	3,28
1,00 - 3,00	3,46
3,00 - 6,00	3,18
6,00 - 10,00	2,95
10,00 - 15,00	5,59
15,00 - 20,00	5,10
20,00 - 25,00	6,68
25,00 - 30,00	6,98
30,00 - 36,00	9,07

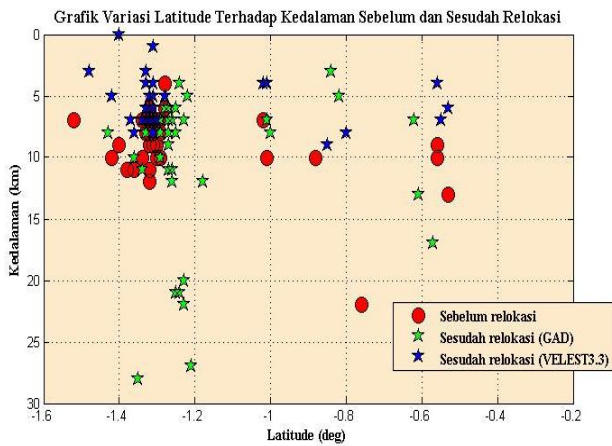
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Relokasi GAD dan Coupled Velocity-Hypocenter

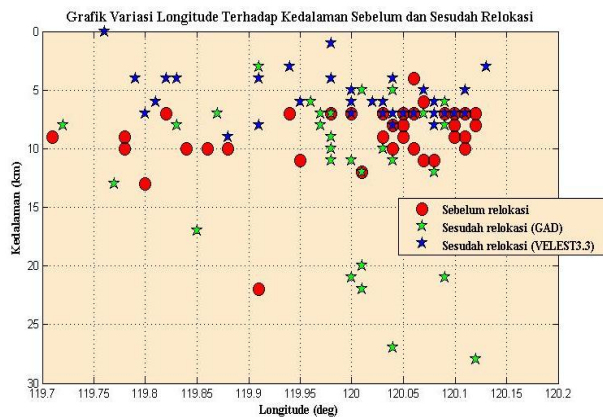
Setelah dilakukan relokasi dengan *Geiger's Method with Adaptive Damping* (GAD) dan *Couple Velocity-Hypocenter Method* dapat dibandingkan hiposenter awal, hiposenter hasil perhitungan GAD dan metode *Coupled Velocity-Hypocenter*.

Faktor utama yang menyebabkan perubahan lokasi sebelum dan sesudah relokasi adalah model kecepatan yang digunakan kurang sesuai dengan kondisi bawah permukaan daerah penelitian, karena model kecepatan 1-D yang digunakan akan merepresentasikan kondisi geologi bawah permukaan area penelitian. Seperti yang diungkapkan oleh Rachman dan Nugraha (2012) bahwa, model kecepatan yang digunakan dalam relokasi hiposenter gempa sangat berpengaruh dalam penentuan hasil relokasi hiposenter. Jika model kecepatan yang digunakan tidak sesuai dengan kondisi geologinya menyebabkan hasil relokasi tidak sesuai dengan kondisi tektoniknya. Faktor lainnya adalah kualitas *picking* gelombang P dan S dari sinyal gempa bumi yang terbaca di setiap stasiun seismik. Perbaikan *picking* gelombang akan berpengaruh terhadap bacaan waktu tiba gelombang dari sinyal gempa bumi yang di deteksi oleh masing-masing stasiun.

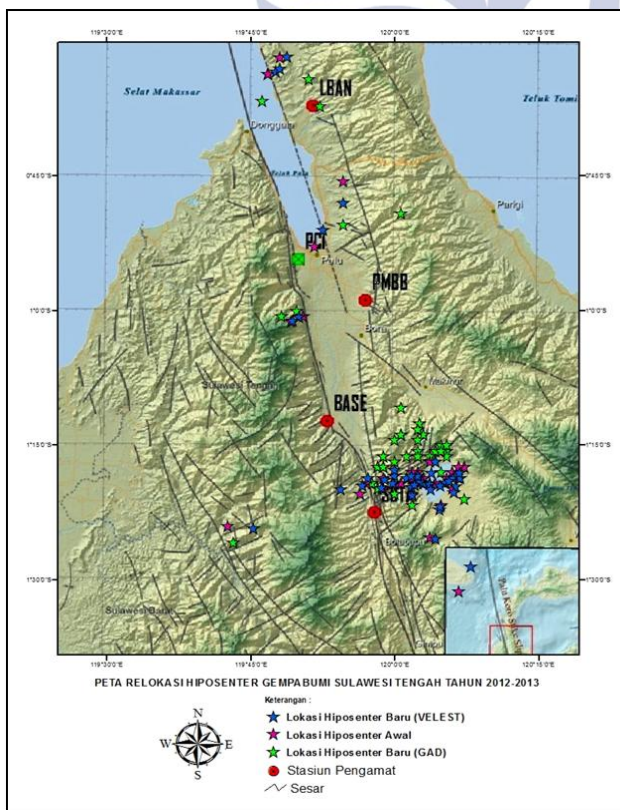
Berikut adalah hasil relokasi hiposenter penelitian. Apabila dilihat dari perubahan kedalaman hiposenter, sebaran kedalaman hasil relokasi menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter* menjadi lebih dangkal. Hiposenter gempa sebelum dan sesudah relokasi dari kedua metode terkonsentrasi pada kedalaman 4-13 km. Sehingga dapat disimpulkan bahwa gempa yang terjadi pada daerah penelitian pada bulan Januari tahun 2012-Desember tahun 2013 merupakan jenis gempa dangkal. Seperti yang terlihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Variasi latitude terhadap kedalaman



Gambar 4. Variasi longitude terhadap kedalaman



Gambar 5. Perbandingan lokasi hiposenter awal, relokasi GAD dan VELEST 3.3.

Kontrol dari metode ini adalah kesesuaian dengan kondisi seismotektonik penelitian dan nilai kesalahan minimum (RMS), semakin kecil nilai RMS maka akan semakin baik. RMS ini didapatkan dari residual yang merupakan selisih antara waktu pengamatan ( $t_{obs}$ ).

Apabila dilihat dari sebaran hiposenter hasil relokasi dengan GAD, tampak sebagian besar epicenternya menyebar di sebelah utara sesar-sesar kecil di utara danau Lindu. Hal tersebut terjadi mungkin disebabkan karena model kecepatan yang digunakan tidak sesuai, sehingga model kecepatan tersebut tidak dapat menggambarkan keadaan geologi yang mendekati sebenarnya di daerah Sulawesi Tengah sehingga hasilnya tidak begitu baik. Berbeda ketika menggunakan model kecepatan daerah Sulawesi Utara pada metode *Coupled Velocity-Hypocenter*, maka diperoleh sebaran epicenter yang lebih baik. Sebaran epicenter sebagian besar lebih rapat dan mendekati bidang sesar. Gempa-gempa di bagian utara juga posisinya lebih baik yaitu mendekati sesar Palu-Koro.

Namun, apabila di lihat dari nilai RMS dari kedua metode. Hasil RMS GAD lebih kecil yakni 0,12 detik dibandingkan dengan hasil RMS metode *Coupled Velocity-Hypocenter* yakni sebesar 0,43 detik dengan GAP sebesar 287°. Hal tersebut dikarenakan, meskipun pada dasarnya kedua metode sama-sama mencari nilai kesalahan residual minimum. Namun formula yang merupakan persamaan empiris dalam menentukan nilai residu antara metode GAD dan *Coupled Velocity-Hypocenter* berbeda.

Relokasi hiposenter dari kedua metode tersebut, memiliki kesamaan dimana posisi hiposenter sebagian besar terkonsentrasi di sebelah utara dan barat danau Lindu. Apabila dilihat dari kondisi seismotektonik lokasi gempa bumi dan sekitarnya merupakan daerah yang banyak terdapat sesar-sesar kecil. Hal ini memungkinkan terjadinya gempa bumi tektonik. Sehingga bila melihat hasil pemetaan gempa bumi sebelum dan sesudah relokasi dari kedua metode tersebut, diduga gempa bumi tersebut merupakan aktivitas dari sesar-sesar kecil yang berada disekitar area penelitian.

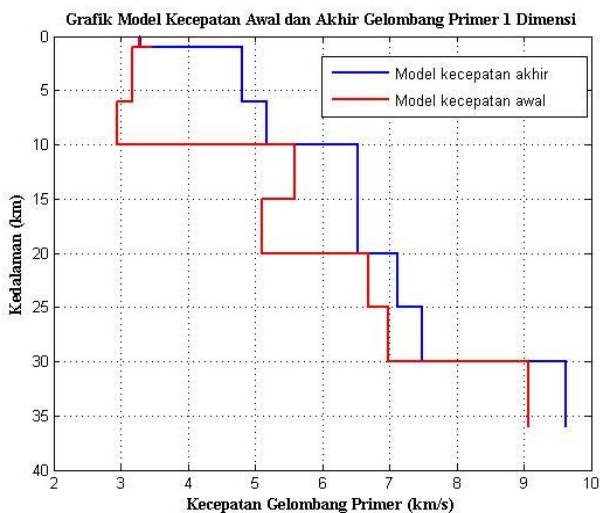
## B. Model Kecepatan

Dengan menggunakan model kecepatan awal yakni model 1D kecepatan gelombang P hasil penelitian Rochman dkk pada tahun 2012 maka di dapatkan hasil model kecepatan baru hasil inversi menggunakan piranti lunak VELEST 3.3.

Model 1D kecepatan gelombang P yang dihasilkan pada penelitian ini menunjukkan perbedaan dibandingkan model kecepatan awal 1D gelombang P hasil penelitian dari Rochman dkk (2012). Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

**Tabel 2.** Model kecepatan awal 1-D gelombang P dan penelitian

Model kecepatan			
Awal (Rochman dkk, 2012)		Akhir (Hasil Penelitian)	
Kedalaman (km)	Kecepatan Gel.P (km/s)	Kedalaman (km)	Kecepatan Gel.P (km/s)
0.00-1.00	3.28	0.00-1.00	3.30
1.00-3.00	3.46	1.00-3.00	4.80
3.00-6.00	3.18	3.00-6.00	4.80
6.00-10.00	2.95	6.00-10.00	5.18
10.00-15.00	5.59	10.00-15.00	6.53
15.00-20.00	5.10	15.00-20.00	6.53
20.00-25.00	6.68	20.00-25.00	7.12
25.00-30.00	6.98	25.00-30.00	7.49
30.00-36.00	9.07	30.00-36.00	9.63



**Gambar 6.** Model kecepatan 1D gelombang P awal dan akhir

Perbedaan tersebut dikarenakan perbedaan wilayah penelitian, model kecepatan awal yang digunakan merupakan model kecepatan daerah Minahasa, Sulawesi Utara. Sedangkan wilayah penelitian ini adalah daerah Sulawesi Tengah. Pada struktur kerak benua secara umum, diskontinuitas conrad berada pada kedalaman 15 km dan diskontinuitas Mohorovisic (moho) berada pada kedalaman 34 km (Waluyo, 2002). Apabila dilihat pada Gambar 6, diskontinuitas conrad terjadi pada kedalaman 10 km. Sedangkan diskontinuitas Mohorovisic (moho) terjadi pada kedalaman 30 km.

Hal ini menunjukkan bahwa setiap wilayah memiliki model kecepatan 1D gelombang P yang berbeda sesuai dengan kondisi geologi bawah permukaan. Model kecepatan hasil inversi penelitian ini menunjukkan bahwa semakin dalam maka semakin besar pula kecepatan

gelombang P. Hal tersebut menyatakan bahwa semakin kedalam maka lapisan penyusun bumi semakin rapat, yang di tandai dengan semakin besarnya kecepatan gelombang P.

## PENUTUP

### Simpulan

Pada penelitian ini menggunakan perambatan gelombang primer. Faktor penting dalam menentukan hiposenter gempa bumi adalah waktu tiba gelombang primer dan sekunder ( $t_p/t_s$ ), kecepatan gelombang primer ( $v_p$ ) dan *origin time*. Gelombang primer merupakan gelombang yang tercatat pertama kali di seismogram. Hal ini menyebabkan gelombang primer lebih mudah untuk dideteksi sehingga mendapatkan waktu tiba maupun waktu tempuh.

Sebaran hiposenter hasil relokasi dengan GAD sebagian besar tampak menyebar di sebelah utara sesar – sesar kecil disebelah utara danau Lindu dan di sebelah barat danau Lindu. Nilai rata-rata RMS hasil relokasi sebesar 0,12 detik. Sedangkan untuk relokasi hiposenter menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter*, hasil relokasi sebagian besar terkonsentrasi tepat di sesar–sesar kecil di area penelitian. Nilai rata – rata RMS relatif kecil yakni 0,43 detik dan nilai GAP rata-rata sebesar 287°. Model kecepatan hasil inversi ini menunjukkan perbedaan dengan model kecepatan awal yang digunakan.

Posisi hiposenter hasil relokasi menggunakan metode *coupled velocity-hypocenter* lebih sesuai dengan kondisi seismotektonik daerah penelitian dibandingkan dengan hasil relokasi GAD, karena sebagian besar berada tepat di sesar–sesar kecil yang berada di area penelitian. Namun, relokasi hiposenter dari kedua metode tersebut memiliki kesamaan yakni posisi hiposenter setelah direlokasi sebagian besar terkonsentrasi di sebelah utara

### Saran

Pada penelitian selanjutnya perlu menggunakan model kecepatan gelombang seismik yang telah disesuaikan dengan daerah penelitian untuk mendapatkan hasil relokasi yang lebih baik serta perlu dilakukan perbandingan beberapa metode relokasi sehingga diperoleh hasil relokasi yang lebih baik.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada BMKG yang telah menyediakan data katalog gempa bumi di wilayah Bengkulu.

## DAFTAR PUSTAKA

BADAN METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA (BMKG). 2010. *InaTEWS konsep dan Implementasi*.

BNPB. 2012. *Pelajaran Berharga dari AMBON MANISE*, GEMA BNPB, Vol. 3 NO.2.

Imposa, S., Fournio, J., Raffaele, R., Scaltrito, A., Scarfi, L. 2009. Accurate hypocentre locations in the Middle-Durance Fault Zone, South-Eastern France. *Cent. Eur. J. Geosci.*, Vol. 4, 416-423.

Kaharuddin., Hutagalung, R., Nurhamdan. 2011. Perkembangan Tektonik dan Implikasinya Terhadap Potensi Gempa dan Tsunami di Kawasan Pulau Sulawesi. *PROCEEDINGS JCM MAKASSAR 2011*.

Madrinovella, I., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., Triastuty, H. 2014. Studi Penentuan dan Relokasi Hiposenter Gempa Mikro Sekitar Cekungan Bandung. *J. Geofisika*, Vol. 13, No. 2.

Nishi, K. 2005. Hypocenter Calculation Software GAD (Geiger's method with Adaptive Damping). *Silver Expert JICA Indonesia*, ver 1.

Rachman, T.D., Nugraha, A.D. 2012. Penentuan Model 1-D Kecepatan Gelombang P dan Relokasi Hiposenter Secara Simultan untuk Data Gempabumi yang Berasosiasi dengan Sesar Sumatra di Wilayah Aceh dan Sekitarnya, *JTM*, Vol. XIX, No. 1.

Rochman, J. P. G. N., Firdaus, F. R. 2012. Model Struktur 1-D Kecepatan Gelombang P di Daerah Minahasa. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, Vol. 8, No. 2.

Rohadi, S., Widiyantoro, S., Nugraha, A.D., Masturyono. 2012. Relokasi Hiposenter Gempa di Jawa Tengah Menggunakan Inversi Tomografi Double-Difference Simultan dan Data dari Katalog Maramex, *JTM*, Vol. XVIII, No. 2.

Waluyo. 2002. *Diktat Kuliah Seismologi*. Universitas Gadjah Mada.