Analisis Persebaran Seismisitas Wilayah Sumatera Selatan Menggunakan Metode *Double Difference*

Dewi Fajriyyatul Maulidah, Bagus Jaya Santosa
Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: bjs@physics.its.ac.id

***Abstrak*—Sumatera Selatan merupakan salah satu pulau yang sering mengalami bencana gempa bumi. Sebagai upaya mitigasi bencana gempa bumi, diperlukan studi kegempaan untuk menentukan pusat gempa dengan presisi yang tinggi. Salah satu teknik yang digunakan untuk merelokasi gempa bumi adalah algoritma *double difference*. Prinsip dari metode *double difference* adalah *residual time* dari waktu tempuh yang diamati dan hasil perhitungan antara dua *event* gempa bumi yang berdekatan pada stasiun pencatat yang sama, dengan syarat jarak antar *event* harus lebih dekat daripada jarak *event* ke stasiun pencatat. Relokasi gempa bumi di Wilayah Sumatera Selatan dilakukan menggunakan software hypoDD. Data yang diperlukan adalah data stasiun, waktu tiba gelombang P, dan model kecepatan bumi. Jumlah gempa bumi yang digunakan sebanyak 106 *event*. Stasiun pencatat yang digunakan sebanyak 9 stasiun. Proses relokasi dibagi menjadi dua tahap, tahap pertama menggunakan program ph2dt dan tahap kedua menggunakan program hypoDD. Hasil relokasi memberikan informasi tentang koordinat episenter yang bergeser dari posisi awal sebelum direlokasi. Tidak hanya koordinat episenter yang telah terelokasi dengan baik, didapatkan nilai RMS yang lebih kecil dibandingkan sebelum direlokasi. Pergeseran hiposenter menyebar ke segala arah dan tidak memiliki kecenderungan ke arah tertentu, namun demikian perubahan hiposenter terbanyak ke arah timur laut. Relokasi menggunakan hypoDD menunjukkan adanya peningkatan kualitas relokasi apabila dilihat dari hasil residual.**

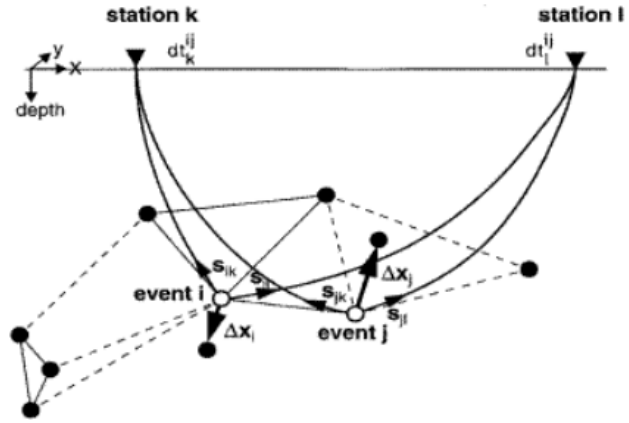
***Kata Kunci*—*Double Difference*, gempa bumi, relokasi.**

I. PENDAHULUAN

INDONESIA mempunyai posisi geografis yang terletak pada pertemuan tiga lempeng aktif dunia, yaitu lempeng Indo Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik. Hal tersebut menyebabkan Indonesia menjadi Negara yang rawan akan bencana gempa tektonik. Salah satu wilayah di Indonesia yang rawan akan bencana gempa bumi adalah Pulau Sumatera. Kegempaan di daerah Sumatera khususnya Sumatera Selatan terbilang cukup tinggi karena pertemuan antara dua lempeng tektonik, yaitu lempeng tektonik Indo-Australia yang bergerak dari arah barat daya dan menunjam ke dalam lempeng Eurasia yang berada di sebelah timur laut akan menyebabkan Pulau Sumatera mengalami pembelokan, sehingga ragam tektoniknya dipengaruhi oleh besarnya sudut interaksi serta konvergensi lempengan [1]. Penunjaman yang relatif miring menyebabkan terbentuknya patahan aktif di Sumatera. Zona patahan. Sumatera inilah yang mempunyai potensi tinggi sebagai penyebab terjadinya gempa.

Pemetaan wilayah yang rawan akan gempa bumi, studi tentang struktur kecepatan, serta analisis seismisitas, memerlukan pengetahuan yang baik tentang penentuan hiposenter gempa bumi yang akurat. Penentuan hiposenter masih belum dioptimalkan karena biasanya informasi tentang hiposenter hanya digunakan untuk memberikan informasi yang cepat kepada masyarakat. Oleh karena itu perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk merelokasi parameter hiposenter gempa bumi yang dihasilkan sebelumnya. Supaya didapatkan posisi hiposenter yang akurat yang dapat bermanfaat dalam analisis struktur secara detail, misalnya analisis tentang zona patahan dan sebaran patahan.

Telah dikembangkan banyak teknik untuk menentukan lokasi hiposenter lebih tepat. Salah satunya adalah dengan menggunakan metode *double difference*. Metode *double difference* didasarkan pada kenyataan jika jarak hiposenter antara dua gempa bumi lebih kecil dibandingkan dengan jarak antara *event* dengan stasiun pencatatnya, maka *ray path* antara sumber gempa dan stasiun pencatat hampir sama dengan panjang *ray path.*



Gambar 1. Ilustrasi Metode *Double Difference*.

Lingkaran hitam dan putih pada Gambar 1 menunjukkan hiposenter yang dihubungkan dengan pusat gempa bumi yang ada di sekitarnya dengan data korelasi silang dan katalog. Garis putus-putus menunjukkan data katalog sedangkan garis utuh menunjukkan data korelasi silang. Lingkaran putih menunjukkan *event* gempa i dan j yang terekam pada stasiun l dan k dengan selisih waktu tempuh dt_k^{ij} dan d_l^{ij}. Sedangkan Δx_i dan Δx_j merupakan vektor relokasi [2].

Waktu residu antara pengamatan dan perhitungan (Δd) pada metode *double difference* merupakan perbedaan waktu tempuh observasi dan kalkulasi antara dua *event* gempa bumi, dapat dinyatakan dalam persamaan

$$d_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (1)$$

dengan t_k^i merupakan waktu tempuh gelombang seismik ke stasiun k akibat gempa bumi i dan merupakan waktu tempuh gelombang seismik ke stasiun k akibat gempa bumi j. Selanjutnya Persamaan (2) dapat ditulis dalam bentuk [3]:

$$\Delta d = \frac{\partial t_k^i}{\partial m}\Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m}\Delta m^j \quad (2)$$

Persamaan (2) dapat ditulis menjadi

$$\Delta d = \frac{\partial t_k^i}{\partial x}\Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y}\Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z}\Delta z^i + \Delta t_k^i - \frac{\partial t_k^i}{\partial x}\Delta x^j - \frac{\partial t_k^i}{\partial y}\Delta y^j - \frac{\partial t_k^i}{\partial z}\Delta z^j - \Delta t_k^j \quad (3)$$

Apabila dinyatakan dalam bentuk matrik maka persamaannya akan menjadi

$$\begin{pmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \vdots \\ \Delta d_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial x_1}\frac{\partial t_1}{\partial y_1} & \frac{\partial t_1}{\partial z_1} & 1 \\ \frac{\partial t_2}{\partial x_2}\frac{\partial t_2}{\partial y_2} & \frac{\partial t_2}{\partial z_2} & 1 \\ \vdots \quad \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial t_n}{\partial x_n}\frac{\partial t_n}{\partial y_n} & \frac{\partial t_n}{\partial z_n} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta y \\ \Delta t \end{pmatrix} \quad (4)$$

atau

$$W\Delta d = WG\Delta m \quad (5)$$

dimana Δd adalah matriks waktu residu berdimensi M×1. M dan G berturut-turut merupakan jumlah data observasi *double difference* dan matriks Jacobi yang berdimensi M×4N. N dan Δm berturut-turut adalah jumlah gempa bumi dan matriks perubahan model yang berdimensi 4N×1, sedangkan W merupakan matriks diagonal yang menjadi pembobotan dalam persamaan perhitungan waktu tempuh gelombang [2].

Waldhauser dan Ellsworth (2000), menerapkan metode *double difference* pada patahan Hayward utara di California dan hasilnya menunjukkan struktur yang lebih fokus dibandingkan dengan metode sebelumnya [3]. Dunn pada tahun 2004 menggunakan hypoDD yang berdasarkan pada metode *double difference* untuk menguji relokasi hiposenter gempa bumi dalam usahanya mengatasi orientasi patahan sehingga memberikan pandangan yang lebih jelas terhadap tektonik zona seismic Tennessee Timur [4]. Miyazawa (2007) juga memperlihatkan bahwa metode *double difference* secara signifikan dapat meningkatkan lokasi gempa bumi mikro pada *Cold Lake* [3]. Pada kesempatan ini, akan dilakukan penelitian yang bertujuan untuk merelokasi hiposenter gempa bumi wilayah Sumatera Selatan menggunakan metode *double difference*. Relokasi diharapkan dapat meningkatkan keakuratan posisi sumber gempa bumi sehingga diperoleh posisi sumber gempa bumi yang dapat dijadikan acuan dalam studi kegempabumian lebih lanjut.

II. METODE

2.1 Relokasi Hiposenter

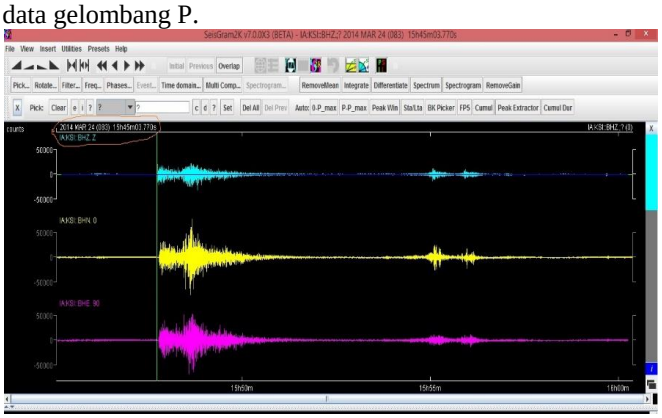
2.1.1 Konversi data

Penelitian ini menggunakan data berformat .openssl, dimana proses pengambilan data dilakukan melalui situs resmi pencatatan gempa yaitu *webdc.eu*. Data ini nantinya akan diproses dengan bantuan perangkat lunak OpenSSL dan Jrdseed untuk merubah format data ke dalam bentuk .SAC. Penelitian ini menggunakan 106 *event* yang tersebar di daerah Sumatera Selatan pada tahun 2010-2015 dengan stasiun pencatat yang digunakan sebanyak 9 stasiun. Data yang didapatkan dari hasil pemilihan data gempa berformat .OPENSSL, oleh karena itu dilakukan proses konversi data yaitu sebuah proses merubah format data dari .OPENSSL menjadi .SEED. Proses ini menggunakan sofware OpenSSL yang dapat dijalankan menggunakan *command prompt*. Hasil keluaran dari proses ini adalah data dengan format .SEED.

Setelah format data berubah menjadi .SEED, maka dilakukan proses konversi data lagi untuk merubah format data dari .SEED menjadi .SAC. Hal tersebut dilakukan karena data yang dibutuhkan dan dapat dibaca oleh software SeisGram2K70 adalah data berformat .SAC. Proses konversi data yang kedua ini menggunakan software Jrdseed yang dapat dijalankan menggunakan *command prompt*. Hasil keluaran dari proses ini adalah data dengan format .SEED yang memiliki 3 komponen yaitu BHE, BHN dan BHZ.

2.1.2 *Picking* data

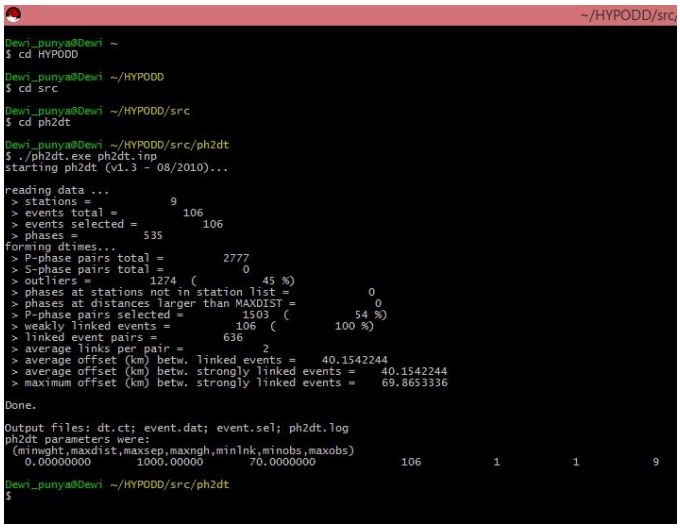
Picking data dilakukan menggunakan software SeisGram2K70, dengan software tersebut data gempa yang telah dirubah menjadi format .BHE, BHN, dan BHZ dapat ditampilkan seperti pada Gambar 2.Berikut ini contoh *picking* data gelombang P.



Gambar 2. Contoh *Picking* waktu tempuh gelombang P

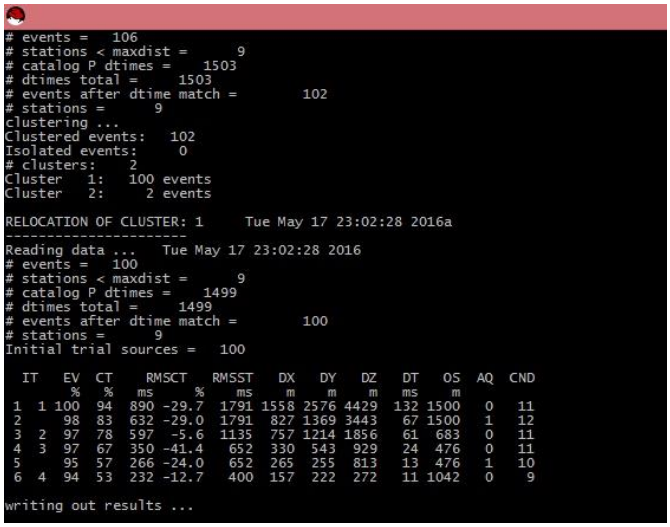
2.1.3 Pengolahan Data dengan ph2dt dan hypoDD

Tahap pertama untuk relokasi hiposenter yaitu analisa fase atau bentuk gelombang dari perbedaan *travel time* tiap *event*. Program yang digunakan untuk tahap pertama yaitu ph2dt. *Input* dari program ph2dt membutuhkan *travel time* dari gelombang yang dihasilkan tiap *event* pada setiap stasiun pencatat. Hasil *output* dari program ph2dt merupakan file-file yang digunakan sebagai masukan untuk mengolah data menggunakan program hypoDD, yaitu diantaranya file dt.ct, event.sel, event.dat, dan ph2dt.log. Kemudian untuk menjalankan program ph2dt digunakan RedHat Cgywin, apabila PC atau komputer yang digunakan tidak berbasis Linux. Sehingga didapatkan tampilan *output* dari ph2dt seperti Gambar 3.



Gambar 3. Tampilan *output windows* dan *processing* ph2dt menggunakan RedHat Cgywin

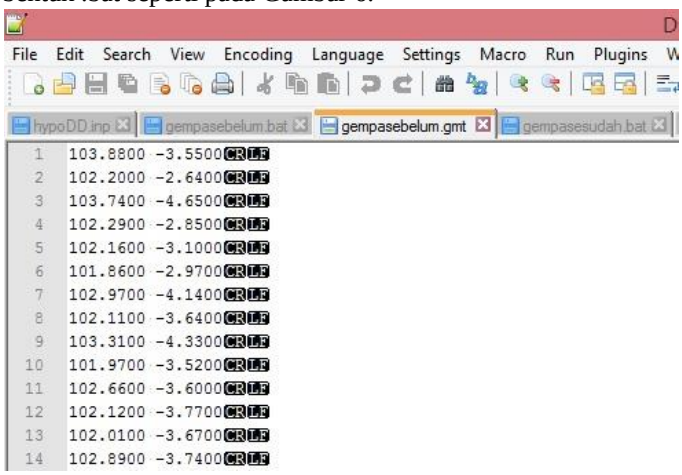
Kemudian tahap kedua yaitu mengolah data yang didapatkan dari tahap pertama untuk menentukan lokasi dari dua hiposenter yang berbeda. Output dari program ph2dt digunakan sebagai input dari program hypoDD. Keluaran dari program ph2dt adalah file dt.ct, event.sel, event.dat, dan ph2dt.log. Sedangkan inputan yang dibutuhkan untuk program hypoDD adalah file dt.ct, file event.sel atau event.dat, dan file stasiun.dat. Proses pengolahan kedua menggunakan program hypoDD. Berikut tampilan proses menggunakan hypoDD:



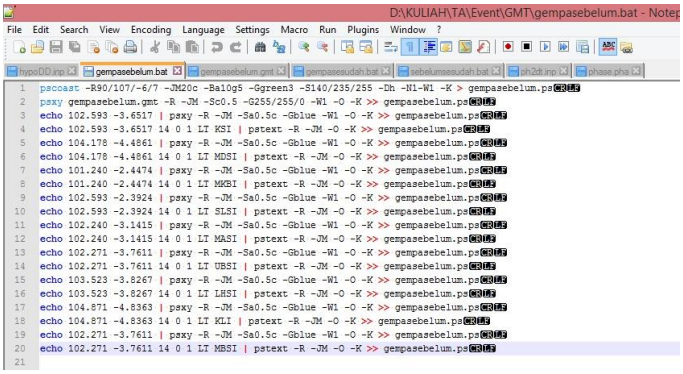
Gambar 4. Tampilan *output windows* dan *processing* hypoDD menggunakan RedHat Cgywin

2.2 Pemetaan Seismisitas

Pembuatan peta persebaran seismisitas dilakukan dengan menggunakan software GMT. Peta persebaran seismisitas akan ditampilkan untuk setiap *cluster*. Dalam pembuatan peta persebaran diperlukan *input* berupa *magnitude*, koordinat gempa dan stasiun, serta keterangan lainnya dari suatu *event* gempa. Setelah itu hasil peta persebaran akan diplot berdasarkan *magnitude* gempa. Pertama disiapkan data tentang *event* gempa dalam format .gmt seperti pada Gambar 5. Pada Gambar 5 format penulisannya adalah *longitude* kemudian baru *lattitude* dari *event* gempa. Kemudian dibuat file dalam bentuk .bat seperti pada Gambar 6.

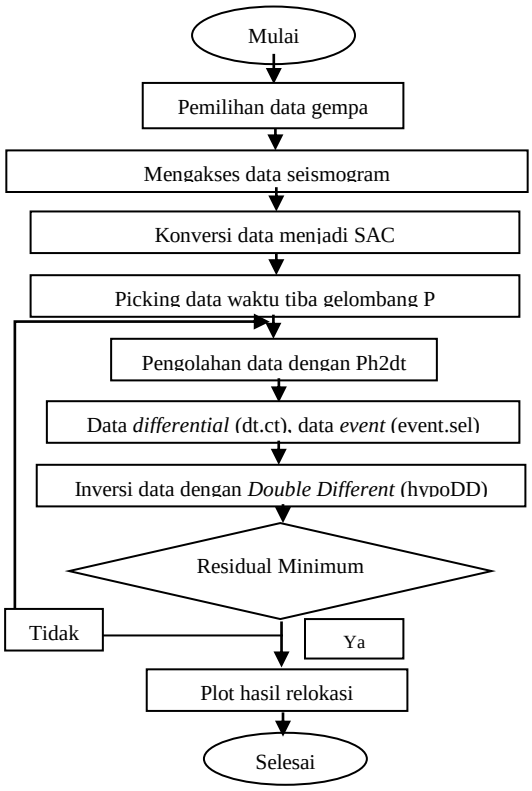


Gambar 5. *Input* software GMT dalam file berformat .gmt



Gambar 6. *Input* software GMT dalam file berformat .bat

Gambaran singkat alur penelitian diperlihatkan dalam diagram alir gambar 7 berikut:



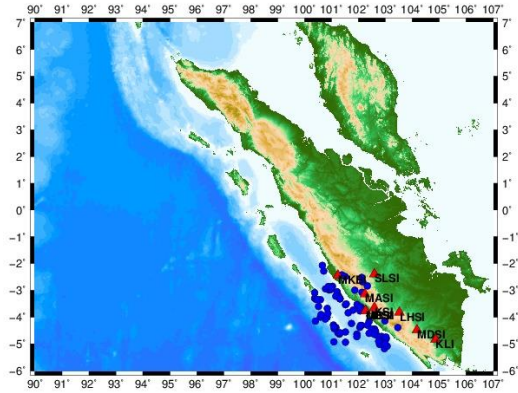
Gambar 7. Diagram Alir penelitoan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Pola Persebaran Seismisitas

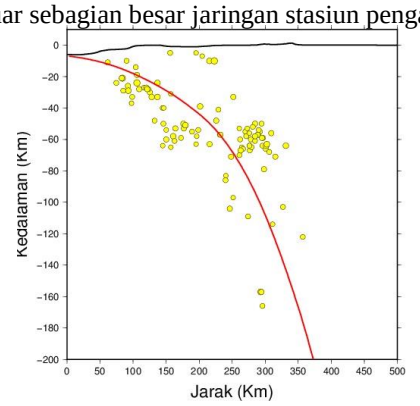
Peta gempabumi di daerah Sumatera Selatan sebelum dan sesudah direlokasi ditunjukkan oleh Gambar 8 dan Gambar 9. Warna merah menunjukkan posisi stasiun perekam, sedangkan warna kuning menunjukkan posisi episenter sebelum relokasi dan warna biru menunjukkan posisi episenter setelah relokasi. Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa persebaran gempabumi terelokasi lebih terfokus dan berkumpul dalam beberapa zona dibandingkan persebaran sebelum direlokasi.

Gambar 8. Plot episenter sebelum relokasi

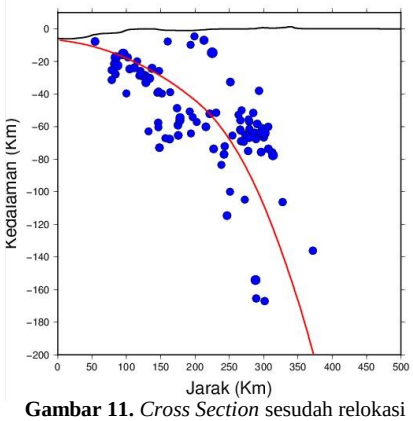


Gambar 9. Plot episenter setelah relokasi

Latitude dan *longitude* dari episenter sebelum dan sesudah relokasi akan mengalami perubahan, begitu pula hiposenter dari gempa bumi setelah direlokasi juga mengalami perubahan. Pergeseran posisi episenter serta perubahan dari kedalaman hiposenter suatu *event* dapat berubah karena jaringan stasiun pencatat yang mencatat suatu *event* berbeda-beda, jadi apabila *event* tersebut mengalami pergeseran artinya *event* tersebut berada diluar sebagian besar jaringan stasiun pengamat.

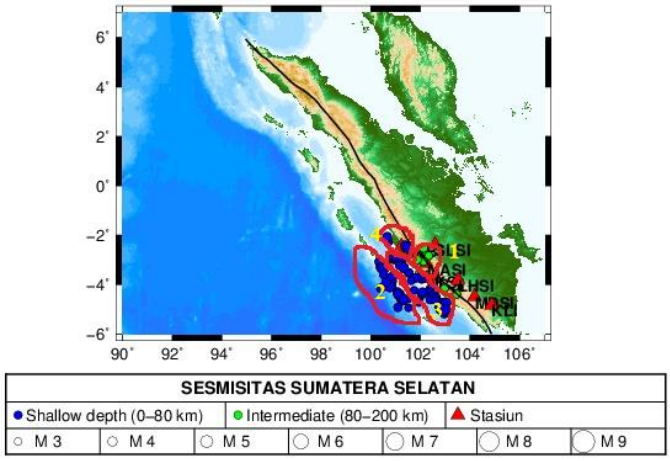


Gambar 10. *Cross Section* hiposenter sebelum relokasi



Gambar 11. *Cross Section* sesudah relokasi

Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan *cross section* dari hiposenter gempabumi di wilayah Sumatera Selatan sebelum dan sesudah dilakukan relokasi. Secara umum, persebaran gempabumi banyak berada di kedalaman dangkal yaitu kurang dari 80 km (h<80km). Gempabumi di Sumatera Selatan banyak disebabkan akibat tunjaman lempeng, sehingga gempabumi yang berada di zona subduksi akan memiliki kedalaman dangkal.

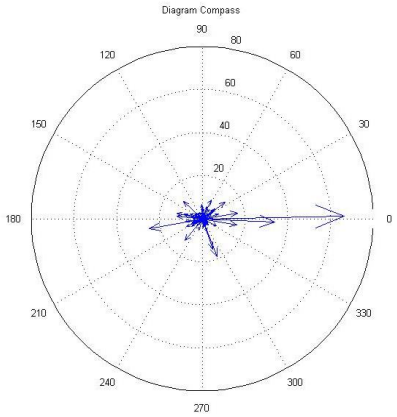


Gambar 12. Peta persebaran seismisitas gempa Sumatera Selatan

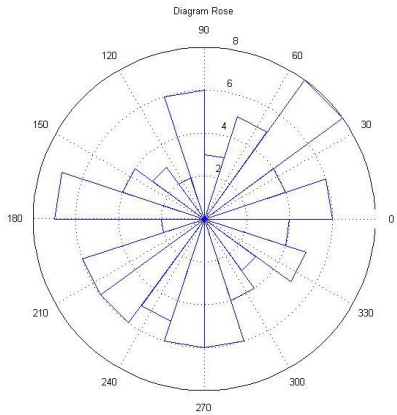
Pada Gambar 12 terlihat bahwa gempabumi yang terelokasi membentuk suatu pola yang saling berkumpul. Terdapat empat pola mengumpul pada Gambar 12. Pola pertama yaitu gempa menengah atau gempa yang memiliki kedalaman lebih dari 80 km berkumpul mendekati garis hitam, dimana garis tersebut merupakan garis patahan pada *Sumatran Fault Zone System.* Kemudian pola kedua dan pola ketiga terlihat episenter cenderung berkumpul pada daerah zona subduksi. Gempabumi yang terjadi pada pola kedua dan ketiga dinamakan gempabumi subduksi yang merupakan gempabumi yang terjadi di pertemuan lempeng Samudra dengan *overriding plate* atau disebut dengan gempabumi *interface slip* atau gempabumi zona *megathrust*. Akan tetapi pola kedua cenderung mendekati garis patahan sehingga mengalami pergeseran ke arah timur laut. Sedangkan pola ketiga cenderung tidak berkumpul mendekati garis patahan melainkan semakin condong ke arah barat daya. Pola keempat berada di zona subduksi akan tetapi pada zona subduksi tersebut terdapat patahan Sunda.

3.2 Diagram Rose dan Diagram Kompas

Arah dari pergeseran episenter dari gempa bumi hasil relokasi dapat diketahui melalui diagram kompas dan juga diagram rose.



Gambar 13. Diagram kompas



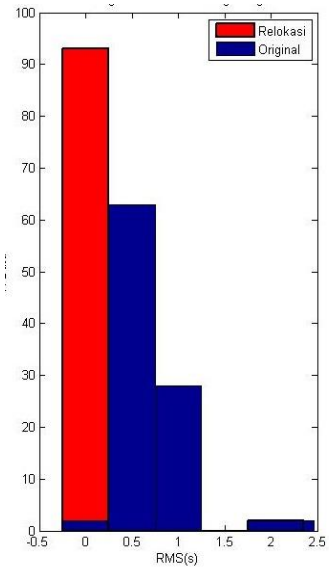
Gambar 14. Diagram rose

Tanda panah pada diagram kompas Gambar 13 menunjukkan arah pergeseran hasil relokasi gempa, sedangkan angka 20, 40, 60, dan 80 menunjukkan jarak pergeseran dari gempa tersebut dalam km. Pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa jarak pergesaran episenter gempa bumi hasil relokasi dominan pada jarak kurang dari 20 km. Diagram rose yang ditunjukkan pada Gambar 14 menggambarkan jumlah gempabumi dan sudut perubahan arah relokasi gempabumi. Pada gambar tersebut lingkaran dengan skala 2 sampai 8 menunjukkan jumlah *event* gempa sedangkan interval 0 sampai 330 menunjukkan sudut pergeseran hasil relokasi. Pergeseran episenter terjauh sebesar 66,3854 km ≈ 66 km dengan besar sudut azimuth 0,95° terhadap arah utara, dengan pergerakan yang semakin dalam dari kedalaman 66 km menjadi 68,911 km. Persebaran gempabumi yang sudah direlokasi cenderung menyebar ke segala arah, namun perubahan episenter terbanyak pada arah Timur Laut.

3.3 Histogram RMS

Proses relokasi akan menghasilkan nilai RMS. Perbandingan histogram RMS sebelum dan sesudah relokasi ditunjukkan oleh Gambar 14, dimana histogram yang berwarna merah adalah RMS setelah direlokasi sedangkan histogram yang berwarna biru sebelum relokasi. Hampir semua nilai RMS dari *event* yang terolakasi mendekati 0, dengan nilai RMS terkecil yaitu 0,002, meskipun ada beberapa *events* yang nilai RMS nya lebih dari 0, akan tetapi dari Gambar 15 dapat dilihat bahwa RMS hasil relokasi jauh lebih baik daripada nilai RMS yang dihasilkan sebelum relokasi. Nilai RMS yang diperoleh setelah proses relokasi menggunakan program hypoDD dapat memberikan informasi yang lebih baik.

Nilai RMS yang dihasilkan menunjukkan keakuratan dari parameter model yang diperoleh. Apabila nilai RMS yang diperoleh kecil, maka nilai parameter model yang dihasilkan mendekati nilai sebenarnya sehingga kurva hasil perhitungan dengan hasil observasi semakin berhimpit yang artinya model parameter yang digunakan melalui proses perhitungan semakin mendekati hasil observasi. Besar kecilnya nilai RMS yang dihasilkan dipengaruhi oleh penentuan nilai tebakan awal dari parameter model. Selain itu faktor lain yang dapat mempengaruhi keakuratan dari hasil yang didapatkan adalah keakuratan dalam pemilihan waktu tiba gelombang P dan S yang dilakukan pada proses *picking* data.



Gambar 15. Histogram RMS residual

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa untuk episenter tersebar dalam empat pola, dimana pola pertama berada di daerah Garis Patahan Sumatera *(Sumatran Fault Zone System)*, kemudian pola kedua dan ketiga berada di daerah zona subduksi, dan pola keempat berada di daerah patahan Sunda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dosen Pembimbing yaitu Prof. Bagus Jaya Santosa, S.U atas bimbingannya dalam pelaksanaan hingga pembuatan laporan ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Barber, A.J., Crow, M.J., Milsom, J., 2005. Sumatra: Geology, Resources and Tectonic Evolution. Geological Society of London.

[2] Sunardi, B., Rohadi, S., Masturyono, M., 2012. Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Wilayah Jawa Menggunakan Teknik Double Different. J. Meteorol. dan Geofis. 13.

[3] Waldhauser, F. and Ellsworth, W.L., 2000. "*A Double-difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California*". Bull. Seismo. Soc. Am. Vol. 90, 1353-1368.

[4] Dunn, M. Meredith (2004). Relocation of Eastern Tennessee Earthquakes using HypoDD. Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg.