

ESTIMASI POLA BIDANG SESAR DAN MOMENT TENSOR GEMPA BUMI JEPANG PADA TAHUN 2003 MENGGUNAKAN ANALISIS INVERSI WAVEFORM 3 KOMPONEN

Eka Jaya Wifayanti dan Bagus Jaya Santosa
Jurusan Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: bjs@physics.its.ac.id

Abstrak— Penelitian ini membahas tentang momen tensor dan pola bidang sesar, serta besar displacement dari sesar yang terjadi di Jepang selama tahun 2003 karena adanya intensitas aktivitas gempa yang banyak dengan skala magnitudo yang cukup besar dengan cara mengetahui focal mechanism yang terjadi. Untuk mendapatkan besar momen tensor dan focal mechanism-nya menggunakan program ISOLA-GUI dengan menggunakan Fungsi Green dan proses inversi untuk mendapatkan momen tensor dan focal mechanism gempa kemudian menghitung panjang, lebar dan besar displacement pada sesar yang terjadi. Bentuk focal mechanism ditunjukkan dengan bentuk beach ball. Dari hasil perhitungan focal mechanism ditentukan bidang patahan dan besar displacement dari sesar. Data yang digunakan dalam penelitian sebanyak delapan kejadian gempa. Dari penelitian ini didapatkan bahwa untuk pola bidang patahan yang cenderung terjadi di Jepang selama tahun 2003 adalah pola oblique dan cenderung reverse fault di zona subduksi. Dengan besar rentang momen tensor untuk masing-masing komponennya sebesar $M_{33} = 2.991 \exp15$ sampai $3.354 \exp17$, $M_{11} = 0$ sampai $2.187 \exp17$, $M_{22} = 1.594 \exp15$ sampai $1.167 \exp17$, $M_{31} = 2.485 \exp15$ sampai $1.799 \exp17$, $M_{32} = 4.968 \exp15$ sampai $5.283 \exp17$, $M_{12} = 0.085 \exp15$ sampai $2.938 \exp17$. Ukuran bidang patahan yang terjadi memiliki panjang sebesar 1.927 km sampai 51 km, lebar sebesar 5.82 km sampai 37 km, dan luas sebesar 11.22 km² sampai 147.23 km². Besar slip dari event gempa di Jepang pada tahun 2003 di zona subduksi berada pada rentang sebesar 8.63 m sampai 68.61 m.

Kata Kunci— focal mechanism, momen tensor, reverse fault, dan zona subduksi.

I. PENDAHULUAN

Jepang merupakan daerah yang memiliki aktivitas gempa bumi yang cukup tinggi. Negara ini secara astronomis terletak pada 30° LU-47° LU dan 128° BT-146° BT. Sistem lempeng tertonik yang terjadi di Jepang merupakan hasil dari interaksi lima lempeng, diantaranya adalah lempeng Eurasia, Amur, Okhotsk, Pasifik, Dan lempeng samudera Filipina [1].

Karena letaknya yang berada pada jalur-jalur lempeng aktif menjadikan Jepang sangat rawan terjadi gempa bumi. Gempa bumi merupakan adanya getaran pada bumi

akibat perambatan gelombang yang menyebar ke seluruh penjuru yang terjadi akibat adanya tekan dari pergeseran lempeng bumi atau disebut juga dengan gempa tektonik. Akibat dari kejadian ini menghasilkan deformasi-deformasi lanjutan pada permukaan benua yang dapat menimbulkan kerusakan. Untuk meminimalisir kerusakan akibat gempa perlu mengetahui karakteristik sumber gempa bumi. Gempa bumi sebagai efek yang ditimbulkan oleh gelombang seismik ini direkam dengan menggunakan seismometer tiga komponen. Seismometer tiga komponen adalah seismometer yang memiliki tiga buah sensor. Satu sensor merekam gelombang seismik pada komponen vertikal (*up-down*, UD) dan dua buah komponen horizontal, yaitu komponen utara-selatan (*north-south*, NS) dan komponen timur-barat (*east-west*, EW) [2]. Pemahaman terhadap karakteristik sesar yang mengakibatkan gempa bumi diperlukan untuk memperkirakan dan mengetahui karakter dan akibat kegempaan. Karena itulah perlu dilakukan pemodelan momen tensor gempa bumi. Moment tensor ini digunakan untuk menggambarkan arah gaya penyebab gempa bumi [3], yang digambarkan dengan beach ball dan mempunyai arti fisis, bagian yang cerah merupakan asal gaya yang menekan ke arah bagian yang gelap. Berdasarkan persamaan dari suku fungsi *Green*. Dalam memodelkan momen tensor ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode inversi yang memanfaatkan *waveform* ataupun waktu tiba gelombang P [4]. Dengan menggunakan inversi momen tensor, proses sumber gempa secara detail dapat didapatkan dari pengamatan data. Momen tensor untuk berbagai jenis gempa bumi dapat di tentukan secara rutin. Juga mencoba dan melakukan *modeling* kesalahan dengan memperlakukan secara hati-hati dan seksama dari data tersebut dapat menghasilkan pengetahuan penting sekitar sumber gempa [5].

Permodelan ini memilih data gempa di Jepang pada tahun 2003 karena aktivitas gempa buminya yang cukup tinggi tersebut maka di perlukan adanya “estimasi pola bidang sesar dan moment tensor gempa bumi Jepang pada tahun 2003 menggunakan analisis inversi waveform 3 komponen program ISOLA yakni program yang menggunakan *tool* Matlab yang akan digunakan untuk menjelaskan *focal mechanism* dari momen tensor gempa.

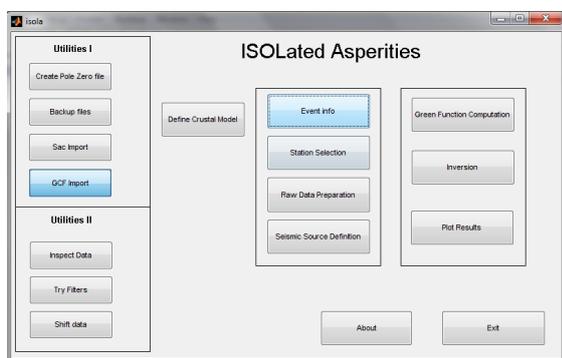
II. METODE PENELITIAN

A. Pengambilan Data

Data yang digunakan adalah data *event* gempa yang terjadi di Jepang selama tahun 2003. Data tersebut didapatkan dari www.fnet.bosai.go.jp

B. Pengolahan Data

Data yang didapatkan masih dalam format *seed*. Kemudian diubah kedalam format *SAC* yang akan digunakan dalam program ISOLA-GUI untuk menentukan *momen tensor* dan *focal mechanism*. Program ISOLA dijalankan menggunakan matlab dimana sebelum pemrosesan dipersiapkan terlebih dahulu data stasiun dengan *longitude*, *lattitudenya* dan *pzfiles* (*a0*, *count*, *zeroes* dan *poles*). Berikut tampilan program isola yang akan digunakan untuk pengolahan data,



Gambar 2. Program isola

Kemudian pada tahap pengolahannya pertama pada *define crustal mode*, dimasukkan model kecepatan, kemudian SAC import, info kejadian, seleksi stasiun, , persiapan data mentah (*raw data preparation*), koreksi instrumental, dan mengubah data asal (*origin*), disimpan. Kemudian fungsi *Green* dirun dan diinversi. Akan didapatkan plot moment tensor dan dikoreksi seismogram sintetik. Dari hasil tersebut akan didapatkan plot momen tensor yang kemudian parameter hasil yang didapat di masukkan pada *hplot* untuk diidentifikasi arah bidang patahannya. Dan dilakukan perhitungan untuk mengetahui panjang, lebar dan *displacement* bidang sesar di daerah penelitian.

C. Perhitungan

Besarnya ukuran sesar dapat dihitung menggunakan persamaan:

- Sesar Strike-Slip
- Log L = 0.59 Mw - 2.30
- Log W = 0.23 Mw - 0.49
- Log A = 0.82 Mw - 2.79
- Dip Slip Fault
- Log L = 0.55 Mw - 2.19
- Log W = 0.31 Mw - 0.63
- Log A = 0.86 Mw - 2.82
- Dimana,
- L = Panjang (km)
- W = Lebar (km)
- A = Luas (km²) [6].

Untuk Besarnya *displacement / slip* yang dialami oleh gempa dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$M_0 = \mu \cdot A \cdot D$$

- Dimana,
- M₀ = Momen seismik gempa (Nm)
- μ = Rigiditas
- A = Luas bidang sesar (km²)
- D = *Displacement/slip* (m) [7]

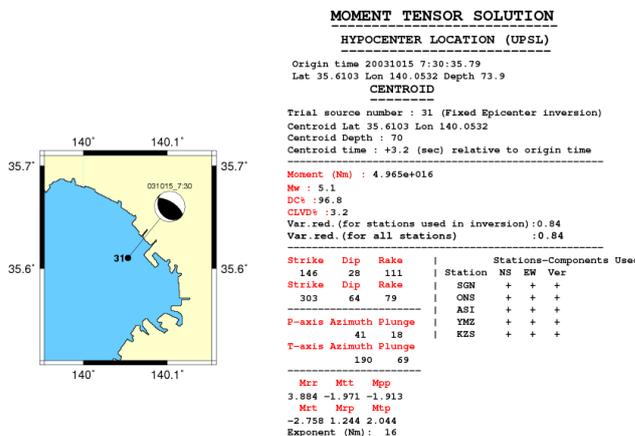
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Momen Tensor dan Mekanisme Fokus

Dari hasil pengolahan menggunakan program ISOLA-GUI didapatkan besar momen tensor untuk masing-masing *event* sebagai berikut (tanda negatif menunjukkan arah yang berlawanan),

Tabel 1. Momen tensor untuk gempa Jepang 2003

Event Tgl/Bln	M _{rr} =M ₃₃	M _{tt} =M ₁₁	M _{pp} =M ₂₂	M _{rt} =M ₃₁	M _{rp} =M ₃₂	M _{tp} =M ₁₂	Ex p
09/01	2.991	-1.397	-1.594	2.636	4.968	-2.480	15
04/02	1.629	0.000	1.630	0.371	-1.415	0.441	16
23/02	7.740	1.649	-9.389	-2.485	-5.797	-0.085	15
10/09	-0.745	0.947	-0.202	1.162	-0.115	-0.385	16
25/09	1.388	-0.262	-1.126	1.193	1.727	-0.769	16
15/10	3.884	-1.971	-1.913	-2.758	1.244	2.044	16
13/11	7.005	-1.380	-5.624	2.703	7.259	-3.163	15
29/12	3.354	-2.187	-1.167	1.799	5.283	-2.938	17



Gambar 3. hasil mekanisme fokus pada kejadian gempa yang terjadi pada 15/10/03_7:30:35

Momen tensor dan *focal mechanism* didapatkan dari hasil inversi momen tensor. Inversi ditentukan oleh data seismogram, Fungsi Green dan komponen momen tensor. Sebagaimana persamaan berikut,

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^6 G_{ij}(t) m_j \dots (4.1)$$

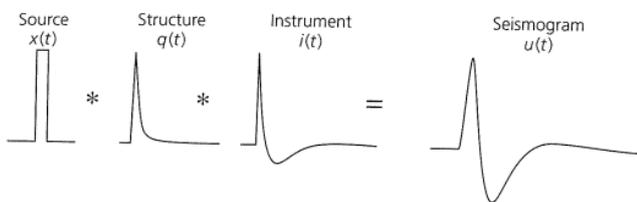
$u_i(t)$ adalah data rekaman seismogram, $G_{ij}(t)$ adalah Fungsi Green dan m_j adalah komponen momen tensor [6]. Komponen momen tensor ada 6 yang ditunjukkan dengan

bentuk dasar dari *focal mechanism* yang digambarkan dengan *beach ball*. Sokos dan Zahrandik [4] menuliskan bahwa untuk data rekaman seismogram merupakan kombinasi dari komponen utama momen tensor.

Stein menjelaskan bahwa data rekaman seismogram merupakan konvolusi dari fungsi waktu sumber (*Source time function*) dengan fungsi waktu struktur dan fungsi waktu dari *instrumental response*[8].

$$u(t) = x(t) * e(t) * q(t) * i(t) \dots (4.2)$$

$x(t)$ adalah fungsi waktu sumber, $e(t)$ adalah operator yang menggambarkan sifat elastik bumi yang ditunjukkan dengan efek refleksi dan transmisi dari gelombang yang melewati medium, begitu juga dengan $q(t)$ atau dapat dikatakan sebagai fungsi atenuasi Dan $i(t)$ adalah *instrumental response*.



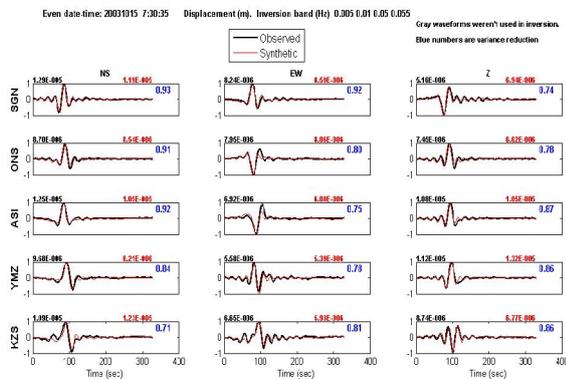
Gambar 5. Gelombang P yang terekam dalam seismogram yang merupakan kombinasi dari fungsi sumber, fungsi atenuasi dan *instrumental response* [8].

Fungsi Green merupakan perhitungan estimasi dari fungsi waktu sumber sehingga dari estimasi ini dapat diketahui besar momen tensor hasil permodelan. Fungsi Green dihitung dengan metode Kikuchi dan Kanamori [7], Fungsi Green dapat pula dituliskan sebagai,

$$g(t) = e(t) * q(t) \dots (4.3)$$

Sehingga fungsi sumber dapat diketahui dengan dekonvolusi dari persamaan data rekaman seismogram. Kecocokan hasil estimasi dengan hasil data observasi yang ada dilapangan dapat diketahui dengan besar selisih dari keduanya yang ditunjukkan dengan besar varian reduksinya.

Perhitungan Fungsi Green dan inversi menggunakan program ISOLA-GUI didapatkan hasil *fitting* kurva *displacement* dari data hasil observasi lapangan (data seismogram) dengan data hasil estimasi menggunakan fungsi green dapat dilihat dalam gambar berikut,



Gambar 6. Hasil *fitting* kurva *displacement* dari salah satu *event* gempa yang terjadi pada 15/10/03_7:30:35

Kurva berwarna merah adalah kurva estimasi dari Fungsi Green dan kurva berwarna hitam adalah kurva dari data seismogram. Besar kecocokan kurva ditentukan oleh varian reduksi [4]. Nilai satu menunjukkan bahwa kurva hasil *fitting* berimpit penuh sedangkan nilai varian reduksinya nol maka ketidakcocokannya sangat besar, dapat dikatakan bahwa perbedaan kurvanya sangat jauh berbeda.

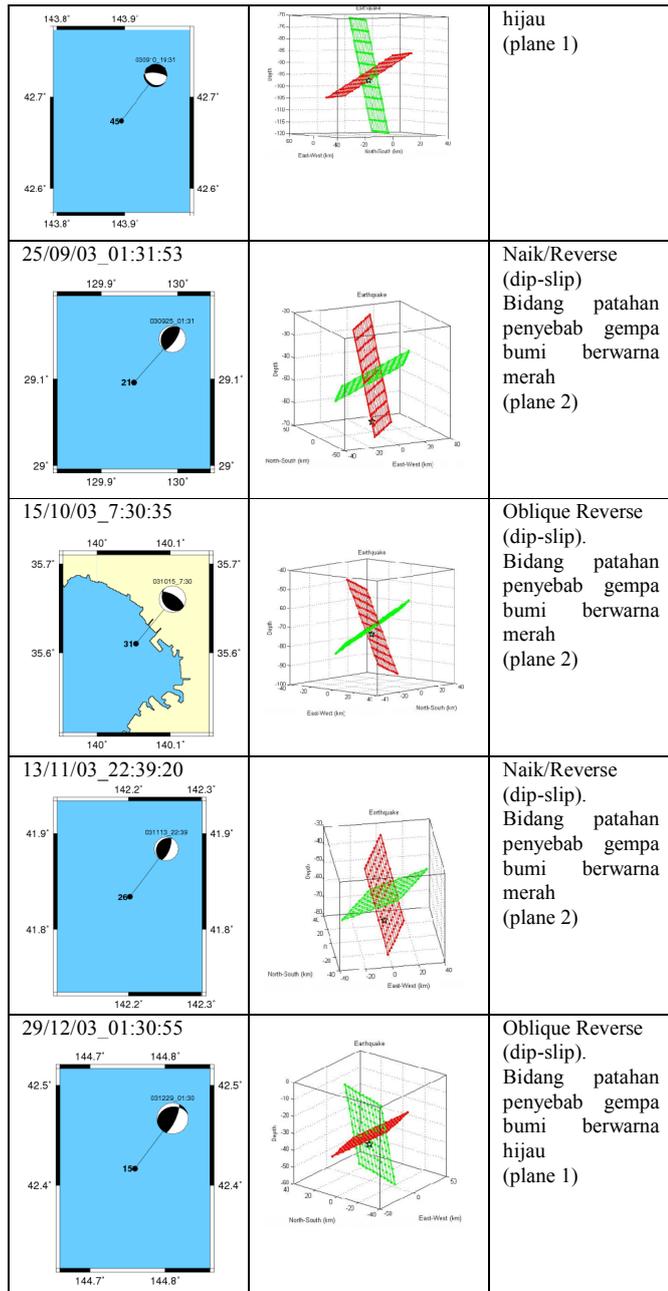
Pada gambar 6 merupakan hasil fitting kurva dengan nilai varian reduksi mencapai 0.84% Dari masing-masing *event* gempa varian reduksinya rata-rata bernilai 0.8. Varian reduksi ini ditentukan oleh besar *filtering* yang dilakukan dalam proses inversi. Inversi yang digunakan dalam program ISOLA-GUI ini adalah *deviatoric moment tensor inversion* yang menghitung proses inversi untuk komponen 5 komponen dasar momen tensor serta menggunakan DC (*Double Couple*) dan CLVD (*Compensated Linier Vector Dipole*) yang mana inversi ini menurut Sokos dan Zahrandik [4] merupakan metode inversi yang paling bagus dalam program ISOLA-GUI[11].

B. Hubungan beachball, Fault plane, dan Tipe Sesar Gempa Bumi

Dari hasil program ISOLA-GUI dan HCPLLOT dapat diketahui jenis dan arah sesar yang terjadi sebagai berikut:

Tabel 2. Hubungan *beachball*, *Fault plane*, dan Tipe Sesar Gempa Bumi

<i>Beachball</i>	<i>Fault Plane</i>	<i>Fault Types</i>
09/01/03 04:14:21 141.1' 141.2' 36.5' 36.4'		Oblique Reverse (dip-slip). Bidang patahan penyebab gempa bumi berwarna merah(plane2)
04/02/03 12:42:16 137.2' 137.3' 34' 33.9'		Naik/Reverse (dip-slip). Bidang patahan penyebab gempa bumi berwarna hijau (plane 1)
23/02/03 13:38:57 141' 141.1' 42.3' 42.2'		Oblique Reverse (dip-slip). Bidang patahan penyebab gempa bumi berwarna hijau (plane 1)
10/09/03 19:31:56 141' 141.1'		Normal (Dip-slip) Bidang patahan penyebab gempa bumi berwarna



C. Orientasi Bidang Sesar

Tabel 3.

Bidang sesar dan auxiliary plane untuk masing-masing event

Event	Plane I (hijau)			Plane II (merah)		
	Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake
09/01/0304 :14:21	244	18	124	29	75	80
04/02/0312 :42:16	165	65	90	346	25	91
23/02/0313 :38:57	195	64	105	343	30	62
10/09/0319 :31:56	276	72	-99	124	21	-64
25/09/0301 :31:53	206	18	82	34	72	93
15/10/037:	146	28	111	303	64	79

30:35						
13/11/0322 :39:20	214	22	101	22	69	86
29/12/0301 :30:55	24	74	70	258	25	140

Pada tabel 3 nilai strike, dip dan rake yang dicetak tebal pada salah satu plane merupakan bidang patahannya, dimana hal ini dapat diketahui dari gambar dimana bidang yang dianggap sebagai bidang patahan adalah bidang yang dilalui atau memiliki jarak paling dekat dengan hiposenter (tanda bintang) tampak pada tabel 2 kolom 2 dan jugadapat dilihat pada hasil parameter saat pengeplotan pada hplot dan bidang lainnya merupakan bidang auxilarinya.

menunjukkan Pola bidang sesar yang terbentuk didaerah sekitar zona subduksi adalah *dip-slip* dimana dari gambar beachball mempunyai arti fisis yakni, bagian yang cerah merupakan asal gaya yang menekan ke arah bagian yang gelap. Pola bidang patahan yang cenderung terjadi adalah sesar naik (*reverse fault*) yakni dapat dilihat dari hasil rake yang hampir semuanya bernilai positif. Satu normal dengan rake negatif. Aruh pergerakan lempengnya sebagian besar cenderung arah utara-selatan.

Dari besar magnitudo *event* gempa yang ada di Jepang didapatkan besar *slip* untuk masing-masing *event* berdasarkan perhitungan menggunakan *papzakos law* sebagai berikut,

D. Hasil perhitungan panjang, lebar, luas dan besar slip bidang patahan

Tabel 4. Hasil perhitungan panjang, lebar, luas dan besar slip bidang patahan

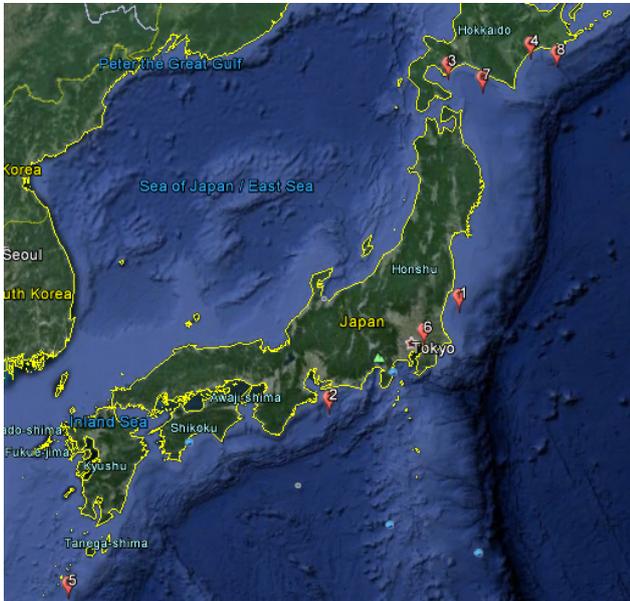
Origin Time Event	Mw	Jenis Sesar	Panjang L (km)	Lebar W (km)	Luas A(km)	Slip S (m)
20030109 04:14:21.32	4.5	Reverse fault	1.927525	5.821032	11.22018	8.63
20030204 12:42:16.97	4.8	Reverse fault	2.818383	7.211075	20.32357	10.5364
20030223 13:38:57.25	4.6	Reverse fault	2.187762	6.251727	13.67729	10.0147
20030910 19:31:56.79	4.7	Normal fault	2.483133	6.714289	16.67247	13.0801
20030925 01:31:53.57	4.9	Reverse fault	3.198895	7.744618	24.77422	15.0810
20031015 7:30:35.79	5.1	Reverse fault	4.120975	8.933055	36.8129	19.5691
20031113 22:39:20.46	4.6	Reverse fault	2.187762	6.251727	13.67729	11.1919
20031229 01:30:55.40	5.8	Reverse fault	10	14.72313	147.2313	68.6198

Pada tabel 4 terlihat bahwa gempa yang menimbulkan nilai slip terbesar adalah pada 29-12-2003 pukul 01:30:55.40 dengan *magnitude* gempa yang tinggi pula merupakan gempa yang terjadi di area Hokkaido dimana semakin besar nilai slip yang terjadi dimungkinkan dapat mengakibatkan kerusakan yang besar pula akibat gempa tersebut.

Bentuk mekanisme focal dari masing-masing *event* cenderung menunjukkan pola bidang sesar *reverse fault* (*dip-slip*). Lokasi *moment tensor solution* gempa ini sejalan dengan akibat

sesar naik antara Lempeng Amerika Utara dan Lempeng Pasifik yang mengalami subduksi. Untuk lebih spesifik berikut diberikan lokasi region dari event gempa yang diteliti.

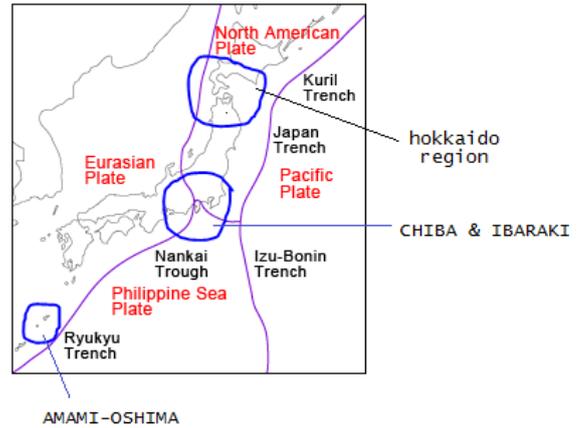
E. Analisa data berdasarkan Geologi Jepang



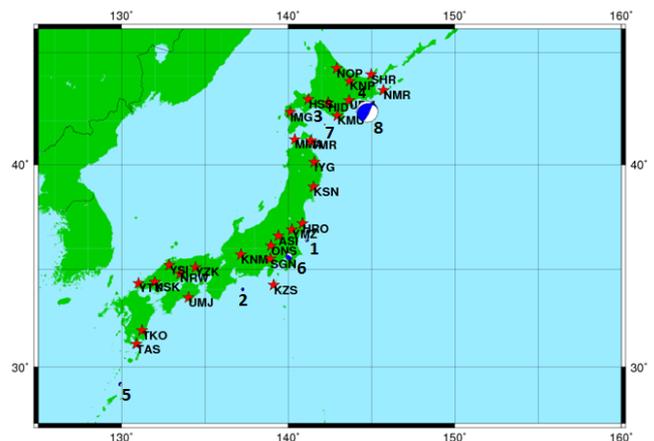
Gambar 5. Distribusi event penelitian



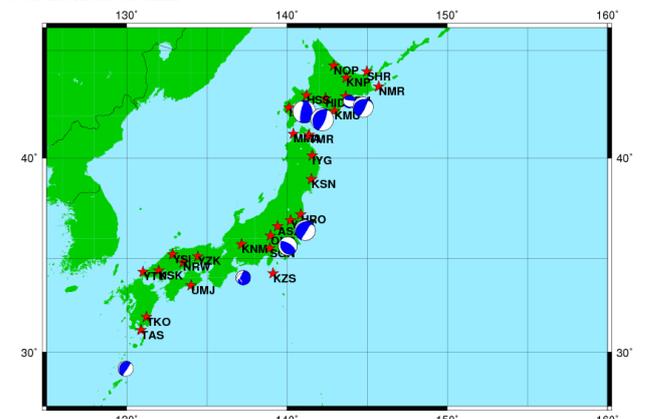
Gambar 6. Daerah region event yang diteliti (yang dilingkari garis merah)



Gambar 7. Lempeng tektonik Jepang dan region yang diteliti



Gambar 8. Mekanisme focal dari kejadian gempa ditampilkan berdasarkan besar momen seismik



Gambar 9. Mekanisme focal dari kejadian gempa ditampilkan berdasarkan pola sesar yang terbentuk

Lokasi awal dan mekanisme focal gempa yang terjadi di region Hokkaido (lingkaran paling atas) terjadi sebagai akibat dari patahan naik pada batas antarmuka antara lempeng utama Amerika Utara (yang meluas ke sudut timur laut dari daratan Eurasia) dan subduksi lempeng Pasifik. Lempeng Pasifik bergerak ke barat-barat laut dengan kecepatan sekitar 8,2 cm per tahun relatif terhadap lempeng Amerika Utara. Selain itu, Hokkaido timur mengalami gempa bumi besar yang berasal dari interior subduksi lempeng Pasifik. Jadi lokasi solusi

momen tensor gempa ini sejalan dengan akibat sesar naik antara Lempeng Amerika Utara dan Lempeng Pasifik yang mengalami subduksi. Di samping mengalami gempa naik besar yang berasal dari permukaan di antara kedua lempeng, Hokkaido Timur mengalami gempa besar yang berasal dari dalam Lempeng Pasifik.

Untuk region Chiba dan Ibaraki, jenis *fault plane* yang ditimbulkan yakni *reverse fault* akibat subduksi lempeng Filipina terhadap lempeng Eurasia dan lempeng Amerika Utara. Sedangkan pada region Amami-Oshima yang membentuk *reverse fault* juga akibat subduksi dari lempeng laut Filipina menunjam lempeng benua Eurasia.

distribusi kejadian gempa yang terjadi berada pada daerah perbatasan lempeng yang mengalami subduksi dimana hasil dari subduksi ini menjadikan area tersebut memiliki deretan gunung apinya sesuai dengan kondisi kondisi geologi Jepang yakni merupakan area yang termasuk dalam *ring of fire*, sehingga pergerakan lempeng di Jepang cenderung didominasi oleh patahan dip-slip yakni *reverse fault*. Dari hasil pengolahan data menggunakan program ISOLA-GUI dan hasil penggambaran *beachball* dengan GMT nampak bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan antara hasil pengolahan menggunakan ISOLA dengan hasil pengolahan dari JMA, begitupun dengan momen seismiknya. Sehingga hasil yang didapatkan dari pengolahan data pada penelitian ini dapat dikatakan cukup akurat.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan didapat kesimpulan sebagai berikut,

1. Besar momen tensor untuk masing-masing komponennya dari 8 *event* gempa di Jepang selama tahun 2003 mempunyai rentang sebagai berikut ini,

$$M_{33} = 2.991 \text{ exp}15 \text{ sampai } 3.354 \text{ exp}17$$

$$M_{11} = 0 \text{ sampai } 2.187 \text{ exp}17$$

$$M_{22} = 1.594 \text{ exp}15 \text{ sampai } 1.167 \text{ exp}17$$

$$M_{31} = 2.485 \text{ exp}15 \text{ sampai } 1.799 \text{ exp}17$$

$$M_{32} = 4.968 \text{ exp}15 \text{ sampai } 5.283 \text{ exp}17$$

$$M_{12} = 0.085 \text{ exp}15 \text{ sampai } 2.938 \text{ exp}17$$
2. Pola bidang sesar gempa yang terjadi di wilayah jepang selama tahun 2003 rata-rata adalah sesar oblique cenderung naik (*reverse fault*).
3. Ukuran bidang patahan yang terjadi bernilai :
 - Panjang = 1.927 km sampai 51 km
 - Lebar = 5.82 km sampai 37 km
 - Luas = 11.22 km² sampai 147.23 km²
4. Besar *slip* dari *event* gempa di Jepang pada tahun 2003 di zona subduksi berada pada rentang sebesar 8.63 m sampai 68.61 m

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Sanosa, S.U atas bimbingannya selama penulis melakukan tugas akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wei D, Seno T. 1998. Determination of the Amurian plate motion. In *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*, Geodyn. Ser., ed. SL Flower, CChung, T Lee, 27:337– 46. Washington, DC: Am. Geophys. Union. 419 pp.
- [2] Afnimar. 2009. *Seismologi*. Laboratorium Seismologi Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- [3] Setyowidodo, Irwan, Bagus Jaya Santosa. *Analisis Seismogram Tiga Komponen Terhadap Momen Tensor Gempa Bumi di Manokwari Papua 03 Januari 2009*. Jurnal Neutrino (2011) April Vol.3, No. 2
- [4] Sokos, Efthimios N, Jiri Zahrandik. *ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data*. Computers and Geoscience 34 (2008) 967-977. 2009. *A Matlab GUI for use with ISOLA Fortran codes*. User's Guide.teith, Stein. Michael Wyssession.2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Oxford : Blackwell Publishing Ltd.
- [5] Yoshida, T. 1995. *Waveform Inversion Methods for the Earthquake Source*. J. Phys. Earth, 43, 183-209. [5] McCafferey, R. (2009), "The Tectonic Framework of the Sumatran Subduction Zone", *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, Vol. 37, hal. 345-366.
- [6] Papazachos B.C. & Papazachou C.B. 2003. The earthquakes of Greece. Ziti Publications, Thessaloniki, 273pp.
- [7] Kikuchi, M., and H. Kanamori. 1991. *Inversion of Complex Body Wave-III*. Bull. Seism. Soc. Am., 81, 2335-2350.
- [8] Steith, Stein. Michael Wyssession.2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Oxford : Blackwell Publishing Ltd.