

## KARAKTERISTIK DAN PARAMETER SUBDUKSI SUMBER GEMPA PULAU JAWA

Wisnu Erlangga<sup>1,\*</sup>)

<sup>1,\*</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia  
Email: wisnuuangga@gmail.com

### ABSTRACT

*The movement of three large plates makes earthquakes frequent in Indonesia. The earthquake caused a lot of damage and casualties. One of the causes of the high risk of earthquake disasters is the large population. Java Island is the island that has the largest population in Indonesia. Besides, earthquakes often occur in Java and its surroundings, which cause a very high risk of an earthquake. A further disaster that occurs after an earthquake is a tsunami if the earthquake originates from the ocean (earthquake originates from subduction). Therefore, this study examines the characteristics and parameters of earthquakes originating from subduction around Java Island, consisting of 10 zones (5 of the megathrust zone and 5 of the benioff zone). The method used to determine these parameters is the Gutenberg-Richter's law method and the maximum likely hood/characteristic method. The results of these two methods have differences due to earthquake uncertainty factors. In the application of earthquake hazard analysis, these two methods are used for calculations by increasing the percentage of use in the characteristic method. The geological evidence shows that characteristic earthquakes occur more frequently than earthquakes predicted from the Gutenberg-Richter model. It is also necessary to know the subduction zone dip angle for modeling 3D earthquake sources. Each subduction zone around Java Island is divided into five areas. The megathrust zone is 50 km in-depth, while the benioff zone is more profound than the megathrust zone. The result shows that the most considerable dip value is in the Java 3 megathrust zone with 14,667° and the Java 2 benioff zone with 53,667°.*

**Keywords:** Earthquake, subduction, Gutenberg-Richter's law, maximum likely hood

### LATAR BELAKANG

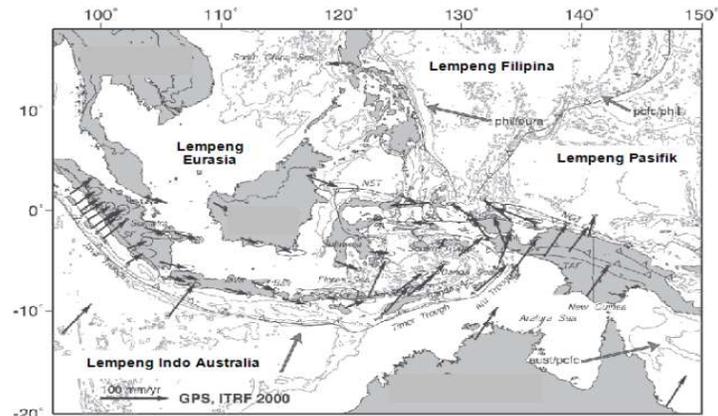
Indonesia merupakan negara kepulauan yang terdiri dari beribu-ribu pulau dan memiliki luas wilayah yang cukup besar. Besarnya wilayah dengan keadaan tiap pulau yang berbeda-beda menyebabkan perbedaan kondisi alam. Secara geografis, wilayah Indonesia berada di atas *ring of fire* yang menyebabkan sering terjadinya gempa. Dengan pergerakan tiga lempeng besar yang mengagapit Indonesia (Gambar 1), memunculkan gunung-gunung api dan aktifitas tektonik yang cukup signifikan (Sulistyanto, 2020 ; Aldiamar, 2007). Hal ini menyebabkan gempa bumi menjadi kejadian alam yang paling banyak merusak dan merugikan di Indonesia (Milson *et al.*, 1992). Pergerakan tiap lempeng yang berbeda telah membentuk

zona subduksi dan zona *transform fault*. Secara umum pelat tektonik di Indonesia dibagi menjadi dua bagian yaitu barat dan timur. Bagian timur dengan batas pelat tektonik yang rumit dan bagian barat dengan batas pelat tektonik yang sederhana dan mudah dikenal.

Beberapa tahun terakhir banyak terdapat kejadian gempa bumi yang menimbulkan kerugian harta benda dan korban jiwa yang cukup besar. Belum adanya cara untuk memprediksi kejadian gempa bumi secara akurat lokasi, waktu kejadian dan seberapa besar gempa yang akan terjadi menjadikan kejadian gempa memberikan masalah serius. Untuk memprediksi kemungkinan kejadian gempa bumi, perlu dilakukan penelitian secara ilmiah yang mengidentifikasi

daerah-daerah yang mempunyai resiko terjadinya gempa bumi berdasarkan kejadian-

kejadian gempa yang pernah terjadi (Widodo, 2012).



Gambar 1. Model plat tektonik Indonesia (Bock *et al.*, 1996)

Salah satu pulau di Indonesia yang berpenduduk terbanyak ialah Pulau Jawa. Hal ini menjadikan tingkat risiko terhadap bencana gempa bumi di Pulau Jawa semakin besar. Selain itu faktor yang berpengaruh adalah keadaan bangunan, apakah sudah dibangun sesuai dengan peraturan atau tidak. Saat terjadi gempa bumi, sebagian besar korban jiwa akibat tertimpa bangunan yang runtuh. Di beberapa kasus kejadian gempa bumi, bangunan yang roboh dan tidak dapat bertahan saat digoncang gempa dikarenakan bangunan tersebut dibangun tidak sesuai dengan peraturan yang ada (SNI 1726-2019).

Salah satu metode untuk mengurangi risiko gempa ialah membangun bangunan yang tahan terhadap gempa (Mahesworo, 2008). Dalam perencanaan bangunan, tingkat kekuatan struktur bangunan disesuaikan dengan keadaan seismologi, geologi, dan geoteknik daerah sekitar bangunan yang akan dibangun (Irsyam *et al.*, 2010).

Dalam analisis gempa biasanya digunakan rekaman data gempa terdahulu karena gempa yang terjadi biasanya kejadian yang memiliki kala ulang tertentu. Parameter dan karakteristik sumber gempa didapatkan dari data gempa yang pernah terjadi sebelumnya. Parameter sumber gempa terdiri dari  $a$ - $b$  dan magnitude maksimum. Model perhitungan

yang sering digunakan untuk menentukan parameter sumber gempa adalah *truncated exponential* dan *characteristic* (Mahesworo, 2008).

Kejadian alam yang biasanya muncul setelah gempa yang dapat menimbulkan kerugian dan korban jiwa yang lebih banyak ialah tsunami. Salah satu penyebab terjadinya tsunami ialah gempa bumi yang bersumber dari lautan. Jumlah populasi penduduk yang besar di Pulau Jawa menyebabkan kemungkinan jatuhnya korban yang lebih besar akibat bencana gempa bumi dan tsunami. Terdapat beberapa kejadian gempa bumi pada subduksi dan tsunami di Pulau Jawa dan sekitarnya antara lain yang terjadi di NTB dan Sumbawa (1977) 316 korban jiwa, NTT, Flores dan Pulau Ataura (1977) 2 korban jiwa dan 25 luka-luka, NTB, Sumbawa, Bali dan Lombok (1979) 27 korban jiwa dan 200 luka-luka, NTT dan Larantuka (1982) 13 korban jiwa dan 400 luka-luka, NTT, Flores Timur dan Pulau Pantar (1987) 83 korban jiwa dan 108 luka-luka, NTT dan Pulau Alor (1989) 7 korban jiwa, NTT, Flores dan Pulau Babi (1992) 1952 korban jiwa dan 2126 luka-luka, Banyuwangi (1994) 38 korban jiwa dan 400 luka-luka dan Pangandaran (2006) 668 korban jiwa dan 9299 luka-luka. Parameter sumber gempa setiap tahunnya

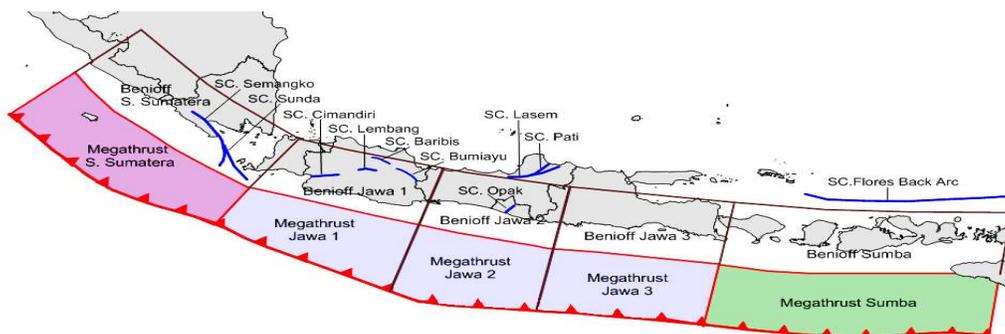
selalu berubah-ubah karena dipengaruhi oleh kejadian-kejadian gempa yang terjadi. Selama beberapa tahun terakhir tidak ada gempa yang melebihi *Magnitude* 8–8,5 di wilayah selatan Pulau Jawa sehingga untuk zona subduksi Jawa dianggap aseismik. Tetapi hal tersebut terbantahkan dengan kejadian gempa dan tsunami pada tahun 1994 dan 2006 yang membuktikan bahwa tidak semua zona subduksi Jawa bersifat aseismik. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai parameter sumber gempa didasar laut atau subduksi dalam langkah mitigasi guna mengurangi risiko bencana yang ditimbulkan.

Pada penelitian ini, penentuan karakteristik sumber gempa di sekitar Pulau Jawa menggunakan metode *Gutenberg-richter's law* dan metode *maximum likely hood* (Aki, 1965). Data gempa yang digunakan ialah kejadian gempa antara tahun 1965-2019.

## METODE PENELITIAN

### Identifikasi Sumber Gempa

Penelitian ini menggunakan sumber *hazard* gempa yang berasal dari sumber gempa subduksi di sekitar Pulau Jawa yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Sumber gempa (Sunardi, 2013)

Berdasarkan gambar diatas, terdapat 10 sumber gempa subduksi di sekitar Pulau Jawa yaitu:

1. Megatruster S. Sumatra
2. Benioff S. Sumatra
3. Megatruster Jawa 1
4. Benioff Jawa 1
5. Megatruster Jawa 2
6. Benioff Jawa 2
7. Megatruster Jawa 3
8. Benioff Jawa 3
9. Megatruster Sumba
10. Benioff Sumba.

### Sumber Data Gempa

Minimnya rekaman data yang ada di Indonesia menjadi kendala tersendiri. Untuk meminimalisir kurangnya data gempa, data gempa yang digunakan berasal dari gabungan data gempa yang dicatat oleh

instansi pemerintah Indonesia (BMKG) maupun instansi internasional (ISS, ISC, BCIS, PDE, ANSS, USGS dan lain-lain) pada kurun waktu 1965-2019.

### Konversi Magnitudo Gempa

Magnitude gempa merupakan skala kekuatan relatif gempa yang merupakan hasil dari pengukuran fase amplitude. Metode ini pertama kali dikemukakan oleh K. Wadati dan C. Richter pada tahun 1930 (Lay dan Wallace, 1995). Skala magnitude terdiri dari magnitudo *surface* ( $M_s$ ), magnitudo lokal ( $M_L$ ), magnitudo body ( $m_b$ ) dan magnitudo momen ( $M_w$ ). Pada penelitian ini hanya menggunakan  $M_w$  sehingga data gempa dengan skala yang berbeda perlu dikonversi. Persamaan

kolerasi skala gempa untuk wilayah Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Korelasi konversi antara beberapa skala magnitudo (Asurifak, 2010)

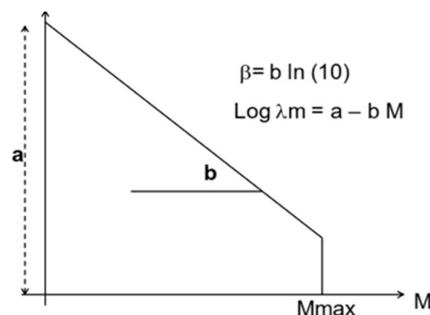
Korelasi Konversi	Events	Range Data	R <sup>2</sup>
$M_W = 0,143M_s^2 - 1,051M_s + 7,285$	3.173	$4,5 \leq M_s \leq 8,6$	93,9%
$M_W = 0,114m_b^2 - 0,556m_b + 5,560$	978	$4,9 \leq m_b \leq 8,2$	72,0%
$M_W = 0,787M_E + 1,537$	154	$5,2 \leq M_E \leq 7,3$	71,2%
$m_b = 0,125M_L^2 - 0,389M_L + 3,513$	722	$3,0 \leq M_L \leq 6,2$	56,1%
$M_L = 0,717M_D + 1,003$	384	$3,0 \leq M_D \leq 5,8$	29,1%

### Distribusi Probabilitas Magnitude

Terdapat perbedaan pada penggunaan magnitudo gempa sebagai salah satu parameter perhitungan dalam analisis *seismic hazard* antara metode probabilistik dan metode deterministik. Makrup (2009) mengatakan, sebagai pengganti dari satu kontrol yaitu magnitudo maksimum yang juga telah digunakan dalam analisis deterministik. Hubungan berulang dari magnitudo gempa atau kala ulang menjadi hal yang diperhitungkan dalam analisis metode probabilistik. Gempa-gempa yang pernah terjadi disuatu sumber gempa digunakan dalam perhitungan yang kemudian disimulasikan ke masa depan. Metodologi yang diterapkan untuk magnitudo ( $M$ ) disini dapat juga diterapkan untuk intensitas gempa (Nicolau, 1988).

### Model Gutenberg - Richter

Gutenberg-Richter pada tahun 1944 menggunakan garis b untuk pemodelan eksponensial pada aplikasi *recurrence model*. Gutenberg-Richter menjelaskan tentang laju tahunan rata-rata terlampaui (*the mean annual rate of exceedance*). Penelitian mereka dilakukan dengan menggunakan data-data kejadian gempa di California bagian selatan. Nilai logaritma  $\lambda_M$  versus magnitudo  $M$  kemudian diplot yang hasilnya mendekati linier seperti ditunjukkan Gambar 3. Hingga sekarang, medel Gutenberg-Richter digunakan sebagai standar oleh peneliti-peneliti dalam menentukan parameter gempa.



Gambar 3. Bentuk garis Gutenberg-Richter's law

Bentuk hubungan ini dikenal dengan hukum Gutenberg-Richter, sebagai berikut :

$$\log \lambda_M(m) = a - b m \quad (1)$$

$$\lambda_M = 10^{a-bm} = e^{\alpha-\beta m} \quad (2)$$

keterangan :

$\lambda_M$  = laju tahunan rata-rata terlampaui yaitu jumlah kejadian gempa dengan magnitudo  $\geq m$  tertentu dalam 1 tahun (*event/tahun*)

$m$  = magnutide gempa

$a$  dan  $b$  = parameter regresi, yang merupakan *fitting* terbaik dari data yang tersedia

Parameter  $a$  berkaitan dengan komponen  $10^a$  dalam persamaan (1),  $10^a$  tidak lain adalah representasi jumlah total gempa pertahun serta nilai ini akan menjadi nilai  $\lambda_M$ . Parameter  $b$  adalah kemiringan garis, yang merepresentasikan kemungkinan relatif kejadian dari gempa yang berbeda.

Probabilitas gempa yang besar akan menjadi kecil apabila nilai parameter  $b$  bertambah hingga diperoleh kemiringan garis yang linier atau semakin datar (Makrup, 2009). Dalam bentuk eksponensial, persamaan (1) akan memberikan nilai  $\alpha$  dan  $\beta$  seperti berikut ini :

$$\alpha = a \ln 10 \approx 2,303 a \quad (3)$$

dan

$$\beta = b \ln 10 = 2,303 b \quad (4)$$

Rate (recurrence rate) kejadian gempa tertentu dihitung berdasarkan parameter  $a$  atau  $\alpha$  dan  $b$  atau  $\beta$  yang sudah diketahui diatas dengan persamaan:

$$v = 10^{\alpha - \beta m_0} \quad (5)$$

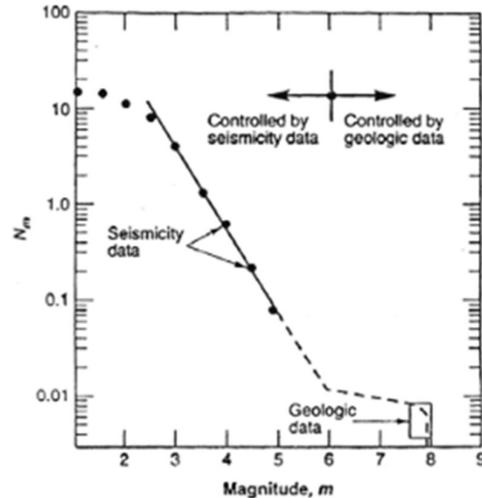
atau

$$v = \exp(\alpha - \beta m_0) \quad (6)$$

**Characteristic Recurrence Law**

Characteristic recurrence law dikembangkan mengingat PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis) (Cornell, 1968) umumnya dilakukan pada lokasi tertentu untuk cakupan wilayah yang luas. Hal ini menyebabkan karakteristik geologis dari patahan tunggal sangat berpengaruh pada hasil PSHA tersebut (Teguh dan Erlangga, 2019). Studi paleoseismik menyebutkan bahwa setiap lokasi pada patahan atau segmen patahan cenderung bergerak dengan jarak yang sama pada setiap gempa yang terjadi. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa patahan tunggal tersebut akan menghasilkan gempa dengan ukuran sebesar 1,5 kali magnitude maksimum secara terus-menerus dengan nilai yang berdekatan atau sama dengan magnitude maksimum tersebut. Gempa ini dinamakan dengan gempa karakteristik (characteristic earthquake). Secara geologis dapat dibuktikan gempa karakteristik lebih sering terjadi dibandingkan dengan gempa

yang diperkirakan dari ekstrapolasi Gutenberg- Richter recurrence law (Fauzi, 2011) seperti ditunjukkan Gambar 4.

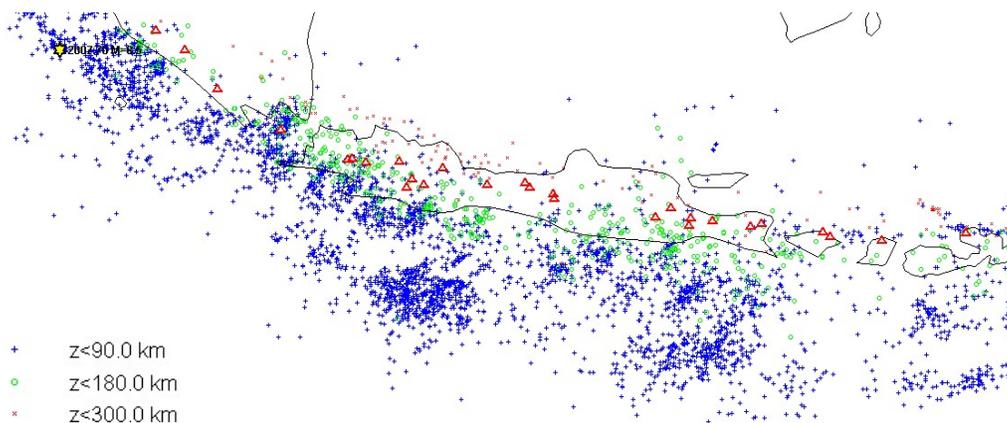


Gambar 4. Recurrence law berdasarkan data seismik (Gutenberg-Richter law) dan data geologi (characteristic law) (Kramer, 1996)

**ANALIS DAN PEMBAHASAN**

**Pengumpulan Data Gempa dan Pemisahan Gempa Utama dengan Gempa Susulan**

Data katalog gempa yang digunakan ialah data gempa yang mempengaruhi Pulau Jawa dan sekitarnya. Data tersebut dikumpulkan dari sumber lembaga nasional (BMKG) dan lembaga internasional (ISS, ISC, BCIS, PDE, ANSS, USGS dan lain-lain). Data katalog gempa yang terkumpul terdiri dari berbagai jenis magnitude sehingga perlu dilakukan penyeragaman magnitude menjadi  $M_w$ . Persamaan kolerasi skala gempa menggunakan penelitian Asurifak (2010). Pada Gambar 5 dapat dilihat kejadian gempa disekitar Pulau Jawa.

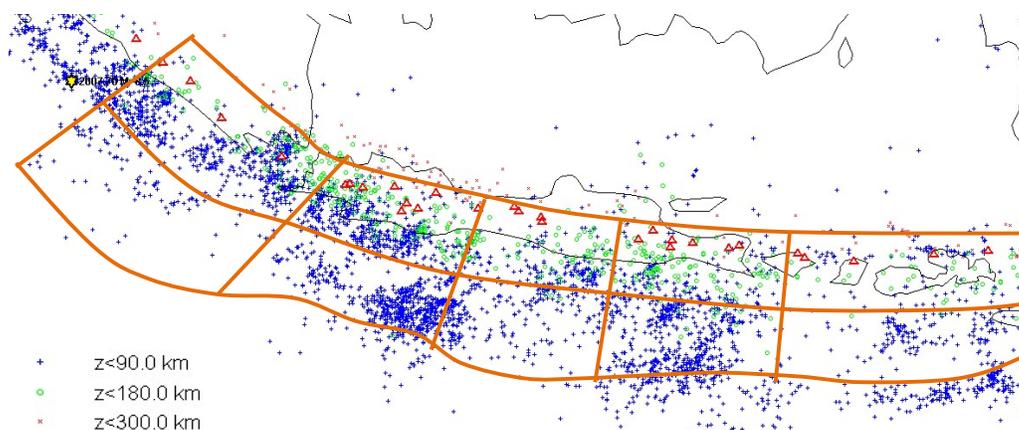


Gambar 5. Kejadian gempa bumi disekitar Pulau Jawa tahun 1965-2019

### Identifikasi Sumber Gempa

Kondisi seismologi, geofisika dan geologi merupakan faktor penentu pada proses identifikasi sumber gempa. Sumber gempa yang diperhitungkan dalam penelitian ini ialah sumber gempa subduksi (*megathrust* dan *benioff*) di wilayah Pulau Jawa dan sekitarnya. Sumber gempa subduksi yang ditinjau ada 10 zona. Tiap-tiap zona sumber gempa subduksi dibeda-bedakan untuk mencari nilai-nilai karakteristik dan parameter sumber gempanya (Gambar 6).

Parameter dari model subduksi meliputi lokasi (koordinat *longitude* dan *latitude*), *annual rate*, sudut penunjaman subduksi dan *b-value* pada area subduksi. Parameter tersebut didapatkan dari data gempa yang pernah terjadi di daerah tersebut dengan batas kedalaman tiap-tiap area subduksi (Erlangga, 2020). Sumber gempa subduksi terdiri dari zona *megathrust* (*interplate*) yang berada pada kedalaman kurang dari 50 km dan zona *benioff* (*intraslab*) pada kedalaman lebih dari 50 km.



Gambar 6 Pembagian zona gempa subduksi

### Karakteristik Sumber Gempa Subduksi

Setiap zona gempa subduksi yang telah dibagi-bagi mempunyai karakteristik yang berbeda-beda. Penentuan karakteristik

sumber gempa di sekitar Pulau Jawa menggunakan metode *Gutenberg-richter's law* dan metode *maximum likely hood*.

Hasil dari karakterisasi sumber gempa berupa parameter yang dapat digunakan dalam analisis *seismic hazard*. Parameter tersebut ialah *b-value*, magnitudo

maksimum dan *slip rate*. Pada Tabel 2 dan Tabel 3 dapat dilihat hasil perhitungan antara metode *Gutenberg-Richter's law* dan metode *maximum likely hood*.

Tabel 2. Parameter sumber gempa subduksi di sekitar Pulau Jawa berdasarkan metode *Gutenberg-Richter's law*

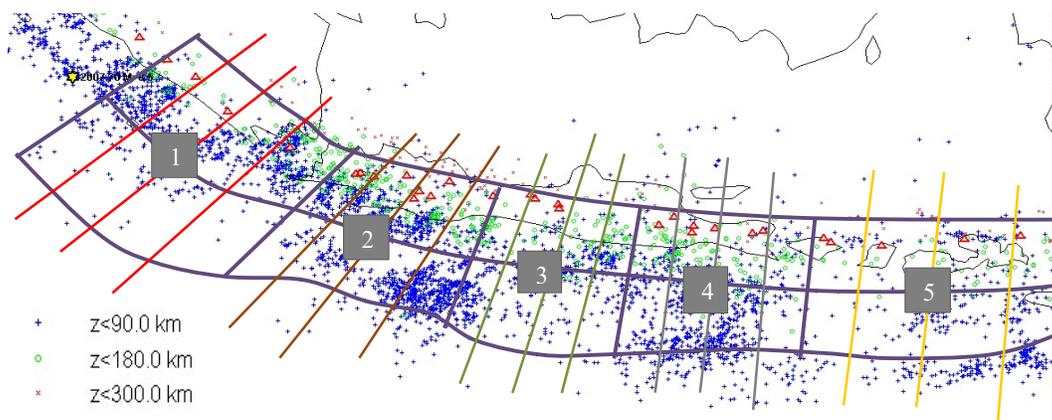
Zona	<i>a</i>	<i>b</i>	$\alpha$	$\beta$	rate <i>v</i>	Mmax
Megatrust S. Sumatra	3,862	-0,745	8,892	1,716	1,368	8,269
Benioff S. Sumatra	5,724	-1,017	13,180	2,341	4,379	8,230
Megatrust Java 1	3,665	-0,761	8,440	1,753	0,723	8,128
Benioff Java 1	6,014	-1,148	13,848	2,644	1,873	8,069
Megatrust Java2	6,305	-1,224	14,519	2,818	1,537	7,979
Benioff Java 2	5,276	-1,037	12,149	2,387	1,240	7,943
Megatrust Java 3	3,644	-0,732	8,391	1,685	0,965	8,043
Benioff Java 3	5,380	-1,084	12,387	2,496	0,913	8,038
Megatrust Sumba	4,383	-0,830	10,092	1,910	1,717	7,332
Benioff Sumba	7,237	-1,320	16,664	3,040	4,322	7,359

Tabel 3. Parameter sumber gempa subduksi di sekitar Pulau Jawa berdasarkan metode *maximum likely hood*

Zona	<i>a</i>	<i>b</i>	$\alpha$	$\beta$	rate <i>v</i>	Mmax
Megatrust S. Sumatra	2,055	0,405	4,731	0,932	1,071	8,269
Benioff S. Sumatra	1,371	0,293	3,156	0,675	0,805	8,230
Megatrust Java 1	2,034	0,426	4,683	0,980	0,805	8,128
Benioff Java 1	1,097	0,238	2,526	0,549	0,805	8,069
Megatrust Java2	0,551	0,129	1,269	0,297	0,805	7,979
Benioff Java 2	-1,421	-0,265	-3,271	-0,611	0,805	7,943
Megatrust Java 3	2,270	0,473	5,227	1,089	0,805	8,043
Benioff Java 3	1,309	0,281	3,015	0,646	0,805	8,038
Megatrust Sumba	2,434	0,459	5,606	1,057	1,380	7,332
Benioff Sumba	1,254	0,188	2,889	0,433	2,057	7,359

Hasil perhitungan antara metode *Gutenberg-Richter's law* dan metode *maximum likely hood* memiliki nilai yang berbeda. Hal ini dikarenakan adanya faktor ketidakpastian dalam analisis gempa. Pada analisis *seismic hazard* digunakan *logic tree* untuk memperhitungkan ketidakpastian nilai parameter. *Reccurrence model* yang digunakan ialah *characteristic (maximum*

*likely hood)* dan *Gutenberg-Richter's law* dengan pemberian bobot lebih besar kepada model karakteristik. Pemberian bobot yang lebih besar pada model karakteristik dikarenakan gempa karakteristik lebih sering terjadi dibandingkan dengan gempa yang diperkirakan dari model *reccurrence* Gutenberg-Richter yang telah dibuktikan secara geologis (Kramer, 1996).

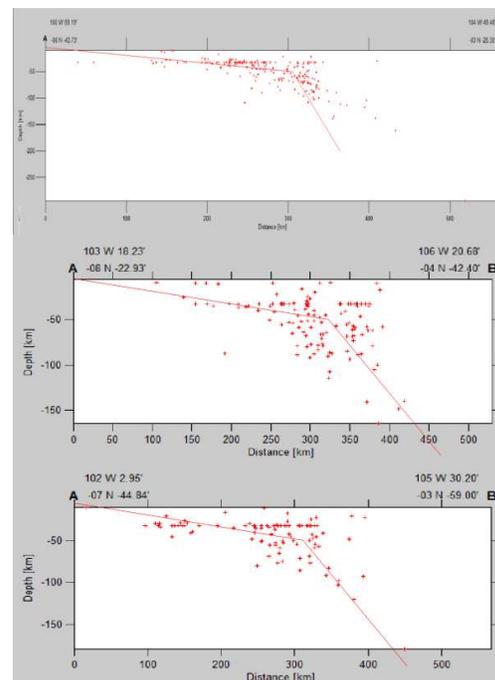


Gambar 7. Lokasi potongan melintang di zona subduksi Jawa dan sekitarnya

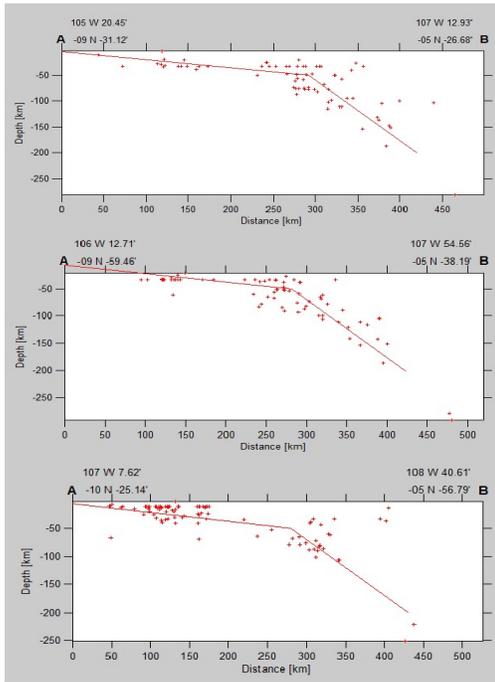
### Sudut Penunjam (*dip*) Zona Subduksi

Pemodelan sumber gempa tiga dimensi (3D) memerlukan nilai sudut penunjaman (*dip*) zona subduksi. Widiyantoro (2009) mengatakan bahwa pemodelan tomografi maupun dari potongan melintang distribusi hiposenter dapat menggambarkan secara umum nilai *dip* zona subduksi. Pada penelitian ini, gambaran umum *dip* zona subduksi diperoleh berdasarkan lima area potongan melintang distribusi hiposenter di sekitar zona subduksi Pulau Jawa dan sekitarnya (Gambar 7). Zona *megathrust* berada pada kedalaman hingga 50 km dan zona *benioff* berada pada kedalaman lebih dari 50 km.

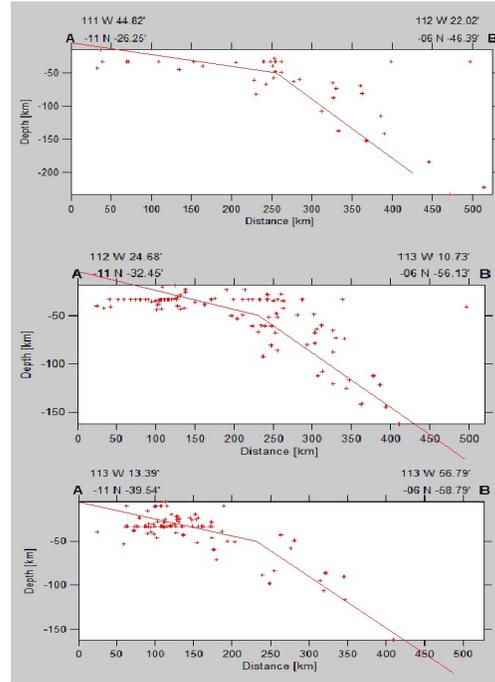
Sudut penunjaman untuk zona *megathrust* dan *benioff* di zona subduksi area 1, 2, 3, 4 dan 5 dapat dilihat pada Gambar 8, 9, 10, 11 dan 12. Hasil perhitungan menunjukkan sudut penunjaman (*dip*)  $8,333^\circ$  zona *Megathrust S. Sumatra*,  $52,667^\circ$  zona *Benioff S. Sumatra*,  $7^\circ$  zona *Megathrust Java 1*,  $40,333^\circ$  zona *Benioff Java 1*,  $13,667^\circ$  zona *Megathrust Java 2*,  $53,667^\circ$  zona *Benioff Java 2*,  $14,667^\circ$  zona *Megathrust Java 3*,  $41,333^\circ$  zona *Benioff Java*,  $38,667^\circ$  zona *Megathrust Sumba* dan  $42,333^\circ$  zona *Benioff Sumba*.



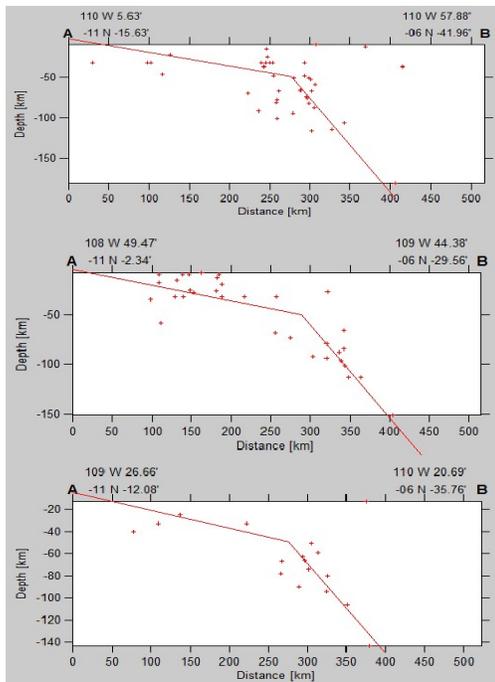
Gambar 8 Potongan Melintang di Area 1



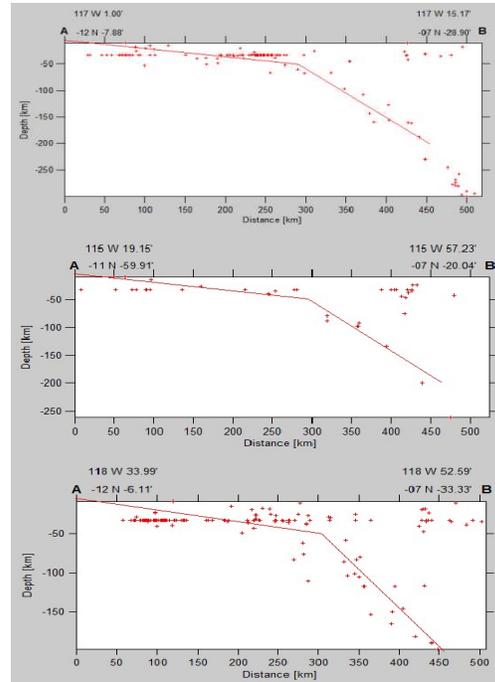
Gambar 9 Potongan Melintang di Area 2



Gambar 11 Potongan Melintang di Area 4



Gambar 10 Potongan Melintang di Area 3



Gambar 12 Potongan Melintang di Area 5

## KESIMPULAN

Nilai parameter sumber gempa subduksi di sekitar Pulau Jawa dengan metode *Gutenberg-Richter's law* berbeda dengan metode *maximum likely hood*. Disini terlihat bahwa gempa karakteristik berbeda dengan gempa yang diperkirakan dari model Gutenberg-Richter. Pada analisis *hazard* gempa, kedua model ini digunakan untuk *reccurence model* dengan nilai pembobot lebih besar pada model karakteristik. Hal ini didasarkan oleh bukti geologis yang menunjukkan bahwa gempa karakteristik lebih sering terjadi dibandingkan dengan gempa yang diperkirakan dari model Gutenberg-Richter.

Nilai sudut penunjaman (*dip*) pada zona subduksi disekitar Pulau Jawa, untuk *megatruse* antara  $7^{\circ} - 14,667^{\circ}$  dan untuk *benioff* antara  $40,333^{\circ} - 53,667^{\circ}$ . Nilai *dip* terbesar berada pada zona *megatruse java 3* sebesar  $14,667^{\circ}$  dan *benioff java 2* sebesar  $53,667^{\circ}$ . Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk penentuan nilai respon spektrum *hazard* seragam dengan bantuan fungsi atenuasi yang sesuai dengan keadaan Indonesia. Berdasarkan nilai respon spektrum tersebut didapatkan nilai PGA pada batuan dasar di Pulau Jawa sebagai acuan untuk penentuan resiko peta gempa Indonesia.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K. (1965). "Maximum Likelihood Estimate of b in the formula  $N = a - bm$  and its Confidence Limits". *Bulletin Earthquake Research Institute of the University of Tokyo*, 43: 237-239.
- Aldiamar, F., (2007). "*Analisa Resiko Gempa dan Pembuatan Respon Spektra Desain untuk Jembatan Suramadu dengan Permodelan Sumber Gempa 3D*", Program Pascasarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITB, Bandung.
- Asrurifak, M. (2010). "*Peta Respon Spektra Indonesia untuk Perencanaan Struktur Bangunan Tahan Gempa dengan Model Sumber Tiga Dimensi dalam Analisis Probabilistik*". Disertasi. Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Bock, R. et al. (1996). "Accretion of the southern Banda arc to the Australian plate margin determined by Global Positioning System measurements". *Tectonics*, 15. 288-295.
- Cornell, C.A. (1968). "Engineering Seismic Risk Analysis". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58, pp. 1583-1606.
- Erlangga, W., Teguh, M., dan Makrup, L. (2020). "The analysis of performance level on an existing multi-story building structure using the time history based on the subduction earthquake source". *E3S Web of Conferences. Vol 156. 4th International Conference on Earthquake Engineering & Disaster Mitigation (ICEEDM 2019)*. Padang, Indonesia.
- Fauzi, U. J., (2011). "*Peta Deagregasi Indonesia Berdasarkan Analisis Probabilitas Dengan Sumber Gempa Tiga Dimensi*". Tesis. Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Gutenberg, B. and Richter, C.F., (1944), "Frequency of Earthquakes in California". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 185-188.
- Irsyam, M., Sengara I.W., Adiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Natawidjaja, D.H., Kertapati, E., Meilano, I., Suhardjono, Asrurifak, M., dan Ridwan, M. (2010). "*Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia*", Bandung.
- Kramer, S.L. (1996). "*Geotechnical Earthquake Engineering*". Prentice-Hall. New Jersey.

- Lay, T. dan Wallace, T.C. (1995). “*Modern Global Seismology*”. Academic Press, San Diego, California.
- Mahesworo, R. P. (2008). “*Usulan Ground Motion Untuk Empat Kota Besar Di Wilayah Sumatera Berdasarkan Hasil Analisis Seismic Hazard Menggunakan Model Sumber Gempa 3 Dimensi*”. Tesis. Institut Teknologi Bandung.
- Makrup, L. (2009). “*Pengembangan Peta Deagregasi Hazard untuk Indonesia Melalui Pembuatan Software dengan Pemodelan Sumber Gempa Tiga Dimensi*”. Disertasi. Institut Teknologi Bandung.
- Milson, J. *et al.* (1992). “The Manokwari Trough and The Western End of The New Guinea Trench”. *Tectonics*. 11. 145-153.
- Nicolaou, A.S. (1998). “*A GIS Platform for Earthquake Risk Analysis*”. Dissertation. Faculty of the Graduate School of State University of New York at Buffalo USA.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). “*SNI 1726 2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*”. Badan Standarisasi Nasional (BSN). Jakarta.
- Sulistiyanto, I.G. (2009). “*Geografi 1 : untuk Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah Kelas X*”. Departemen Pendidikan Nasional. Jakarta.
- Sunardi, B. (2013). “*Peta Deagregasi Hazard Gempa Wilayah Jawa dan Rekomendasi Ground Motion Di Empat Daerah*”. Tesis, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Teguh, M. dan Erlangga, W. (2019). “Comparison of Bedrock and Surface Time Histories Subjected to Subduction Earthquake in a Selected Location of Yogyakarta”. *Journal of GEOMATE*. 17. Issue 63. pp. 77 -86.
- Widodo. (2012). “*Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan*”. Pustaka Pelajar. Yogyakarta