

PENENTUAN *GROUND MOTION PREDICTION EQUATIONS (GMPEs)* DENGAN METODE *EUCLIDEAN* DAN *LIKELIHOOD* UNTUK WILAYAH JAWA TIMUR

DETERMINING GROUND MOTION PREDICTION EQUATIONS (GMPEs) USING EUCLIDEAN AND LIKELIHOOD METHOD FOR EAST JAVA

Rian Mahendra Taruna^{1*}, Supriyanto Rohadi², Ariska Rudyanto³, Damianus Tri Heryanto⁴

¹Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jl. Perhubungan I no 5 Tangerang Selatan Banten

²Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG, Jl. Angkasa I no 2 Kemayoran Jakarta

³Bidang Seismologi Teknik BMKG, Jl. Angkasa I no 2 Kemayoran Jakarta Jakarta

⁴Pusat Instrumentasi, Rekayasa, dan Kalibrasi BMKG, Jl. Angkasa I no 2 Kemayoran Jakarta

*E-mail: reemyan@gmail.com

Naskah masuk: 3 Oktober 2016; Naskah diperbaiki: 14 Oktober 2016; Naskah diterima: 22 Desember 2016

ABSTRAK

Pemilihan dan penentuan *Ground Motion Prediction Equations (GMPEs)* sangat penting untuk perkiraan kerusakan akibat gempabumi pada wilayah yang memiliki zona seismik aktif di Indonesia. Wilayah Jawa Timur merupakan zona seismik aktif yang sering mengalami kerusakan akibat gempabumi namun belum memiliki *GMPEs* yang memadai. Tujuan dari penelitian ini adalah memperoleh *GMPEs* yang mampu memprediksi nilai *Peak Ground Acceleration (PGA)* di wilayah Jawa Timur dengan akurat. Pada penelitian ini 10 model *GMPEs* diterapkan pada database *strong ground motion* di Jawa Timur. Penelitian diawali dengan pembuatan database *strong ground motion* yang terbagi atas tiga tahap, yaitu relokasi dengan *Double Difference*, penentuan tipe gempabumi, dan penentuan kondisi situs. Data yang digunakan adalah gempabumi dengan magnitudo $5 \leq Mw \leq 9$ dan jarak kurang dari 500 km yang terjadi di sekitar Jawa Timur dari 2009 hingga 2016. Penentuan tipe gempabumi dilakukan melalui analisa posisi hiposenter terhadap model *slab* dengan mempertimbangkan mekanisme gempabumi. Kondisi situs dari sensor *accelerograph* ditentukan berdasarkan nilai *Vs30* dan periode dominan. Tingkat keakuratan *GMPEs* yang tersedia diuji menggunakan histogram distribusi residual, metode *Likelihood*, dan *Euclidean Distance Ranking*. Hasil dari metode ini adalah model awal *GMPEs* yang selanjutnya diregresi dengan data observasi *accelerograph* untuk menghasilkan persamaan baru yang bisa digunakan sebagai *seismic hazard assessment* di Jawa Timur. Hasil pemetaan nilai observasi *PGA* periode 2015- 2016 ke dalam kurva atenuasi *GMPEs* menunjukkan bahwa estimasi nilai *PGA* melalui *GMPEs* baru relatif akurat.

Kata Kunci: *ground motion prediction equations, Metode Likelihood, Metode Euclidean Distance*

ABSTRACT

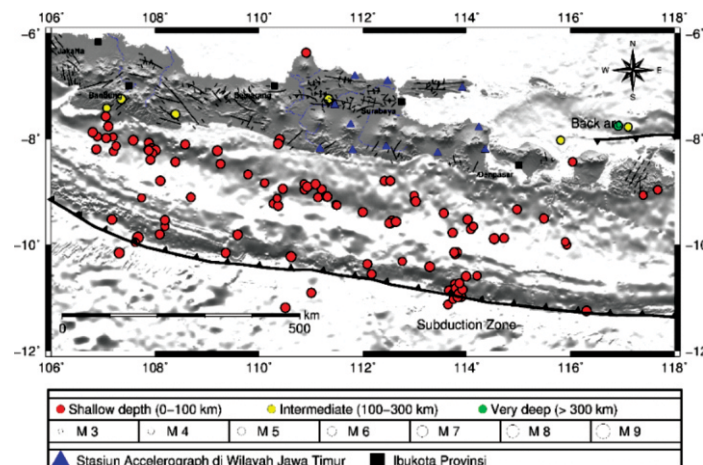
Selection and determination of Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) has become important for seismic hazard assessment in active seismic region. East Java is one of active seismic region with frequently damages due to earthquakes. The purpose of this paper is to present GMPEs which can predict Peak Ground Acceleration (PGA) in East Java accurately. In this research, we applied 10 GMPEs models to strong ground motion database of East Java. This research initially constructs strong ground motion database which is divided into three stages, those are relocation using Double Difference, determination of type of earthquake, and determination of site condition. Data set consisted of earthquakes of $5 \leq Mw \leq 9$ and distance less than 500 km that occurred around Java from 2009 until 2016. Determination of type of earthquake is conducted by analysing hypocenter position to slab model considering mechanism of the earthquake. Site condition of accelerograph is determined using Vs30 and dominant period. Performance of GMPEs is tested using histogram of residual distribution, Likelihood, and Euclidean Distance Ranking methods. Then regression with observation data applied to GMPEs model from testing methods that can present new equation for seismic hazard in East Java. Plotting observed PGA in period 2015 up to 2016 into the attenuation curve of the obtained GMPEs showed that new GMPEs can accurately estimate PGA value.

Keywords: *ground motion prediction equations, Likelihood method, Euclidean Distance method*

1. Pendahuluan

Indonesia menempati zona tektonik yang sangat aktif karena tiga lempeng besar saling bertemu di wilayah Indonesia serta membentuk jalur-jalur pertemuan

lempeng yang kompleks [1]. Keberadaan pertemuan lempeng-lempeng ini menempatkan Indonesia sebagai wilayah yang sangat rawan terhadap gempabumi.



Gambar 1. Peta persebaran gempa bumi yang telah direlokasi di wilayah penelitian

Jawa Timur merupakan salah satu daerah di Indonesia yang sering mengalami kerusakan akibat gempa bumi. Seismotektonik Pulau Jawa dapat dibagi menjadi dua lajur, yakni lajur seismotektonik subduksi selatan Jawa dan lajur seismotektonik sesar aktif daratan Jawa [2]. Karakteristik lajur seismotektonik subduksi selatan Jawa ini merupakan bagian dari Lempeng tektonik Indo- Australia yang menunjam di bawah bagian Lempeng tektonik Eurasia. Lajur subduksi ini memanjang dari selat Sunda hingga ujung timur Pulau Sumbawa.

Kondisi tektonik tersebut menunjukkan pentingnya penelitian tentang *Ground Motion Prediction Equations (GMPEs)* di daerah Jawa Timur guna memperkirakan kerusakan akibat gempa bumi di masa yang akan datang. *GMPEs* sangat berguna dalam *seismic hazard analysis* karena mampu memperkirakan parameter *ground motion* dengan akurat pada periode yang cukup lama serta berguna bagi insinyur dalam rekayasa bangunan.

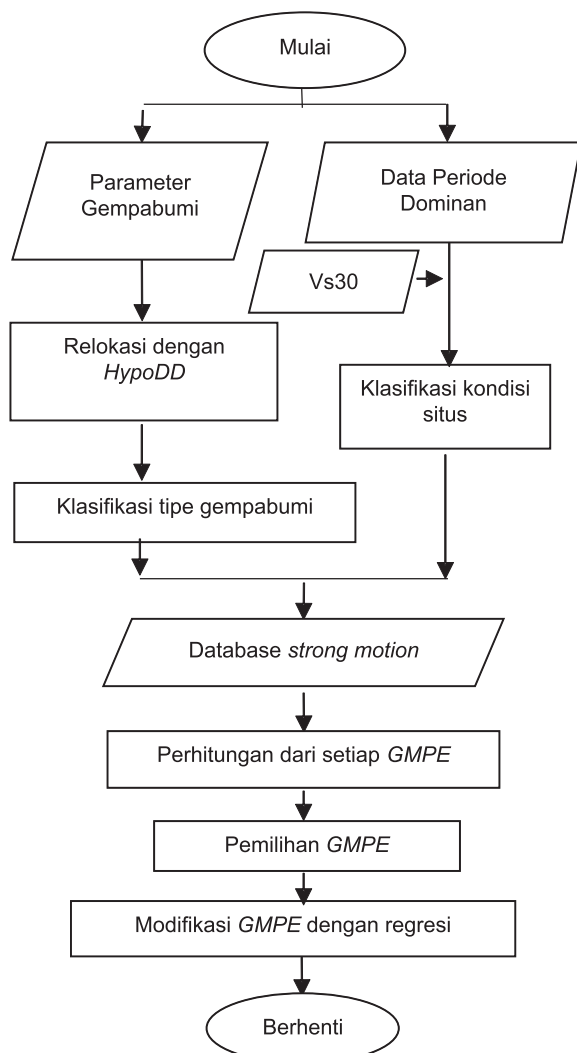
GMPEs diperoleh dari analisa empiris dengan mempertimbangkan parameter sumber gempa bumi dan kondisi situs. Tipe gempa bumi dan kondisi situs yang berbeda akan menghasilkan *ground motion* yang berbeda meskipun memiliki magnitudo dan jarak yang sama [3]. Namun studi *GMPEs* di Indonesia sebelumnya belum mempertimbangkan faktor mekanisme gempa bumi dan kondisi situs, Prosedur dalam pemilihan dan perbandingan *GMPEs* juga terus dikembangkan oleh para peneliti. Terdapat beberapa metode kuantitatif yang mampu menggambarkan dengan baik kesesuaian dari *GMPE* [4]. Perkembangan metode perbandingan mendorong perlunya penelitian *GMPEs* terbaru sehingga hasil yang didapat lebih dipercaya. Beberapa alasan di atas menjadi latar belakang dalam penelitian ini guna mendapatkan model *GMPEs* yang lebih akurat dengan menggunakan database yang lengkap termasuk tipe gempa bumi dan kondisi situs serta menggunakan

metode pemilihan *GMPEs* yang terbaru. *GMPEs* yang lebih akurat akan menghasilkan perkiraan kerusakan akibat gempa bumi yang lebih baik. Data pengukuran *accelerograph* pada tahun 2009- 2016 dalam analisis diperoleh dari Bidang Seismologi Teknik BMKG.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pembuatan database *strong motion* yang terdiri dari tipe dan parameter gempa bumi, kondisi situs, dan nilai observasi *Peak Ground Acceleration (PGA)*. Gempa bumi dalam penelitian merupakan gempa bumi dengan $M \geq 5$ dan jarak episenter ≤ 500 km yang terekam oleh 12 *accelerograph* di Jawa Timur pada periode 2009-2016. Data parameter gempa bumi diperoleh dari katalog gempa bumi BMKG [5], ISC [6], *Global CMT* [7], dan *USGS* [8]. Data gempa bumi direlokasi terlebih dahulu menggunakan metode *Double Difference* [9] sehingga mendapatkan kualitas data yang lebih baik. Data gempa bumi yang telah direlokasi ditunjukkan pada Gambar 1. Dalam penelitian ini juga digunakan data periode dominan dari rekaman *accelerograph* BMKG dan nilai $Vs30$ daerah sensor *accelerograph* dari Rudyanto (2013) [10] untuk mengetahui kondisi situs di daerah sensor.

Database yang telah lengkap selanjutnya digunakan sebagai masukan dari 10 *GMPEs* yang diteliti. Nilai *PGA* dari 10 *GMPEs* kemudian dibandingkan dengan *PGA* observasi menggunakan grafik distribusi residual, metode *Likelihood*, dan metode *Euclidean Distance Ranking*. Metode tersebut akan menghasilkan sebuah model awal untuk digunakan dalam proses regresi dengan observasi *PGA* sehingga diperoleh *GMPEs* baru untuk wilayah Jawa Timur. Alir kerja penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Alur kerja penelitian dalam penentuan *GMPEs*

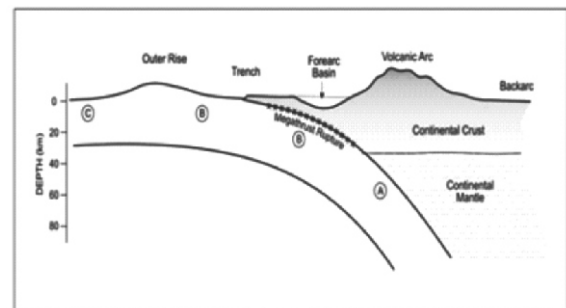
Tipe gempabumi. Klasifikasi tipe gempabumi dilakukan dengan cara melihat posisi hiposenter terhadap model *slab*. Menurut Astiz (1988) gempabumi *intraslab* dapat terjadi pada 3 lokasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan gempabumi interface berada pada zona *megathrust* dengan mekanisme *thrusting* [11].

Gempabumi pada zona *crustal* memiliki kedalaman yang sangat dangkal dan berada jauh dari zona subduksi.

Kondisi situs. Kondisi situs dapat diketahui melalui nilai *Vs30* dan periode dominan berdasarkan BSSC (2000) [12]. Secara umum kondisi situs terbagi atas *soil* dan *rock*. Klasifikasi kondisi situs menurut BSSC (2000) dapat dilihat pada Tabel 1.

GMPEs. Sejauh ini catatan *strong ground motion* di dunia lebih banyak didominasi oleh gempabumi di

shallow crustal sehingga sebagian besar persamaan atenuasi yang ada dikembangkan untuk daerah *crustal* [13]. Dalam penelitian ini digunakan 10 *GMPEs* berbeda yang diambil dari Douglas (2011) [14] dengan mempertimbangkan kesesuaian kondisi tektonik dengan daerah Jawa Timur. Karakteristik *GMPEs* yang digunakan terangkum pada Tabel 2. Pemilihan *GMPEs* yang digunakan juga didasarkan pada penelitian Rudyanto (2013) tentang persamaan atenuasi di wilayah Sumatra dan Jawa [10].



Gambar 3. Klasifikasi tipe gempabumi (Astiz, 1988)

Tabel 1. Klasifikasi tanah *NEHRP* (BSSC, 2000)

Kategori		Profil Tanah	<i>Vs30</i> (m/sec)	T dom (s)
<i>Vs30</i>	T dom			
A	SC I	Hard Rock	$V_s > 1524$	$T < 0,2$
B	SC II	Rock	$762 < V_s \leq 1524$	
C	SC II	Hard soil	$366 < V_s \leq 762$	$0,2 = T < 0,4$
D	SC III	Stiff soil	$183 < V_s \leq 366$	$0,4 = T < 0,6$
E	SC IV	Soft soil	$V_s < 183$	$T = 0,6$

Tabel 2. Karakteristik model *GMPEs* (Douglas, 2011)

Model	Area	Magnitudo	Tipe Gempabumi
Tong dan Katayama (1988) [15]	Japan	$4,5 \leq M \leq 7,9$	Semua tipe gempabumi
Boore (1993) [16]	NW America	$5,1 \leq M_w \leq 7,7$	Semua tipe gempabumi
Yongs dkk. (1997) [17]	World Subduct. Zone	$5 \leq M_w \leq 8,2$	Interface, Intraslab
Midorikawa dan Ohtake (2004) [18]	Japan	$5,5 \leq M_w \leq 8,3$	Semua tipe gempabumi
Kanno dkk. (2006) [19]	Japan	$5 \leq M_w \leq 8,2$	Semua tipe gempabumi
Lin dan Lee (2008) [20]	NE Taiwan	$4,1 \leq M_w \leq 7,3$	Semua tipe gempabumi
Bindi dkk. (2009) [21]	Italia	$4,6 \leq M_w \leq 6,9$	Semua tipe gempabumi
Hong dkk. (2009) [22]	Mexico	$5 \leq M_w \leq 8$	Interface, Strike slip
Mandal dkk. (2009) [23]	India	$3,1 \leq M_w \leq 7,7$	Semua tipe gempabumi
Akkar dan Bommer (2010) [24]	Europe	$5 \leq M_w \leq 7,6$	Semua tipe gempabumi

Metode Likelihood (LH). Metode *Likelihood* dikembangkan oleh Scherbaum dkk. (2004) [25]. Tes *LH* dilakukan untuk mengetahui ketepatan prediksi dari *GMPEs*. Tes *LH* adalah perhitungan parameter likelihood dari suatu data dengan rumus berikut:

$$LH(|Res|) = Erfc\left(\frac{|Res|}{\sqrt{2}}, \infty\right) \quad (1)$$

$$Erfc = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{|Res|}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (2)$$

Erfc adalah fungsi error dan Res adalah residual ternormalisasi.

$$Res = \frac{\log(\text{nilai observasi}) - \log(\text{nilai prediksi})}{\text{standard deviasi nilai prediksi}} \quad (3)$$

Pemilihan *GMPEs* dapat dilakukan dengan menggunakan nilai mean, median, standar deviasi residual normal, dan median LH. Kecocokan dari *GMPEs* dapat dilihat dari nilai median LH. *GMPEs* dengan kecocokan optimal akan terdistribusi normal antara 0 dan 1 dan nilai median LH sekitar 0,5.

Metode Euclidean Distance Based Ranking (EDR).

Metode *EDR* merupakan metode baru yang dikembangkan oleh Kale dan Akkar (2013) dalam membandingkan *GMPEs* yang paling sesuai dengan data observasi [4]. Metode ini dikembangkan dari konsep jarak *Euclidean* (DE) yang merupakan modifikasi dari konsep analisis residual. Perumusan DE adalah:

$$DE = \sum_{i=1}^N (p_i - q_i)^2 \quad (4)$$

dengan N adalah jumlah pasangan data (p_i, q_i).

Metode *EDR* mengasumsikan bahwa logaritma natural dari model prediksi, khususnya DE terdistribusi normal. D dinotasikan sebagai selisih antara logaritma natural dari data observasi (a) dan data prediksi (Y) seperti rumus (5).

$$D = a - Y \quad (5)$$

Nilai diskrit dari D dinotasikan sebagai d_j . Jumlah kemungkinan terjadinya d_j disebut *Modified Euclidean Distance* (MDE). MDE pada data diskrit dirumuskan pada persamaan (6).

$$MDE_d = \sum_{j=1}^n |d_j| \Pr(|D| < |d_j|) \quad (6)$$

Dalam metode ini juga dikenalkan parameter k untuk mengukur tingkat penyimpangan antara data observasi dengan data prediksi. Parameter k adalah perbandingan antara $DE_{original}$ dan $DE_{corrected}$ yang dirumuskan pada persamaan (7).

$$k = \frac{DE_{original}}{DE_{corrected}} \quad (7)$$

$$DE_{original}^2 = \sum_{i=1}^N (a_i - Y_i)^2 \quad (8)$$

$$DE_{corrected}^2 = \sum_{i=1}^N (a_i - Y_{c,i})^2 \quad (9)$$

Dengan a_i dan Y_i adalah logaritma natural dari data observasi dan prediksi ke- i . N adalah jumlah data pada database ground motion yang digunakan. Parameter $Y_{c,i}$ adalah data estimasi ke- i yang telah dikoreksi dengan garis regresi antara logaritma data prediksi dan observasi seperti yang ditunjukkan pada persamaan (10).

$$Y_{c,i} = Y_i - (Y_{fit,i} - a_i) \quad (10)$$

nilai optimum dari *EDR* adalah 1.0 yang terjadi ketika nilai estimasi sama dengan nilai observasi yang bersesuaian.

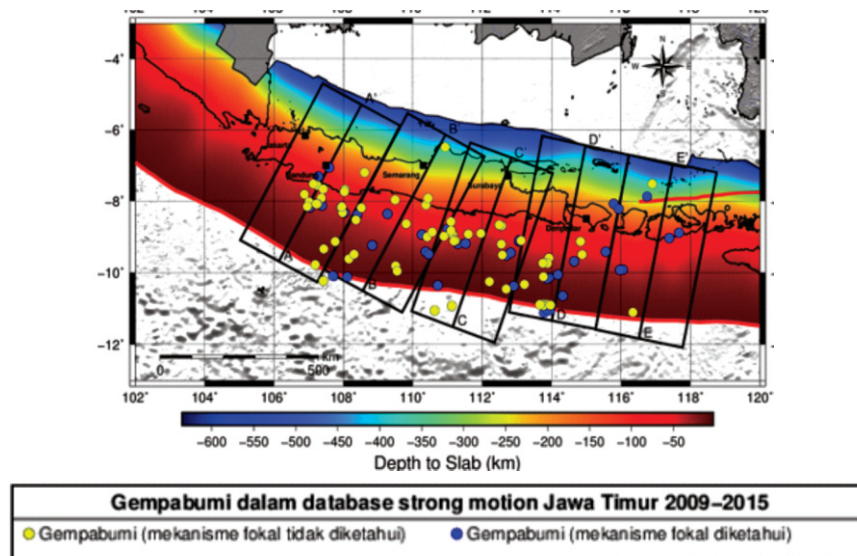
Untuk menghilangkan ketergantungan hasil *EDR* terhadap ukuran data maka parameter k dan MDE harus dinormalisasikan dengan jumlah data N . Perhitungan *EDR* secara matematis disajikan dalam persamaan (11). Semakin kecil nilai *EDR* maka data prediksi merepresentasikan dengan baik data observasi.

$$EDR^2 = k \times \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N MDE_i^2 \quad (11)$$

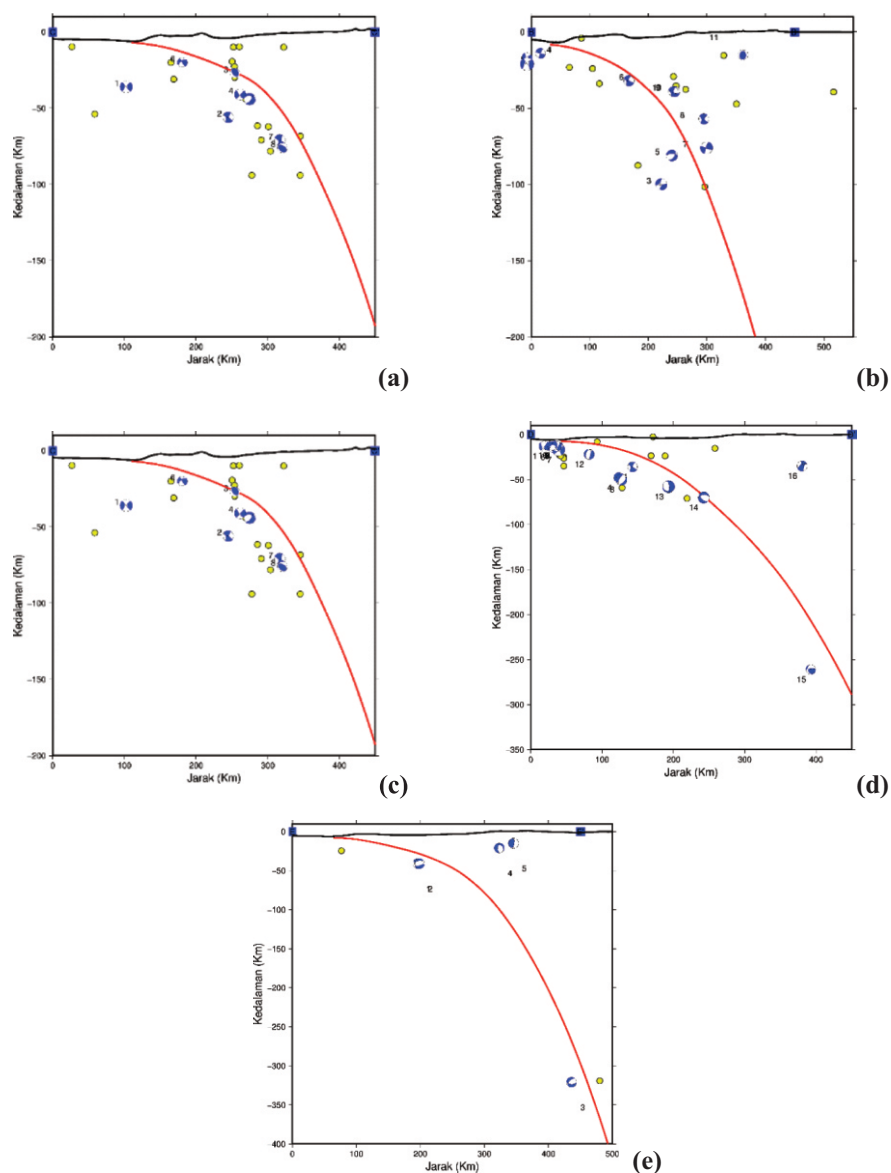
Penentuan model *GMPEs*. Hasil dari metode *LH* dan *EDR* akan menunjukkan tingkat kesesuaian dari semua model persamaan yang dianalisa. Model dengan kesesuaian tertinggi akan digunakan sebagai bentuk awal regresi linear berganda dari data observasi *accelerograph*. Model dengan koefisien baru ini yang kemudian digunakan sebagai persamaan baru untuk wilayah Jawa Timur.

3. Hasil dan Pembahasan

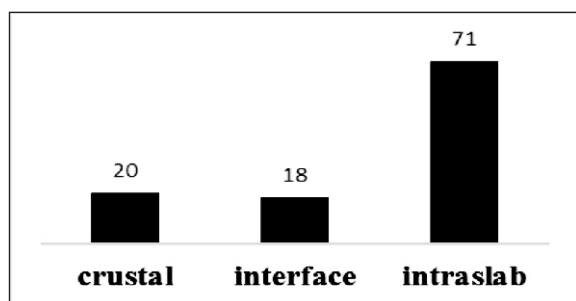
Klasifikasi tipe gempabumi. Tipe gempabumi dapat diketahui secara visual dengan melihat lokasi gempabumi terhadap slab. Persebaran gempabumi dan *cross section* dapat dilihat di Gambar 4 dan 5. Gambar 4 menunjukkan bahwa sebagian gempabumi tidak memiliki data mekanisme fokal. Mekanisme fokal dari gempabumi tersebut dapat diketahui dengan asumsi bahwa mekanisme fokal yang berada pada satu lokasi yang berdekatan adalah sama. Data mekanisme fokal digunakan untuk membedakan gempabumi *interface* dan *intraslab*. *Cross section* yang dibuat pada penelitian ini berjumlah 5 lintasan yang dianggap mampu menggambarkan posisi hiposenter terhadap *slab* dengan lebih akurat. *Model slab* yang digunakan adalah model *slab* dari USGS [26].



Gambar 4. Persebaran gempabumi dan lintasan *cross section*



Gambar 5. *Cross section* dan persebaran gempabumi lintasan a) A- A', b) B- B', c) C- C', d) D- D', dan e) E- E'



Gambar6. Grafik jumlah gempabumi per tipe gempabumi

Gambar 5 menunjukkan bahwa mekanisme *normal fault* lebih dominan dibandingkan *thrust fault* khususnya untuk kedalaman lebih dari 40 km. *Normal fault* pada slab merupakan ciri- ciri utama dari gempabumi *intraslab* [11]. Kondisi ini sesuai dengan klasifikasi gempabumi dari Rudyanto (2013) yang menyatakan bahwa gempabumi *intraslab* di wilayah Jawa berada pada kedalaman lebih dari 40 km [10]. Gambar 5 juga menunjukkan bahwa gempabumi *crustal* untuk wilayah Jawa berada pada kedalaman kurang dari 40 km dan berjumlah sedikit dibandingkan gempabumi akibat subduksi.

Hasil klasifikasi secara manual ditampilkan pada Gambar 6 yang menunjukkan bahwa sebagian besar gempabumi dalam database merupakan gempabumi *intraslab*, yaitu sebanyak 71 event. Gempabumi *crustal* dan *interface* memiliki jumlah yang hampir sama, yaitu 20 dan 18. Dominasi gempabumi *intraslab* bersesuaian dengan kondisi tektonik wilayah Jawa Timur yang dekat dengan zona subduksi. Gempabumi *crustal* yang terjadi relatif sedikit karena sesar lokal di Jawa Timur cenderung menghasilkan gempabumi dengan magnitudo kecil kurang dari 5 Mw.

Klasifikasi kondisi situs. Penentuan kondisi situs dilakukan dengan melihat nilai Vs30 dan periode dominan seperti pada Tabel 3. Berdasarkan nilai Vs30 diperoleh hasil bahwa semua sensor *accelerograph* di Jawa Timur berada di tipe situs *soil*. Nilai Vs30 dari semua sensor kurang dari 366 m/s yang merupakan batas atas kategori kelas D atau *stiff soil* menurut klasifikasi NEHRP [12]. Kondisi situs berdasarkan periode dominan juga menunjukkan hasil yang relatif sama dengan Vs30. Hasil yang berbeda hanya terdapat di sensor Banyuwangi, namun pada penelitian ini hasil Vs30 diasumsikan lebih baik karena diperoleh dari survei langsung di lapangan.

Database *Ground motion*. Analisa tentang database sangat penting untuk mengetahui karakter dari persamaan atenuasi yang diperoleh. Analisa database dilakukan dengan melihat persebaran data

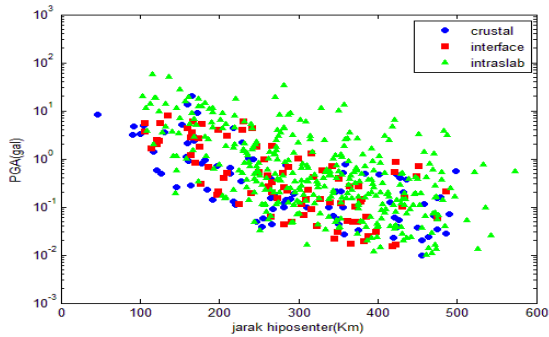
berdasarkan magnitudo momen, tipe gempabumi, dan jarak hiposenter. Persebaran data terhadap jarak hiposenter dan magnitudo pada setiap tipe gempabumi ditunjukkan pada Gambar 7 dan 8. Berdasarkan Gambar tersebut sebagian besar gempabumi yang terjadi memiliki magnitudo momen 5 hingga 6 dan jarak hiposenter antara 100- 500 km. Nilai PGA bervariasi dari 0,009 gals hingga 57,137 gal. Sebagian besar rekaman strong motion bernilai $PGA < 10$ gals yang berhubungan dengan dominasi gempabumi kecil pada database.

Karakter database *ground motion* dalam penelitian ini menunjukkan bahwa model yang diasumsikan sesuai dengan wilayah Jawa Timur adalah model yang dibuat di wilayah dengan zona subduksi dan didominasi oleh gempabumi 5-6 Mw. Jika melihat karakteristik tersebut maka 10 model atenuasi yang akan diteliti mampu memenuhi kriteria yang diinginkan karena dibuat berdasarkan database *strong ground motion* di zona subduksi dengan dominasi gempabumi 5 hingga 8 Mw.

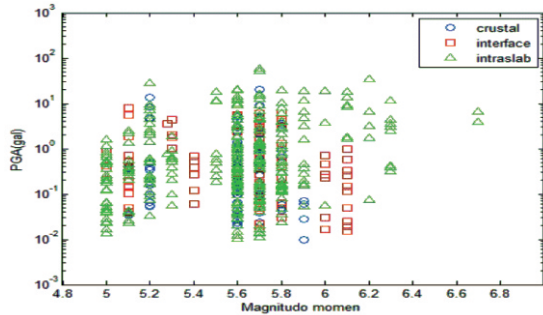
Pemilihan dan pengujian *GMPEs*. Database *strong motion* pada tahun 2010-2015 digunakan sebagai input pada 10 rumus *GMPEs* yang berbeda untuk memprediksi nilai *PGA* dari suatu gempabumi. Pada tahap awal tingkat kesesuaian *GMPEs* dilihat melalui distribusi residual pada histogram (Gambar 9). Kesesuaian dari *GMPEs* yang baik ditandai dengan distribusi residual yang mengikuti pola distribusi normal (Gaussian). Distribusi normal pada histogram digambarkan oleh kurva *bell shaped* yang memiliki nilai rata-rata 0 dan standar deviasi 0,5.

Tabel3. Klasifikasi kondisi situs di sensor *accelerograph*

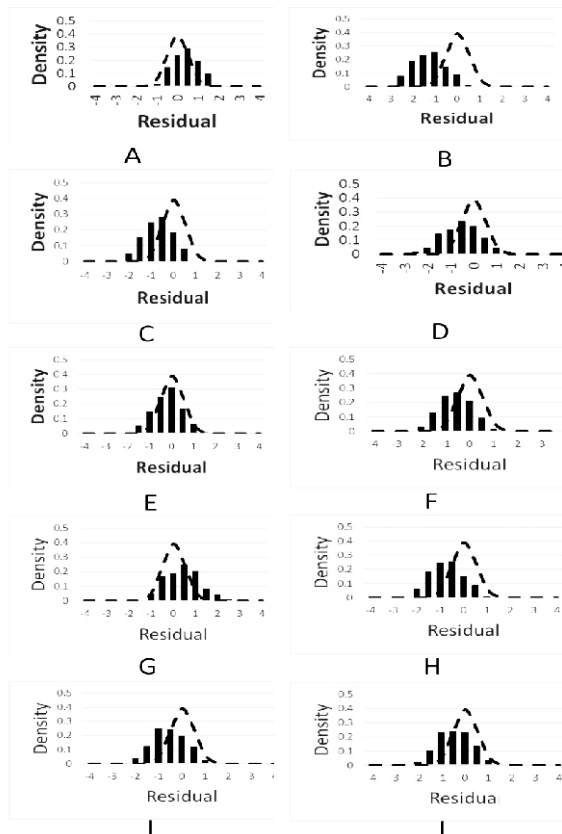
STASIUN	T (s)	Vs30 (m/s)	Kondisi Situs	
			Vs30	T
ASEMBAGUS	0.698	196.5	soft soil	soft soil
BANYUGLUGUR	0.942	218	medium soil	soft soil
BANYUWANGI	0.148	202	medium soil	rock
GUMUKMAS	0.274	290	medium soil	hard soil
GRESIK	0.201	223	medium soil	hard soil
KALIANGET	0.470	248	medium soil	medium soil
KARANGKATES	0.503	189.5	soft soil	medium soil
NGANJUK	0.390	168.5	soft soil	hard soil
PACITAN	0.233	186	soft soil	hard soil
PAGERWOJO	0.599	203	medium soil	medium soil
SAWAHAN	0.445	295	medium soil	medium soil
TAMBAKBOYO	0.231	221.6	medium soil	hard soil



Gambar 7. Persebaran database terhadap *PGA* dan jarak hiposenter pada tiap tipe gempa



Gambar 8. Persebaran database terhadap *PGA* dan magnitudo momen pada tiap tipe gempa



Gambar 9. Distribusi residual ternormalisasi dari model *GMPEs* a) Tong 88, b) Boore 93, c) Youngs 97, d) Mido 04, e) Kanno 06, f) Lin 08, g) Hong 09, h) Bindi 09, i) Mand 09, dan j) Akkar 10.

Berdasarkan distribusi residual yang disajikan pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa hanya 2 persamaan yang menunjukkan hasil yang baik. Hanya persamaan Tong 88 dan Kanno 06 yang hampir sesuai dengan kurva distribusi normal. Persamaan lain umumnya memiliki kesesuaian yang kurang baik dengan nilai rata-rata kurang dari 0, khususnya Boore 93 dan Bindi 09.

Analisa dari kesesuaian *GMPEs* secara kuantitatif menggunakan metode *LH* dan *EDR* disajikan pada Tabel 4. Metode *LH* menggunakan beberapa parameter dalam perhitungannya, yaitu nilai median *LH*, mean, dan standar deviasi dari residual ternormalisasi. Berdasarkan nilai-nilai tersebut dapat disimpulkan bahwa persamaan Kanno 06 memiliki mean dan standar deviasi residual relatif lebih baik dibandingkan persamaan lain. Hasil perbandingan yang berbeda terjadi jika melihat nilai dari median *LH*, yaitu nilai median *LH* terbaik dimiliki oleh Tong 88, Bindi 09, dan Mand 09. Kondisi ini merupakan salah satu kelemahan dari metode *LH*, yaitu adanya ketidaksamaan hasil analisa dari setiap parameter [25]. Oleh Karena itu, dalam metode *LH* diperlukan metode penunjang atau pembuatan skema penilaian tertentu.

Berdasarkan metode *EDR* dapat diketahui bahwa persamaan Mido 04, Kanno 06, dan 08 menunjukkan kesesuaian terbaik. Nilai *EDR* yang semakin kecil, menunjukkan kesesuaian lebih baik dengan nilai maksimal 1. Nilai *MDE* dalam metode *EDR* digunakan untuk analisa lanjutan tentang *aleatory ability* dan bias dari [4], sehingga pada penelitian ini cukup menggunakan perbandingan nilai *EDR*.

Tabel 4. Hasil analisa *EDR* dan *LH* dari setiap *GMPEs* (nilai yang menunjukkan kesesuaian terbaik dicetak tebal)

Model <i>GMPE</i>	<i>EUCLIDEAN</i>		<i>LIKELIHOOD</i>		
	<i>MDE</i>	<i>EDR</i>	median <i>LH</i>	mean Res	σ σ_{Res}
Tong 88	5.13	12.83	0.6	0.18	0.69
Boore 93	13.88	22.44	0.81	0.25	0.12
Young 97	6.69	7.46	0.88	0.15	0.09
Mido 04	5.72	6.67	0.86	0.16	0.17
Kanno 06	4.99	5.58	0.9	0.09	0.14
Lin 08	4.87	6.02	0.82	0.22	0.17
Hong 09	5.08	8.98	0.74	0.12	0.47
Bindi 09	5.19	7.46	0.73	0.34	0.23
Mand 09	4.83	7.92	0.68	0.41	0.35
Akkar 10	4.81	7.29	0.75	0.3	0.29

Hasil analisa histogram, *LH*, dan *EDR* menunjukkan hasil yang hampir sama dalam menentukan ranking *GMPEs* terbaik. Perbedaan signifikan hanya terlihat antara hasil dari *LH* dan *EDR*, hal ini dikarenakan klasifikasi ranking dari *LH* membutuhkan prosedur yang lebih kompleks [25] dibandingkan dengan *EDR* yang hanya menggunakan nilai tunggal dari *EDR*. Namun secara umum semua metode tersebut memiliki kesimpulan yang sama dalam menentukan persamaan dengan kesesuaian terbaik, yaitu persamaan dari Kanno 06. Selain itu dapat diketahui bahwa persamaan Tong 88 dan Mido 04 yang dibuat di wilayah Jepang memiliki kesesuaian lebih baik dibandingkan persamaan lainnya. Hasil tersebut membuktikan teori dari Cotton dkk. (2006) bahwa salah satu faktor terpenting dalam pemilihan *GMPEs* adalah kesamaan kondisi tektonik dan tipe gempabumi yang dominan [27]. Hasil penelitian ini juga relatif sama dengan Rudyanto (2013) yang menyatakan bahwa persamaan Youngs 97, Kanno 06, dan Lin 08 sebagai model *GMPEs* terbaik untuk wilayah Sumatra dan Jawa [10].

Analisa dari ketiga metode tersebut juga menggambarkan bahwa sebagian *GMPEs* yang diteliti masih memiliki tingkat kesalahan yang cukup tinggi. Bahkan persamaan dari Kanno 06 yang merupakan model terbaik masih memiliki nilai *EDR* yang tinggi. Lemahnya *GMPEs* dalam memprediksi strong motion di wilayah Jawa Timur mungkin disebabkan oleh dominasi gempabumi kecil dibandingkan gempabumi menengah dan kuat [28] serta jumlah data yang diperlukan belum mencukupi [29].

Pada studi persamaan Kanno 06 dipilih sebagai model awal *GMPEs* di Jawa Timur karena dianggap paling mampu dalam mengestimasi nilai *PGA* dengan akurat. Model *GMPEs* Kanno 06 untuk kedalaman ≤30 km adalah sebagai berikut:

$$\log Y = a_1 M_w + b_1 R - \log(R + c_1^{d_1 M_w}) + e_1 \quad (12)$$

dan untuk kedalaman >30 km adalah:

$$\log Y = a_2 M_w + b_2 R - \log(R) + c_2 \quad (13)$$

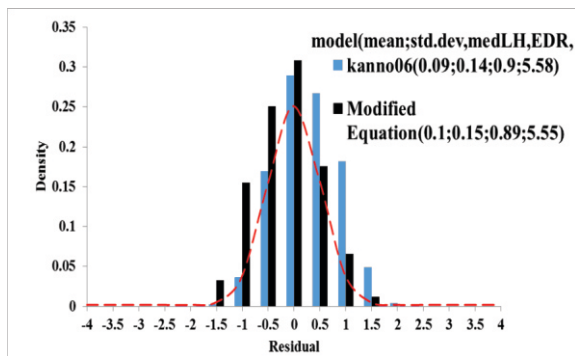
dengan *Y* adalah *PGA* dalam gals, *M_w* adalah magnitudo momen, dan *R* adalah jarak hiposenter. Menurut Kanno 06 pengelompokan persamaan berdasarkan kedalaman dikarenakan gempabumi *crustal* dan *interface* memiliki ground motion yang hampir sama. Hal ini mungkin terjadi akibat adanya kesamaan lintasan perambatan gelombang antara dua jenis gempabumi tersebut, dimana kedalaman fokal dari dua tipe ini lebih kecil dari kedalaman

gempabumi *intraslab*. Si dan Midorikawa (1999) juga menyatakan teori yang sama, yaitu gempabumi *crustal* dan *interface* pada umumnya menghasilkan nilai *PGA* yang hampir sama [30]. *Ground motion* dari kedalaman dangkal dan dalam memiliki karakteristik atenuasi yang berbeda karena adanya refleksi dan refraksi gelombang seismik di lapisan moho [18]. Persamaan Kanno 06 juga memiliki koreksi *site condition* dalam perhitungannya [19]. Namun karena semua stasiun di Jawa Timur merupakan soil site maka perhitungan koreksi *site condition* dianggap tidak diperlukan.

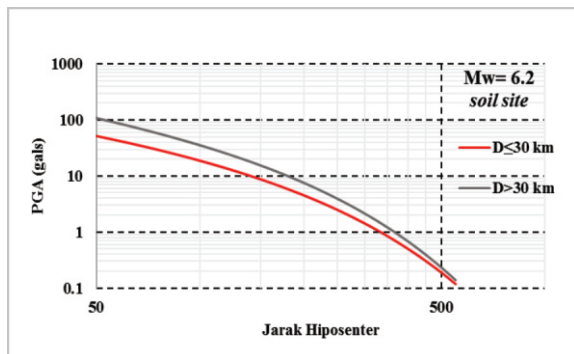
GMPEs untuk wilayah Jawa Timur diturunkan dari persamaan Kanno 06 dengan terlebih dahulu melakukan regresi berganda untuk mendapatkan koefisien baru. Nilai koefisien dari persamaan Kanno 06 sebelum dan sesudah regresi disajikan pada Tabel 5. Perubahan nilai koefisien yang relatif kecil menunjukkan bahwa *ground motion* dari penelitian Kanno dkk. (2006) di wilayah Jepang tidak jauh berbeda dengan *ground motion* di wilayah Jawa Timur [19]. Histogram residual pada Gambar 10 digunakan untuk melihat perbandingan kesesuaian antara *GMPEs* sebelum dan sesudah regresi. Secara kualitatif Gambar 10 menunjukkan bahwa residual dari persamaan baru yang telah dimodifikasi memiliki residual lebih kecil dan mendekati kurva distribusi normal. Perbandingan antara dua persamaan tersebut juga dilakukan secara kuantitatif melalui nilai mean, standar deviasi, median *LH*, dan *EDR* yang ditampilkan pada Gambar 10. Jika melihat nilai mean dan standar deviasi residual maka perubahan tidak terlalu signifikan. Namun analisa dengan nilai median *LH* dan *EDR* menunjukkan bahwa persamaan baru yang diperoleh memiliki tingkat kesesuaian yang lebih baik.

Tabel 5. Koefisien persamaan atenuasi dalam perhitungan *PGA*

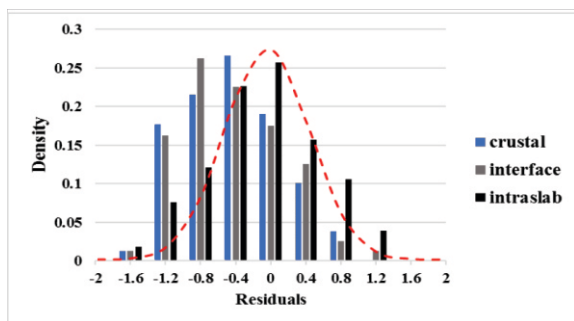
Model Koefisien	Kanno dkk. (2006)	Hasil modifikasi
a₁	0.56	0.51
b₁	-0.0031	-0.003
c₁	0.0055	0.0055
d₁	0.5	0.5
e₁	0.26	0.57
a₂	0.41	0.4
b₂	-0.0039	-0.004
c₂	1.56	1.52



Gambar 10. Plot distribusi residual dari *GMPEs* Kanno 06 dan persamaan baru yang telah dimodifikasi



Gambar 11. Perbandingan kurva atenuasi dari persamaan baru untuk *shallow earthquakes* dan *deep earthquakes*



Gambar 12. Plot distribusi residual dari *GMPEs* baru pada setiap tipe gempabumi

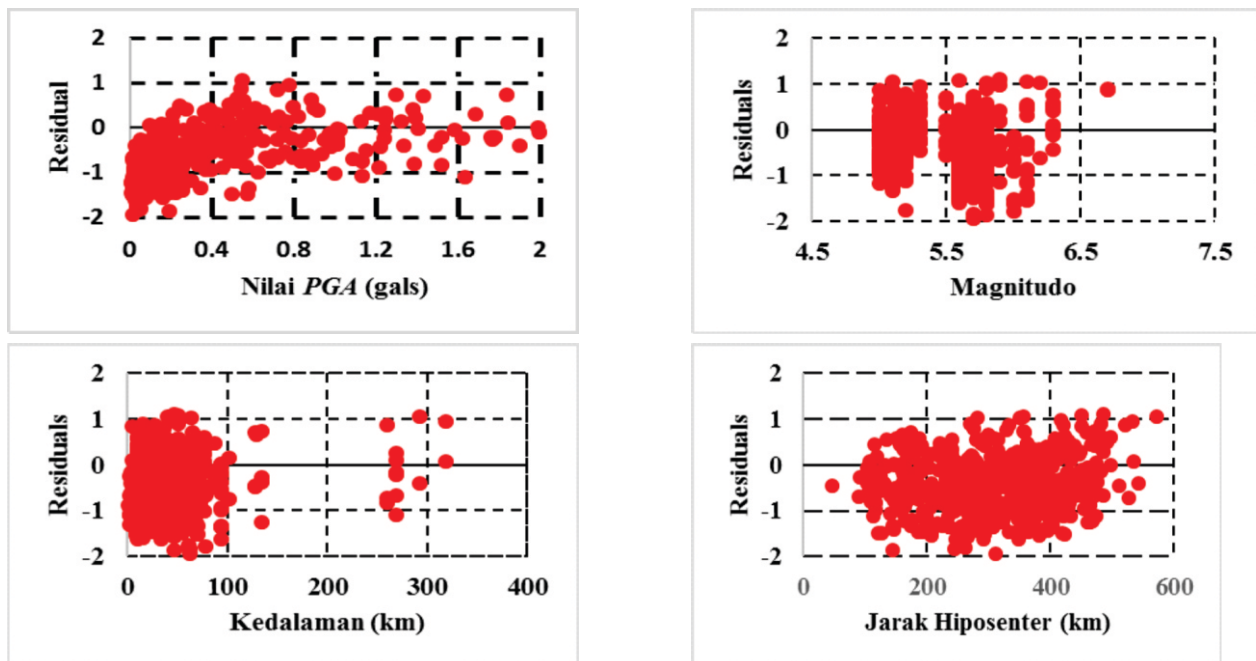
Kurva atenuasi gempabumi dangkal dan dalam dari persamaan baru untuk magnitudo momen 6,0 ditampilkan pada Gambar 10. Kurva atenuasi tersebut menunjukkan bahwa nilai *PGA* dari gempabumi dalam lebih besar dibandingkan gempabumi dangkal. Hal ini dapat dijelaskan melalui penelitian Si dan Midorikawa (1999) yang menemukan bahwa *ground motion* dari gempabumi intraslab lebih besar dari gempabumi *crustal* dan *interface* [30]. Gempabumi *slab* diidentikkan dengan gempabumi dalam sedangkan gempabumi *crustal* dan *interface* merupakan bagian dari gempabumi dangkal. Hasil tersebut juga didukung oleh hasil penelitian Zhao dkk. (2006) yang menemukan bahwa gempabumi di kedalaman 80 km 2,5 kali lebih besar

dibandingkan gempabumi pada kedalaman 15 km [3]. Laju atenuasi dari gempabumi dalam dan dangkal cenderung sama pada jarak kurang dari 400 km. Laju atenuasi dari *PGA* meningkat seiring dengan bertambahnya jarak serta terlihat adanya saturasi *PGA* pada jarak pendek di sekitar 50 km. Karakteristik tersebut biasanya terjadi akibat gempabumi *crustal* [19].

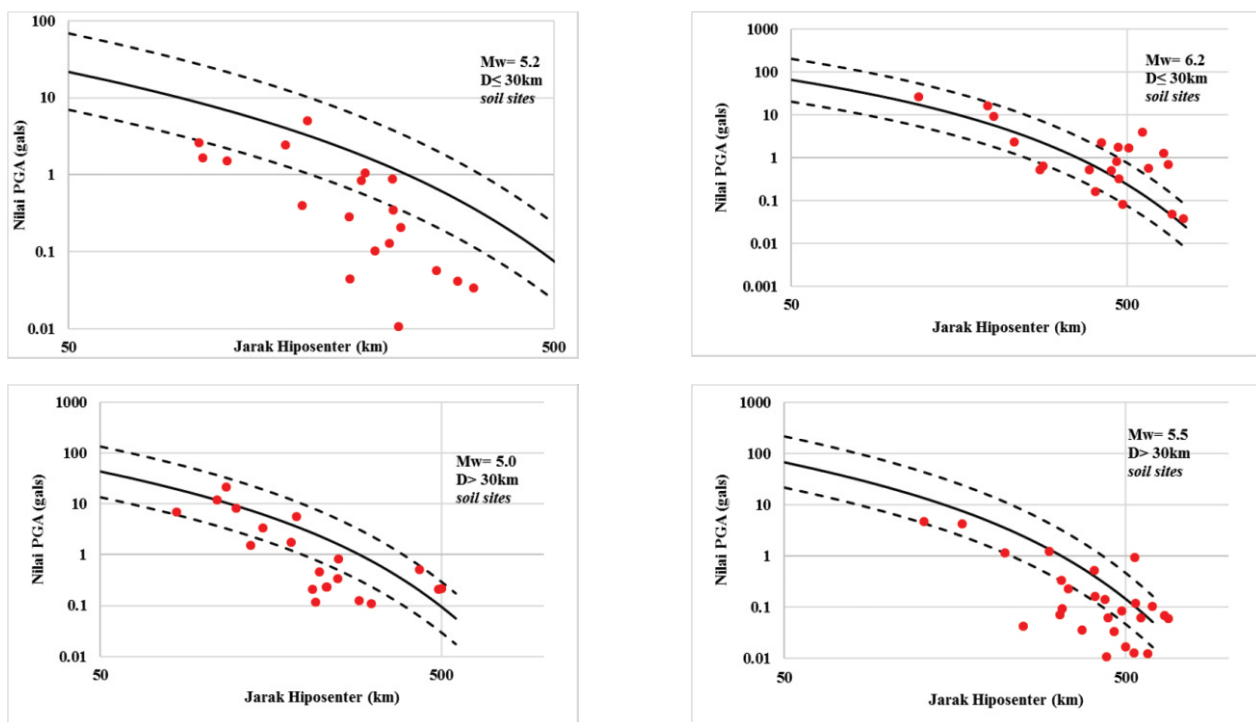
Prosedur penting dalam penelitian *GMPEs* adalah mengetahui kapabilitas dan ketergantungan persamaan terhadap parameter di dalamnya. Analisa pertama adalah untuk mengetahui hubungan antara tipe gempabumi dengan residual *GMPEs*. Gambar 11 menunjukkan bahwa gempabumi *intraslab* memiliki distribusi residual paling baik dibandingkan tipe gempabumi *crustal* dan *interface*. Keadaan ini berhubungan dengan dominasi gempabumi intraslab dalam database *ground motion* yang diteliti. Selain itu model *GMPEs* yang digunakan umumnya *overestimated* dalam mengestimasi *ground motion* gempabumi *crustal* yang memiliki nilai lebih kecil dibandingkan gempabumi *slab* pada jarak yang sama. Oleh karena itu dalam perhitungan efek sumber pada *GMPEs* diperlukan analisa parameter sumber yang lebih mendalam seperti faktor *stress drop*.

Distribusi residual antara *PGA* hasil observasi dan perhitungan ($\log(\text{obs/pre})$) terhadap magnitudo, jarak, kedalaman, dan nilai *PGA* observasi ditampilkan pada Gambar 12. Gambar 12a menunjukkan bahwa residual pada nilai *PGA* <0,4 gals relatif besar sekitar -2 dan semakin mengecil seiring bertambahnya nilai *PGA*. Berdasarkan kondisi tersebut dapat diketahui bahwa persamaan baru yang diperoleh lebih efektif digunakan untuk menghitung *PGA* lebih dari 0,4 gals. Penentuan batas ini hampir sama dengan Rudyanto (2013) yang membuat ambang batas pada nilai 0,0005 m/s^2 [10]. Namun Rudyanto (2013) menentukan ambang batas tersebut secara acak sehingga tidak menggambarkan efektifitas sebenarnya dari *GMPEs*.

Gambar 12b menunjukkan bahwa ketergantungan persamaan terhadap magnitudo tidak terlalu tinggi. Residual yang cukup besar hanya terjadi pada magnitudo 5,6-5,8. Residual terlihat menurun sebanding dengan kenaikan magnitudo. Hal yang berbeda terlihat pada hubungan residual dengan kedalaman. Gambar 12c menggambarkan bahwa tidak ada ketergantungan antara *GMPEs* dengan kedalaman focal. Pada kedalaman lebih dari 250 km terjadi penurunan residual secara signifikan, namun *sample* data dengan kedalaman lebih dari 250 km belum mencukupi untuk digunakan sebagai acuan.



Gambar 12. Hubungan residual dari *GMPEs* baru terhadap a) Nilai *PGA* observasi, b) Magnitudo, c) Kedalaman, dan d) Jarak Hiposenter



Gambar 13. Perbandingan kurva atenuasi *GMPEs* baru dengan data observasi *PGA* yang telah dinormalisasi

Gambar 12d menunjukkan tidak adanya pengaruh jarak terhadap residual *PGA*. Ketergantungan *GMPEs* terhadap jarak hiposenter lebih kecil dibandingkan ketergantungannya terhadap magnitudo.

Secara umum, semua karakteristik residual *PGA* di atas menggambarkan bahwa semakin besar nilai *PGA* maka residual akan menurun. Hal ini bisa dilihat dari kenaikan magnitudo, kedalaman, dan nilai *PGA*

observasi atau perhitungan yang berbanding lurus dengan penurunan nilai residual *PGA*. Karakter ini juga ditemui pada penelitian *GMPEs* sebelumnya, salah satunya yaitu penelitian Midorikawa dan Ohtake (2003) [31]. Oleh karena itu model *GMPEs* lebih efektif digunakan untuk menghitung *PGA* yang relatif tinggi.

Kelebihan ini sangat berguna dalam penerapannya pada bidang seismologi teknik atau teknik sipil.

Karakteristik ini biasanya bukan akibat dari model yang digunakan namun akibat kurangnya data pada rentang nilai *PGA* dan jarak tertentu. Gambar 13 menggambarkan kurva atenuasi dari persamaan baru yang diperoleh dan nilai *PGA* observasi pada tahun 2015-2016. Gambar 13 menunjukkan kemampuan *GMPEs* dalam memprediksi nilai *PGA* dari gempa bumi yang terjadi pada periode baru-baru ini. Data observasi terlebih dahulu dinormalisasi pada parameter tertentu dengan menggunakan persamaan Fukushima dkk., 2003 sebagai berikut:

$$\log \text{obs}' = \log \text{obs} - \log \text{pre} + \log \text{pre}' \quad (14)$$

dengan *obs'* adalah nilai *PGA* observasi ternormalisasi, *obs* adalah nilai observasi *PGA*, *pre* adalah nilai prediksi dengan parameter yang sama dengan *PGA* observasi, dan *pre'* adalah nilai prediksi dengan parameter yang dinormalisasi [32]. Nilai *PGA* pada jarak 50 km untuk gempa bumi dangkal adalah 21,8gals dan 64,8gals dengan magnitudo 5,2 dan 6,2. Garis putus-putus menggambarkan ambang batas nilai yang masih diasumsikan baik. Ambang batas dihitung berdasarkan standar deviasi $\pm 0,5$ pada persamaan. Gambar 13a menunjukkan bahwa persamaan atenuasi mampu memprediksi *ground motion* dengan cukup akurat, namun penyimpangan semakin besar pada jarak lebih dari 250 km. Kondisi yang berbeda terlihat pada Gambar 13b. Secara umum persamaan atenuasi untuk magnitudo 6,2 mampu memprediksi *PGA* lebih baik dibandingkan atenuasi untuk magnitudo 5,4. Nilai yang melewati ambang batas baru terjadi pada jarak lebih dari 500 km. Kurva atenuasi dari *deep earthquake* yang ditampilkan pada Gambar 13c dan 13d memiliki atenuasi yang hampir sama dengan *shallow earthquake*. Perbedaan yang signifikan terdapat pada nilai *PGA* untuk gempa bumi dalam dengan jarak 50 km dan magnitudo 5,0 yaitu 43,3 gals. Nilai ini hampir 2 kali lipat dari nilai *PGA* untuk gempa bumi dangkal pada jarak yang sama. Jika dibandingkan dengan kurva atenuasi gempa bumi dangkal, Gambar 13c dan 13d menunjukkan tingkat penyimpangan yang lebih kecil. Hanya sebagian kecil data yang berada di luar ambang batas. Penyimpangan yang relatif besar berada pada jarak lebih dari 300 km.

Karakteristik utama yang bisa dilihat dari kurva atenuasi *deep earthquake* dan *shallow earthquake* dalam memprediksi *PGA*, yaitu persamaan atenuasi sangat efektif dalam memprediksi *PGA* dari gempa bumi dengan kekuatan besar atau jarak yang dekat. Semakin jauh jarak maka residual semakin tinggi. Pada beberapa titik terlihat adanya penyimpangan nilai *PGA* observasi yang cukup besar. Hal ini mungkin saja disebabkan adanya struktur *Q* yang unik di dalam wilayah pulau Jawa.

Nilai *Q* merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi penjalaran gelombang seismik, sehingga dibutuhkan koreksi tambahan untuk mengurangi efek dari struktur *Q* [19]. Namun diperlukan penelitian tentang struktur *Q* di wilayah Jawa terlebih dahulu untuk dapat melakukan perumusan koreksi tambahan.

4. Kesimpulan

Sebuah persamaan atenuasi dikembangkan untuk wilayah Jawa Timur dengan menggunakan database strong ground motion yang lengkap dan metode perbandingan *GMPEs* yang dapat dipercaya. Model awal yang digunakan diperoleh melalui analisa kesesuaian dengan *PGA* observasi di wilayah Jawa Timur dengan menggunakan metode kualitatif (histogram residual ternormalisasi) dan metode kuantitatif (*LH* dan *EDR*).

Model Kanno dkk. (2006) yang terpilih melalui metode tersebut sudah mempertimbangkan faktor dari sumber gempa bumi (magnitudo, kedalaman fokal, tipe dan mekanisme gempa bumi), lintasan penjalaran gelombang (jarak hiposenter), dan kondisi situs. *GMPEs* untuk wilayah Jawa Timur diperoleh melalui regresi model Kanno dkk. (2006) dengan data *PGA* observasi. Persamaan baru yang diperoleh memiliki tingkat kesesuaian yang cukup baik sehingga mampu memprediksi nilai *PGA* dengan lebih akurat. Residual dari persamaan atenuasi menurun seiring dengan meningkatnya nilai magnitudo dan jarak. Persamaan atenuasi baru yang diperoleh semakin baik jika digunakan untuk memprediksi nilai *PGA* yang relatif besar.

Daftar Pustaka

- [1] Bird, P., "An updated digital model of plate boundaries", *Geochimistry Geophysics Geosystems*, Vol. 4, No. 3, 2003.
- [2] Soehaimi, "Seismotektonik dan Potensi Kegempaan di Wilayah Jawa", *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol. 3 No. 4, 2008.
- [3] Zhao, J.X., Takahashi, T., Asano, A., Okada, H., Saiki, T., Irikura, K., Zhang, J., Thio, Hong. K., Somerville, P.G., dan Fukushima, Y., "Attenuation Relations of Strong Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, pp.898-913, 2006.
- [4] Kale, O., dan Akkar, S., "A New Procedure for Selecting and Ranking Ground- Motion Prediction Equations (*GMPEs*): The Euclidean Distance- Based Ranking (*EDR*) Method", *Bulletin of Seismological Society of*

- America*, Vol. 103, No. 2A, pp.1069-1084, 2013.
- [5]Repository Gempa BMKG. "BMKG Data Repository" Internet: <http://repogempa.bmkg.go.id/query.php>, diakses 11 Februari 2016.
- [6]ISC Bulletin. "Event Catalogue Search" Internet: [search/catalogue](http://www.isc.ac.uk/search/catalogue), diakses 23 Februari 2016.
- [7]Global CMT Catalog. "Catalog search" Internet: [CMTsearch](http://www.globalcmt.org/CMTsearch), diakses 21 Februari 2016.
- [8]USGS Earthquake Archives. "Search earthquake Archives" Internet: [quakes/search](http://earthquake.usgs.gov/quake/search/), diakses 23 Februari 2016.
- [9]Waldhauser, F., dan Ellsworth, W. L., "A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1353-13, 2000.
- [10]Rudyanto, A., "Development of Strong Motion Database for the Sumatra-Java Region", Program Master Filosofi, The Australian National University, Australia, 2013.
- [11]Astiz, L., Lay, T., dan Kanamori, H., "Large Intermediate-Depth Earthquakes and the Subduction Process", *Phys. Earth Planet. Interiors* 53, 80-166, 1988.
- [12]BSSC, "The 2000 NEHRP Recommended Provisions for New Building and Other Structures", Washington, DC, 2000.
- [13]Villaverde, R., "Fundamental Concepts of Earthquake Engineering", *Textbook*, CRC Press, London, 2009.
- [14]Douglas, J., "Ground-motion Prediction Equations 1964-2010 PEER Report 2011/102", Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley, 2011.
- [15]Tong, H. dan Katayama, T., "Peak Acceleration Attenuation by Eliminating The Ill-Effect of The Correlation Between Magnitude and Epicentral Distance", *Proceeding Of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Japan, 1988.
- [16]Boore, D. M., Joyner, W. B., & Fumal, T. E., "Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: An interim report", *Open-File Report 93-509. U.S. Geological Survey*, 1993.
- [17]Youngs, R.R., Chiou, S.J., Silva, W.J., dan Humphrey, J.R., "Strong Ground Motion Attenuation Relationship for Subduction Zone Earthquakes", *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, 1997.
- [18]Midorikawa, S., dan Ohtake, Y., "Variance of peak ground acceleration and velocity in attenuation relationships", *Proceedings of Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering*, Paper no. 0325, 2004.
- [19]Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., dan Fukushima, Y., "A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, pp.879-897, 2006.
- [20]Lin, P., dan Lee, C., "Ground-motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes in northeastern Taiwan", *Bulletin of Seismological Society of America*, 98(1):220-240, 2008.
- [21]Hong, H. P., Pozos-Estrada, A., & Gomez, R., "Orientation effect on ground motion measurements for Mexican subduction earthquakes", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8(1), 1-16, 2009.
- [22]Bindi, D., Luzi, L., Pacor, F., Sabetta, F., & Massa, M., "Towards a new reference ground motion prediction equation for Italy: Update of the Sabetta-Pugliese (1996)", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(3), 591-608, 2009.
- [23]Mandal, P., Kumar, N., Satyamurthy, C., & Raju, I. P., "Ground-motion attenuation relation from strong-motion records of the 2001 Mw 7.7 Bhuj earthquake sequence (2001-2006)", *Gujarat, India. Pure and Applied Geophysics*, 166(3), 451-469, 2009.
- [24]Akkar, S., & Bommer, J. J., "Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region and the Middle East", *Seismological Research Letters*, 81(2), 195-206, 2010.
- [25]Scherbaum, F., Cotton, F., dan Smit, P., "On the use of response spectral-reference data for the selection and ranking of ground-motion models for seismic-hazard analysis in regions of moderate seismicity: The case of rock motion", *Bulletin of Seismological Society of America* 94(6):2164-2185, 2004.
- [26]USGS Earthquake Hazard Program. "Slab Model" Internet: [data/slabs/models](http://data.slabs/models), diakses 20 Februari 2016.
- [27]Cotton, F., Scherbaum, F., Bommer, J.J. dan Bungum, H., "Criteria for Selecting and Adjusting Ground-Motion Models for Specific Target Regions: Application to Central Europe and Rock Sites", *Journal of Seismology*, 10, 137-156, 2006.
- [28]Bommer, J. J., P. Stafford, J. E. Alarcón, dan S. Akkar, "The influence of magnitude range on empirical ground-motion prediction", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 97, 2152-2170, 2007.
- [29]Bommer, J. J., J. Douglas, F. Scherbaum, F. Cotton, H. Bungum dan D. Fah, "On the selection of ground-motion prediction

- equations for seismic hazard analysis", *Seismol Res Lett*, 81, 783-793, 2010.
- [30] Si, H., dan Midorikawa, S., "New attenuation relationships for peak ground acceleration and velocity considering effects of fault type and site condition", *J. Struct. Construct. Eng. AIJ*, 523, 63-70, 1999.
- [31] Midorikawa, S., dan Ohtake, Y., "Empirical analysis of variance of ground motion intensity in attenuation relationships", *J. Japan Assoc. Earthquake Eng.*, 3-1, 59-70, 2003.
- [32] Fukushima, Y., C. Berge-Thierry, P. Volant, D. A. Griot-Pommerehne, dan F. Cotton, "Attenuation relation for West Eurasia determined with recent near-fault records from California, Japan dan Turkey", *J. Earthquake Eng.* 7, no. 3, 1-26, 2003.

