

Pemilihan Ground Motion Model di Wilayah Jawa Menggunakan Data Percepatan Tanah Tahun 2010-2021

Rian Mahendra Taruna^{1*}, Asyer Octhav², Asep Nur Rachman³, Mohamad Taufik Gunawan⁴, Sulastri Sulastri⁵, Supriyanto Rohadi⁶, Jaya Murjaya⁷ 

¹ Stasiun Geofisika Mataram, BMKG, Mataram, Indonesia

² Stasiun Geofisika Gorontalo, BMKG, Gorontalo, Indonesia

^{3,4,5,6,7} Pusat Penelitian dan Pengembangan, BMKG, Jakarta, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received November 01, 2021

Revised November 05, 2021

Accepted March 14, 2022

Available online April 25, 2022

Kata Kunci:

Ground Motion Model, Peak Ground Acceleration, Subduksi, Crustal

Keywords:

Ground Motion Model, Peak Ground Acceleration, Subduction, Crustal



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2022 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Wilayah Jawa terletak di zona subduksi serta keberadaan beberapa sesar di daratan, sehingga upaya mitigasi harus dilakukan untuk mengurangi risiko gempa. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui data percepatan tanah wilayah Jawa dengan menggunakan ground motion model. Penelitian ini tergolong kedalam penelitian kuantitatif yang diawali dengan pembuatan strong motion database berdasarkan data yang dikumpulkan sesuai kriteria yang dipilih. Data tersebut harus mencakup lokasi gempa bumi, kedalaman, magnitudo, jarak episenter, nilai observasi PGA dari instrumen accelerograph, jenis tanah site, dan tipe gempabumi. Data *strong motion* bersumber dari BMKG yang terdiri dari *PGA*, parameter gempa dari 265 kejadian gempabumi pada periode 2010-2021 dengan magnitudo $M > 3.0$, dan kondisi situs berupa nilai $Vs30$ pada stasiun-stasiun jaringan akselerograf BMKG yang terpasang di seluruh pulau Jawa. Data tersebut kemudian digunakan untuk memilih *GMM* yang memiliki residual paling rendah dari beberapa persamaan yang telah dirumuskan sebelumnya yang dianggap memiliki karakteristik gempa bumi dan tektonik yang mendekati kondisi tektonik dan karakteristik kegempaan di Pulau Jawa. Analisis dilakukan berdasarkan grafik histogram residual dan nilai standar deviasi untuk mendapatkan model yang terpercaya. Hasil penelitian menunjukkan beberapa model memiliki performa yang baik dalam memperkirakan nilai *PGA*.

ABSTRACT

The Java region is located in a subduction zone and there are several faults on the mainland, so mitigation efforts must be made to reduce the risk of earthquakes. The purpose of this study is to find out the data on the acceleration of the land in the Java region by using a ground motion model. This research is classified as a quantitative research which begins with the creation of a strong motion database based on data collected according to the selected criteria. The data must include the location of the earthquake, depth, magnitude, distance from the epicenter, *PGA* observation values from the accelerograph instrument, the type of site soil, and the type of earthquake. Strong motion data sourced from BMKG consisting of *PGA*, earthquake parameters from 265 earthquake events in the 2010-2021 period with a magnitude of $M > 3.0$, and site conditions in the form of a $Vs30$ value at BMKG accelerograph network stations installed throughout Java. The data is then used to select the *GMM* which has the lowest residual from several equations that have been previously formulated which are considered to have earthquake and tectonic characteristics that are close to tectonic conditions and seismic characteristics on the island of Java. The analysis was carried out based on the histogram graph of the residual and the standard deviation value to obtain a reliable model. The results showed that several models had good performance in estimating *PGA* values.

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki aktivitas seismik yang relatif tinggi (Fidia et al., 2018; Fitria & Prastowo, 2022). Hal ini disebabkan oleh kondisi tektonik yang kompleks yang dimiliki Indonesia dan berada pada zona pertemuan lempeng besar, yaitu Lempeng Eurasia, Indo-Australia, Filipina, dan Pasifik (Naryanto, 2021; Tumangkeng et al., 2020). Pulau Jawa merupakan bagian dari daerah aktif karena menjadi bagian segmen Sunda Megathrust dan beberapa patahan aktif di darat (Soehaimi et al., 2021). Wilayah Jawa juga menjadi pusat pembangunan di Indonesia dengan total populasi lebih dari 150 juta penduduk dan diikuti dengan banyaknya infrastruktur penting yang meningkatkan risiko terhadap bencana, khususnya gempa bumi (Widiyantoro et al., 2020). Gempa bumi merupakan salah satu bencana alam yang disebabkan oleh adanya pergeseran lempeng bumi atau disebabkan oleh adanya letusan gunung berapi (Farida et al., 2019). Gempa

*Corresponding author.

E-mail addresses: reemyan@gmail.com (Rian Mahendra Taruna)

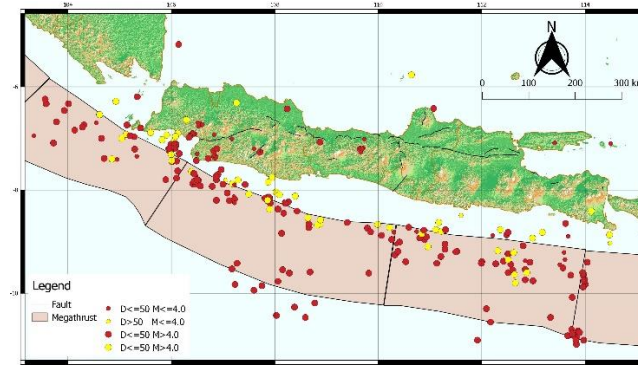
bumi terjadi akibat adanya getaran dan pergerakan di permukaan bumi yang disebabkan oleh adanya pelepasan energi secara tiba-tiba (Tahir & Anawardiayah, 2020). Pelepasan energi secara tiba-tiba menimbulkan gelombang seismik yang dapat merusak segala sesuatu di permukaan bumi, seperti bangunan, pohon-pohon, bahkan dapat menimbulkan korban jiwa (Bahri & Mungkin, 2019). Gempa bumi belum dapat diprediksi waktu dan tempat terjadi walaupun pada saat ini teknologi semakin maju. Indonesia menjadi salah satu negara yang rawan akan terjadinya gempa. Di Indonesia banyak terjadi gempa besar yang memberikan dampak serius bagi masyarakat. Beberapa kejadian gempa bumi yang signifikan dan menyebabkan dampak yang besar di Pulau Jawa akibat aktivitas subduksi antara lain gempa bumi Yogyakarta tanggal 26 Mei 2006 dengan magnitudo $M_w=6.4$ yang menyebabkan sekitar 6000 korban jiwa dan hampir 1 juta masyarakat kehilangan tempat tinggal, gempa bumi Kebumen 2014 dengan magnitudo 6.5, dan gempabumi Tasikmalaya 2017 dengan magnitudo 6.9 (Dewi & Sukmawati, 2020; Muttalib & Mashur, 2019). Beberapa kejadian gempa bumi yang disebabkan oleh aktivitas sesar aktif di Pulau Jawa dan menimbulkan dampak kerusakan antara lain gempabumi Pangalengan Tahun 2016 dengan magnitudo 4.2 dan gempabumi Tasikmalaya 2017 dengan magnitudo 5.4 (Fahlia et al., 2019).

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi resiko gempa yakni dengan menentukan bahaya gempa di suatu daerah dengan menggunakan *Ground Motion Model (GMM)*. *Ground Motion Model (GMM)* menggambarkan hubungan antara parameter gerakan tanah, seperti *Peak Ground Acceleration (PGA)* dengan beberapa variabel, seperti parameter sumber gempa, lintasan perambatan gelombang, dan kondisi tanah (Timbuleng et al., 2020; Wardhana et al., 2021). *GMM* tidak hanya digunakan untuk menentukan atenuasi *ground motion* pada suatu kejadian, namun diperlukan juga untuk memprediksi *ground motion* di masa depan dengan magnitudo dan jarak tertentu sebagai input dalam perancangan bangunan tahan gempa, sehingga dapat mengurangi resiko korban jiwa dan kerusakan akibat kegagalan struktur bangunan (Damayanti et al., 2020; Saputra et al., 2021; Taruna & Setiadi, 2020).

Di Indonesia sudah terdapat beberapa penelitian yang membahas mengenai penggunaan *Ground Motion Model (GMM)* untuk mengatasi adanya resiko gempa yang tinggi. Penelitian pertama menunjukkan bahwa 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 (Rohadi et al., 2018). Hasil penelitian selanjutnya mengungkapkan bahwa percepatan maksimum batuan dasar (PBA) di kota Jakarta (0.239 g) lebih besar dibanding PBA untuk kota Jakarta menurut SNI 03-1726- 2002 (0.15 g). Pembuatan *ground motion* sintetik dilakukan dengan bantuan Program SYNTH, dengan menggunakan hasil deagregasi dari penelitian sebelumnya (Hutapea & Mangape, 2019). Hasil penelitian selanjutnya juga mengungkapkan bahwa penggunaan *ground motion* diperoleh dua *ground motion* sintesis untuk masing-masing mekanisme sumber gempa pada periode 0,2 detik dan 1,0 detik (Muntafi & Makrup, 2017). Berdasarkan beberapa hasil penelitian diketahui bahwa terdapat berbagai macam cara yang dapat dilakukan untuk mengantisipasi terjadi gempa di wilayah Indonesia. Hanya saja pada penelitian sebelumnya belum terdapat kajian mengenai pemilihan *ground motion model* di wilayah Jawa menggunakan data percepatan tanah tahun 2010-2021. Sehingga penelitian ini difokuskan pada kajian tersebut dengan tujuan untuk mengetahui data percepatan tanah wilayah Jawa dengan menggunakan *ground motion model*.

2. METODE

Penelitian ini tergolong kedalam penelitian kuantitatif yang diawali dengan pembuatan *strong motion database* berdasarkan data yang dikumpulkan sesuai kriteria yang dipilih. Data tersebut harus mencakup lokasi gempa bumi, kedalaman, magnitudo, jarak episenter, nilai observasi *PGA* dari instrumen *accelerograph*, jenis tanah *site*, dan tipe gempa bumi. Pada tahap ini juga dilakukan analisis terhadap data yang digunakan untuk mengetahui karakteristik gempa bumi dalam penelitian. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari rekaman *ground motion* gempa bumi dari sensor *accelerograph* yang tersebar di Pulau Jawa dan diperoleh dari BMKG. Data gempabumi diperoleh dari katalog BMKG, USGS, dan ISC-EHB dari Tahun 2010-2021 dengan magnitudo $\geq 3,0$ dan jarak hiposenter dari lokasi sensor < 500 km dengan minimal 2 stasiun yang merekam. Berdasarkan kriteria tersebut diperoleh 265 kejadian gempa di sekitar Pulau Jawa. Sebaran gempa bumi yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Plot data gempa bumi yang digunakan dalam penelitian

Data tersebut kemudian dikelompokkan menjadi tipe gempa bumi *interface*, *intraslab*, dan *shallow crustal* berdasarkan analisis sebaran hiposenter dan mekanisme fokal. Gempa bumi *intraslab* umumnya terjadi pada kedalaman lebih dari 40 km dan memiliki mekanisme *normal fault* (Rohadi et al., 2018). Tipe *interface* memiliki mekanisme fokal *thrusting* pada kedalaman relatif dangkal. Sedangkan gempa *shallow crustal* biasanya terjadi di daratan atau jauh dari zona tumbukan dengan kedalaman dangkal. Data mekanisme fokal diperoleh melalui GlobalCMT. Data kondisi tanah diperoleh dari pengukuran *in situ* dari BMKG dan data sekunder Vs30 dari USGS yang diturunkan dari kemiringan topografi. Pengklasifikasian kondisi tanah berdasarkan nilai Vs30 mengacu pada SNI. Selanjutnya nilai prediksi *PGA* dihitung menggunakan *GMM* yang dipilih. Secara umum persamaan *GMM* menghitung nilai *PGA* dari fungsi magnitudo, jarak, dan kedalaman. Namun, pada penelitian ini dipilih beberapa *GMM* yang juga mempertimbangkan fungsi tipe gempa bumi dan jenis tanah. *GMM* yang diteliti juga merupakan *GMM* yang digunakan dalam membuat Peta Bahaya Gempa 2017 guna mengukur tingkat keakuratan *GMM* tersebut. Pada penelitian ini terdapat 4 model khusus untuk gempa subduksi dan 2 model untuk gempa bumi subduksi dan *crustal*. Langkah terakhir adalah analisis nilai residual untuk mengetahui model terbaik yang berdasarkan plot histogram residual dan nilai rata-rata serta standar deviasi. Perhitungan residual dilakukan dengan menggunakan rumus.

$$Residual = \log_{10}(PGA_{Obs}/PGA_{Emp})$$

PGA_{Obs} merupakan nilai *PGA* yang diperoleh dari rekaman *accelerograph* dalam satuan gals, sedangkan PGA_{Emp} (gals) diperoleh dari hasil perhitungan *GMM*. Penelitian ini memiliki keterbatasan dengan menggunakan jenis magnitudo yang beragam dan tipe jarak berupa jarak hiposenter karena kurangnya keterangan jenis magnitudo di katalog yang digunakan serta parameter sumber seperti *rupture area*. Adapun daftar *GMM* yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Daftar *GMM* yang Digunakan

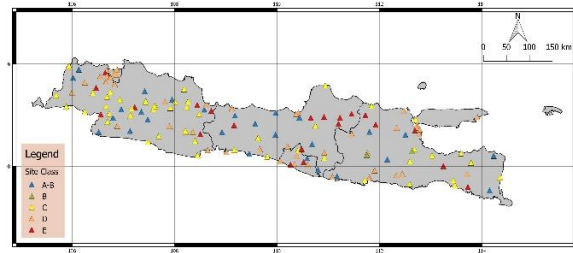
GMM	Zona	Tipe
Youngs 97 (Youngs et al., 1997)	Subduksi	Interface, Intraslab
AB 03 (Atkinson & Boore, 2003)	Subduksi	Interface, Intraslab
Lin Lee 08 (Lin & Lee, 2008)	NE Taiwan	Interface, Intraslab
Hydro 16 (Abrahamson et al., 2016)	Subduksi	Interface, Intraslab
Kanno 06 (Kanno, 2006)	Japan	Semua tipe
Zhao 06 (Zhao et al., 2006)	Japan, Iran, Western USA	Semua tipe

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

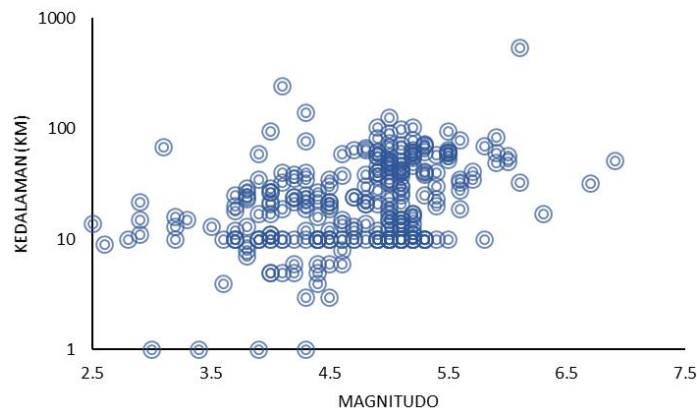
Klasifikasi tipe gempa bumi menunjukkan bahwa 144 kejadian merupakan gempa bumi *intraslab*, sedangkan tipe *interface* dan *shallow crustal* berjumlah 72 dan 49 kejadian. Sebaran ini menunjukkan bahwa aktivitas gempa di dalam *slab* subduksi selatan Jawa relatif tinggi. Tingginya aktivitas seismik di zona subduksi selatan Jawa juga sesuai dengan nilai-a yang relatif tinggi (Erlangga, 2020). Pada penelitian ini digunakan data *ground motion* dari 152 sensor *accelerograph*. Berdasarkan data yang telah dikumpulkan, *strong motion database* berhasil dibuat untuk 4130 rekaman *accelerograph* dari 265 *event* gempa bumi.

Klasifikasi kondisi situs berdasarkan pengukuran Vs30 BMKG dan data sekunder USGS menunjukkan bahwa sebagian besar sensor berada pada tanah lunak (kelas C, D, dan E). Adapun peta sebaran dan site class accelerograph di Wilayah Jawa, dapat dilihat pada [Gambar 2](#).



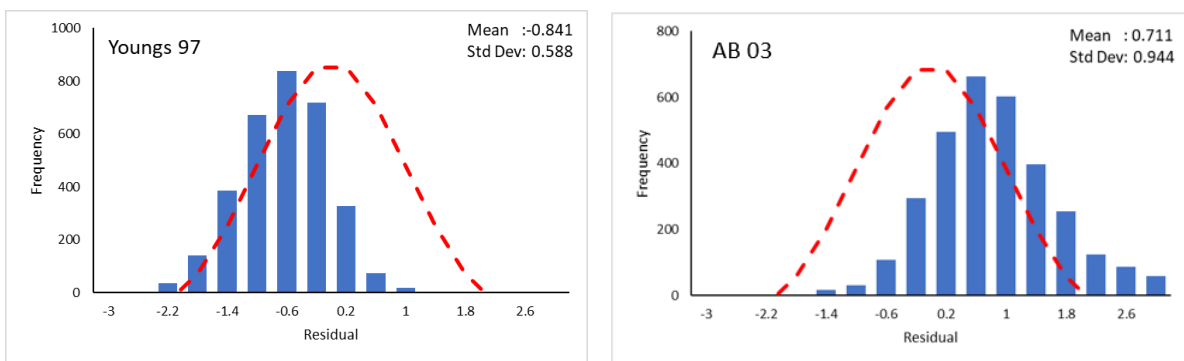
Gambar 2. Peta Sebaran dan Site Class Accelerograph di Wilayah Jawa

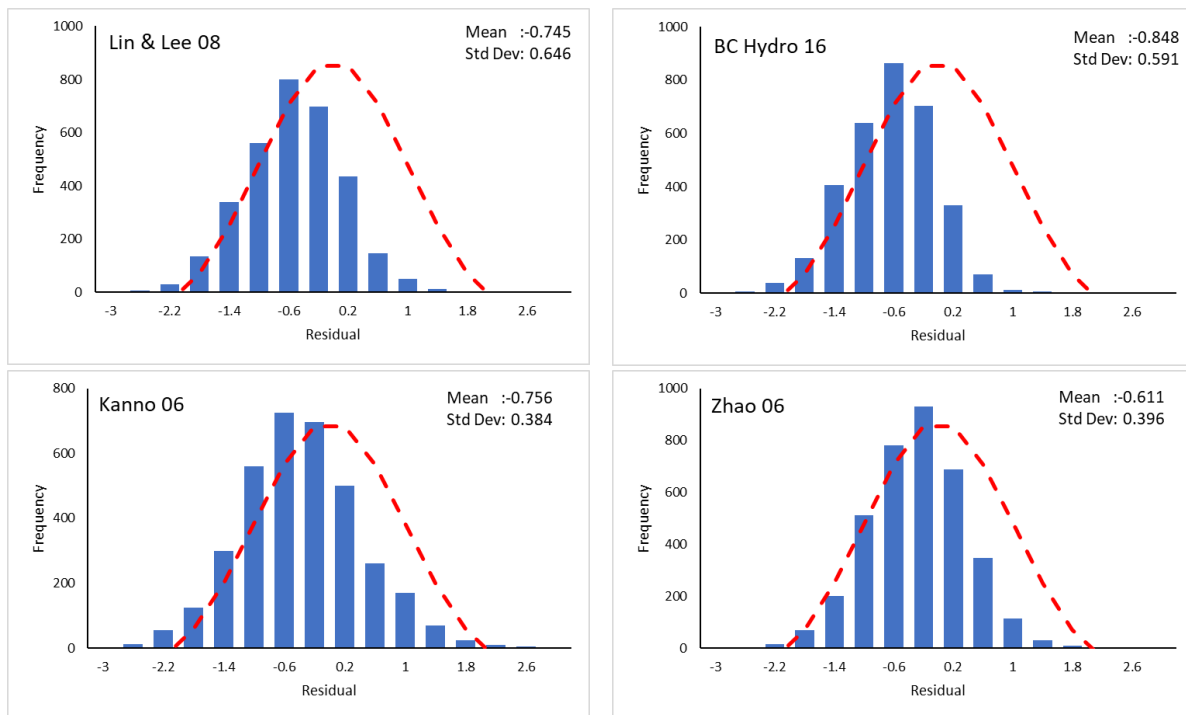
Karakteristik data gempa bumi yang digunakan dapat terlihat melalui grafik sebaran data magnitudo terhadap kedalaman. Gempa bumi dalam penelitian ini sebagian besar merupakan gempa menengah dengan magnitudo antara 4,5-5,5, sedangkan dari segi kedalaman, gempabumi dalam penelitian ini relatif dangkal dengan kedalaman 10-100 Km. Karakteristik kedalaman ini menggambarkan bahwa data gempa bumi di wilayah Jawa bersumber dari *megathrust* dan zona Benioff. Gambaran sebaran data magnitudo terhadap kedalaman dapat dilihat pada [Gambar 3](#).



Gambar 3. Sebaran Data Magnitudo Terhadap Kedalaman

Analisis kesesuaian hasil *PGA* dari dari setiap *GMM* yang digunakan dan hasil observasi dilakukan dengan melihat plot histogram residual seperti pada [Gambar 4](#).





Gambar 4. Histogram Residual dari Masing-Masing GMM Beserta Nilai Mean Dan Standar Deviasi

Histogram residual yang optimal mengikuti bentuk *bell shape curve*, sehingga *GMM* yang akurat digambarkan dengan tren jumlah data yang meningkat saat residual mendekati nol semakin banyak (Taruna & Setiadi, 2020). Dalam penelitian ini *GMM* terbagi antara 2 jenis, yaitu *GMM* yang mengakomodir semua tipe gempa dan *GMM* untuk zona subduksi. Nilai mean dan standar deviasi juga dapat menjadi analisis pendukung dari analisis histogram, karena nilai mean yang mendekati nol dan standar deviasi rendah menunjukkan residual setiap rekaman cenderung kecil. Penggunaan metode kualitatif berdasarkan histogram residual terbukti efektif dan mudah untuk menginterpretasikan tingkat akurasi *GMM* relatif terhadap *GMM* lain yang diteliti.

Pembahasan

Hasil analisis histogram menunjukkan bahwa model Lin&Lee 08 dan BC Hydro 16 memiliki kesesuaian terbaik dalam menghitung *PGA* gempabumi subduksi. Analisis kuantitatif berdasarkan data mean dan standar deviasi juga menunjukkan bahwa kedua model tersebut yang relatif akurat dibandingkan Youngs 97 dan AB 03. Kondisi tersebut dapat disebabkan oleh jenis data yang digunakan. Persamaan Young 97 menggunakan data gempabumi dari kejadian gempa di seluruh dunia Jepang, Cascadia, dan Kepulauan Solomon, namun sumber gempa yang paling dominan berasal dari wilayah Amerika Selatan (Harefa & Edial, 2019; Hariyanto et al., 2020). Keberagaman dari sumber gempa yang digunakan menghasilkan persamaan yang tidak dapat menggambarkan percepatan di suatu sumber gempa spesifik, terlebih pada data yang digunakan tidak terdapat gempa dari wilayah Indonesia, khususnya Jawa. Persamaan BC Hydro 16 sebenarnya juga menggunakan data *worldwide* dalam pengembangan rumusnya. Namun, persamaan ini dapat memberikan hasil lebih baik karena faktor heterogenitas sumber gempa diakomodasi melalui fungsi sumber gempa yang lebih detail, termasuk parameter mekanisme gempa. Selain itu, persamaan BC Hydro 16 juga mempertimbangkan ketidakpastian dalam skala magnitudo dan lokasi *site* yang merekam gempa. Sedangkan Lin&Lee 08 cenderung lebih akurat karena persamaan tersebut dikembangkan di wilayah dengan kondisi tektonik mirip dengan Pulau Jawa, yaitu Kawasan timur aut Taiwan. Sebagian besar data gempa pada penelitian tersebut merupakan tipe intraslab yang ternyata sama dengan kondisi seismotektonik di Jawa. Selain itu, dapat kita temukan bahwa persamaan lebih baru secara umum lebih akurat. Hal ini terjadi karena studi terbaru menyatakan bahwa banyak variable yang perlu diakomodir dalam *GMM*, sehingga *GMM* model lama dianggap kurang relevan. Sebagai contoh adanya ketidakpastian variabel lokasi *site*, *site response*, dan skala magnitudo baru diakomodir pada persamaan terbaru (Abrahamson et al., 2016). Sedangkan apabila hasil penelitian ini dibandingkan dengan penelitian lain di Jawa maka ditemukan bahwa terdapat kemiripan dengan penelitian yang menemukan bahwa model Lin&Lee 08 memiliki performa relatif baik untuk digunakan di Pulau Jawa (Rohadi et al., 2018). Hal ini mungkin terjadi karena data yang dianalisis pada penelitian tersebut digunakan juga pada penelitian ini, namun pada penelitian ini terdapat penambahan data

hingga 2021, sedangkan pada penelitian sebelumnya hanya sampai 2016. Kelebihan lain dalam penelitian ini, yakni klasifikasi tipe gempa dan tipe tanah karena data yang digunakan lebih lengkap.

Pada tipe gempa bumi subduksi dan *crustal* terlihat bahwa model *GMM* mampu memberikan estimasi *PGA* lebih baik dibandingkan *GMM* khusus untuk tipe gempa subduksi (Zulfar, 2018; Zulsfi et al., 2021). Hasil perhitungan nilai *mean* dan standar deviasi *GMM* untuk tipe gempa subduksi dan *crustal* lebih kecil dibandingkan *GMM* khusus gempa subduksi, bahkan nilai standar deviasi Kanno 06 dan Zhao 06 kurang dari 0,4. Salah satu penyebab adalah rekaman *strong ground motion* atau getaran kuat umumnya terjadi akibat gempa *near field* dangkal di daratan yang bersumber dari gempa *crustal*. Sedangkan performa *GMM* akan cenderung lebih baik dalam memprediksi nilai *PGA* yang lebih besar. Selain itu gempa subduksi di wilayah Jawa umumnya memiliki jarak relatif jauh dari *site*, sehingga atenuasi menjadi lebih rumit dan sulit teridentifikasi dengan baik oleh *GMM* yang ada. Faktor kedua adalah persamaan Kanno 06 dan Zhao 06 keduanya dikembangkan di wilayah Jepang dengan kondisi tektonik mirip wilayah Jawa. Negara Jepang memiliki bentuk pulau mirip dengan Jawa. Selain itu, jarak garis subduksi ke daratan Jepang cenderung mirip dengan wilayah Jawa, yaitu sekitar 200 km, ditambah lagi dengan keberadaan gempa *crustal* di daratan Jepang seperti di Jawa (Hidayati et al., 2018; Rohadi et al., 2018).

Persamaan Zhao 06 relatif memiliki sebaran residual lebih baik dibandingkan Kanno 06. Hal ini juga terlihat dari nilai *mean* persamaan Zhao 06 yang lebih mendekati nol dibandingkan Kanno 06 dengan standar deviasi yang hampir sama. Zhao 06 memiliki performa lebih baik karena memiliki lebih banyak fungsi dalam persamaannya, seperti *site class*, mekanisme patahan, dan faktor modifikasi jarak. Hal ini berbeda dengan persamaan Kanno 06 yang hanya memperhitungkan faktor magnitudo, jarak hiposenter, dan kedalaman fokal. Namun, dari sisi penggunaan Kanno 06 lebih praktis dan dibutuhkan untuk wilayah dengan informasi parameter gempa yang terbatas. Sehingga, kedua persamaan tersebut sebenarnya dapat digunakan untuk memperkirakan nilai *PGA* di wilayah Jawa karena memiliki bias relatif kecil.

Pada perhitungan *GMM* terdapat faktor penting yang sering diabaikan, yaitu tipe jarak yang digunakan. Meskipun perbedaan nilai antartipe jarak tidak signifikan, hal ini sangat berpengaruh pada hasil estimasi *PGA* yang diperoleh karena kenaikan kecil nilai *PGA* sebesar 0,1 g akan memberikan perkiraan intensitas gempa yang jauh berbeda. Oleh karena itu, pada penelitian ini masih banyak ditemukan nilai simpangan yang relatif tinggi karena keterbatasan tipe jarak yang digunakan, yaitu jarak hiposenter. *GMM* terbaru membutuhkan nilai jarak yang mendekati jarak sebenarnya antara *site* dan bidang sesar atau *rupture*. Pada wilayah Indonesia jenis jarak *rupture* dan Joyner-Boore masih sulit diperoleh karena kurangnya ketersediaan data parameter sumber gempa, seperti *rake*, *dip*, dan *strike* khususnya untuk gempa lampau dengan kekuatan kecil hingga sedang (Damayanti et al., 2020; Pratiwi & Fitri, 2021).

Analisis terhadap data *PGA* hasil perhitungan dan observasi juga perlu dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari residual dan kualitas data *PGA*. Oleh karena itu, pada penelitian ini juga dilakukan analisis perbandingan antara nilai PGA_{obs} dan jarak hiposenter terhadap residual model Zhao06. Hubungan antara PGA_{obs} dan residual menggambarkan adanya keterkaitan positif antara kedua variabel tersebut, sehingga nilai residual cenderung meningkat ketika nilai PGA_{obs} bertambah. Namun perlu diperhatikan korelasi positif ini tidak menggambarkan bahwa nilai residual semakin baik saat PGA_{obs} tinggi. Residual yang baik bukan yang terkecil, namun memiliki nilai mendekati nol. Namun, garis tren menunjukkan bahwa residual pada PGA_{obs} besar cenderung lebih mendekati nol. Nilai residual cenderung memiliki simpangan lebih besar ketika nilai $PGA_{obs} < 0,1$ gal. Hal ini bisa disebabkan oleh sensitivitas sensor *accelerograph* yang lebih baik dalam menangkap *strong ground motion*. Selain itu, yang muncul akibat rekaman *PGA* gempa *far field* relatif lebih besar karena adanya faktor amplifikasi gelombang. Pada satu kejadian gempa *far field* dengan kekuatan besar, nilai *PGA* yang tercatat pada *site* yang lebih jauh dapat lebih besar dibandingkan *PGA* yang tercatat oleh *site* di dekat sumber gempa. Perhitungan *PGA* dengan mempertimbangkan faktor amplifikasi masih sulit dilakukan saat ini, karena membutuhkan data *site class* di *site* yang akurat dari hasil pengukuran lapangan untuk semua *site* yang diteliti (Sulaeman et al., 2017). Faktor lain yang dapat menyebabkan tingginya residual pada nilai *PGA* relatif kecil yaitu sifat gelombang dari sumber gempa dalam yang memiliki spektrum guncangan yang luas namun memiliki nilai relatif kecil (Hartono et al., 2021). Kondisi ini masih sulit untuk diakomodir oleh *GMM* yang ada karena kejadian gempa bumi dalam jarang terjadi, sehingga masih kurang untuk digunakan dalam mengembangkan *GMM* khusus untuk gempa dalam (Shobari et al., 2019).

Sedangkan analisis residual terhadap jarak hiposenter pada Gambar 6b menunjukkan korelasi yang lebih rendah. Hal ini dapat disimpulkan bahwa tidak ada hubungan antara kualitas data dan jarak hiposenter, karena nilai residual cenderung sama pada jarak hiposenter 15-500 Km. Kondisi ini menunjukkan bahwa *GMM* yang digunakan pada penelitian ini memiliki kemampuan yang relatif sama dalam memprediksi *PGA* pada jarak hiposenter hingga 500 Km. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian terdahulu yang juga mengungkapkan bahwa 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 (Rohadi et al., 2018). Hasil penelitian selanjutnya mengungkapkan bahwa percepatan maksimum batuan dasar (PBA) di kota Jakarta (0.239 g) lebih besar dibanding PBA untuk kota Jakarta menurut SNI 03-1726- 2002 (0.15 g). Pembuatan ground motion sintetik dilakukan dengan bantuan program SYNTH dengan menggunakan hasil deagregasi dari penelitian sebelumnya (Hutapea & Mangape, 2019). Hasil penelitian selanjutnya juga mengungkapkan bahwa penggunaan ground motion diperoleh dua ground motion sintesis untuk masing-masing mekanisme sumber gempa pada periode 0,2 detik dan 1,0 detik (Muntafi & Makrup, 2017). Jadi, berdasarkan hasil penelitian yang didukung oleh penelitian terdahulu dapat dikatakan bahwa GMM mampu menunjukkan besarnya kemungkinan terjadinya gempa di suatu wilayah, sehingga dapat dijadikan acuan dalam membuat serta merancang bangunan.

4. SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model Lin&Lee 08 dan BC Hydro memiliki performa relatif lebih baik dibandingkan GMM lainnya untuk menghitung nilai PGA dari gempa bumi subduksi. Pada tipe gempa bumi subduksi dan *shallow crustal*, model Zhao 06 mampu memprediksi dengan baik nilai PGA dibandingkan GMM lain yang diteliti. GMM terpilih juga divalidasi terhadap data PGA observasi dan jarak hiposenter, hasil validasi menunjukkan sebaran residual yang relatif baik pada nilai PGA 0,1-10 gal. Pemilihan GMM merupakan komponen terpenting dalam *probabilistic seismic hazard analysis (PSHA)*, karena diperlukan untuk menghitung perkiraan bahaya gempa di masa depan. GMM terpilih dapat digunakan untuk jenis gempa bumi subduksi maupun *crustal* di wilayah Jawa serta dapat diterapkan pada pengembangan Peta Bahaya Gempa Indonesia dan *building code* selanjutnya.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes Norman. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23–44. <https://doi.org/10.1193/051712EQS188MR>.
- Atkinson, G. M., & Boore, D. M. (2003). Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4), 1703–1729. <https://doi.org/10.1785/0120020156>.
- Bahri, Z., & Mungkin, M. (2019). Penggunaan SCR sebagai Alarm Peringatan Dini pada Saat Terjadi Gempa Bumi. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 4(3), 101–105. <https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/jet/article/view/2063>.
- Damayanti, C., Yamko, A. K., Souisa, C. J., Barends, W., & Naroly, I. L. P. T. (2020). Pemodelan Segmentasi Mentawai-Pagai: Studi Kasus Gempa Megathrust di Indonesia. *Jurnal Geosains Dan Remote Sensing*, 1(2), 105–110. <https://doi.org/10.23960/jgrs.2020.v1i2.56>.
- Dewi, B. V. T., & Sukmawati, A. M. (2020). Pemetaan Perubahan Kondisi Sosial Ekonomi Masyarakat Pasca Gempa Bumi di Kecamatan Tanjung, Kabupaten Lombok Utara. *Tata Kota Dan Daerah*, 12(2), 83–93. <https://doi.org/10.21776/ub.takoda.2020.012.02.3>.
- Erlangga, W. (2020). Karakteristik dan Parameter Subduksi Sumber Gempa Pulau Jawa. *Teknisia*, 25(2), 30–40. <https://doi.org/10.20885/teknisia.vol25.iss2.art4>.
- Fahlia, F., Irawan, E., & Tasmin, R. (2019). Analisis Dampak Perubahan Perilaku Sosial Ekonomi Masyarakat Desa Mapin Rea Pasca Bencana Gempa Bumi. *Jurnal Ekonomi Dan Bisnis Indonesia*, 4(1). <https://doi.org/10.37673/jebi.v4i1.362>.
- Farida, M., Alimuddin, I., Maulana, A., Irfan, U. R., Jaya, A., -, S., -, K., & -, A. (2019). Sosialisasi Bencana Geologi dan Mitigasinya di Sekolah Dasar Islam Terpadu (SDIT) Ar-Rahmah Makassar. *Jurnal Tepat : Applied Technology Journal for Community Engagement and Services*, 2(2), 66–73. https://doi.org/10.25042/jurnal_tepat.v2i2.83.
- Fidia, R., Pujiastuti, D., & Sabarani, A. (2018). Korelasi Tingkat Seismisitas dan Periode Ulang Gempa Bumi di Kepulauan Mentawai dengan Menggunakan Metode Guttenberg-Richter. *Jurnal Fisika Unand*, 7(1), 84–89. <https://doi.org/10.25077/jfu.7.1.84-89.2018>.
- Fitria, M., & Prastowo, T. (2022). Seismisitas Jawa Timur dan Potensi Bahaya Bencana Seismik Terkait. *Jurnal Inovasi Kimia Indonesia*, 11(1). <https://doi.org/10.26740/ifi.v11n1.p17-27>.
- Harefa, R. W., & Edial, H. (2019). Analisis Bahaya Bencana Gempa Bumi di Wilayah Kota Gunungsitoli. *Jurnal Buana*, 3(6), 1213. <https://doi.org/10.24036/student.v3i6.613>.
- Hariyanto, T., Bioresita, F., & Safitri, C. N. (2020). Perhitungan Intensitas Gempa Bumi Berdasarkan Nilai PGA (Peak Ground Acceleration) Menggunakan Data Gempa Bumi Multi-Event (Studi Kasus: Kabupaten Pandeglang, Banten). *Geoid*, 15(2), 189.

- <https://doi.org/10.12962/j24423998.v15i2.7120>.
- Hartono, D., Khoirudin Apriyadi, R., Winugroho, T., Aprilyanto, A., Hadi Sumantri, S., Wilopo, W., & Surya Islami, H. (2021). Analisis Sejarah, Dampak, dan Penanggulangan Bencana Gempa Bumi pada Saat Pandemi Covid-19 di Sulawesi Barat. *Pendipa Journal of Science Education*, 5(2), 218–224. <https://doi.org/10.33369/pendipa.5.2.218-224>.
- Hidayati, S., Sulaeman, C., Supartoyo, S., & Kriswati, E. (2018). Pengaruh Gempabumi Tektonik terhadap Aktivitas. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 14(4). <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v19i4.423>.
- Hutapea, B. M., & Mangape, I. (2019). Analisis Hazard Gempa dan Usulan Ground Motion pada Batuan Dasar untuk Kota Jakarta. *Jurnal Teknik Sipil*, 16(3), 121. <https://doi.org/10.5614/jts.2009.16.3.2>.
- Kanno, T. (2006). A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 879–897. <https://doi.org/10.1785/0120050138>.
- Lin, P.-S., & Lee, C.-T. (2008). Ground-Motion Attenuation Relationships for Subduction-Zone Earthquakes in Northeastern Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(1), 220–240. <https://doi.org/10.1785/0120060002>.
- Muntafi, Y., & Makrup, L. (2017). Analisis Hazard Gempa DKI Jakarta Metode Probabilistik dengan Pemodelan Sumber Gempa 3 Dimensi. *Jurnal Teknisia*, 20(2), 85–95. <https://journal.uui.ac.id/teknisia/article/view/5034/6025>.
- Muttalib, A., & Mashur, M. (2019). Analisis Dampak Sosial Ekonomi Masyarakat Pasca Bencana Gempa Bumi di Kabupaten Lombok Utara (KLU). *Jurnal Ilmiah Mandala Education*, 5(2), 84. <https://doi.org/10.36312/jime.v5i2.785>.
- Naryanto, H. S. (2021). Analisis Sumber Tsunami untuk Pertimbangan Perencanaan Jalur Kabel InaCBT di Selat Makasar. *Jurnal ALAMI: Jurnal Teknologi Reduksi Risiko Bencana*, 5(1), 8–18. <https://doi.org/10.29122/alami.v5i1.4736>.
- Pratiwi, D., & Fitri, A. (2021). Analisis Potensial Penalaran Gelombang Tsunami di Pesisir Barat Lampung, Indonesia. *Jurnal Teknik Sipil*, 8(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.21063/JTS.2021.V801.05>.
- Rohadi, S., Taruna, R. M., Rudyanto, A., & Heryanto, D. T. (2018). Penentuan Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) dengan Metode Euclidean dan Likelihood untuk Wilayah Jawa Timur. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, 17(3). <https://doi.org/10.31172/jmg.v17i3.357>.
- Saputra, E., Nugraheni, F., Pawirodikromo, W., & Makrup, L. (2021). Comparison of Soil Surface Seismic Hazard Maps as Basic Disaster Mitigation Based Spatial Planning in Riau Province. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 27(2), 250–259. <https://doi.org/10.14710/mkts.v27i2.36902>.
- Shobari, F., Mufti, A., Jabbari, I., Khoirullah, N., Zakaria, Z., Sophian, R. I., & Mulyo, A. (2019). Correlation of Horizontal Earthquake Coefficient Value (Kh) with Safety Factor (FS) Value in Cilengkrang, West Java. *Padjajaran Geoscience Journal*, 3(4), 243–253. <http://journal.unpad.ac.id/geoscience/article/view/23189/11366>.
- Soehaimi, A., Sinung Baskoro, S. ., Soebowo, E., Ma'mur, M., & Sopyan, Y. (2021). Penilaian Potensi Bencana Gempabumi dan Tsunami untuk Pelindungan Infrastruktur Migas dan PLTU di Cilacap, Jawa Tengah. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 22(4), 209. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v22i4.657>.
- Sulaeman, C., Putra, M. F. N., Rustadi, R., & Haerudin, N. (2017). Analisis Site Effect Berdasarkan Data Mikrotremor dan Nilai Peak Ground Acceleration pada Sesar Opak, Kabupaten Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 3(3). <https://doi.org/10.23960/jge.v3i3.1051>.
- Tahir, S., & Anawardiyah. (2020). Dampak Gempa Bumi terhadap Jaringan Pipa PDAM Donggala di Kelurahan Tanamodindi Kota Palu. *Jurnal Teknik Sipil*, 4(1). <https://doi.org/10.31934/siimo.v4i1.1106>.
- Taruna, R. M., & Setiadi, T. A. P. (2020). Penentuan Rumus Percepatan Tanah Akibat Gempa Bumi di Kota Mataram Menggunakan Metode Euclidean Distance. *JST (Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 9(1). <https://doi.org/10.23887/jst-undiksha.v9i1.23613>.
- Timbuleng, Sompotan, A., & Tumimomor, F. R. (2020). Analisis Pergerakan Tanah Berdasarkan Peak Ground Velocity (PGV) Akibat Gempa Bumi di Luwuk. *Jurnal Pendidikan Fisika*, 1(2). <https://doi.org/10.53682/charmsains.v1i2.16>.
- Tumangkeng, C., Wenas, D. R., & Umboh, S. I. (2020). Model Kecepatan 1d Gelombang P dan Relokasi Hiposenter Wilayah Sulawesi Utara dan Sekitarnya Menggunakan Metode Couple Velocity-Hypocenter. *Jurnal Pendidikan Fisika*, 1(2). <https://doi.org/10.53682/charmsains.v1i2.9>.
- Wardhana, D. D., Rachmawati, S. K., Sudrajat, Y., & Handayani, L. (2021). Metode Geolistrik Konfigurasi Dipole-Dipole untuk Penetapan Bidang Gelincir Gerakan Tanah di Jajaway, Palabuhanratu,

- Sukabumi. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 12(1), 47. <https://doi.org/10.34126/jlbg.v12i1.354>.
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N. R., Susilo, S., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D., & Putra, H. E. (2020). Implications for Megathrust Earthquakes and Tsunamis from Seismic Gaps South of Java Indonesia. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72142-z>.
- Youngs, R. R., Chiou, S. J., Silva, W. J., & Humphrey, J. R. (1997). Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58–73. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.58>.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., & Fukushima, Y. (2006). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898–913. <https://doi.org/10.1785/0120050122>.
- Zulfiar, M. H. (2018). Pemeriksaan Material pada Pembangunan Rumah Non-Engineered di Daerah Rawan Gempa Dusun Serut, Palbapang Kabupaten Bantul, Yogyakarta. *Semesta Teknik*, 21(2). <https://doi.org/10.18196/st.212224>.
- Zulfi, A., Simanjuntak, N. B. P., Sari, V. A., & Rahmi, F. (2021). Penerapan Analisis Geospasial Berbasis Sistem Informasi Geografis untuk Pemetaan Tingkat Ancaman Bencana di Kabupaten Padang Pariaman, Sumatera Barat. *Jurnal Geosains Dan Remote Sensing*, 2(2), 82–91. <https://doi.org/10.23960/jgrs.2021.v2i2.50>.