

Analisis Bahaya Gempa Bumi Menggunakan Metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) di Pulau Madura, Jawa Timur

Jessica Stephanie Tulis¹, Anne Meylani Magdalena Sirait^{1,*}, Supartoyo²

¹Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Depok, 16424, Indonesia

²Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung, 40122, Indonesia

*Corresponding author: jessica.stephanie81@ui.ac.id

Abstrak

Gempa bumi berkekuatan 4,8 SR yang terjadi pada 13 Juni 2018 pukul 20.06 WIB di Kabupaten Sumenep, Pulau Madura mengakibatkan 135 bangunan rusak. Usaha mitigasi bencana gempa bumi perlu dilakukan untuk meminimalisir dampak kerusakan dan kerugian jiwa hingga materiil. Salah satu caranya adalah dengan melakukan penelitian mengenai kemungkinan munculnya gempa bumi pada tingkat bahaya tertentu menggunakan metode PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*). Nilai PGA terendah pada peta periode ulang gempa 2.475 tahun (PoE 2%) hasil penelitian memiliki rentang nilai 0,25 – 0,27 g, sedangkan pada peta milik SNI 1726:2019 memiliki rentang nilai 0,15 – 0,20 g yang keduanya berada di wilayah Kabupaten Sumenep. Nilai PGA pada peta periode ulang gempa 2.475 tahun (PoE 2%) hasil penelitian di Pulau Madura masuk ke intensitas MMI VII (very strong) hingga VIII (severe). Menurut grafik respon SA dalam periode 4 detik di lokasi kejadian gempa 13 Juni 2018, diperlukan revisi kode bangunan nasional SNI 1726:2019 dari percepatan tanah spektral tertinggi 0,45 g menjadi 0,61 g.

Kata kunci: PSHA; bahaya; gempa bumi; Pulau Madura; percepatan tanah maksimum

1. Pendahuluan

Gempa berkekuatan 4,8 SR terjadi pada 13 Juni 2018 pukul 20.06 WIB di Kabupaten Sumenep, Pulau Madura. Dampak dari gempa ini adalah kerusakan ratusan rumah warga. Pemicu gempa bumi ini diduga berasal dari aktivitas Sesar Rembang-Madura-Kangean-Sakala (RMKS). Sesar RMKS memiliki arah barat-timur yang membentuk zona deformasi sepanjang 230 – 258 km (PuSGeN, 2017). Selain sesar RMKS, terdapat juga sesar - sesar lain dalam radius 500 km dari pantai terluar Pulau Madura. Lokasi Pulau Madura sendiri berada pada jarak ~370 km dari zona subduksi bagian selatan Pulau Jawa. Kehadiran sesar aktif dan zona subduksi ini membuat Pulau Madura rawan terhadap bencana gempa bumi, sehingga diperlukan usaha mitigasi bencana gempa bumi agar kerugian jiwa dan materiil dapat diminimalisir.

Salah satu upaya mitigasi bencana gempa bumi adalah melalui analisis bahaya gempa bumi

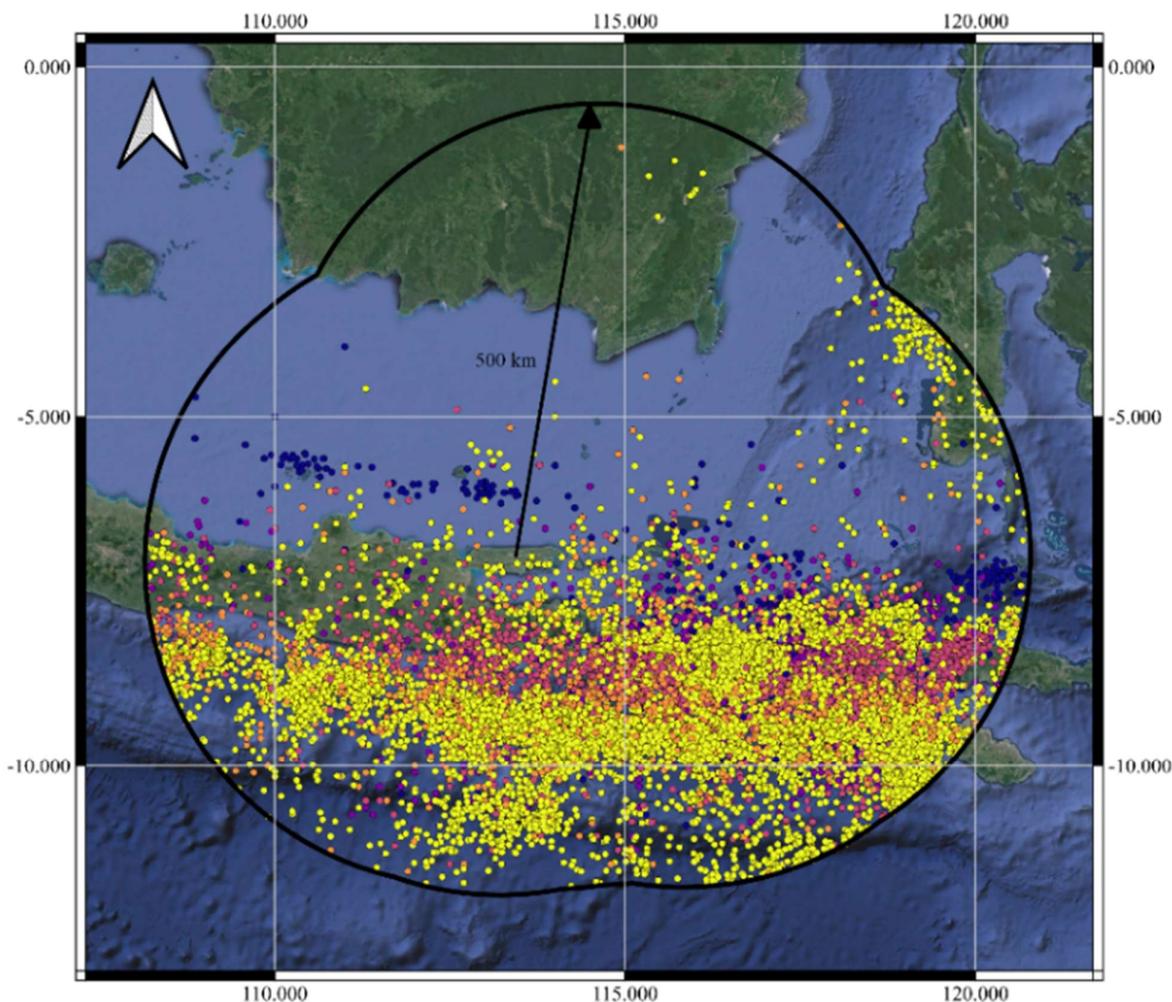
terutama di Pulau Madura. Analisis bahaya gempa ini akan menghasilkan informasi mengenai kemungkinan munculnya gempa bumi pada tingkat bahaya tertentu. Salah satu metode yang dapat membantu menganalisis bahaya kegempaan suatu wilayah adalah metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA). Metode ini mengkombinasikan karakteristik magnitudo, jarak, dan waktu dari riwayat gempa bumi di wilayah penelitian untuk memperkirakan probabilitas atau kemungkinan percepatan gerakan tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) yang mungkin terjadi dalam periode ulang tertentu. Metode PSHA memungkinkan penggunaannya untuk mengidentifikasi faktor ketidakpastian sehingga dapat diukur dan digabungkan dengan hubungan yang rasional untuk menghasilkan gambaran yang lebih detail mengenai perhitungan bahaya gempa bumi (Hutapea & Mangape, 2009).

Melihat kondisi seismotektonik dari Pulau Madura ini, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat bahaya gempa bumi berdasarkan probabilitas percepatan tanah maksimum ketika bencana gempa bumi terjadi di Pulau Madura. Probabilitas percepatan tanah di sekitar Pulau Madura dihitung dengan menggunakan Metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA).

2. Data dan Metode

Penelitian akan berfokus pada Pulau Madura dan sekitarnya. Langkah pertama dalam penelitian

ini adalah pemilihan data gempa. Data gempa diambil dari katalog daring International Seismological Center (ISC) (isc.ac.uk terakhir akses di tahun 2021). Gempa bumi yang dipilih adalah yang memiliki informasi parameter gempa yang lengkap (koordinat, waktu kejadian, magnitudo, dan kedalaman) dipilih sebagai data gempa. Berdasarkan kriteria ini, terpilih 15483 kejadian gempa bumi dengan range waktu kejadian dari 5 Juli 1911 hingga 22 Oktober 2021. Range kedalaman gempa adalah 0 - 738 km dan range magnitudo gempa adalah M_w 4.106 – 6.9 (Gambar 1).



Gambar 1. Peta memperlihatkan sebaran 15483 gempa bumi dari 5 Juli 1911 – 22 Oktober 2021 dari katalog ISC (isc.ac.uk). Gempa diplot berdasarkan kedalaman: warna kuning (0 – 50 km), jingga (50 – 100 km), merah (100 – 200 km), ungu (200 – 300 km), dan biru (>300 km). Kurva warna hitam menandakan radius 500 km dari garis pantai teluar Pulau Madura.

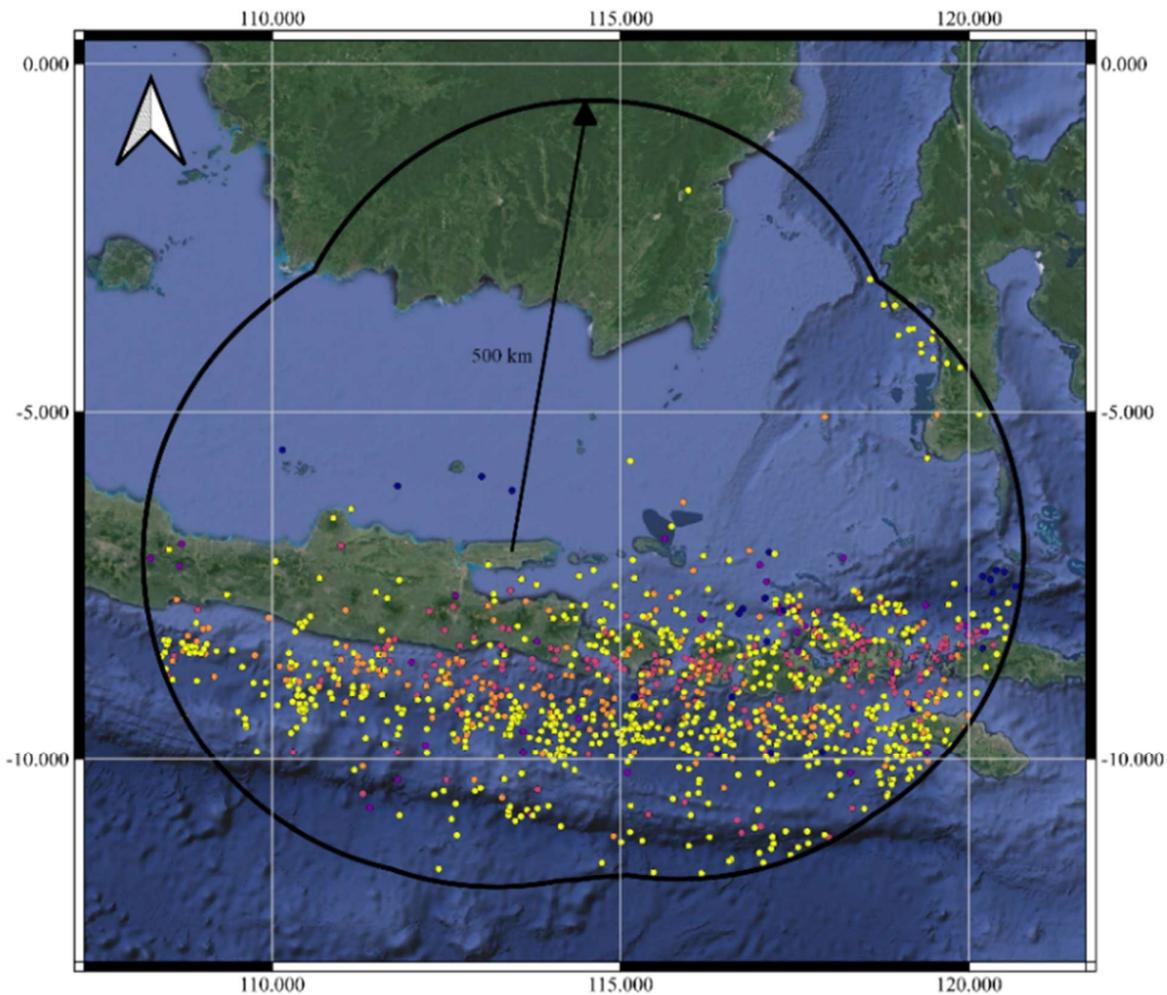
Langkah kedua dalam pengolahan data adalah konversi skala magnitudo gempa yang berbeda menjadi skala Mw (*moment magnitude*). Konversi skala magnitudo menggunakan rumus konversi Scordilis (2005) dan Irsyam et al. (2010a) yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Korelasi konversi skala magnitudo (Scordilis (2005); Irsyam et al. (2010a))

Korelasi Konversi	Rentang Data
$M_w = 0,143(ms^2) - 1,051(ms) + 7,285$	$4,5 \leq ms \leq 8,6$
$M_w = 0,114(mb^2) - 0,556(mb) + 5,560$	$4,9 \leq mb \leq 8,2$
$M_w = 0,787(Me) + 1,537$	$5,2 \leq Me \leq 7,3$
$M_w = 0,58(M_{jma}) + 2,25$	$3,0 \leq M_{jma} \leq 5,5$
$m_b = 0,125(mL^2) - 0,389(mL) + 3,513$	$3,0 \leq mL \leq 6,2$
$mL = 0,717(mD) + 1,003$	$3,0 \leq mD \leq 5,8$

Langkah ketiga dalam pengolahan data adalah proses *declustering* yang berfungsi untuk

memisahkan antara gempa utama atau independen (*mainshock*) dengan gempa dependen (*foreshock* dan *aftershock*). Tujuan langkah ini adalah untuk menghindari peningkatan hasil pada nilai bahaya gempa bumi jika disertai gempa bumi dependen di dalam pemrosesannya (Pacheco dan Sykes, 1992). Pemrosesan *declustering* menggunakan metode Poisson oleh Gardner dan Knopoff (1974) yang terintegrasi di perangkat lunak ZMAP (Wyss dkk, 2001). Proses *declustering* memilih 1127 kejadian gempa bumi independen dalam radius 500 km dari pantai terluar Pulau Madura (Gambar 2).

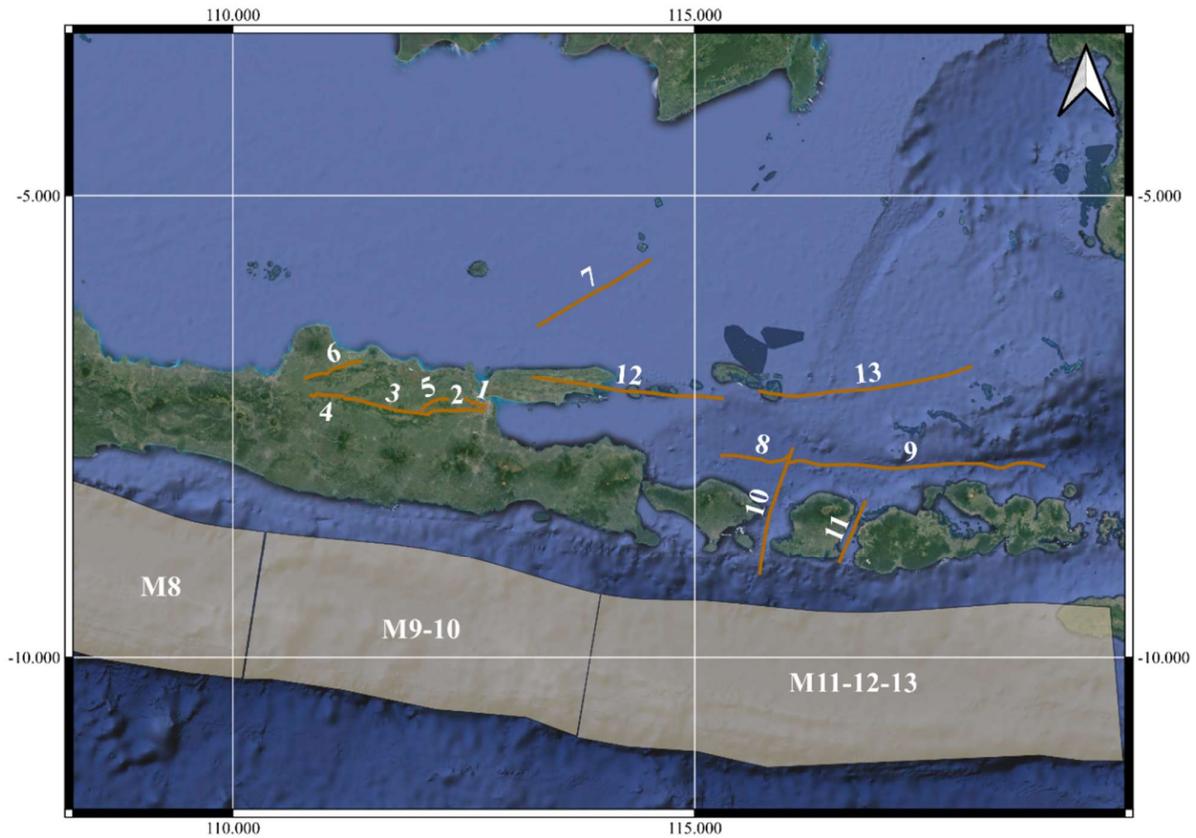


Gambar 2. Peta sebaran 1127 gempa bumi hasil *declustering* dalam radius 500 km dari garis pantai terluar Pulau Madura. Gempa diplot berdasarkan kedalaman: warna kuning (0 – 50 km), jingga (50 – 100 km), merah (100 – 200 km), ungu (200 – 300 km), dan biru (>300 km). Kurva warna hitam menandakan radius 500 km dari garis pantai terluar Pulau Madura.

Langkah keempat dalam pengolahan data adalah identifikasi dan pemodelan sumber gempa yang mempengaruhi Pulau Madura dan sekitarnya. Data diperoleh dari Irsyam, dkk (2010b) dan Muntafi, dkk (2015), dimana gempa bumi di pulau Madura dan sekitarnya dapat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu gempa bumi *crustal fault*, gempa bumi subduksi, dan gempa bumi *background*. Gempa bumi *crustal fault* merupakan gempa bumi dangkal yang disebabkan oleh aktivitas patahan aktif (*shallow crustal fault*) dan memiliki efek hingga radius 200 km dari sumber. Gempa subduksi memiliki efek hingga radius 500 km dan kedalaman 300 km dalam radius tersebut (Hutapea dan Mangape, 2009; Purbandini, dkk 2017). Sumber gempa bumi *crustal fault* dimodelkan pada rentang kedalaman 0 – 20 km dan radius 50 km dari patahan. Sumber gempa bumi *subduction* merupakan sumber gempa bumi yang terjadi di bentangan batas pertemuan antar lempeng samudera yang menunjam ke bawah lempeng benua atau zona subduksi (*megathrust interface*). Sumber gempa bumi subduksi dimodelkan pada rentang 0 – 50 km dan berada di *megathrust interface zone*, sedangkan gempa bumi yang terjadi di bawah zona tersebut masuk ke kategori sumber gempa bumi *deep background* atau zona Benioff. Sumber gempa bumi *background* merupakan sumber gempa bumi yang belum diketahui secara jelas sumber terjadinya, namun pada lokasi tersebut didapati adanya kejadian gempa bumi. Selain berdasarkan sumber gempanya, gempa bumi dalam katalog juga dibagi berdasarkan kedalamannya, yaitu *shallow earthquake* dengan rentang kedalaman 0 – 50 km (yang diduga bukan berasal dari patahan maupun subduksi), *intermediate depth earthquake* dengan rentang kedalaman 50 – 100 km (*deep-1*) dan 100

– 150 km (*deep-2*), dan *deep earthquake* dengan rentang kedalaman 150 – 200 km (*deep-3*) dan 200 – 300 km (*deep-4*). Berdasarkan kriteria diatas, sumber – sumber gempa yang mempengaruhi Pulau Madura dan sekitarnya adalah patahan Baribis-Kendeng segmen Surabaya, patahan Baribis-Kendeng segmen Waru, patahan Baribis-Kendeng segmen Cepu, patahan Baribis-Kendeng segmen Purwodadi, patahan Baribis-Kendeng segmen Blumbang, patahan naik Pati, patahan Bawean, Flores *backarc thrust* segmen Bali, Flores *backarc thrust* segmen Lombok – Sumbawa, Lombok *strike slip fault* segmen utara, Sumbawa *strike slip fault* segmen utara, patahan RMKS bagian barat, patahan RMKS bagian timur, zona *megathrust* segmen Jawa bagian barat dan tengah, segmen timur Jawa, dan segmen Sumba (Gambar 3).

Langkah kelima dalam pengolahan data adalah karakterisasi sumber gempa bumi yang meliputi magnitudo maksimum yang dihasilkan, *dip* dan *rake* patahan, geometri patahan, dan *slip rate* patahan. Informasi karakteristik zona subduction didasarkan pada model *dip* Slab 2.0 (Hayes dkk, 2018), magnitudo maksimum, panjang dan lebar zona subduksi, nilai a- dan b. Kedua informasi diperoleh dari PuSGeN (2017). Untuk karakteristik zona *background* didasarkan pada model *dip* Slab 2.0 (Hayes dkk, 2018), nilai a- dan b berdasarkan hukum Gutenberg-Richter (1944) dengan menggunakan *software* ZMAP oleh Wiemer (2001). Hasil dari karakterisasi sumber gempa ini dapat dilihat pada tabel 2 dan 3.



Gambar 3. Peta yang memperlihatkan sesar – sesar dan segmen zona subduksi penyebab gempa bumi yang mempengaruhi Pulau Madura. Patahan ditandai dengan garis merah dimana (1) Baribis-Kendeng segmen Surabaya, (2) Baribis-Kendeng segmen Waru, (3) Baribis-Kendeng segmen Cepu, (4) Baribis-Kendeng segmen Purwodadi, (5) Baribis-Kendeng segmen Blumbang, (6) patahan naik Pati, (7) patahan Bawean, (8) Flores *backarc thrust* segmen Bali, (9) Flores *backarc thrust* segmen Lombok – Sumbawa, (10) Lombok *strike slip fault* segmen utara, (11) Sumbawa *strike slip fault* segmen utara, (12) patahan RMKS bagian barat, (13) patahan RMKS bagian timur. Zona *megathrust* ditandai dengan warna abu – abu, dimana M8 segmen Jawa bagian barat dan tengah, M9 –10 segmen timur Jawa, dan M11-12-13 segmen Sumba.

Tabel 2. Karakteristik sumber gempa bumi patahan di Pulau Madura dan sekitarnya (PuSGen, 2017; Hayes dkk, 2018)

Jenis	Nama	Segmen	Tipe Patahan*	Dip (°)	Rake (°)	L (km)	W (km)	Seismo Depth (km)		Sliprate (mm/tahun)	Mmax
								Upper	Lower		
Fault (patahan)	Baribis-Kendeng Fold-Thrust Zone	Surabaya	R	45S	90	25	30	3	18	0,05	6,8
		Waru	R	45S	90	64	30			0,1	7,2
		Cepu	R	45S	90	100	30			0,1	7,5
		Purwodadi	R	45S	90	38	30			0,1	7
		Blumbang	R	45S	90	31	30			0,05	6,9
	Pati Thrust		SS	90	0	69	30			0,1	6,5
	Bawean Fault		SS	90	0	156	20			0,5	7,6
	Flores Backarc Thrust	Bali	R45N	45	90	84	20			7	7,4
		Lombok-Sumbawa	R45N	45	90	310	20			9,9	8
	Lombok Strait Strikslip Fault	North	SS	90	0	156	20			0,5	7,6
	Sumbawa Strait Strikslip Fault	North	SS	90	0	79	20			0,5	7,3
	RMKS Fault	West	SS	90	0	258	20			1,5	7,9
		East	SS	90	0	230	20			1,5	7,8

*Tipe Patahan: R (Reverse), SS (Strike Slip), R45N (Reverse 45° North)

Tabel 3. Karakteristik sumber gempa bumi subduksi (*megathrust interface*) di Pulau Madura dan sekitarnya (PuSGen, 2017)

Jenis	Nama	Dip (°)	Rake (°)	L (km)	W (km)	Seismo Depth (km)		Gutenberg & Richter value		Mmax
						Upper	Lower	a	b	
<i>Subduction (megathrust interface)</i>	M8 (West-Central Java)	20N	90	540	182,5	0	50	6,14	1,10	8,5
	M9-10 (East Java)			404	175,5			6,14	1,10	8,5
	M11-12-13 (Sumba)			653	180			6,81	1,20	7,8
<i>Background</i>	<i>Shallow</i>			-		0	50	9,569	1,43	6,12
	<i>deep-1</i>			-		50	100	8,457	1,23	5,95
	<i>deep-2</i>			-		100	150	8,911	1,28	5,95
	<i>deep-3</i>			-		150	200	10,82	1,76	5,75
	<i>deep-4</i>			-		200	300	11,07	1,87	5,95

Langkah keenam dalam pengolahan data adalah menentukan atenuasi dari masing – masing model sumber gempa di wilayah penelitian. Untuk *fault* digunakan fungsi atenuasi Boore-Atkinson NGA (Boore-Atkinson, 2014), Campbell-Bozorgnia NGA (Campbell-Bozorgnia, 2014), dan Chiou-Youngs NGA (Chiou-Youngs, 2014). Untuk sumber gempa subduksi digunakan fungsi atenuasi BCHYDRO (Abrahamson et al., 2015), dan untuk gempa *background* digunakan fungsi atenuasi Geomatrix *slab seismicity rock* (Youngs et al., 1997), data AB 2003 gempa *intraslab* data dengan kondisi *BC-rock* (Atkinson-Boore, Worldwide 2003), dan data Vs-30 dari Zhao et al (2006).

Langkah akhir dari proses ini adalah perhitungan bahaya kegempaan berdasarkan data dan diinformasi diatas dengan menggunakan metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) mengikuti langkah – langkah oleh Pagani dkk (2017).

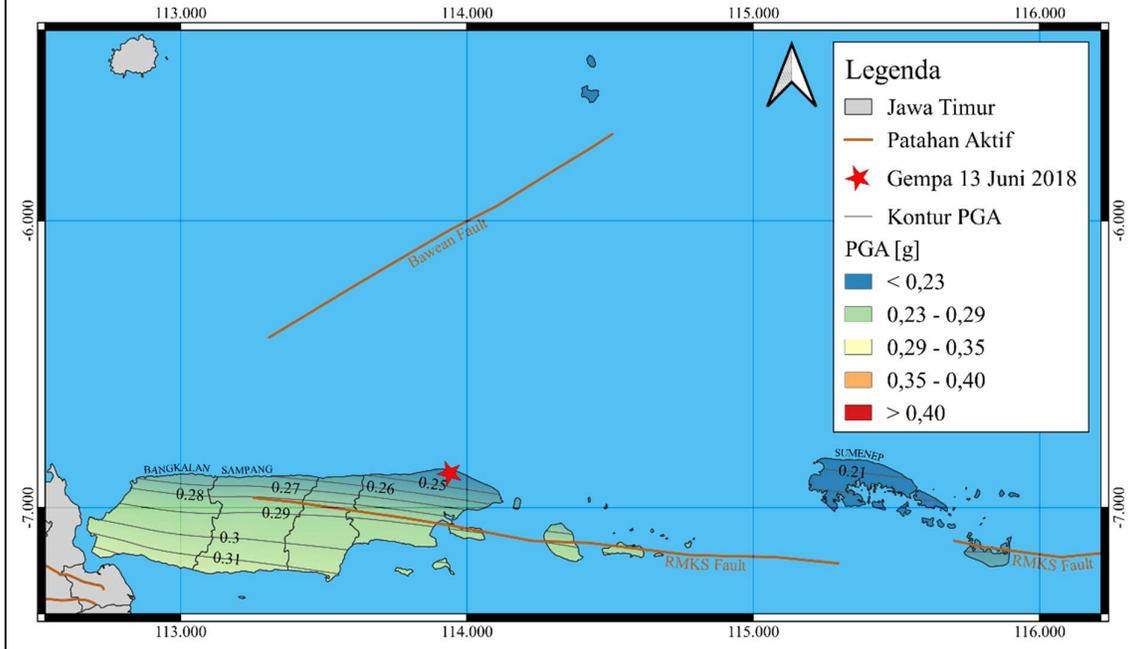
4. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengolahan data adalah berupa peta sebagai berikut peta *peak ground acceleration* (PGA) atau percepatan tanah maksimum pada batuan dasar dengan probability of exceedance (PoE) atau probabilitas terlampaui 10%, 5%, dan 2% (periode ulang gempa 475, 975, dan 2.475 tahun) dalam masa guna bangunan 50 tahun. Dari pengolahan data diperoleh nilai PGA berkisar antara 0.21 – 0.31 g untuk PoE 10%, 0.23 – 0.34 g

untuk PoE 5%, dan 0.25 – 0.40 g untuk PoE 2% (Gambar 4).

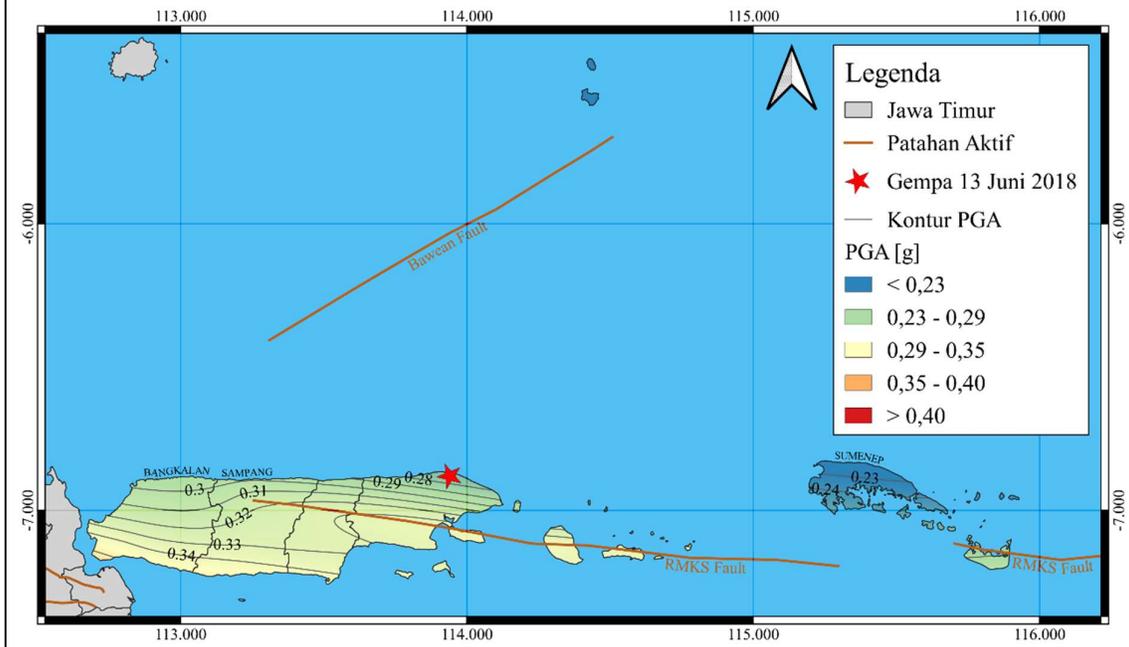
Seiring dengan penurunan persentase probabilitas terlampauinya (PoE), periode ulang gempa akan semakin bertambah panjang dan nilai PGA juga semakin meningkat seiring dengan hal tersebut. Hal ini dapat disebabkan oleh seiring dengan semakin bertambah panjang periode pengulangan gempanya, maka akan semakin banyak gempa bumi dengan magnitudo yang lebih besar muncul di wilayah penelitian (PuSGen, 2017). Secara umum, rentang nilai dan persebaran nilai PGA pada peta periode ulang gempa 2.475 tahun dengan probabilitas terlampaui (PoE) 2% di wilayah penelitian ini relatif sesuai dengan hasil Peta SNI 1726:2019 dengan PoE dan periode ulang yang sama (Gambar 5). Pada Peta SNI, daerah - daerah yang mengalami percepatan tanah yang lebih tinggi dengan 0.30 – 0.40 g adalah Pulau Madura bagian timur dan hasil ini sesuai dengan peta PGA di penelitian ini (Gambar 4c). Hasil PGA ini dapat diasosiasikan dengan patahan RMKS yang letaknya berada di bagian timur Pulau Madura. Namun, nilai PGA di kabupaten Sumenep pada penelitian ini (0.15 – 0.2 g) lebih tinggi dibandingkan dengan nilai PGA dari peta SNI (0.25 – 0.27 g) (Gambar 5). Perbedaan nilai ini dapat terjadi karena akurasi yang berbeda dari hasil perhitungan PGA yang disebabkan karena perbedaan luas wilayah dan jumlah data gempa yang dipakai dalam perhitungan.

PETA PEAK GROUND ACCELERATION (PGA) PULAU MADURA, JAWA TIMUR UNTUK PROBABILITAS TERLAMPAUI 10% DALAM 50 TAHUN

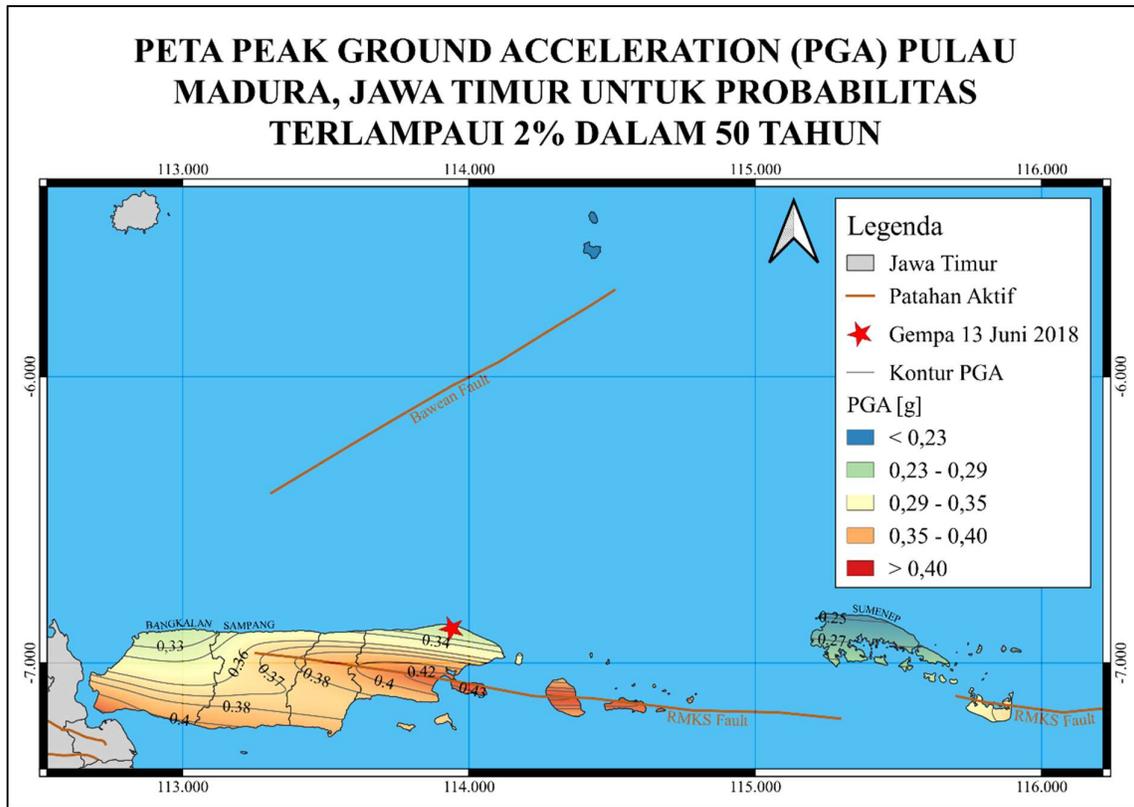


(a)

PETA PEAK GROUND ACCELERATION (PGA) PULAU MADURA, JAWA TIMUR UNTUK PROBABILITAS TERLAMPAUI 5% DALAM 50 TAHUN



(b)

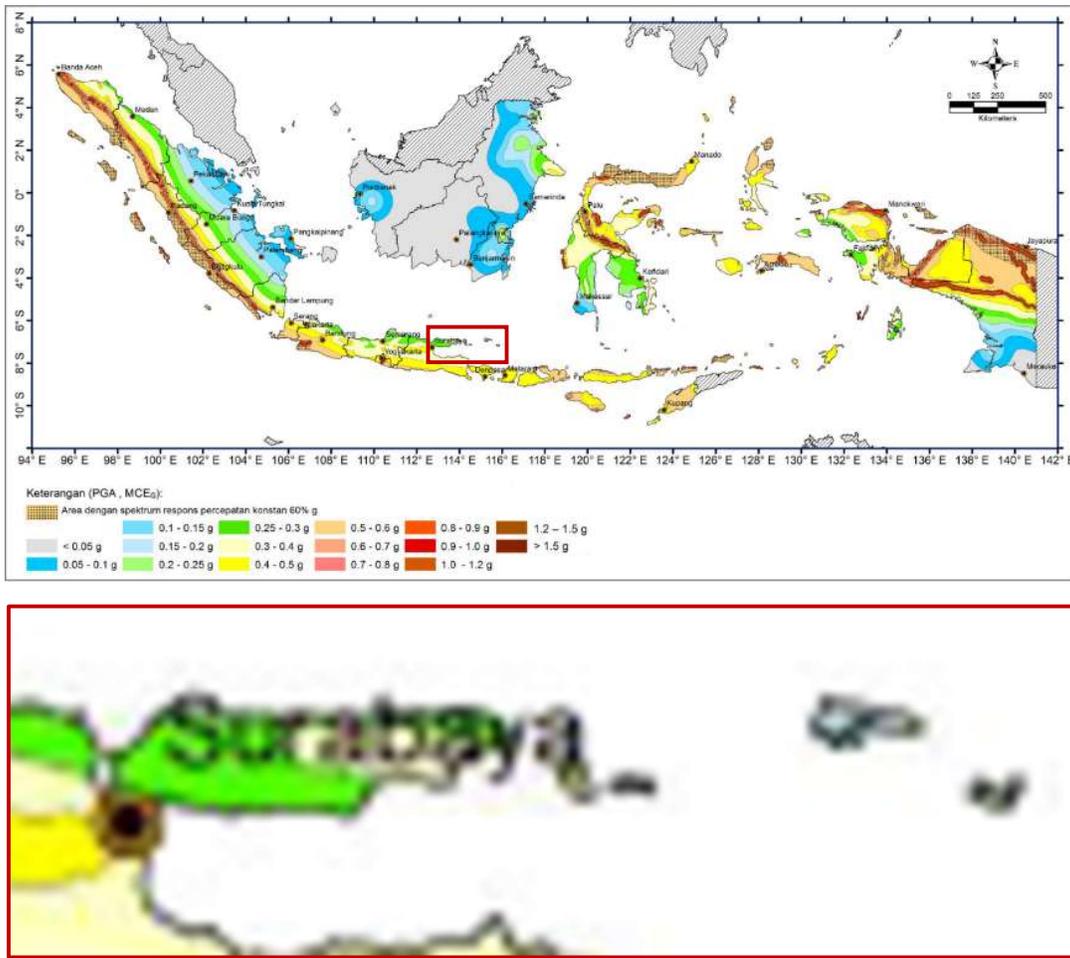


Gambar 4. Peta *peak ground acceleration* (PGA) atau percepatan tanah maksimum di batuan dasar untuk *probability of exceedance* (PoE) atau probabilitas terlampaui (a) 10%, (b) 5%, dan (c) 2% dalam masa guna bangunan 50 Tahun (periode ulang gempa) 475 (a), 975 (b), dan 2475 (c) tahun di Pulau Madura, Jawa Timur. Nilai PGA diplot berdasarkan rentang nilainya, Garis permukaan patahan aktif di sekitar Pulau Madura digambarkan dengan garis coklat.

Jika persebaran nilai PGA pada peta periode ulang gempa 2475 tahun dengan probabilitas terlampaui (PoE) 2% di wilayah penelitian ini yang berkisar antara 0.25 – 0.40 g atau sama dengan 25% – 40% g dikonversi dalam skala MMI (Tabel 4), maka akan termasuk ke intensitas VII (*very strong*) hingga VIII (*severe*).

Menurut penjelasan USGS (2019), skala VII – VIII berarti gempa bumi dapat menimbulkan kerusakan yang cukup besar pada bangunan dengan konstruksi buruk, kerusakan pada bangunan dengan konstruksi baik, sedikit kerusakan pada bangunan dengan konstruksi tahan gempa yang baik, dan beberapa furnitur berat dapat bergoyang. Menurut penjelasan BMKG (2016), skala VII – VIII berarti gempa bumi dapat menyebabkan setiap orang keluar rumah, dapat dirasakan oleh orang yang sedang berada di dalam kendaraan, dinding

dapat lepas dari rangka rumah, monumen dapat roboh, dan air menjadi keruh. Dengan informasi deskripsi efek gempa bumi berdasarkan skala MMI di atas, harapannya pemerintah selaku pembuat aturan dan pengambil keputusan dapat mempertimbangkan regulasi infrastruktur, konstruksi, hingga tata wilayah berdasarkan variasi intensitas gempa bumi di Pulau Madura. Area dengan nilai PGA yang besar akan menghasilkan skala MMI yang tinggi pula dan hal ini menandakan bahwa area tersebut memiliki kemungkinan kerusakan yang lebih berat dibandingkan area lain dengan nilai PGA dan skala MMI yang rendah, sehingga diperlukan perhatian dan perlakuan khusus terhadap pertimbangan tata ruang dan permukiman hingga perencanaan dan letak infrastruktur dan bangunan.



Gambar 5. Peta *peak ground acceleration* (PGA) atau percepatan tanah maksimum di batuan dasar untuk *probability of exceedance* (PoE) atau probabilitas terlampaui 2% dalam masa guna bangunan 50 tahun (periode ulang gempa 2475 tahun) di Indonesia, (PuSGeN, 2017; SNI 1726:2019). Kotak merah menandai daerah penelitian.

Tabel 4. Hubungan antara skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*) dengan PGA (*Peak Ground Acceleration*) (USGS)

PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Selain tiga peta PGA, penelitian juga menghitung nilai *spectral acceleration* (SA) atau percepatan spektral. Nilai ini dipakai sebagai dasar untuk menguji ketahanan bangunan, Gambar 6 menampilkan grafik yang membandingkan nilai percepatan spektral (SA) dari penelitian ini dengan nilai dari kode bangunan SNI 1726:2019 (BSN,

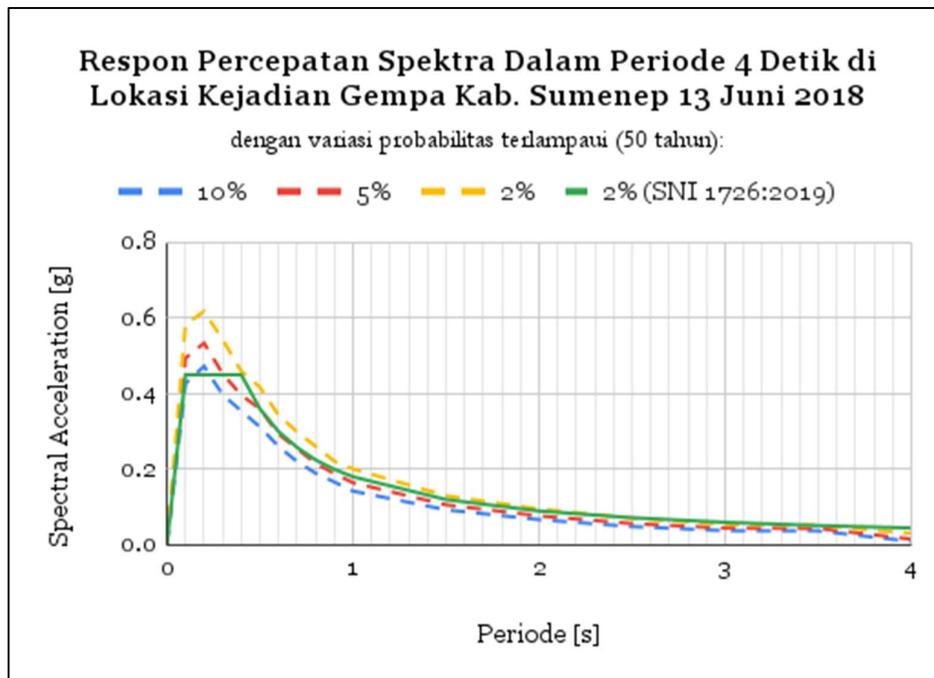
2019). Sampel perbandingan wilayah diambil dititik riwayat gempa bumi Sumenep 13 Juni 2018 pada koordinat 113°56'38,832" Bujur Timur dan 6°53'8,304" Lintang Selatan. Nilai SA pada gambar 6 menggambarkan percepatan tanah spektral yang mungkin terjadi di koordinat tersebut, bukan menggambarkan percepatan tanah spektral saat

gempa bumi 13 Juni 2018 yang terjadi di koordinat tersebut.

Dari gambar di atas, dapat kita lihat bahwa nilai percepatan spektra dengan probabilitas terlampaui 2% pada kode bangunan SNI 1726:2019 memiliki nilai puncak 0.45 g, lebih rendah dari nilai percepatan spektra dari penelitian ini (nilai puncak 0.61g). Perbedaan nilai ini dapat disebabkan karena perbedaan data yang dipakai dalam masing – masing perhitungan, percepatan spektra di penelitian ini dihitung dari peristiwa gempa 13 Juni 2018 di Kabupaten Sumenep (M4.8 SR),

sedangkan nilai percepatan tanah pada kode bangunan SNI 1726:2019 dihitung dari data penelitian PuSGeN tahun 2017, sehingga gempa bumi 13 Juni 2018 tidak masuk ke dalam perhitungan dalam SNI 1726:2019 ini. Dengan perbedaan hasil ini, maka diperlukan revisi desain spektra dalam kode bangunan Standarisasi Nasional

Indonesia, sehingga bangunan dan struktur di lokasi tersebut dapat dirancang mampu menahan percepatan tanah hingga 0,61 g.



Gambar 6. Grafik perbandingan respon percepatan spektra hasil penelitian (garis biru = 10%, merah = 5%, kuning = 2%) dengan kode bangunan SNI 1726:2019 (garis hijau) dalam periode 4 detik di lokasi kejadian gempa bumi Kab. Sumenep 13 Juni 2018.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian penentuan nilai percepatan tanah maksimum (PGA) di Pulau Madura, Jawa Timur dapat disimpulkan beberapa hal, antara lain adalah:

1. Nilai percepatan tanah maksimum (PGA) di batuan dasar dengan sumber gempa bumi *crustal fault*, subduksi, dan gempa *background* untuk probabilitas terlampaui (PoE) 10% dalam masa guna bangunan 50 tahun (periode ulang

gempa 475 tahun) berada pada rentang nilai 0.21 – 0.31 g.

2. Nilai percepatan tanah maksimum (PGA) di batuan dasar dengan sumber gempa bumi *crustal fault*, subduksi, dan gempa *background* untuk probabilitas terlampaui (PoE) 5% dalam masa guna bangunan 50 tahun (periode ulang gempa 975 tahun) berada pada rentang nilai 0.23 – 0.34 g.

3. Nilai percepatan tanah maksimum (PGA) di batuan dasar dengan sumber gempa bumi *crustal fault*, subduksi, dan gempa *background* untuk probabilitas terlampaui (PoE) 2% dalam masa guna bangunan 50 tahun (periode ulang gempa 2475 tahun) berada pada rentang nilai 0,25 – 0,4 g. Jika diperhatikan,
4. Persentase probabilitas terlampaui (PoE) semakin menurun ketika periode ulang tahunnya semakin panjang,
5. Perbedaan jumlah data dan luas area yang dipakai dalam perhitungan nilai PGA akan mempengaruhi nilai akhir PGA yang dihasilkan.
6. Diperlukan revisi kode bangunan nasional SNI 1726:2019 dengan memasukkan data gempa terbaru untuk mendapatkan nilai percepatan tanah yang akurat.

Daftar Pustaka

- Abrahamson, N., Gregor, N., Addo, K. (2015). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations For Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra* 32(1):150202104017001, doi:10.1193/051712EQS188MR
- Atkinson, G. M., Boore, D. M. (2023). Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 4, pp. 1703–1729, <https://doi.org/10.1785/0120020156>
- Baker, Jack W. (2015). *Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. White Paper Version 2.1, 77 pp.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2016). Skala MMI (Modified Mercalli Intensity), <https://www.bmkg.go.id/gempabumi/skala-mmi.bmkg>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2018a). Gempa bumi M=4.8 mengguncang Sumenep, Jawa Timur, tidak berpotensi tsunami. <https://www.bmkg.go.id/berita/?p=gempabumi-m4-8-mengguncang-sumenep-jawa-timur-tidak-berpotensitsunami&tag=press-release&lang=ID>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2018b). Katalog gempa bumi signifikan dan merusak 1821–2018. Jakarta: Pusat Gempabumi dan Tsunami Kedepuan Bidang Geofisika Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2019). SNI 1726:2019, Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., Atkinson, G. M. (2014) NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes, *Earthquake Spectra* 30 (3), 1057 – 1085, DOI: 10.1193/070113EQS184M]
- Campbell, K. W., Bozorgnia, Y. (2014) NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra, *Earthquake Spectra* Volume 30, No. 3, 1087–1115, DOI: 10.4231/D3MS3K235
- Chiou, B., Youngs, R. R. (2014) Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra, *Earthquake Spectra* 30(3):1117-1153, DOI: 10.1193/072813EQS219M
- Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58, 1583–1606
- Gardner, J., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 64, p. 1363–1367
- Gutenberg, B. & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185–188
- Hall, R. (2002). Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE-Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, modeland animations. *Journal of Asian Earth Sciences* 20, 353–434
- Hayes, G. (2018). Slab2 - A comprehensive subduction zone geometry model: U.S. Geological Survey data release, <https://doi.org/10.5066/F7PV6JNV>
- Hutapea, B. M. & Mangape, I. (2009). Analisis hazard gempa dan usulan ground motion pada batuan dasar untuk Kota Jakarta. *Jurnal*

- Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil, 16(3), 121–131
- International Seismological Centre (ISC). (2021). On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- Irsyam, M., Asrurifak, M., Hendriyawan, B., Bambang, T., Wahyu, Firmanti, A. (2010a). Development of spectral hazard maps for a proposed revision of the Indonesian Seismic Building Code. *Geomechanics and Geoengineering*, 5: 1, 35–47
- Irsyam, M., Sengara, W., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W. (2010b). Ringkasan hasil sudi tim revisi peta gempa Indonesia 2010. Bandung: Tim Revisi Peta Gempa Indonesia
- Keller, E. A. & Pinter, N. (1996). *Active tectonics, earthquake, uplift, and landscape*. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Keller, E. A. & Pinter, N. (2002). *Active tectonics, earthquakes, uplift, and landscape*. 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 362 p
- McGuire, R. (1976). FORTRAN computer program for seismic risk analysis. United States Geological Survey open-file report, 76–67
- Merz, H. & Cornell, C. (1973). Seismic risk analysis based on quadratic magnitude-frequency law. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63:1999-2006
- Muntafi, Y., Widodo, & Makrup, L. (2015). Analisis hazard gempa DKI Jakarta metode probabilistik dengan pemodelan sumber gempa 3 dimensi. *Jurnal Teknisia*, XX (2), 85–95
- Pacheco, J., & Sykes, L. R. (1992). Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989. *Bulletin of the Seismological Society of America* 82:1306–1349
- Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M., Vigano, D. (2014). OpenQuake Engine: An open hazard (and risk) software for the global earthquake model. *Seismological Research Letters*, 85(3), 692–702. <https://doi.org/10.1785/0220130087>
- Purbandini, P., Santosa, B. J., & Sunardi, B. (2017). Analisis bahaya kegempaan di wilayah Malang menggunakan pendekatan probabilistik. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 6(2), B20–B24. <https://doi.org/10.12962/j23373520.v6i2.25221>
- Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN). (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. ISBN 978-602-5489-01-3, Puslitbang Perumahan dan Permukiman, Balitbang Kementerian PUPR
- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG). (2018). Gempa bumi merusak kabupaten sumenep pada h-2 Idul Fitri, PVMBG terjunkan tim tanggap darurat. <https://vsi.esdm.go.id/index.php/gempabumi-a-tsunami/kejadian-gempabumi-a-tsunami/2288-gempabumi-merusak-terjang-kabupaten-sumenep-pada-h-2-idul-fitri-pvmbg-terjunkan-tim-tanggap-darurat>
- Scordilis, E. M. (2005). Globally valid relations converting Ms, mb, and Mjma to Mw, Meeting one arthquake monitoring and seismic hazard mitigation in Balkan countries. *NATO ARW, Borovetz, Bulgaria*, 158–161
- United State Geological Survey (USGS). (2019). The Modified Mercalli Intensity Scale | U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/modified-mercalli-intensity-scale>
- Wyss, M., Wiemer, S., Zúñiga, F. (2001). ZMAP a tool for analysis of seismicity patterns, typical applications and uses: a cook-book. *ETH Zurich*.
- 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*, Vol. 68, No. 1, 58-73
- Zhao, X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H., Somerville, P., 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. 898-913.