



## Analisis Probabilitas Bahaya Gempa di Ibu Kota Baru Indonesia

\*Rocky Mountainshia<sup>1</sup>, Paulus Pramono Rahardjo<sup>1</sup>, Dega Damara Aditramulyadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan Bandung

<sup>2</sup>Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

<sup>\*</sup>mountainshia@gmail.com

Received: 10 Februari 2022 Revised: 11 Januari 2023 Accepted: 20 Januari 2023

### Abstract

*Efforts to move the Capital of Indonesia to Kalimantan are intended to solve the problem of overpopulation in Jakarta, so it's possible there are massive infrastructure development in the future. In this study conducted Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) and made an earthquake hazard map that serves to analyze earthquake-resistant buildings for the New Capital of Indonesia. The PSHA and earthquake map was developed for 2% probability exceeded in 50 years or 2500-return period. The results of the analysis on three important periods, comprised of PGA, S<sub>s</sub>, and S<sub>1</sub> with a return period of 2500 years have higher acceleration at bedrock if performed by GMPE 2017 rather than GMPE 2010 for the period between 0.05 and 0.1s. Maximum earthquake acceleration on bedrock resulting from the creation of earthquake hazard maps in New Capital of Indonesia for period of PGA, 0.2s, and 1.0s at bedrock for return period of 2500 years is 0.2-0.25g, 0.4-0.5g, and 0-0.15g, respectively. The earthquake threat index in the New Capital of Indonesia is categorized as low according to Indonesia's National Board for Disaster Management (BNPB) regulations (PGA<0.2501g).*

**Keywords:** PSHA, GMPE 2010, GMPE 2017, earthquake acceleration, earthquake hazard maps

### Abstrak

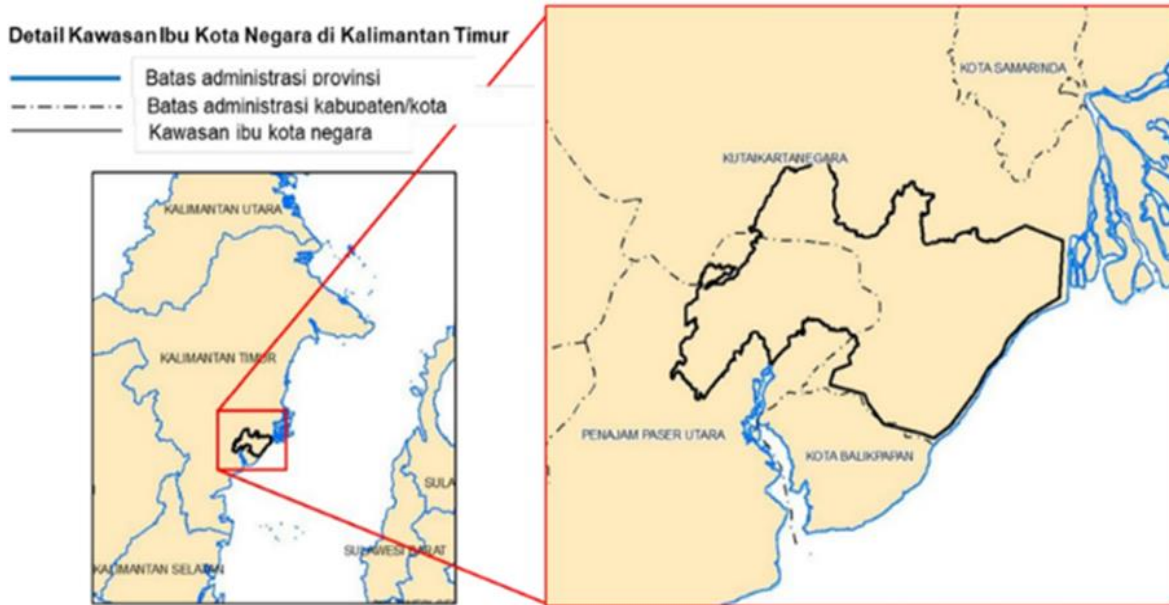
*Upaya pemindahan ibu kota Indonesia ke Kalimantan dimaksudkan untuk mengatasi masalah overpopulasi di Jakarta, sehingga memungkinkan adanya pembangunan infrastruktur yang masif di masa yang mendatang. Pada penelitian ini dilakukan Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) dan membuat peta hazard gempa yang berfungsi untuk perencanaan bangunan tahan gempa untuk daerah Ibu Kota Baru Indonesia. PSHA dan peta gempa dibuat untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun atau periode ulang 2500 tahun. Hasil analisis pada tiga periode penting yaitu PGA, S<sub>s</sub>, dan S<sub>1</sub> di batuan dasar dengan periode ulang 2500 tahun memiliki percepatan gempa di batuan dasar lebih besar jika menggunakan GMPE 2017 daripada GMPE 2010 untuk periode kecil antara PGA dan 0,1s. Percepatan gempa maksimum di batuan dasar hasil pembuatan peta bahaya gempa di Ibu Kota Baru Indonesia pada periode PGA, S<sub>s</sub>, dan S<sub>1</sub> di batuan dasar untuk periode ulang 2500 tahun secara berturut-turut adalah 0,2-0,25g; 0,4-0,5g; dan 0-0,15g. Indeks ancaman bencana pada Ibu Kota Baru Indonesia dikategorikan rendah menurut peraturan BNPB (PGA<0,2501g).*

**Kata kunci:** PSHA, GMPE 2010, GMPE 2017, percepatan gempa, peta bahaya gempa

### Pendahuluan

Upaya pemindahan ibu kota negara Indonesia ke Kalimantan dimaksudkan untuk mengatasi masalah overpopulasi di Jakarta, sehingga memungkinkan adanya pembangunan infrastruktur yang masif di masa yang mendatang. Lokasi Ibu Kota Negara (IKN) Indonesia baru dapat dilihat pada Gambar 1, yang mana terletak di Kabupaten Kutai Kartanegara

dan Kabupaten Penajam Paser Utara, Provinsi Kalimantan Timur. Pulau Kalimantan adalah wilayah di Indonesia yang jarang terkena guncangan gempa bumi berada kokoh diatas lempeng Eurasia dan aktivitas gempa buminya rendah. Akan tetapi, Pulau Kalimantan berisiko terjadinya gempa bumi dikarenakan adanya endapan batuan yang lunak, dan memiliki struktur geologi yang didominasi oleh sesar dan lipatan.



Gambar 1. Lokasi Ibu Kota Negara Indonesia Baru

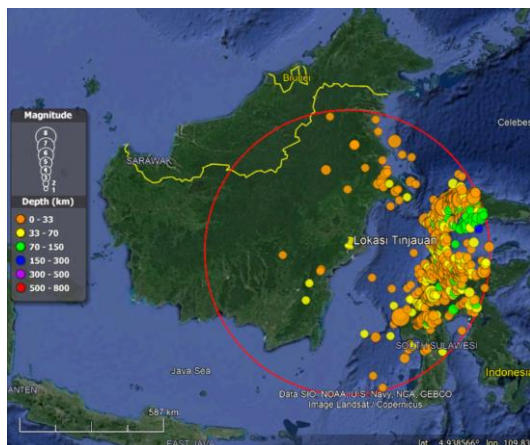
Masalah geoteknik yang penting dari kacamata kegunaan yaitu evaluasi respon situs. Analisis respon situs dilakukan untuk tanah kelas situs SF (tanah khusus) dan digunakan untuk memprediksi gerak tanah (*ground motion*) yang kemudian digunakan untuk mengembangkan desain spektra respon. Penelitian ini akan menganalisis bahaya gempa pada Lokasi Ibu Kota Negara (IKN) baru yang terletak di Kabupaten Kutai Kartanegara dan Kabupaten Penajam Paser Utara, Provinsi Kalimantan Timur.

$$P[I \geq i] = \int \int P[I \geq i; m, r] f_M(m) \cdot f_R(r) dm \cdot dr \quad (1)$$

Dengan  $f_M$  adalah fungsi kepadatan magnitudo,  $f_R$  adalah fungsi kepadatan jarak dari sumber.  $[I \geq i | m \text{ dan } r]$  adalah kondisi probabilitas acak intensitas ( $I$ ) yang melampaui nilai ( $i$ ) pada suatu lokasi akibat magnitudo ( $M$ ) dan jarak hiposenter ( $R$ ).

### Identifikasi dan pemodelan sumber gempa

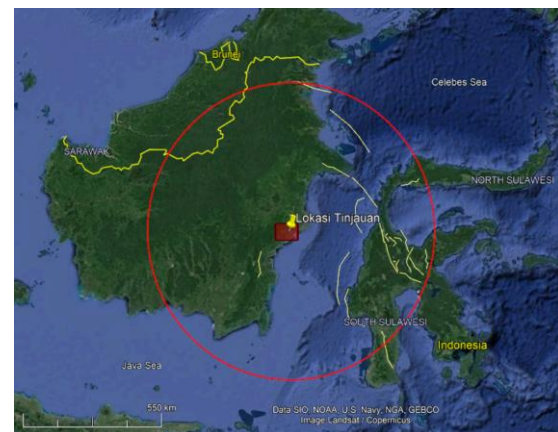
Model sumber gempa yang digunakan dalam analisis ini ada tiga, yaitu sumber gempa sesar, sumber gempa subduksi, dan sumber gempa *background*. Model sumber gempa sesar/*fault* diidentifikasi berdasarkan geometri *fault*. Dalam perhitungan jarak, model ini memasukkan jarak dari *site* ke *hypocenter*. Jarak ini memerlukan data *dip* dari sesar yang dipakai sebagai perhitungan probabilitas.



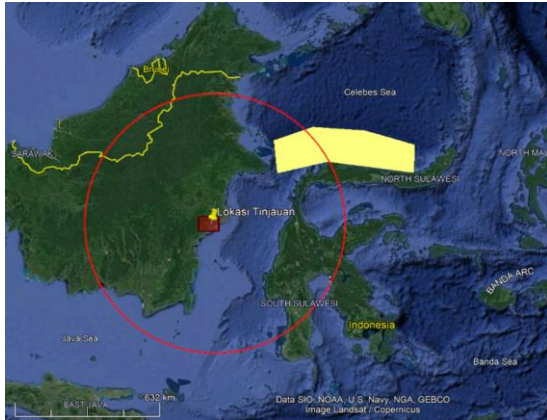
Gambar 2. Data kejadian gempa bumi di radius 500 km dari IKN (<https://earthquake.usgs.gov>)

### Metode

Metode perhitungan untuk analisis probabilitistik bahaya gempa (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis/PSHA*) menggunakan teori probabilitas total yang dinyatakan dengan Persamaan 1.



Gambar 3. Sumber gempa sesar yang berpengaruh di area IKN



**Gambar 4. Sumber Gempa Subduksi yang Berpengaruh di Area IKN**

Model sumber gempa subduksi adalah model yang didapat dari data seismotektonik. Batas kedalaman maksimum dari sumber gempa ini dimodelkan hingga 50 km atau merupakan daerah *Megathrust* (Asrurifak, 2010). Untuk daerah yang lebih dalam (>50 km) atau daerah *Benioff* diwakili oleh model sumber gempa *deep background*. Model sumber gempa *background* (*gridded seismicity*) digunakan untuk mengestimasi rate dari kejadian gempa kecil sampai sedang yang akan datang di daerah sesar dan gempa-gempa acak di luar sesar (Petersen *et al.*, 2008). Model ini memprediksikan bahwa kejadian gempa yang lebih besar kemungkinan dapat terjadi di daerah sekitar gempa-gempa kecil sampai sedang yang telah terjadi sebelumnya.

Model *gridded seismicity* ini dalam analisisnya terdiri atas *shallow background source* dan *deep background source*. Untuk *shallow background source* terbagi atas interval kedalaman 0-25 km dan 25-50 km, sedangkan *deep background source* terbagi atas interval kedalaman 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km, dan 200-300 km.

Batasan pemodelan zona sumber gempa yang digunakan mengacu pada Asrurifak (2010), yaitu kedalaman sumber gempa dibatasi hingga 300 km, jarak lokasi sumber gempa ke lokasi yang ditinjau dibatasi hingga 500 km serta fungsi atenuasi yang digunakan untuk setiap model adalah fungsi atenuasi yang dianggap sesuai dengan karakteristik kegempaan dan model sumber gempa wilayah Indonesia.

### Pengumpulan dan pengolahan data gempa

Data gempa yang digunakan adalah semua data kejadian gempa yang pernah terjadi di wilayah IKN, Penajam Paser Utara yang dicatat oleh *The United States Geological Survey* (USGS) dengan kriteria:

- Lintang (*latitude*) :  $-0,93522^\circ$
- Bujur (*longitude*) :  $116,97688^\circ$
- Magnitudo Minimum : 4,5
- Magnitudo Maksimum : 8
- Rentang Kedalaman : 0 – 300 km
- Waktu Pengamatan : 1971 – 2020

Berdasarkan USGS, diperoleh 662 data kejadian gempa yang terjadi pada radius 500 km dari IKN. Untuk memperoleh hasil analisis yang akurat, data kejadian gempa yang diperoleh harus diolah terlebih dahulu. Ada beberapa tahapan pengolahan data gempa yaitu, konversi skala magnitudo, pemisahan gempa susulan (*declustering*), dan analisis kelengkapan data gempa.

### Konversi Skala Magnitudo

Data kejadian gempa yang diperoleh dari USGS menggunakan skala magnitudo yang berbeda-beda. Skala magnitudo yang digunakan adalah *surface wave magnitude* ( $m_s$ ), *Richter local magnitude* ( $M_L$ ), *body wave magnitude* ( $m_b$ ) dan *moment magnitude* ( $M_w$ ). Skala-skala magnitudo tersebut harus dikonversi terlebih dahulu menjadi satu skala magnitudo yang sama sebelum digunakan dalam *seismic hazard analysis*. Persamaan konversi yang digunakan berdasarkan PuSGeN 2017 dapat dilihat pada Tabel 1.

### Analisis kejadian gempa independen

Data yang diperoleh dari katalog gempa merupakan data-data kejadian gempa yang terdiri dari gempa utama (*main shocks*) dan gempa susulan (*aftershock*). Kejadian gempa susulan harus diidentifikasi sebelum data kejadian gempa digunakan untuk menentukan tingkat *hazard* agar perhitungan tidak *overestimated* (Pacheco & Skykes, 1992). Analisis pemisahan gempa utama dilakukan menggunakan kriteria *time windows* dan kriteria *distance windows*. Analisis pemisahan gempa utama dilakukan menggunakan kriteria *time windows* dan kriteria *distance windows*.

**Tabel 1. Korelasi konversi skala magnitudo untuk wilayah Indonesia (PuSGeN, 2017)**

Skala magnitudo	Persamaan konversi	Range data
<i>Surface wave magnitude</i> ( $m_s$ )	$M_w = 1,0107m_s + 0,0801$	$3,7 \leq m_s \leq 8,2$
<i>Body wave magnitude</i> ( $m_b$ )	$M_w = 0,6016m_b + 2,476$	$2,8 \leq m_b \leq 6,1$
<i>Richter local magnitude</i> ( $m_L$ )	$M_w = 0,9239m_L + 0,5671$	$6,2 \leq m_L \leq 8,7$
	$M_w = 0,74736m_L + 1,0651$	$3,0 \leq m_L \leq 7,5$

**Tabel 2 Pembobotan yang digunakan dalam penelitian**

GMPE	Sumber Gempa	Ground motion model	Bobot
2010	Shallow Crustal	Boore-Akitson NGA 2008	1/3
		Campbell-Bozorgnia NGA 2008	1/3
		Chiou-Youngs NGA 2008	1/3
	Megathrust	Youngs <i>et al.</i> , 1997	1/4
		Atkinson-Boore, 2003	1/2
		Zhao <i>et al.</i> , VS30, 2006	1/4
		Atkinson-Boore, Cascadia 2003	1/3
	Benioff	Youngs <i>et al.</i> , 1997	1/3
		Atkinson Boore, Worldwide 2003	1/3
		Boore-Atkitson NGA 2014	1/3
2017	Shallow Crustal	Campbell-Bozorgnia NGA 2014	1/3
		Chiou-Youngs NGA 2014	1/3
		BCHYDRO (Abrahamson, 2012)	1/4
	Megathrust	Atkinson-Boore, 2003	1/2
		Zhao <i>et al.</i> , VS30, 2006	1/4
		Atkinson-Boore, Cascadia 2003	1/3
		Youngs <i>et al.</i> , 1997	1/3
	Benioff	Atkinson Boore, Worldwide 2003	1/3

Terdapat beberapa kriteria yang diajukan oleh Gardner dan Knopoff (1974), Arabasz dan Robinson (1976), dan Uhrhammer (1986). Kejadian gempa susulan didefinisikan sebagai gempa dengan magnitudo lebih kecil yang terjadi dalam rentang jarak dan waktu di sekitar lokasi gempa yang terbesar. Pada studi ini, analisis kejadian gempa independen dilakukan menggunakan kriteria *time windows* dan *distance windows* dari Gardner dan Knopoff (1974) dengan bantuan program ZMAP7 (Wiermer, 2001). Berdasarkan analisis yang telah dilakukan oleh peneliti dengan menggunakan model-model diatas, model Garner dan Knopoff (1974) memiliki hasil yang cukup baik (Tim Revisi Peta Gempa Indonesia, 2010). Dari 662 data kejadian gempa yang diperoleh dari USGS, setelah dilakukan analisis kejadian gempa independen menjadi 383 data kejadian gempa utama.

#### Analisis kelengkapan (*completeness*) data gempa

Analisis kelengkapan (*completeness*) data gempa dilakukan untuk mengetahui kelengkapan data yang diperlukan dalam proses analisis probabilistik. Ketidaklengkapan data gempa dapat mengakibatkan parameter risiko gempa yang dihasilkan menjadi *overestimated* atau *underestimate* (Stepp, 1973). Metode analisis kelengkapan data gempa yang digunakan pada penelitian ini mengikuti prosedur yang diusulkan oleh Stepp (1973).

#### Fungsi atenuasi

*Ground Motion Prediction Equation* (GMPE) atau fungsi atenuasi merupakan persamaan yang digunakan untuk mengestimasi tingkat guncangan

tanah akibat gempa dengan magnitudo, jarak dari sumber ke lokasi pengamatan dan kondisi sumber gempa tertentu. Pemilihan fungsi atenuasi ini didasarkan pada kesamaan kondisi geologi dan tektonik dari wilayah dimana fungsi atenuasi itu dibuat. Karena tidak tersedianya data untuk menurunkan suatu fungsi atenuasi di wilayah Indonesia, pemakaian fungsi atenuasi yang diturunkan dari wilayah lain tidak dapat dihindari. Fungsi atenuasi yang digunakan sebagian besar sudah menggunakan Next Generation Attenuation (NGA), dimana atenuasi ini dalam pembuatannya sudah menggunakan data gempa global (*worldwide data*). (PuSGeN, 2017). Dalam penelitian ini menggunakan fungsi atenuasi yang digunakan pada pengembangan peta *hazard* gempa Indonesia tahun 2010 dan tahun 2017. Fungsi atenuasi yang digunakan pada pengembangan peta *hazard* gempa Indonesia tahun 2010 untuk masing-masing jenis sumber dapat dilihat pada Gambar 9 hingga Gambar 11, serta Gambar 12 sampai dengan Gambar 14 untuk fungsi atenuasi tahun 2017.

#### Logic tree

Pengelolaan unsur ketidakpastian dilakukan menggunakan pendekatan *logic tree*. *Logic tree* memperhitungkan seluruh ketidakpastian dalam menentukan parameter-parameter dalam analisis *hazard* gempa, yaitu fungsi atenuasi, pemilihan *reccurrence model*, *reccurrence rate*, dan magnitudo maksimum. Dengan menggunakan *logic tree*, setiap alternatif yang dipilih dalam menentukan parameter-parameter tersebut diberi suatu bobot yang menggambarkan tingkat kepercayaan terhadap parameter yang digunakan. Pembobotan yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

## Hasil dan Pembahasan

### Sumber gempa yang mempengaruhi analisis

Pada radius 500 km dari IKN, terdapat 3 sesar di Pulau Kalimantan, 17 sesar di Pulau Sulawesi, dan satu (1) sumber gempa subduksi. Parameter sumber gempa sesar dan subduksi dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4. Terdapat 662 data kejadian gempa yang

tercatat pada tahun 1970 hingga 2020. Setelah dilakukan pengolahan data gempa menjadi 383 data. Hasil pengolahan data gempa dapat dilihat pada Tabel 5 dan 6.

**Tabel 3. Parameter sumber gempa subduksi di radius 500 km dari IKN (PuSGeN, 2017)**

Subduksi	$M_w$	a	b
North Sulawesi	8.5	4.82	0.92

**Tabel 4. Parameter sumber gempa sesar di radius 500 km dari IKN (PuSGeN, 2017)**

Sesar	Slip rate (mm/yr)	Mekanisme	Dip	Top	Bottom	L (km)	$M_{max}$
<b>Pulau Kalimantan</b>							
Tarakan	0,3	Strike-slip	90	3	18	100	7
Mangkalihat	0,5	Strike-slip	90	3	18	111	7
Meratus	0,2	Reverse-slip	45W	3	18	105	7
<b>Pulau Sulawesi</b>							
Tarakan	0,1	Strike-slip	90	3	18	206	7,4
Tomini	0,1	Reverse-slip	45	3	18	59	7,1
Palukoro – Makasar Str	10,0	Left-lateral SS	90	3	18	130	7,1
Makasar Strait North	2,0	Reverse-slip	45E	3	18	100	7,1
Makasar Strait Central	2,0	Reverse-slip	45E	3	18	170	7,3
Mamuju	2,0	Reverse-slip	45E	3	18	40	7,0
Walanae	0,5	Strike-slip	90	3	18	130	7,1
Weluki	0,1	Reverse-slip	45	3	18	72	7,3
Kuleana	7,0	Left-lateral strike slip	90	3	18	22	6,6
Tokakaru	2,0	Reverse-slip	45	3	18	80	7,2
Poso	0,1	Reverse-slip	45E	3	18	85	7,3
Palu	10,0	Left-lateral strike slip	90	3	18	31	6,8
Saluki	10,0	Left-lateral strike slip	90	3	18	44	6,9
Sausu	1,0	Strike-slip	90	3	18	31	6,8
Maleei	0,1	Reverse-slip	45E	3	18	70	7,1
Moa	10,0	Left-lateral strike slip	90	3	18	66	7,1
Pewusai	7,0	Reverse-slip	45N	3	18	46	6,9

**Tabel 5 Data gempa sebelum dilakukan pengolahan data**

Waktu Pengamatan	Jumlah kejadian	$M_w$		
		$M_w \leq 5$	$5 > M_w \geq 6$	$M_w > 6$
1970 ~ 1980	41	13	24	4
1980 ~ 1990	112	53	54	5
1990 ~ 2000	175	84	80	11
2000 ~ 2010	115	61	48	6
2010 ~ 2020	219	144	71	4
Jumlah kejadian gempa	662			

**Tabel 6 Data gempa setelah dilakukan pengolahan data**

Waktu Pengamatan	Jumlah kejadian	$M_w$		
		$M_w \leq 4,5$	$4,5 > M_w \geq 5,5$	$M_w > 5,5$
1970 ~ 1980	37	12	21	4
1980 ~ 1990	77	42	31	4
1990 ~ 2000	88	41	40	7
2000 ~ 2010	89	44	40	5
2010 ~ 2020	92	60	28	4
Jumlah kejadian gempa	383			



**Kurva hazard**

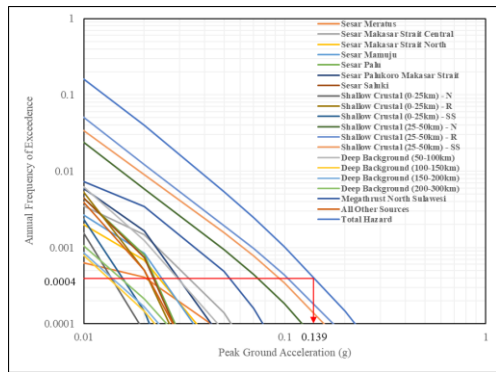
Kontribusi masing-masing sumber gempa dalam menghasilkan percepatan gempa pada analisis PSHA dapat dilihat pada kurva *hazard*. Kurva hazard hasil analisis PSHA dengan menggunakan GMPE 2010 dan 2017 ditunjukkan pada Gambar 5 hingga 10.

**Uniform Hazard Spectrum (UHS)**

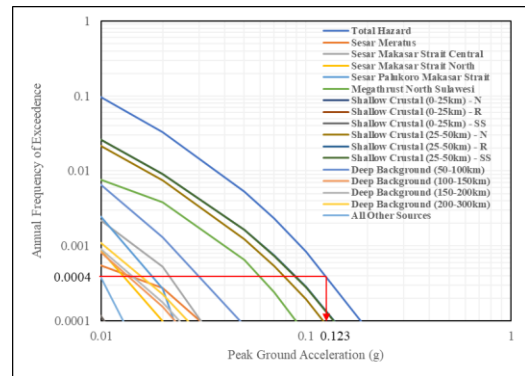
Percepatan gempa di batuan dasar ditunjukkan oleh UHS hasil PSHA. Perbandingan nilai UHS dengan

GMPE 2010 dan 2017 dapat dilihat pada Gambar 11 dan Tabel 7. Perbedaan percepatan gempa untuk periode penting adalah 8,38 - 17,44 %.

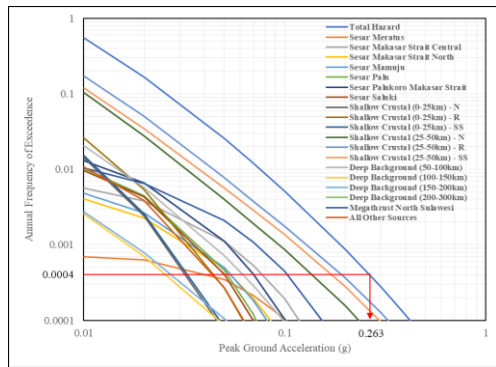
Hasil analisis pada tiga periode penting yaitu PGA,  $S_s$ , dan  $S_1$  di batuan dasar dengan periode ulang 2500 tahun dengan GMPE 2017 memiliki percepatan gempa yang lebih besar daripada GMPE 2010 pada periode kecil antara 0,05 detik sampai 0,1 detik. Beda nilai maksimum pada periode penting ditunjukkan pada periode  $S_s$  ( $T = 0,2$  detik) dengan nilai 17,44%.



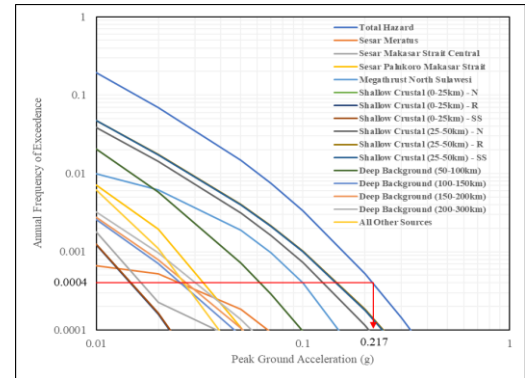
**Gambar 5 Kurva Hazard dengan GMPE 2010 untuk Periode  $T = \text{PGA}$  di Area IKN**



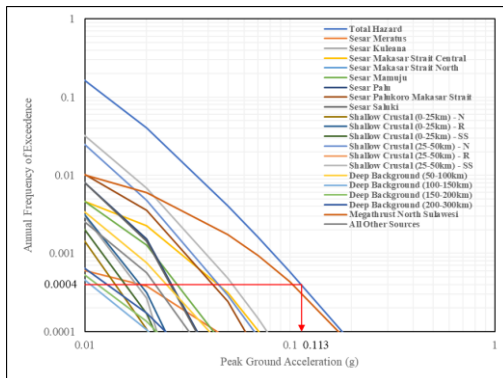
**Gambar 8 Kurva Hazard dengan GMPE 2017 untuk Periode  $T = \text{PGA}$  di Area IKN**



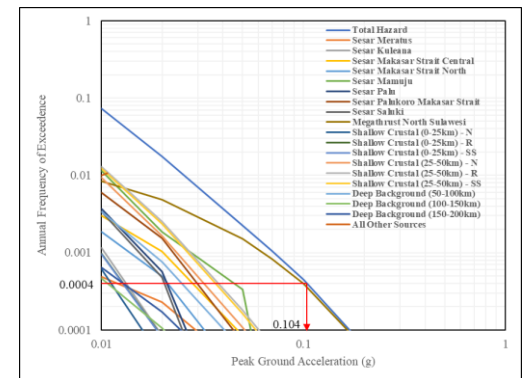
**Gambar 6 Kurva Hazard dengan GMPE 2010 untuk Periode  $T = 0,2$  s di Area IKN**



**Gambar 9 Kurva Hazard dengan GMPE 2017 untuk Periode  $T = 0,2$  s di Area IKN**



**Gambar 7 Kurva Hazard dengan GMPE 2010 untuk Periode  $T = 1$  s di Area IKN**



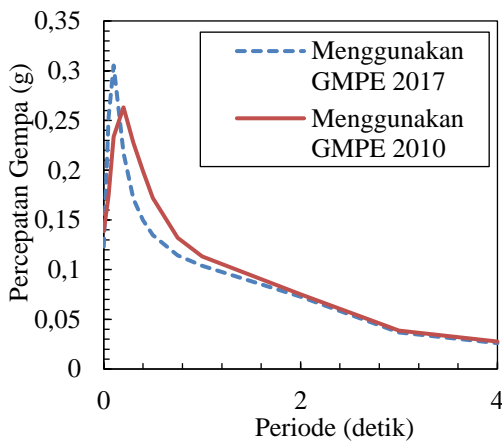
**Gambar 10 Kurva Hazard dengan GMPE 2017 untuk Periode  $T = 1$  s di Area IKN**

### Peta Gempa IKN

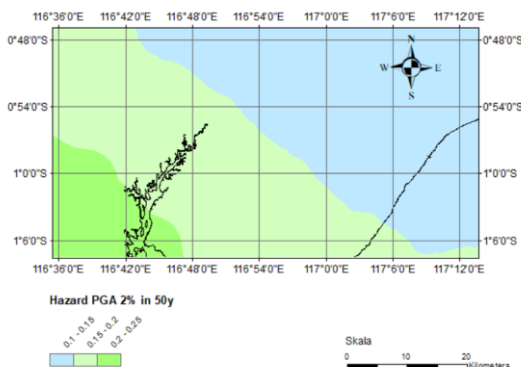
Pembuatan peta gempa IKN menggunakan fungsi atenuasi 2010 dan katalog USGS untuk periode ulang 2500 tahun dengan bantuan software PSHA dan software pemetaan ditunjukkan pada Gambar 12 hingga 14.

### Indeks ancaman bencana

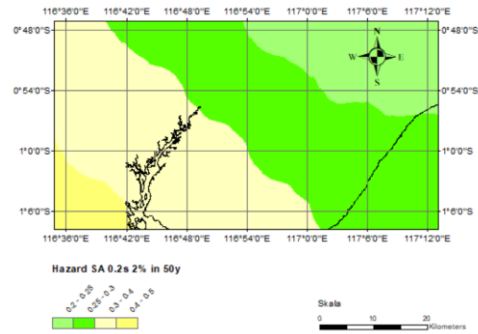
Berdasarkan Peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana Nomor 02 Tahun 2012 Tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana, Indeks Ancaman Bencana Gempa Bumi ditentukan berdasarkan nilai PGA. Kelas indeks yang ditentukan oleh Peraturan BNPB Tahun 2012 yaitu rendah dengan PGA *value* < 0,2501 g, sedang dengan PGA *value* = 0,2501 – 0,7g, dan tinggi dengan PGA *value* > 0,7g. Berdasarkan hasil pemetaan PSHA dengan bantuan software PSHA dengan GMPE 2010 dan software pemetaan, nilai PGA maksimum berada pada rentang 0,2-0,25 g yang menunjukkan indeks ancaman bencana gempa bumi di area IKN adalah rendah.



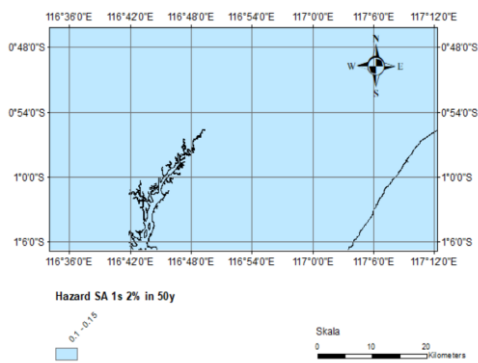
Gambar 11 UHS dengan GMPE 2010 dan GMPE 2017



Gambar 12. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar Periode PGA untuk Periode Ulang 2500 Tahun pada Area IKN



Gambar 13. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar Periode  $S_s$  ( $T = 0,2s$ ) untuk Periode Ulang 2500 Tahun pada Area IKN



Gambar 14 Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar Periode  $S_1$  ( $T = 1s$ ) untuk Periode Ulang 2500 Tahun pada Area IKN

Tabel 7 Perbandingan nilai UHS untuk periode penting

Periode (detik)	Percepatan Gempa (g)		Beda (%)
	GMPE 2010	GMPE 2017	
PGA	0,139	0,123	11,17
0,2	0,263	0,217	17,44
1	0,113	0,104	8,38

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis diperoleh bahwa percepatan gempa di batuan dasar pada periode penting (PGA,  $S_s$ , dan  $S_1$ ) untuk lokasi IKN memiliki nilai yang lebih besar dari SNI. Nilai ini perlu mendapatkan kajian lebih lanjut, seperti menggunakan data katalog gempa yang lebih lengkap. Menurut Peraturan BNPB Tahun 2012, indeks ancaman gempa bumi untuk area IKN masuk dalam kategori rendah dengan nilai  $PGA < 0,2501$  g.

### Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada PT. GEC yang telah menyediakan lisensi perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini.

## Daftar Pustaka

- Abrahamson, N., Gregor, N. and Addo, K. (2016). BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23-44.
- Atkinson, G.M. and 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*, v.93, 1703-1729.
- Arabasz, W. J., & Robinson, R. (1976). Microseismicity and geologic structure in the northern South Island, New Zealand. *New Zealand journal of geology and geophysics*, 19(5), 569-601.
- Asrurifak, M. (2010). *Peta Respon Spektra Indonesia untuk Perencanaan Struktur Bangunan Tahan Gempa Berdasarkan Model Sumber Gempa Tiga Dimensi dalam Analisis Probabilitas*.
- Boore, D.M. and Atkinson, G.M. (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138.
- Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E. and Atkinson G.M. (2013). NGA-West 2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5%-Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057-1085.
- Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. (2008). NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 139-171.
- Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. (2013). NGA-West2 Campbell-Bozorgnia Ground Motion Model for the horizontal Components of PGA, PGV and 5%-Damped Elastic Pseudo-Acceleration Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 sec, *Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2013/6*, xii+75.
- Chiou, B., Darragh, R., Gregor, N. and Silva, W. (2008). NGA project strong-motion database. *Earthquake Spectra*, 24(1), 23-44.
- Gardner, J. K. and Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian. *Bulletin of the Seismological Society of America* 64, 1363-1367.
- Irsyam, M., Sengara, W., Aldiamar, F., & Widiyantoro, S. (2010). *Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Pacheco, J. and Sykes, L.R. (1992). Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989. *Bulletin of the Seismological Society of America* 82, 1306-1349.
- PEER. (2013). *PEER Ground Motion Database - PEER Center*. Retrieved 03 August 2021, from <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- Stepp, J. C. (1973). Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area. In Harding, S. T. (Eds). Contributions to seismic zoning, US National Oceanic and Atmospheric Administration. *Technical Report ERL 267-ESL 30*, p. 16-28.
- Tim Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
- Uhrhammer, R. (1986). Characteristics of northern and central California seismicity, *Earthquake Notes* 57(1), 21-37.
- USGS. *Search Earthquake Catalog*. Retrieved September 12, 2021, from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Wiemer, S., (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373-382.
- Youngs, R.R., Chiou, S.J., Silva, W.J. and Humphrey, J.R., (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58-73.
- Zhao, J.X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P.G., Asano, A., Ohno, ouchi, T., Takahashi, T. and Ogawa, H., (2006). An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 914-92.