

IDENTIFIKASI PENGARUH PERUBAHAN PARAMETER SEISMİK DAN GEOMETRI SUMBER GEMPA TERHADAP PERCEPATAN TANAH DI PROVINSI DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA

Elvis Saputra^{1*}, Widodo²

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia

Jl. Kaliurang km 14,5, Yogyakarta, D.I.Yogyakarta

*Email: elvis.saputra@uii.ac.id

Abstrak

Peta Gempa Nasional yang dipublish tahun 2017 memiliki beberapa perbedaan penggunaan sumber gempa dan parameter seismik dibandingkan dengan Peta Gempa Nasional 2010. Perubahan parameter seismik dan sumber gempa tersebut akan berpengaruh terhadap hasil prediksi nilai percepatan tanah. Oleh karena itu, penelitian tentang perubahan nilai parameter, pergeseran geometri sumber gempa megathrust, dan efeknya terhadap percepatan tanah puncak (PGA) khususnya di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta penting untuk dilakukan. Metode analisis yang digunakan dalam menentukan pengaruh nilai percepatan pada penelitian ini menggunakan metode probabilistik. Hasil dari penelitian ini diketahui bahwa perubahan geometri sumber gempa megathrust pada peta gempa 2017 menyebabkan terjadinya penurunan nilai percepatan tanah di D.I.Yogyakarta. Penurunan nilai percepatan tersebut disebabkan karena terjadinya pergeseran zona megathrust dari sumber gempa sebelumnya sehingga jarak dari site ke sumber gempa menjadi ikut berubah. Perubahan jumlah segmen megathrust Jawa yang awalnya hanya terdiri dari 1 segmen kemudian berubah menjadi 3 segmen, menyebabkan terjadi penurunan frekuensi kejadian gempa dan penurunan nilai parameter seismik. Penurunan nilai parameter seismik tersebut juga menyebabkan terjadinya penurunan nilai percepatan. Meskipun demikian, perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terkait pengaruh nilai percepatan tanah akibat penambahan jumlah segment patahan di Provinsi D.I.Yogyakarta mengingat kontribusi nilai percepatan terbesar diberikan oleh sumber gempa patahan.

Kata kunci: Parameter seismik, pengaruh percepatan tanah puncak (PGA), sumber gempa.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Hingga saat ini Indonesia telah memiliki 4 peta gempa yang digunakan secara Nasional untuk perencanaan gedung dan infrastruktur tahan gempa. Peta gempa nasional pertama dimuat kedalam Peraturan Perencanaan Tahan Gempa Indonesia untuk Gedung (PPTI-UG,1983), kemudian dengan adanya beberapa kejadian gempa besar dan hasil penelitian parameter seismik terkini, sehingga peta gempa nasional telah dilakukan beberapa kali pemuktahiran berturut-turut yaitu Peta Gempa Nasional 2002, Peta Gempa Nasional 2010, serta yang terbaru Peta Gempa Nasional 2017.

Proses penyusunan Peta Gempa Nasional 2017 (PGN 2017) memiliki beberapa perbedaan penggunaan parameter seismik dibandingkan dengan Peta Gempa Nasional 2010 (PGN 2010). Perbedaan parameter seismik pada PGN 2017 ditandai dengan adanya kenaikan nilai magnitude maksimum, penurunan nilai a (indeks seismisitas) dan penurunan nilai b (tingkat risiko gempa) yang akan berpengaruh terhadap nilai beta (β) dan $rate$ (v) dalam memprediksi gerakan tanah (PuSGeN, 2017). Perbedaan parameter tersebut akan berpengaruh pada nilai percepatan tanah maksimum dan respon spektra. Selain perubahan parameter seismik, dalam proses penyusunan PGN 2017 juga terdapat perbedaan geometri segment megathrust (PuSGeN, 2017). Hal tersebut dapat diketahui dengan melakukan *overlay* sumber gempa megathrust antara PGN 2017 (baru) dan PGN 2010 (lama). Hasil *overlay* menunjukkan bahwa pada beberapa wilayah tertentu, segment megathrust bergeser posisi ada yang mendekati dan ada juga menjauhi pulau atau daratan. Dengan demikian hal tersebut akan menyebabkan perubahan jarak terhadap suatu titik yang ditinjau. Perubahan jarak selanjutnya akan berpengaruh terhadap nilai percepatan tanah. Secara umum percepatan tanah akan semakin mengecil seiring dengan bertambahnya jarak dari sumber gempa ke lokasi yang ditinjau (Ismul Hadi & Kirbani Sri Brotopuspito, 2015).

Sudah menjadi suatu hal yang sangat penting untuk mengetahui efek perubahan parameter dan geometri megathrust terhadap peta gempa. Perubahan yang dimaksudkan sudah termasuk seberapa besar perubahan nilai parameter dan pergeseran geometri sumber gempa megathrust yang terjadi. Oleh karena itu, penelitian tentang perubahan nilai parameter, pergeseran geometri, dan efeknya terhadap percepatan tanah puncak (PGA) khususnya di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta penting untuk dilakukan.

Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

PGA merupakan parameter penting yang dapat memberikan gambaran besaran gerakan tanah (Pawirodikromo, 2012), dengan mengetahui nilai PGA maka dapat diidentifikasi tingkat risiko suatu wilayah. Penentuan nilai PGA pada penelitian ini menggunakan metode PSHA. Metode PSHA merupakan metode yang paling umum digunakan saat ini dalam memprediksi gerakan tanah, karena memiliki beberapa kelebihan dari metode sebelumnya yaitu metode *Deterministic Seismic Hazard Analysis* (DSHA) (Irsyam et al., 2010). Analisis gerakan tanah dengan menggunakan metode PSHA akan memperhitungkan berbagai macam skenario pergerakan tanah yang akan terjadi (Asrurifak et al., 2010). Dengan menggunakan metode PSHA, ketidakpastian dalam penggunaan parameter-parameter sumber gempa, persamaan *ground motion prediction equations* (GMPE), *recurrence model*, dan *reccurence rate* dapat diatasi dengan menerapkan model *logic tree* (Pawirodikromo, 2018). Pada PSHA akan melibatkan banyak persamaan-persamaan yang harus diperhitungkan, tetapi karena keterbatasan tempat maka hanya persamaan probabilitas total yang disajikan yaitu:

$$P_x(x) = \int_M \int_R P(X > x | m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (1)$$

Dimana, $P_x(x)$ adalah probabilitas total dari suatu gempa yang menghasilkan percepatan puncak $X > x$, magnitude M , jarak R selama rentang waktu yang ditinjau. $P(X > x | m, r)$ merupakan probabilitas sebuah gempa dengan magnitude M pada jarak R yang memberikan percepatan maksimum X di lokasi lebih tinggi dari x . f_M merupakan fungsi probabilitas magnitude. dan f_R adalah fungsi probabilitas jarak.

METODE PENELITIAN

Identifikasi Sumber Gempa Potensial

Langkah awal yang dilakukan dalam analisis metode PSHA adalah menentukan sumber-sumber gempa potensial terhadap lokasi tinjauan. Lokasi yang dijadikan objek dalam penelitian ini adalah Provinsi D.I. Yogyakarta karena provinsi tersebut merupakan salah satu wilayah yang pernah terjadi gempa besar dan terdapat banyak korban jiwa. Sumber gempa yang diperhitungkan dalam penelitian ini mencakup radius 500 km dari batas administrasi D.I.Yogyakarta. Dari radius tersebut terdapat sumber gempa subduksi dan patahan. Karena keterbatasan waktu dan tenaga maka pada penelitian ini sumber gempa yang ditinjau hanya sumber gempa Megathrust saja.

Penentuan Parameter Seismik

Parameter seismik yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada parameter seismik hasil penelitian terdahulu yaitu hasil studi dari tim gempa Nasional seperti yang disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Selain dari parameter seismik, dalam analisis PSHA juga diperlukan sudut penunjaman dengan membuat potongan melintang pada distribusi kejadian gempa menggunakan software ZMAP (Wiemer, 2001).

Perhitungan Percepatan Tanah dengan Metode PSHA

Penentuan nilai percepatan tanah pada analisis PSHA (Pers. 1) digunakan bantuan *software Seismik Risk Model* (Makrup, 2009). Analisis PSHA menggunakan SR-Model membutuhkan beberapa parameter input sebagai berikut:

- a. Koordinat dan kedalaman sumber gempa telah didapatkan pada tahap identifikasi sumber gempa potensial.

- b. Parameter sumber gempa yang sebelumnya didapatkan pada sub-bab 2.2, kemudian dilakukan analisis lebih lanjut dengan persamaan Gutenberg-Richter di bawah ini (Makrup, 2013).

$$\log(\lambda m) = a - bm \quad (2)$$

dirubah menjadi bentuk fungsi,

$$\lambda m = 10a - \beta m \quad (3)$$

dengan λ_m adalah kejadian gempa per tahun, m adalah magnitudo, dan a dan b adalah konstanta.

- c. Persamaan *Ground Motion Prediction Equations* (GMPE)
d. Sudut penujuman yang sebelumnya sudah diperoleh pada subbab 2.2
e. Penginputan bobot *logic tree*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sumber Gempa Megathrust Potensial

Segmen sumber gempa megathrust potensial yang diperhitungkan pada analisis PHSA di Provinsi D.I.Yogyakarta disajikan pada Tabel 1 dan 2. Segmen sumber gempa pada Tabel 1 merupakan segmen sumber gempa yang dirilis pada tahun 2010 yang masuk dalam radius 500 km dari batas administrasi D.I.Y kemudian begitu juga sumber gempa yang disajikan pada Tabel 2 merupakan segmen sumber gempa megathrust terbaru yang belum lama dipublish oleh tim studi gempa nasional (PuSGeN, 2017).

Tabel 1. Segmen megathrust

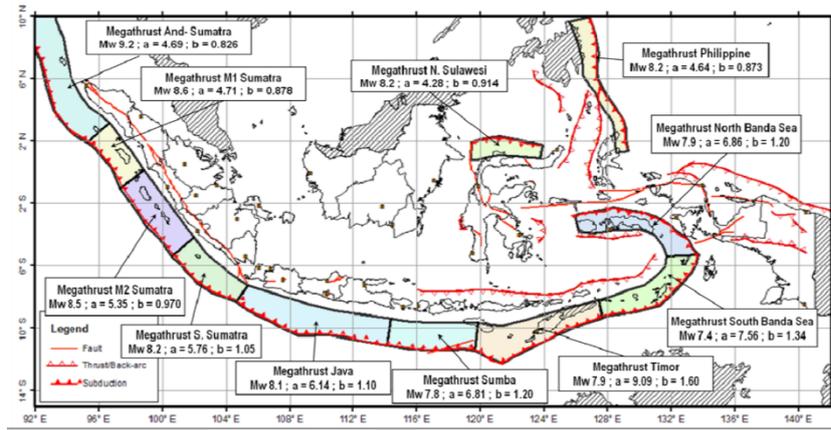
No	Segmen Megathrust
1	Sumatera
2	Java
3	Sumba

Tabel 2. Segmen megathrust PGN 2017

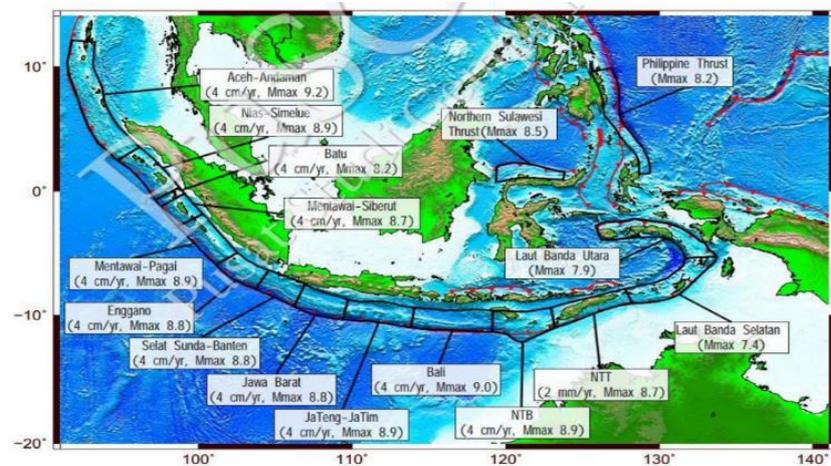
No	Segmen Megathrust
1	Eanggano
2	Selat Sunda-Banten
3	Jawa Barat
4	Jateng – Jatim
5	Bali

Perubahan Geometri Sumber Gempa Megathrust

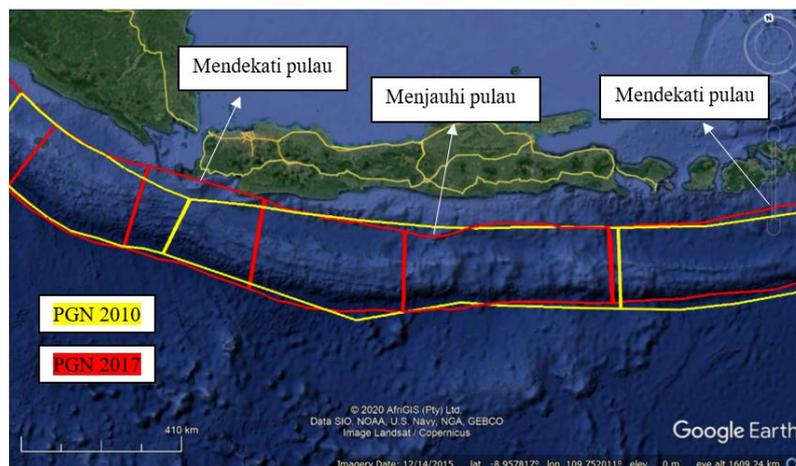
Peta sumber gempa subduksi yang dirilis oleh tim Pusat Studi Gempa Nasional 2017 (Gambar 1) terdapat perbedaan bentuk geometri dan jumlah segmen jika dibandingkan dengan peta sumber gempa 2010 (Gambar 2). Perubahan ini terjadi dikarenakan adanya perkembangan instalasi data GPS yang cukup banyak setelah tahun 2010 (PuSGeN, 2017). Selain dari penambahan instalasi data GPS, juga terdapat beberapa hasil penelitian terbaru tentang perkembangan sumber gempa subduksi di Jawa. Berdasarkan alasan tersebutlah segmen megathrust di Jawa yang awalnya hanya terdiri satu segmen pada peta gempa 2010, kemudian pada peta gempa 2017 terbagi menjadi 3 segmen yaitu Segmen Selat Sunda-Banten, Segmen Jawa Barat, dan Segmen Jawa Tengah-Jawa Timur. Selain adanya perbedaan jumlah segmen, bentuk geometri dari sumber gempa subduksi juga terjadi perubahan dimana ada segmen bergerak menjauhi pulau Jawa dan ada juga segmen yang bergerak mendekati seperti yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 1. Segmen megathrust peta gempa 2010 (Irsyam et al., 2010)



Gambar 2. Segmen megathrust peta gempa 2017 (PuSGeN, 2017)



Gambar 3. Overlay segment megathrust

Perubahan Parameter Seismik pada Sumber Gempa Megathrust

Perubahan yang terdapat dalam proses pembuatan peta gempa 2017 tidak hanya pada geometri sumber gempa, tetapi juga terjadi perubahan penggunaan parameter seismik terutama di pulau Jawa. Seperti yang telah di jelaskan di atas bahwa jumlah zona segmen megathrust yang pada tahun 2010 yang terdiri dari 1 segmen kemudian pada tahun 2017 dibagi menjadi 3 segmen. Akibat dari perubahan jumlah segmen ini menyebabkan terjadi penurunan frekuensi kejadian gempa sehingga nilai parameter-parameter seismiknya juga akan terjadi penurunan. Perbedaan penggunaan parameter seismik dalam proses pembuatan peta gempa 2010 dan 2017 dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Parameter seismik peta gempa 2010 (Irsyam et al., 2010)

Segmen	b	β	a	α	Mmin	Mmax	ν
Sumatera	1,05	2,42	5,76	13,27	5	8,2	3,24
Java	1,1	2,53	6,14	14,14	5	8,1	4,37
Sumba	1,2	2,76	6,81	15,68	5	7,8	6,46

Tabel 4. Parameter seismik peta gempa 2017 (PuSGeN, 2017)

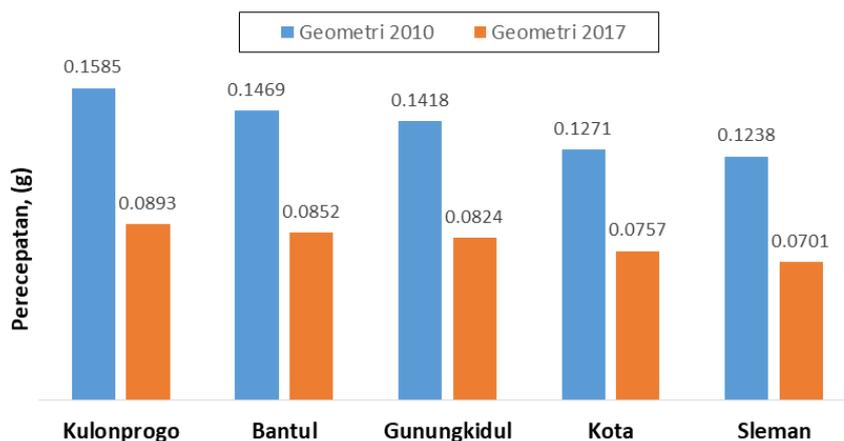
Segmen	b	β	a	α	Mmin	Mmax	ν
Enggano	1,05	2,42	5,57	12,38	5	8,8	2,09
Selat Sunda-Benten	1,15	2,65	5,99	13,79	5	8,8	1,74
Jawa Barat	1,08	2,49	5,55	12,78	5	8,8	1,41
Jateng-Jatim	1,08	2,49	5,63	12,97	5	8,9	1,70
Bali	1,11	2,56	5,63	12,97	5	9	1,2

Warna-warna yang terdapat pada segmen megathrust pada kedua tabel di atas menunjukkan kesamaan posisi atau letak segmen. Segmen yang berwarna coklat merupakan segmen megathrust yang berada di Pulau Sumatera, kemudian segmen yang berwarna hijau merupakan segmen megathrust di pulau Jawa, dan yang terakhir segmen berwarna kuning merupakan segmen megathrust di Pulau Bali.

Frekuensi kejadian gempa dan nilai *rate* (ν) yang terdapat pada parameter seismik 2017 tepatnya pada Tabel 4, mengalami penurunan dibandingkan parameter seismik 2010. Penurunan nilai parameter seismik ini berhubungan dengan penambahan jumlah segmen seperti yang dijelaskan sebelumnya sehingga distribusi kerjadian gempanya juga ikut terbagi dan menjadi lebih kecil. Meskipun demikian, tidak semua parameter seismik pada peta gempa 2017 mengalami penurunan. Nilai Magnitude maksimum pada setiap zona megathrust yang ditinjau, secara keseluruhan mengalami kenaikan.

Pengaruh Perubahan Geometri Sumber Gempa Megathrust

Perbedaan geometri sumber gempa akan berpengaruh terhadap nilai percepatan tanah pada lokasi tinjauan. Lokasi yang memiliki jarak lebih dekat dengan sumber gempa akan memiliki nilai percepatan yang lebih besar dan begitu juga sebaliknya. Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa terjadi perubahan geometri sumber gempa megathrust dimana pada selatan pulau jawa terdapat segmen yang bergeser mendekati dan menjauhi pulau jawa. Berdasarkan perubahan geometri sumber gempa tersebut dilakukan analisis lebih lanjut di Provinsi D.I. Yogyakarta dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.

**Gambar 4. Percepatan tanah di batuan dasar akibat perubahan geometri**

Hasil analisis yang disajikan pada Gambar 4 menunjukkan bahwa penggunaan geometri sumber gempa megathrust 2010 dalam analisis PSHA, memiliki nilai percepatan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan penggunaan geometri sumber gempa megathrust 2017. Penurunan nilai percepatan yang terjadi saat penggunaan geometri sumber gempa megathrust 2017 merata disemua

kabupaten/kota di D.I.Yogyakarta. Informasi lebih lanjut terkait perbedaan antara nilai percepatan dari input geometri 2010 dan geometri 2017 disajikan pada Tabel 5.

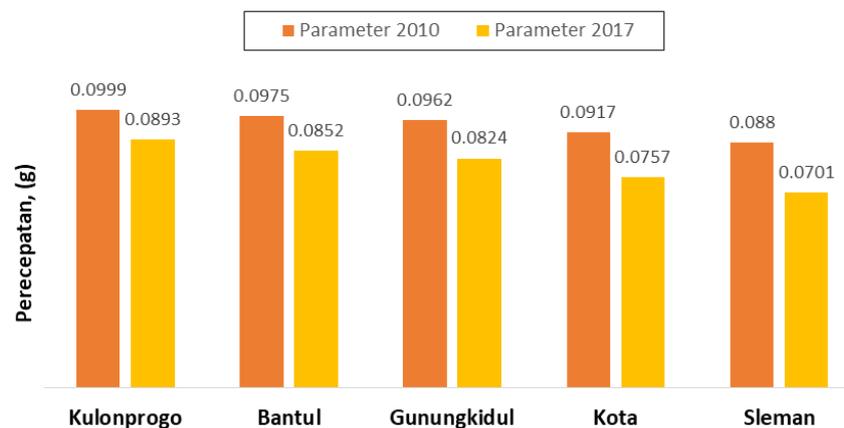
Tabel 5. Perbedaan nilai percepatan per kabupaten/kota

Kabupaten/Kota	Acc (g) 2010	Acc (g) 2017	Selisih Δ
Kulon Progo	0.1585	0.0824	48.0%
Bantul	0.1469	0.0852	42.0%
Gunung Kidul	0.1418	0.0893	37.0%
Yogyakarta	0.1271	0.0757	40.4%
Sleman	0.1238	0.0701	43.4%

Penurunan nilai percepatan yang paling terbesar yang disajikan pada Tabel 5 terdapat pada Kabupaten Kulon Progo dengan penurunan sebesar 48% dari percepatan dengan geometri sebelumnya. Penurunan yang terjadi pada Kabupaten Kulon Progo diakibatkan oleh pergeseran geometri sumber gempa 2017 yang bergerak menjauhi daratan seperti yang tampak pada hasil *overlay* pada Gambar 3.

Pengaruh Perubahan Parameter Sumber Gempa Megathrust

Terjadinya perubahan segmen megathrust di pulau Jawa yang awalnya hanya terdiri dari 1 segmen kemudian berubah dibagi menjadi 3 segmen, menyebabkan terjadi penurunan frekuensi kejadian gempa dan penurunan nilai parameter seismik. Penurunan parameter tersebut akan berpengaruh terhadap nilai percepatan tanah.



Gambar 5. Pengaruh perubahan parameter seismik

Hasil yang disajikan pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa nilai percepatan pada kabupaten/kota yang dianalisis menggunakan parameter seismik 2010 memiliki nilai percepatan lebih tinggi dari pada yang dianalisis menggunakan parameter 2017. Penurunan ini tidak terlepas dari penurunan nilai frekuensi kejadian gempa setiap segmen megathrust di sekitar pulau Jawa akibat segmen yang dibagi menjadi lebih kecil dari sebelumnya. Informasi lebih lanjut perbedaan antara nilai percepatan dari input geometri 2010 dan geometri 2017 disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbedaan percepatan berdasarkan Parameter seismik

Kabupaten/Kota	Acc (g)	Acc (g)	Selisih
	2010	2017	Δ
Kulon Progo	0.0824	0.0824	17.5%
Bantul	0.0852	0.0852	12.6%
Gunung Kidul	0.0893	0.0893	7.2%
Yogyakarta	0.0757	0.0757	17.4%
Sleman	0.0701	0.0701	20.3%

Penurunan nilai percepatan yang terjadi akibat perubahan parameter seismik tidak terlalu besar seperti yang terjadi pada pengaruh akibat perubahan geometri sumber gempa. Persentase penurunan maksimum yang terjadi yaitu sebesar 20.3% di Kabupaten Sleman yang letak lokasinya berada pada jarak yang lebih jauh dari sumber gempa dibandingkan dengan 4 kabupaten/kota lainnya.

Terjadinya penurunan nilai percepatan pada penggunaan parameter seismik 2017 dikarenakan terjadinya perubahan jumlah segmen megathrust di pulau Jawa yang awalnya hanya terdiri dari 1 segmen kemudian berubah dibagi menjadi 3 segmen, menyebabkan terjadi penurunan frekuensi kejadian gempa dan penurunan nilai parameter seismik. Penurunan nilai parameter tersebut menyebabkan terjadinya penurunan nilai percepatan.

Indeks Risiko Gempa Akibat Sumber Gempa Megathrust

Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) dalam Perka BNPB No. 02 Tahun 2012 telah merumuskan indeks risiko gempa berdasarkan nilai percepatan seperti yang disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Komponen indeks ancaman bencana (BNPB, 2012)

Bencana	Indikator	Kelas Indeks		
		Rendah	Sedang	Tinggi
Gempa Bumi	Peta Bahaya	PGA	PGA (0.25	PGA
	Gempa Bumi	(< 0.25)	- 0.7)	(> 0.7)

Berdasarkan hasil analisis PSHA, nilai percepatan maksimum yang diperoleh di Yogyakarta dengan mempertimbangkan efek dari sumber gempa megathrust adalah ± 0.1 g. Jika mengacu pada tabel diatas maka Provinsi D.I.Yogyakarta masuk ke dalam kelas indeks Rendah. Meskipun demikian, pada kenyataannya kejadian gempa merusak tidak hanya terjadi akibat sumber gempa subduksi, tetapi lebih didominasi oleh sumber gempa patahan seperti yang terjadi di Yogyakarta pada tahun 2006, dimana sumber gempa berasal dari patahan opak dan banyak menelak korban jiwa.

Selain dari itu, jika mengacu pada Peta Gempa 2017 prediksi nilai percepatan puncak di batuan dasar di D.I.Yogyakarta berkisar 0.34 g. Nilai tersebut jauh berbeda dengan nilai yang diperoleh pada penelitian ini, hal itu dikarenakan sumber gempa yang diperhitungkan dalam penyusunan peta tidak hanya sumber gempa subduksi tetapi juga sumber gempa patahan. Dari perbandingan hasil tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa kontribusi sumber gempa patahan di Yogyakarta lebih mendominasi dibandingkan dengan sumber gempa subduksi. Oleh karena itu diperlukan evaluasi lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh perubahan dan penambahan sumber gempa patahan.

Sumber gempa patahan yang dirilis oleh PusGen 2017 menunjukkan bahwa adanya penambahan jumlah segment patahan aktif yang cukup signifikan. Sebelumnya pada PGN 2010, sumber patahan di Pulau Jawa terdiri atas 10 sesar aktif, tapi pada PGN 2017 sumber gempa diketahui bertambah menjadi 37 patahan aktif (PuSGeN, 2017). Oleh karena itu, diperlukan evaluasi lebih lanjut untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan segmen patahan aktif di Provinsi D.I.Yogyakarta mengingat prediksi nilai percepatan tanah di provinsi tersebut didominasi oleh sumber gempa patahan.

KESIMPULAN

- Perubahan geometri sumber gempa megathrust pada peta gempa 2017 menyebabkan terjadinya penurunan nilai percepatan tanah di D.I.Yogyakarta. Penurunan nilai percepatan tersebut disebabkan karena terjadinya pergeseran zona megathrust dari peta gempa sebelumnya sehingga jarak dari site ke sumber gempa menjadi ikut berubah, dalam hal ini jaraknya menjadi lebih jauh.

- b. Perubahan jumlah segmen megathrust Jawa yang awalnya terdiri 1 segmen kemudian berubah menjadi 3 segmen, menyebabkan terjadi penurunan frekuensi kejadian gempa dan penurunan nilai parameter seismik. Penurunan nilai parameter seismik tersebut juga menyebabkan terjadinya penurunan nilai percepatan.
- c. Diperlukan evaluasi lebih lanjut dengan mempertimbangkan sumber gempa patahan untuk menentukan indeks risiko di Yogyakarta, karena pengaruh nilai percepatan yang diberikan oleh sumber gempa megathrust cukup kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Asrurifak, M., Budiono, B., Triyoso, W., & Hendriyawan. (2010). Development of Spectral Hazard Map for Indonesia with a Return Period of 2500 Years using Probabilistic Method. *Civil Engineering Dimension*, 12(1), 52–62.
- BNPB. (2012). *Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana (Perka BNPB No.02 Tahun 2012)*.
- Irsyam, M., Sengara, W., Aldiarnar, F., & Widiyantoro, S. (2010). *Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010*. Kementerian Pekerjaan Umum.
- Ismul Hadi, A., & Kirbani Sri Brotopuspito, D. (2015). Pemetaan Percepatan Getaran Tanah Maksimum Menggunakan Pendekatan Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) di Kabupaten Kepahiang Provinsi Bengkulu. In *BERKALA FISIKA* (Vol. 18, Issue 3).
- Makrup, L. (2009). *Pengembangan Peta Deagregasi Hazard untuk Indonesia Melalui Pembuatan Software dengan Pemodelan Sumber Gempa Tiga Dimensi*. Institut Teknologi Bandung.
- Makrup, L. (2013). *Seismic Hazard untuk Indonesia (Edisi Pertama)*. Graha Ilmu.
- Pawirodikromo, W. (2012). *Seismology Teknik & Rekayasa Kegempaan (Cetakan Pertama)*. Pustaka Pelajar.
- Pawirodikromo, W. (2018). The estimated PGA map of the Mw6.4 2006 yogyakarta Indonesia earthquake, constructed from the modified mercalli intensity imm. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 51(2), 92–104.
- PuSGeN. (2017). *Peta Sumber Daya dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pustlitbang PUPR.
- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373–382.