



Kajian Pemilihan Koefisien Situs pada Perhitungan Spektra Percepatan Gerakan Tanah di Permukaan

*Windu Partono¹, Masyhur Irsyam², I. Wayan Sengara², Muhammad Asrurifak³

¹Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang,

²Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung,

³Pusat Penelitian Mitigasi Bencana, Institut Teknologi Bandung, Bandung

*windupartono@lecturer.undip.ac.id

Received: 30 April 2019 Revised: 3 Juli 2019 Accepted: 5 Juli 2019

Abstract

SNI 1726:2012 states that surface spectral accelerations S_{MS} (0.2 second) and S_{MI} (1 second) can be calculated by multiplying site factors F_a (0.2 second) and F_v (1 second) with spectral accelerations S_S (0.2 second) dan S_I (1 second). All site factors used by SNI 1726:2012 are adopted from ASCE/SEI 7-10. In 2013 Stewart and Seyhan proposed new and different site factors compared to ASCE/SEI 7-10. These site factors are then used for developing ASCE/SEI 7-16 with minor improvement for site class SE (soft soil). ASCE/SEI 7-16 states that the site factors for site class SE with S_S greater than $1g$ or S_I greater than $0.2g$, shall be calculated using Site Specific Analysis (SSA). The SSA method used for calculating site factor is difficult for ASCE/SEI 7-16 to be implemented in Indonesia. This paper describes the result of S_{MS} and S_{MI} study at five cities (Jakarta, Bandung, Semarang, Yogyakarta and Surabaya) for site class SC, SD and SE using site factors proposed by Stewart and Seyhan and site factor SNI 1726:2012. The S_{MS} and S_{MI} at five cities calculated using site factors proposed by Stewart and Seyhan are $\pm 15\%$ differences compared to S_{MS} and S_{MI} calculated using SNI 1726:2012 site factors.

Keywords: Site factor, surface spectral acceleration, site specific analysis

Abstrak

SNI 1726:2012 menjelaskan bahwa spektra percepatan permukaan S_{MS} (0,2 detik) dan S_{MI} (1 detik) dapat dihitung dengan mengalikan koefisien situs F_a (0,2 detik) dan F_v (1 detik) dengan spektra percepatan S_S (0,2 detik) dan S_I (1 detik). Koefisien situs yang digunakan oleh SNI 1726:2012 diadopsi dari ASCE/SEI 7-10. Pada tahun 2013 Stewart dan Seyhan menyampaikan usulan koefisien situs baru yang berbeda dengan yang digunakan pada ASCE/SEI 7-10. Koefisien situs tersebut kemudian digunakan pada pengembangan ASCE/SEI 7-16 dengan sedikit perubahan pada situs tanah SE. ASCE/SEI 7-16 menyampaikan bahwa untuk kelas situs SE jika nilai S_S lebih besar dari $1,0g$ atau nilai S_I lebih besar dari $0,2g$ maka koefisien situs harus ditentukan dengan metode Site Specific Analysis (SSA). Penggunaan metode SSA menyebabkan ASCE/SEI 7-16 sulit diterapkan di Indonesia. Tulisan ini menyampaikan hasil kajian penggunaan koefisien situs dari Stewart dan Seyhan dan koefisien situs SNI 1726:2012 pada perhitungan spektra percepatan permukaan S_{MS} dan S_{MI} pada lima kota (Jakarta, Bandung, Semarang, Yogyakarta dan Surabaya) untuk situs tanah SC, SD dan SE. Hasil kajian menunjukkan S_{MS} dan S_{MI} yang dihitung pada lima kota dengan koefisien situs dari Stewart dan Seyhan berbeda $\pm 15\%$ dibandingkan jika menggunakan koefisien situs SNI 1726:2012.

Kata kunci: Koefisien situs, spektra percepatan permukaan, site specific analysis

Pendahuluan

Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia telah terbit pada tahun 2017. Peta tersebut merupakan pengembangan Peta Sumber Gempa Tahun 2010. Penelitian dan pengembangan Peta Sumber dan

Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017 dilakukan oleh Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN, 2017). Perubahan terbesar dari peta gempa tahun 2017 terhadap peta gempa tahun 2010 adalah bertambahnya jumlah sumber gempa terutama sumber gempa sesar aktif yang tersebar di seluruh

wilayah Indonesia. Sebagai contoh jalur sesar aktif di Pulau Jawa yang terdeteksi menurut hasil penelitian pada tahun 2010 berjumlah 5 (Partono *et al.*, 2015).

Berdasarkan hasil penelitian terbaru yang tertuang pada peta gempa tahun 2017 jumlah sesar aktif yang terdeteksi di Pulau Jawa berubah menjadi 31 jalur. Berbeda dengan sumber gempa sesar aktif, sumber gempa subduksi tidak mengalami perubahan secara signifikan. Dampak terpenting dari hasil penelitian dan pengembangan Peta Gempa tahun 2017 adalah evaluasi terhadap SNI 1726:2012 (Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung). Informasi penting yang perlu dievaluasi adalah peta MCE_R (*risk-targeted maximum considered earthquake*) di batuan dasar (SB) baik untuk periode pendek (S_s) dan periode panjang (S_1).

Nilai MCE_R , S_s dan S_1 sangat diperlukan pada perhitungan spektra percepatan dipermukaan (S_{MS} dan S_{MI}) maupun spektra percepatan desain (S_{DS} dan S_{DI}). Perhitungan S_{MS} dan S_{MI} membutuhkan informasi tentang nilai atau koefisien situs F_a (periode pendek/0,2 detik) dan F_v (periode panjang/1 detik). Koefisien situs F_a dan F_v yang tercantum pada SNI 1726:2012 mengadopsi secara langsung dari peraturan ASCE/SEI 07-10 (*minimum design loads for buildings and other structures*). ASCE/SEI 07-10 telah berkembang menjadi ASCE/SEI 7-16.

Pengembangan ASCE/SEI 7-16 memberikan dampak langsung terhadap pengembangan SNI 1726:2012. Salah satu dampak terpenting dari pengembangan ASCE/SEI 7-16 adalah cara perhitungan koefisien situs F_a dan F_v terutama untuk situs tanah SE (tanah lunak). Untuk situs tanah SE dengan nilai S_s minimum 1,0 g, nilai F_a tidak dapat dihitung menggunakan tabel koefisien situs tetapi harus dihitung dengan pendekatan *metode respons spesifik-situs (site specific*

analysis/SSA). Pendekatan yang sama juga harus dilakukan pada perhitungan koefisien situs F_v pada situs SE jika nilai S_1 minimum 0,2 g.

Persoalan penting yang harus dihadapi pada pengembangan SNI 1726:2012 sekiranya akan mengabdopsi ASCE/SEI 7-16 adalah penggunaan metode SSA pada perhitungan koefisien situs F_a dan F_v untuk kelas situs SE. SSA sangat sulit dilaksanakan oleh para ahli dibidang Teknik Sipil karena membutuhkan data elevasi batuan dasar (*bedrock*), data dinamis tanah (kecepatan rambat gelombang geser/ V_s , *density* tanah/ γ , modulus geser/ G dan *damping ratio*/ ξ) setiap lapisan tanah sampai ke permukaan (Shiuly *et al.*, 2017; Irsyam *et al.*, 2007).

Dua peneliti Stewart & Seyhan (2013) yang tergabung pada *Pacific Earthquake Engineering Research* (PEER) memperkenalkan koefisien situs yang berbeda dengan koefisien situs yang digunakan pada ASCE/SEI 07-10. Koefisien situs tersebut kemudian digunakan pada ASCE/SEI 7-16. Tabel 1 dan 2 menunjukkan koefisien situs F_a dan F_v hasil penelitian Stewart & Seyhan (2013). Koefisien situs SA (Batuan keras), SB (batuan), SC (tanah keras) dan SD (tanah sedang) yang digunakan pada ASCE/SEI 7-16 sama dengan hasil penelitian Stewart & Seyhan (2013). ASCE/SEI 7-16 menggunakan cara berbeda untuk perhitungan koefisien situs tanah SE. Tabel 3 dan 4 menunjukkan cara perhitungan koefisien situs yang digunakan ASCE/SEI 7-16 untuk situs tanah SE. Pada kedua tabel tersebut terlihat bahwa metode SSA harus digunakan untuk mendapatkan nilai koefisien situs pada situs tanah SE jika nilai S_s minimum 1,0 g atau nilai S_1 minimum 0,2 g. Tulisan ini akan menyajikan hasil kajian perhitungan spektra percepatan permukaan S_{MS} dan S_{MI} pada lima kota besar di Pulau Jawa (Jakarta, Bandung, Semarang, Yogyakarta dan Surabaya) dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013).

Tabel 1. Koefisien situs F_a (Stewart & Seyhan, 2013)

Situs	$S_s < 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s > 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8

Tabel 2. Koefisien situs F_v (Stewart & Seyhan, 2013)

Situs	$S_1 < 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 > 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,1	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0

Tabel 3. Koefisien situs Fa (ASCE/SEI 7-16)

Situs	S _s <0,25	S _s =0,5	S _s =0,75	S _s =1,0	S _s =1,25	S _s >1,5
SE	2,4	1,7	1,3	SSA	SSA	SSA

Tabel 4. Koefisien situs Fv (ASCE/SEI 7-16)

Situs	S ₁ <0,1	S ₁ =0,2	S ₁ =0,3	S ₁ =0,4	S ₁ =0,5	S ₁ >0,6
SE	4,1	SSA	SSA	SSA	SSA	SSA

Hasil perhitungan nilai S_{MS} dan S_{MI} pada kelima kota tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai S_{MS} dan S_{MI} yang dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari SNI 1726:2012. Pada tulisan ini juga disampaikan tahapan perhitungan S_{MS} dan S_{MI} berdasarkan kombinasi data *hazard* gempa probabilistik dan deterministik untuk mendapatkan nilai MCE_R S_s dan S₁.

Metode

Analisis untuk mendapatkan nilai spektra percepatan tanah dengan menggunakan kombinasi *hazard* gempa probabilistik (*probabilistic seismic hazard analysis/PSHA*) dan deterministik (*deterministic seismic hazard analysis/DSHA*) pertama kali diperkenalkan oleh Leyendecker *et al.* (2000). Perhitungan percepatan gerakan tanah di batuan dasar pada satu titik dengan pendekatan PSHA dilakukan dengan menggunakan metode *total probability theorem* dari McGuire (1995).

Persamaan 1 menunjukkan rumus dasar perhitungan spektra percepatan dengan pendekatan probabilistik. Nilai “λa*” pada Persamaan 1 menunjukkan total probabilitas terlampaui nilai percepatan “a*”. P_m(m) dan P_r(r) adalah probabilitas fungsi distribusi magnitudo “m” dan jarak “r” sedangkan “v” adalah nilai tengah kecepatan (antara batas bawah dan batas atas). Untuk perhitungan PSHA digunakan pendekatan probabilitas 2% terlampaui selama 50 tahun atau periode ulang gempa 2500 tahun. Analisis deterministik DSHA untuk setiap titik pengamatan dihitung dengan menggunakan nilai *magnitudo* gempa terbesar atau magnitudo rencana dari setiap sumber gempa dan jarak terdekat titik pengamatan terhadap setiap sumber gempa.

$$\lambda a^* = v \int_m \int_r (P_a > a^* | m, r) P_m(m) P_r(r) dr dm \quad (1)$$

Untuk menghitung percepatan gerakan tanah di batuan dasar dengan pendekatan PSHA dan DSHA digunakan beberapa fungsi atenuasi atau GMPE (*ground motion prediction equation*). GMPE yang digunakan untuk perhitungan spektra percepatan di

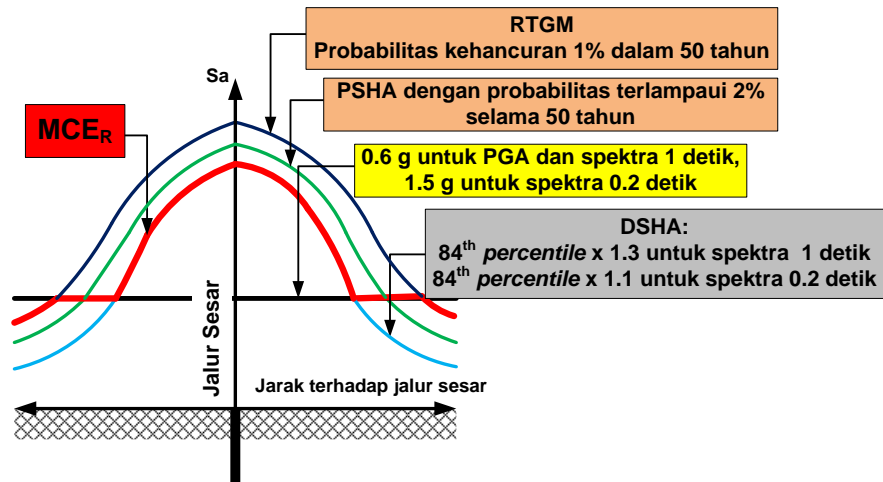
batuan dasar dikelompokkan menjadi empat kelompok model yaitu *shallow crustal fault*, *shallow background*, subduksi *megathrust* dan subduksi *Benioff*. GMPE yang digunakan untuk model sumber gempa *shallow crustal fault* sama dengan model *shallow background* yaitu Boore & Atkinson (2008), Campbell & Bozorgnia (2008) dan Chiou & Youngs (2008). GMPE untuk model sumber gempa subduksi *megathrust* adalah Abrahamson *et al.* (2016), Zhao *et al.* (2006) dan Atkinson & Boore (2003). Sedangkan untuk model sumber gempa *benioff* menggunakan GMPE dari Youngs *et al.* (1997) dan Atkinson & Boore (2003).

Perhitungan kombinasi PSHA dan DSHA dilakukan untuk mendapatkan nilai MCE_R dengan menggabungkan analisis *risk targeted ground motion* (RTGM) dari PSHA (dengan target probabilitas keruntuhan bangunan 1% selama 50 tahun) dengan 84th *percentile* dari DSHA. Pada perhitungan RTGM digunakan nilai logaritma standard deviasi “β” sebesar 0,65 dan nilai faktor arah gempa (*direction factor*) 1,1 untuk spektra 0,2 detik dan 1,3 untuk spektra 1 detik. Pada pembuatan SNI 1726:2012, nilai “β” yang digunakan adalah sebesar 0,7 (Sengara *et al.*, 2015) dan *direction factor* spektra 0,2 detik dan 1 detik secara berturut-turut adalah 1,05 dan 1,15.

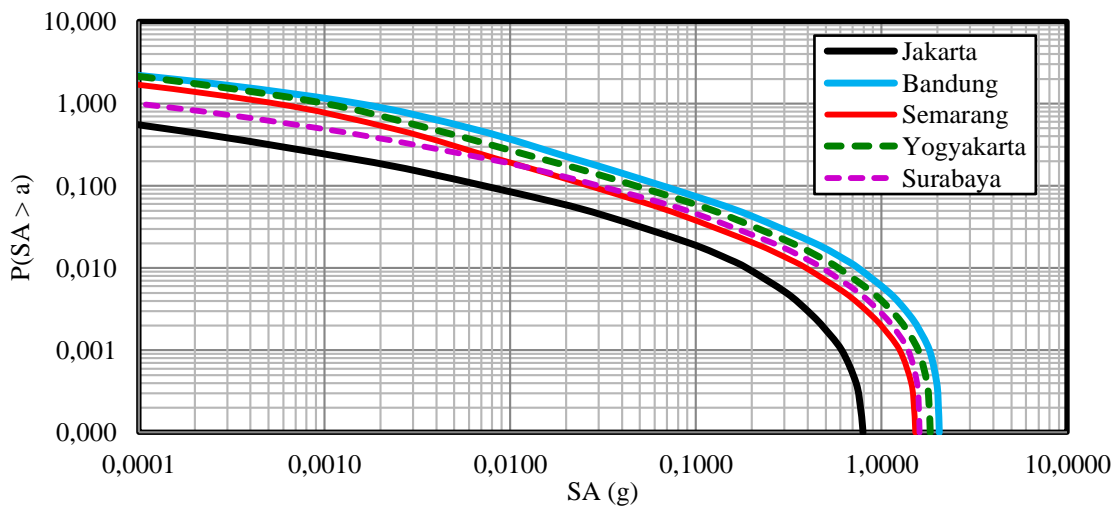
Sidi (2011) menyarankan penggunaan nilai “β” untuk Indonesia bervariasi antara 0,65 sampai 0,7. Persamaan 2 dan 3 menunjukkan rumus perhitungan RTGM (Luco *et al.*, 2007). Nilai “c” pada persamaan tersebut merupakan nilai percepatan sedangkan “c_{10%}” adalah nilai 10th *percentile* kapasitas keruntuhan bangunan. Gambar 1 menunjukkan skema perhitungan MCE_R yang merupakan kombinasi dari hasil perhitungan RTGM dan DSHA dan dikembangkan dari metode yang diperkenalkan oleh Leyendecker *et al.* (2000).

$$f_r(c) = \frac{1}{c\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\ln c - (\ln c_{10\%} + 1.28\beta)^2}{2\beta^2}\right] \quad (2)$$

$$P[\text{collaps}] = \int_0^{\infty} f_r(c) P[S > c] dc \quad (3)$$



Gambar 1. Skema perhitungan MCE_R



Gambar 2. Kurva *hazard* 0,2 detik untuk lima kota

Menurut SNI 1726:2012 dan ASCE/SEI 7-16 nilai spektra percepatan di permukaan tanah, S_{MS} dan S_{M1} , dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4 dan 5. S_S dan S_1 pada kedua persamaan tersebut merupakan nilai spektra percepatan periode pendek (0,2 detik) dan periode panjang (1 detik) hasil perhitungan spektra MCE_R .

$$S_{MS} = Fa * S_S \quad (4)$$

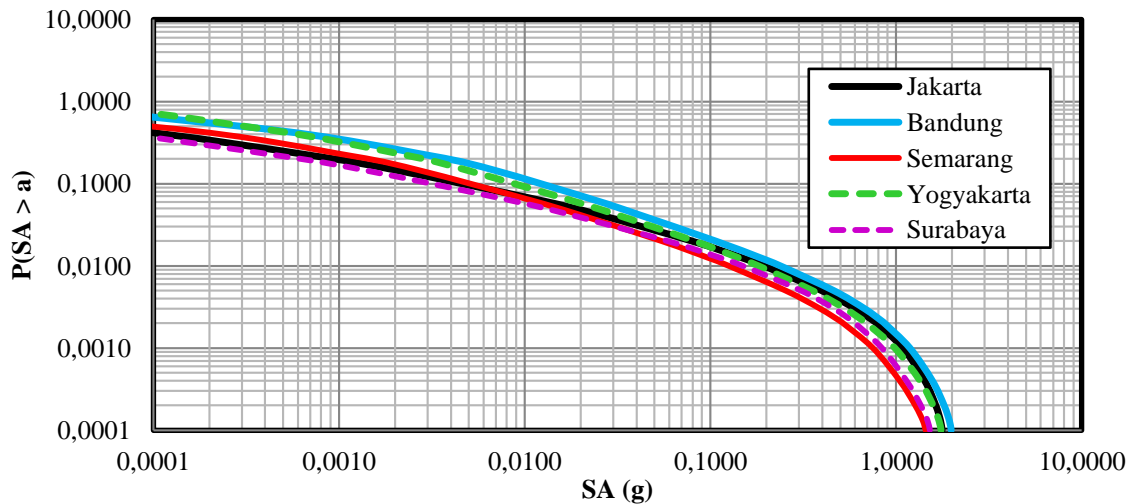
$$S_{M1} = FV * S_1 \quad (5)$$

Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis PSHA untuk lima kota besar di Pulau Jawa berbentuk kurva *hazard* gempa. Gambar 2 menunjukkan kurva *hazard* gempa untuk lima kota besar di Pulau Jawa untuk spektra 0,2 detik dan Gambar 3 menunjukkan kurva *hazard* gempa untuk spektra 1 detik. Dari kedua kurva *hazard* gempa

tersebut maka dapat dihitung nilai spektra 0,2 detik dan 1 detik dengan probabilitas 2% terlampaui selama 50 tahun atau periode ulang gempa 2.500 tahun. Tabel 5 menunjukkan spektra *hazard* gempa periode 0,2 detik dan 1 detik untuk lima kota besar. Data perhitungan PSHA diambil dari hasil perhitungan dan pembuatan peta *hazard* gempa tahun 2017. Peta *hazard* gempa tahun 2017 dihitung untuk seluruh wilayah Indonesia dengan koordinat (92°BT, 8°LU) sampai (142°BT, -12°LS) dengan interval 0,1° untuk kedua arah bujur timur (BT) dan lintang utara dan selatan (LU dan LS).

Karena posisi koordinat setiap kota tidak bertepatan atau tidak sama dengan koordinat data *hazard* gempa tahun 2017 maka data *hazard* gempa yang dipilih adalah data dari titik terdekat dengan koordinat kelima kota. Nilai spektra percepatan yang dihitung dengan pendekatan PSHA sebagaimana terlihat pada Tabel 5 dihitung dengan probabilitas terlampaui 2% selama 50 tahun.



Gambar 3. Kurva hazard 1 detik untuk lima kota

Nilai spektra percepatan dihitung dengan menggunakan kurva hazard gempa 0,2 detik dan 1 detik sebagaimana terlihat pada Gambar 2 dan Gambar 3. Koordinat lima kota besar menggunakan data yang sama dengan data pada SNI 1726:2012.

Tabel 5. Spektra percepatan PSHA di batuan dasar

Kota	Koordinat		Spektra PSHA	
	Bujur	Lintang	0,2 detik (g)	1 detik (g)
Jakarta	106,865	-6,175	0,798	0,402
Bandung	107,619	-6,917	1,286	0,562
Semarang	110,438	-7,005	0,998	0,433
Yogyakarta	110,350	-7,800	1,345	0,606
Surabaya	112,752	-7,257	0,717	0,334

Tabel 6. Spektra percepatan RTGM di batuan dasar

Kota	Koordinat		Spektra RTGM	
	Bujur	Lintang	0,2 detik (g)	1 detik (g)
Jakarta	106,865	-6,175	0,788	0,380
Bandung	107,619	-6,917	1,189	0,514
Semarang	110,438	-7,005	0,911	0,391
Yogyakarta	110,350	-7,800	1,238	0,538
Surabaya	112,752	-7,257	0,680	0,306

Tabel 6 menunjukkan hasil perhitungan RTGM 0,2 detik dan 1 detik pada lima kota dengan menggunakan target probabilitas keruntuhan bangunan 1% terlampaui selama 50 tahun dan nilai logaritma *standard deviasi* "β" sebesar 0,65. Pada perhitungan spektra RTGM digunakan nilai faktor arah gempa (*direction factor*) 1,1 untuk spektra 0,2 detik dan 1,3 untuk spektra 1 detik. Pemilihan ketiga nilai tersebut berbeda dengan yang

digunakan pada perhitungan RTGM untuk SNI 1726:2012.

Tabel 7. Spektra percepatan DSHA di batuan dasar

Kota	Koordinat		Spektra DSHA	
	Bujur	Lintang	0,2 detik (g)	1 detik (g)
Jakarta	106,865	-6,175	0,378	0,242
Bandung	107,619	-6,917	1,185	0,426
Semarang	110,438	-7,005	0,607	0,906
Yogyakarta	110,350	-7,800	1,147	0,301
Surabaya	112,752	-7,257	1,415	0,426

Tabel 7 menunjukkan hasil analisis hazard gempa deterministik (DSHA) pada lima kota. Hasil perhitungan DSHA merupakan penggabungan dari beberapa sumber gempa di sekitar lima kota besar dengan menggunakan magnitudo gempa maksimum sebagaimana telah digunakan pada perhitungan PSHA dan jarak sumber gempa terdekat. Nilai spektra percepatan DSHA pada Tabel 7 dihitung dengan menggunakan nilai 84th *percentile* dari nilai *mean* atau sebesar 1,8 lebih besar dari nilai *mean*. Nilai *direction factor* yang digunakan pada perhitungan DSHA untuk spektra 0,2 detik dan 1 detik yaitu masing-masing secara berurutan sebesar 1,1 dan 1,3.

Tabel 8 menunjukkan hasil analisis hazard gempa gabungan RTGM dan deterministik DSHA untuk mencari nilai spektra percepatan $MCE_R S_S$ dan $MCE_R S_1$. Percepatan $MCE_R S_S$ dan S_+ untuk selanjutnya digunakan untuk perhitungan spektra percepatan di permukaan. Spektra percepatan di permukaan dihitung dengan mengalikan nilai spektra $MCE_R S_S$ maupun $MCE_R S_1$ dengan koefisien situs F_a dan F_v masing-masing untuk spektra 0,2 detik dan 1 detik. Nilai spektra S_S dan S_1

sebagaimana terlihat pada tabel tersebut untuk selanjutnya digunakan untuk perhitungan spektra permukaan S_{MS} dan S_{M1} . Spektra S_{MS} dan S_{M1} dihitung dengan mengalikan nilai koefisien situs F_a dan F_v dengan nilai spektra S_s dan S_1 . Spektra permukaan S_{MS} dan S_{M1} dihitung dengan menggunakan dua model koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) dan SNI 1726:2012.

Tabel 8. Spektra MCE_R S_s dan S_1

Kota	Koordinat		Spektra MCE_R	
	Bujur	Lintang	S_s (g)	S_1 (g)
Jakarta	106,865	-6,175	0,774	0,377
Bandung	107,619	-6,917	1,155	0,503
Semarang	110,438	-7,005	0,839	0,365
Yogyakarta	110,350	-7,800	1,221	0,534
Surabaya	112,752	-7,257	0,708	0,313

Tabel 9 sampai 11 menunjukkan hasil perhitungan spektra percepatan di permukaan S_{MS} dan S_{M1} masing-masing untuk tiga situs tanah SC (tanah keras), SD (tanah sedang) dan SE (tanah lunak) hasil perkalian nilai koefisien situs dengan nilai MCE_R S_s dan S_1 . Perhitungan S_{MS} maupun S_{M1} sebagaimana terlihat pada ketiga tabel tersebut menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) dan koefisien situs dari SNI 1726:2012.

Dari hasil perhitungan nilai spektra permukaan S_{MS} dan S_{M1} sebagaimana terlihat pada Tabel 9 sampai 11, terlihat bahwa nilai S_{MS} untuk situs tanah SC dan SE dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart dan Seyhan (2013) lebih besar dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan menggunakan koefisien situs dari SNI 1726:2012. Pada situs tanah SD nilai S_{MS} yang dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) mempunyai nilai yang sama dengan nilai S_{MS} yang dihitung dengan menggunakan koefisien situs SNI 1726:2012.

Tabel 9. Spektra percepatan di permukaan S_{MS} dan S_{M1} dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) dan SNI 1726:2012 untuk tanah SC

Kota	Stewart & Seyhan (2013)		SNI 1726:2012	
	S_{MS} (g)	S_{M1} (g)	S_{MS} (g)	S_{M1} (g)
Jakarta	1,167	0,698	0,984	0,621
Bandung	1,386	0,748	1,155	0,665
Semarang	0,908	0,517	0,829	0,501
Yogyakarta	1,157	0,701	0,978	0,622
Surabaya	0,866	0,470	0,788	0,465

Hasil perhitungan S_{M1} untuk situs tanah SC dan SD sebagaimana terlihat pada Tabel 9 dan 10

menunjukkan nilai yang lebih besar jika dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) dibandingkan dengan menggunakan koefisien situs dari SNI 1726:2012. Kondisi sebaliknya terjadi pada kelas situs SE. sebagaimana terlihat pada Tabel 11. Hasil perhitungan S_{M1} untuk kelas situs SE yang dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) menunjukkan nilai yang lebih rendah jika dibandingkan dengan menggunakan koefisien situs dari SNI 1726:2012.

Tabel 10. Spektra percepatan di permukaan S_{MS} dan S_{M1} dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) dan SNI 1726:2012 untuk tanah SD

Kota	Stewart & Seyhan (2013)		SNI 1726:2012	
	S_{MS} (g)	S_{M1} (g)	S_{MS} (g)	S_{M1} (g)
Jakarta	0,922	0,726	0,922	0,621
Bandung	1,197	0,903	1,197	0,772
Semarang	0,977	0,705	0,977	0,607
Yogyakarta	1,250	0,941	1,250	0,842
Surabaya	0,875	0,623	0,875	0,554

Tabel 11. Spektra percepatan di permukaan S_{MS} dan S_{M1} dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) dan SNI 1726:2012 untuk tanah SE

Kota	Stewart & Seyhan (2013)		SNI 1726:2012	
	S_{MS} (g)	S_{M1} (g)	S_{MS} (g)	S_{M1} (g)
Jakarta	0,993	0,939	0,907	0,940
Bandung	1,123	1,103	1,040	1,181
Semarang	1,031	0,923	0,913	0,923
Yogyakarta	1,134	1,135	1,076	1,199
Surabaya	0,972	0,859	0,911	0,858

Perbedaan (peningkatan atau penurunan) yang timbul akibat penggunaan kedua model koefisien situs untuk tiga situs tanah SC, SD dan SE dapat dilihat pada Tabel 12 sampai 14. Tanda “+” atau “-” pada ketiga tabel tersebut menunjukkan peningkatan atau penurunan nilai S_{MS} atau S_{M1} yang dihitung dengan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) dibandingkan terhadap koefisien situs dari SNI 1726:2012.

Dari hasil perhitungan sebagaimana terlihat pada Tabel 12 nilai S_{MS} mengalami peningkatan maksimum sebesar 20% dan minimum sebesar 9,53% atau rata-rata sebesar 15,27% untuk nilai S_{MS} situs tanah SC. Untuk spektra S_{M1} terjadi peningkatan maksimum sebesar 12,48% dan minimum sebesar 1,08% dengan rata-rata sebesar 8,37%. Dengan mengabaikan tanda “+” dan “-” atau perubahan mutlak terlihat nilai S_{MS} dan S_{M1} secara

rata-rata untuk lima kota besar untuk situs tanah SC berbeda sebesar 8% sampai 15%.

Tabel 12. Perbedaan nilai S_{MS} dan S_{MI} yang dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) terhadap SNI 1726:2012 untuk tanah SC

Kota	Perbedaan (%)	
	S_{MS}	S_{MI}
Jakarta	+18,60	+12,40
Bandung	+20,00	+12,48
Semarang	+9,53	+3,19
Yogyakarta	+18,30	+12,70
Surabaya	+9,90	+1,08
Rata-rata	+15,27	+8,37

Kajian yang sama juga dilakukan terhadap situs tanah SD pada lima kota besar di Pulau Jawa, Sebagaimana terlihat pada Tabel 13, spektra S_{MS} yang dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) maupun SNI 1726:2012 menunjukkan nilai yang sama atau tidak mengalami perubahan. Kondisi ini disebabkan karena nilai koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) untuk perhitungan S_{MS} untuk situs tanah SD sama dengan koefisien situs dari SNI 1726:2012. Kondisi berbeda terjadi pada hasil perhitungan spektra S_{MI} . Spektra S_{MI} yang dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) lebih besar dibandingkan dengan spektra S_{MI} yang dihitung menggunakan koefisien situs dari SNI 1726:2012. Peningkatan spektra S_{MI} minimum sebesar 11,76% dan maksimum sebesar 16,97% atau rata-rata sebesar 14,85%.

Tabel 13. Perbedaan nilai S_{MS} dan S_{MI} yang dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) terhadap SNI 1726:2012 untuk tanah SD

Kota	Perbedaan (%)	
	S_{MS}	S_{MI}
Jakarta	0,00	+16,91
Bandung	0,00	+16,97
Semarang	0,00	+16,14
Yogyakarta	0,00	+11,76
Surabaya	0,00	+12,45
Rata-rata	0,00	+14,85

Hasil perhitungan nilai S_{MS} untuk situs tanah SE di lima kota sebagaimana terlihat pada Tabel 14 menunjukkan adanya peningkatan jika menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) dibandingkan jika menggunakan koefisien situs dari SNI 1726:2012. Besarnya peningkatan spektra S_{MS} minimum sebesar 3,28% dan maksimum sebesar 22,14% atau rata-rata sebesar 12,96%. Berbeda dengan spektra S_{MS} , nilai spektra S_{MI} yang dihitung menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) mengalami penurunan

minimum sebesar 1,94% dan maksimum sebesar 11,47% atau rata-rata sebesar 5,79%.

Hasil kajian terhadap penggunaan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) setelah di dibandingkan dengan koefisien situs dari SNI 1726:2012 untuk situs tanah SC, SD dan SE secara rata-rata menunjukkan perbedaan sebesar $\pm 15\%$. Dari hasil perhitungan nilai S_{MS} dan S_{MI} pada lima kota memberi gambaran tentang perubahan atau perbedaan yang signifikan sekiranya pada perhitungan kedua spektra percepatan permukaan tersebut menggunakan nilai koefisien situs dari ASCE/SEI 7-16. Kajian yang lebih lengkap tentang pengaruh model SSA pada penentuan nilai koefisien situs tanah lunak SE perlu dilakukan untuk melihat lebih jelas perbedaan penggunaan metode SSA dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013).

Tabel 14. Perbedaan nilai S_{MS} dan S_{MI} yang dihitung dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) terhadap SNI 1726:2012 untuk tanah SE

Kota	Perbedaan (%)	
	S_{MS}	S_{MI}
Jakarta	+22,14	-4,18
Bandung	+7,98	-8,62
Semarang	+17,03	-2,74
Yogyakarta	+3,28	-11,47
Surabaya	+14,35	-1,94
Rata-rata	+12,96	-5,79

Kesimpulan

Peraturan perencanaan bangunan tahan gempa di Indonesia (SNI 1726:2012) perlu dikaji ulang sejalan dengan perubahan yang ada pada peta gempa Indonesia (Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017). Peta $MCE_R S_S$ and S_I yang ada pada SNI 1726:2012 dikembangkan dari peta gempa Indonesia tahun 2010. Perlu dilakukan kajian tentang peta $MCE_R S_S$ dan S_I baru diseluruh wilayah Indonesia sebagai pengganti peta $MCE_R S_S$ dan S_I yang ada pada SNI 1726:2012.

Perubahan yang muncul pada pengembangan peta $MCE_R S_S$ dan S_I di seluruh wilayah Indonesia akibat dari perubahan data gempa dan data sumber gempa di seluruh wilayah Indonesia. Perubahan nilai *direction factor* dan nilai standard deviasi (β) yang digunakan pada perhitungan $MCE_R S_S$ dan S_I menyebabkan terjadinya perubahan kedua spektra percepatan tersebut dibandingkan nilai lama yang ada pada SNI 1726:2012.

Koefisien situs yang dikembangkan untuk perhitungan spektra percepatan di permukaan S_{MS} dan S_{MI} pada SNI 1726:2012 mengabdopsi secara

langsung konsep perhitungan spektra percepatan S_{MS} dan S_{MI} dari peraturan ASCE/SEI 7-10. ASCE/SEI 7-10 sebagai acuan pembuatan SNI 1726:2012 telah berubah menjadi ASCE/SEI 7-16. Salah satu perubahan penting yang terdapat pada ASCE/SEI 7-16 dan sulit diadopsi pada perubahan SNI 1726:2012 adalah perubahan cara perhitungan koefisien situs untuk perhitungan spektra S_{MS} dan S_{MI} tanah lunak (SE).

Pengembangan SNI 1726:2012, membutuhkan metoda lain untuk mempermudah perhitungan koefisien situs tanah maupun perhitungan S_{MS} dan S_{MI} untuk situs tanah SE. Hasil kajian perhitungan spektra S_{MS} dan S_{MI} di lima kota besar di Pulau Jawa menunjukkan bahwa koefisien situs yang dikembangkan oleh Stewart & Seyhan (2013) dapat digunakan di Indonesia karena lebih mudah untuk diaplikasikan.

Koefisien situs tersebut juga digunakan pada ASCE/SEI 7-16 kecuali untuk situs tanah SE. Hasil kajian perhitungan spektra S_{MS} pada lima kota besar di Pulau Jawa (Jakarta, Bandung, Semarang, Yogyakarta dan Surabaya) untuk situs tanah SC, SD dan SE dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) serta membandingkannya dengan koefisien situs dari SNI 1726:2012 menunjukkan adanya perubahan secara signifikan dengan perbedaan atau kenaikan secara rata-rata sebesar 15% untuk tanah SC dan 13% untuk tanah SE. Untuk tanah SD nilai spektra S_{MS} pada kelima kota tersebut tidak mengalami perubahan. Hal ini menunjukkan bahwa untuk pengembangan SNI 1726:2012 atau hitungan nilai spektra permukaan S_{MS} dapat menggunakan nilai koefisien situs baru dari Stewart & Seyhan (2013) sebagai pengganti koefisien situs yang ada pada ASCE/SEI 7-16.

Hasil perhitungan nilai spektra permukaan S_{MI} pada lima kota besar di Pulau Jawa untuk situs tanah SC dan SD dengan menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) maupun ASCE/SEI 7-16 mengalami kenaikan secara rata-rata sebesar 8% untuk tanah SC dan 15% untuk tanah SD. Untuk situs tanah SE perhitungan spektra permukaan S_{MI} jika menggunakan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) mengalami penurunan secara rata-rata sebesar 6%. Adanya kenaikan nilai spektra permukaan S_{MS} sebesar 13% dan penurunan nilai S_{MI} sebesar 6% untuk tanah SE maka nilai koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) dapat digunakan sebagai pengganti koefisien situs yang ada pada SNI 1726:2012.

Karena adanya perbedaan pada hasil perhitungan spektra S_{MS} dan S_{MI} pada lima kota besar di Pulau Jawa, penggunaan koefisien situs lama dari SNI 1726:2012 atau koefisien situs dari Stewart &

Seyhan (2013) harus melalui hasil kajian untuk seluruh kota besar yang ada di Indonesia atau seluruh wilayah di Indonesia. Hasil kajian ini diharapkan memberikan gambaran secara menyeluruh tentang perbedaan yang diperoleh sekiranya koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) akan digunakan sebagai pengganti dari koefisien situs yang ada pada SNI 1726:2012.

ASCE/SEI 7-16 telah memperkenalkan metode SSA untuk perhitungan koefisien situs atau spektra percepatan tanah di permukaan untuk situs tanah SE. Studi tentang pemanfaatan metode ini perlu dilakukan di seluruh wilayah Indonesia. Hasil kajian tersebut akan memberikan gambaran tentang seberapa besar perbedaan yang akan diperoleh seandainya spektra S_{MS} dan S_{MI} dihitung dengan metode SSA dibandingkan dengan penggunaan koefisien situs dari Stewart & Seyhan (2013) maupun dari SNI 1726:2012. Kajian ini sangat penting untuk diperkenalkan kepada para ahli dibidang Teknik Sipil agar mengenal lebih dekat tentang metode SSA untuk mendapatkan nilai spektra percepatan di permukaan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro atas bantuan pembiayaan pada penelitian ini melalui program Hibah Penelitian Strategis tahun 2019. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN), Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat atas bantuan penyediaan data *hazard* gempa seluruh Indonesia.

Daftar Pustaka

- Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23-44.
- ASCE/SEI 07-16 (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers.
- 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.
- Boore, D. M., & 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.

- Campbell, K. W., & 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.
- Chiou, B. S. J. & Young, R. R. (2008). *NGA model for average horizontal component of peak ground motion and response spectra*. PEER 2008/2009, Pasific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- Irsyam M., Dangkoa D. T., Kusumastuti D. & Kertapati E. (2007). Methodology of Site-Specific Seismic Hazard Analysis for Important Civil Structure. *Civil Engineering Dimensions*, 9(2), 103-112.
- Leyendecker, E. V., Hunt, R. J., Frankel, A. D., & Rukstales, K. S. (2000). Development of Maximum Considered Earthquake Ground Motion Maps. *Earthquake Spectra*, 16(1), 21-40.
- Luco, N., Ellingwood, B. R., Hamburger, R. O., Hooper, J. D., Kimbal, J. K. & Kircher, C. A. (2007, September). *Risk-Targeted versus current seismic design maps for the conterminous United States*, Paper Presented at SEAOC 2007, Structural Engineers Association of California, California.
- McGuire R.K. (1995). Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes, Closing the Loop, *Bulletin of The Seismological Society of America*, 85(5), 1275-1284.
- Partono, W., Wardani, S. P. R., Irsyam, M., & Maarif, S. (2015). Development of seismic microzonation maps of Semarang, Indonesia. *Jurnal Teknologi*, 77(11), 99-107.
- Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN), (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Indonesia: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- SNI 1726:2012 (2012). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktural bangunan gedung dan non gedung*, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.
- Sengara, I. W., Irsyam, M., Sidi, I. D., Mulia, A., Asrurifak, M., & Hutabarat, D. (2015, July). *Development of Earthquake Risk-Targeted Ground-motions for Indonesian Earthquake Resistance Building Code SNI-1726-2012*. Paper presented at 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP12). Vancouver Canada. July, 12-15.
- Sidi I. D. (2011). Hazard analysis and probability based factor of safety, *Research Report, Structural Engineering Division*, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Indonesia: Institut Teknologi Bandung.
- Shiuly A., Sahu R.B. & Mandal S. (2017). Site Specific Seismic Hazard Analysis and Determination of Response Spectra of Kolkata for Maximum Considered Earthquake. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(3), 466-477.
- Stewart J. A. & Seyhan E. (2013). Semi-Empirical Nonlinear Site Amplification and its Application in NEHRP Site Factors, *Pasific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Report 2013/13*, Berkelay: University of California.
- Zhao, J. X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P. G., Asano, A. & 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), 914-925.
- 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.