



Perbandingan Nilai Percepatan Tanah Menggunakan Persamaan Empiris di Daerah Sumatera Bagian Selatan

Baihaqy Akmal Fasha^{1*}, Meta Nisrina Syafitri², Purwaditya Nugraha³

^{1,2,3}Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia

DOI: <https://doi.org/10.29303/Goescienceed.v6i4.1439>

Article Info

Received: 10 October 2025

Revised: 27 October 2025

Accepted: 30 October 2025

Correspondence:

Phone: +6281360279194

Abstrak: Pulau Sumatra merupakan wilayah dengan aktivitas seismik yang tinggi karena terletak pada zona pertemuan antara Lempeng Indo-Australia dan Eurasia. Kondisi ini menyebabkan perlunya kajian mengenai percepatan tanah maksimum sebagai dasar dalam analisis bahaya seismik dan perencanaan mitigasi bencana. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan nilai percepatan tanah maksimum (*Peak Ground Acceleration*) yang diperoleh dari beberapa persamaan empiris dengan hasil perhitungan metode deterministik (*Deterministic Seismic Hazard Analysis*) berdasarkan Peta Gempa Nasional Pusgen 2017. Lima persamaan empiris digunakan, yaitu Mc.Guire (1963), Sadigh (1997), Campbell (1983), Fukushima & Tanaka (1990), dan Donovan (1973), dengan parameter gempa acuan di Provinsi Bengkulu tahun 1943 bermagnitudo 7,3 Mw dan kedalaman 15 km. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa sebaran nilai selisih antara hasil empiris dan deterministik berada pada rentang -0,7 hingga 0,5 g, dengan frekuensi tertinggi pada interval -0,3 hingga 0,1 g. Secara umum, seluruh persamaan empiris cenderung menghasilkan nilai *underestimate* dibandingkan Pusgen (2017), namun persamaan Mc.Guire menunjukkan hasil yang paling mendekati nilai deterministik. Hal ini disebabkan oleh kesesuaian model Mc.Guire terhadap kondisi geotektonik Sumatra bagian Selatan yang didominasi sesar aktif dan sumber gempa dangkal. Dengan demikian, persamaan Mc.Guire dapat dianggap sebagai model empiris yang representatif untuk memperkirakan nilai PGA di wilayah Sumatra bagian Selatan dan dapat digunakan sebagai acuan awal dalam kajian bahaya seismik regional di Sumatera.

Kata kunci: percepatan tanah maksimum, metode empiris, deterministik, Mc.Guire, Sumatra bagian Selatan, Pusgen 2017

Citation: Fasha, A., B., Syafitri, N., M., & Nugraha, P. (2025). Perbandingan Nilai Percepatan Tanah Menggunakan Persamaan Empiris di Daerah Sumatera Bagian Selatan. *Journal Pendidikan, Sains, Geologi dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 6(4), 1725-1729. doi: <https://doi.org/10.29303/Goescienceed.v6i4.1439>

Pendahuluan

Pulau Sumatra merupakan salah satu wilayah dengan tingkat aktivitas seismik yang tinggi karena terletak di zona subduksi utama antara Lempeng Indo-Australia dan Eurasia (Hutchings dkk., 2021). Aktivitas kegempaan di kawasan ini dipicu oleh berbagai faktor, termasuk aktivitas gunung api, pergerakan pada zona subduksi, serta keberadaan sesar aktif. Sumatra bagian Selatan, yang mencakup Provinsi Bengkulu, Sumatra Selatan, dan Lampung, memiliki ketiga karakteristik tersebut sehingga tergolong wilayah dengan tingkat kerentanan gempabumi yang tinggi (Santoso dkk.,

2011). Dalam tiga dekade terakhir, beberapa gempabumi besar terjadi di Pulau Sumatra, di antaranya gempa Aceh tahun 2004 dengan magnitudo 9,2 Mw yang memicu tsunami (Meltzner dkk., 2006), gempa Nias tahun 2005 dengan magnitudo 8,6 Mw (Fujii dkk., 2020), gempa Bengkulu tahun 2007 dengan magnitudo 8,4 Mw yang menyebabkan longsoran dan liquefaction (Mase, 2018), serta gempa Mentawai tahun 2010 dengan magnitudo 7,8 Mw yang juga memicu tsunami (Satake dkk., 2013). Peristiwa-peristiwa tersebut menunjukkan bahwa percepatan tanah sebagai respons maksimum di permukaan akibat gempabumi

Email: baihaqy1102@gmail.com

merupakan parameter penting dalam kajian bahaya seismik.

Prediksi percepatan tanah memiliki peran krusial dalam upaya mitigasi bencana, khususnya sebagai dasar perencanaan pembangunan dan tata ruang (Miano, 2020). Namun demikian, hingga kini Pulau Sumatra belum memiliki acuan baku terkait prediksi percepatan tanah. Sebagian besar kajian mendalam mengenai topik ini masih dilakukan di luar Indonesia (Taruna, 2020).

Secara metodologis, prediksi percepatan tanah dapat dilakukan dengan pendekatan empiris, deterministik, maupun probabilistik (Miano, 2020). Metode empiris menghasilkan banyak persamaan karena dibangun berdasarkan kondisi geologi spesifik suatu daerah (Hartanto, 2020). Sebaliknya, metode deterministik (*Deterministic Seismic Hazard Analysis/DSHA*) lebih menekankan pada pemodelan skenario terburuk, di mana semua sumber aktivitas seismik yang relevan diidentifikasi dan dievaluasi potensi guncangannya (Puri dkk., 2016). Kedua metode tersebut memiliki keunggulan masing-masing, baik dari segi penerapan maupun akurasi, sehingga perbandingan di antara keduanya menjadi penting. Hal ini relevan karena prediksi percepatan tanah di wilayah Sumatra bagian Selatan belum memiliki acuan yang memadai.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk membandingkan hasil perhitungan percepatan tanah menggunakan beberapa persamaan empiris yang dikembangkan di luar negeri dengan hasil perhitungan DSHA dari Pusgen 2017. Perhitungan difokuskan pada kondisi geologi Sumatra bagian Selatan dengan mempertimbangkan sumber gempa sesar dangkal. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan acuan yang lebih representatif terkait prediksi percepatan tanah, serta memperkaya kajian bahaya seismik di wilayah Sumatra bagian Selatan.

Metode

Pada penelitian ini dilakukan evaluasi nilai percepatan tanah dengan menggunakan beberapa persamaan empiris, kemudian hasilnya dibandingkan dengan nilai percepatan tanah yang dihitung menggunakan metode *Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA)* berdasarkan Peta Gempa Nasional (Pusgen, 2017).

Penggunaan metode empiris diawali dengan pengambilan data gempabumi dari tahun 1925 hingga 2025 yang diperoleh dari *United States Geological Survey (USGS)*, khususnya pada wilayah Sumatra bagian Selatan yang meliputi Provinsi Bengkulu, Sumatra Selatan, dan Lampung kemudian dibagi dalam 351 *grid*. Pemilihan gempabumi acuan dilakukan dengan

mempertimbangkan parameter kedalaman dan magnitudo. Dari hasil seleksi tersebut, digunakan gempabumi yang terjadi di Provinsi Bengkulu pada tahun 1943 dengan magnitudo 7,3 Mw. Gempa ini berlokasi pada koordinat lintang -2,84 dan bujur 102,195 dengan kedalaman sumber gempa 15 km, sehingga dapat diidentifikasi sebagai gempa dangkal (Spence, 1989).

Persamaan empiris yang digunakan pada penelitian ini antara lain :

1. Persamaan Empiris Mc. Guire (1963)

Persamaan ini pernah digunakan untuk menentukan nilai Peak Ground Acceleration (PGA) akibat gempabumi di California Selatan, khususnya pada zona patahan San Andreas. Penerapannya dilakukan untuk sumber gempabumi dangkal dengan kedalaman kurang dari 30 km serta magnitudo berkisar antara 5 hingga 7,5 Mw (Mc. Guire, 1963).

$$\alpha = \frac{472,3 \times 10^{0,278M_s}}{(R+25)^{1,301}}$$

Dengan α merupakan percepatan tanah (gal); nilai M_s adalah magnitudo gempa utama; R adalah jarak hiposenter (Km).

2. Persamaan Empiris Sadigh (1997)

Persamaan ini diperoleh dari data gempabumi kuat di California. Penggunaan persamaan disesuaikan dengan sumber gempa berupa sesar naik dan sesar mendatar, dengan rentang magnitudo 4-8 serta kedalaman sumber gempa hingga 100 Km (Sadigh K, 1997).

$$y = e^{[C_1 + C_2M + C_3(8.5 - M)^{2.5} + C_4 \ln(r_{rup} + e^{C_5 + C_6M}) + C_7 \ln(r_{rup} + 2)]}$$

Pada persamaan ini, y merepresentasikan nilai PGA dalam satuan g, sedangkan M merupakan momen magnitudo (Mw). Parameter r_{rup} adalah jarak terdekat terhadap bidang patahan yang dinyatakan dalam kilometer. Nilai konstanta empiris yang digunakan bervariasi tergantung pada besaran magnitudo gempa. Untuk magnitudo $M \leq 6,5$, digunakan nilai $C_2 = 1$, $C_5 = 1.29649$, dan $C_6 = 0.25$. Sementara itu, untuk magnitudo $M > 6,5$, nilai konstanta yang digunakan adalah $C_2 = 1,1$, $C_5 = -0.48451$, dan $C_6 = 0.524$. Konstanta lainnya, yaitu C_1 , C_3 , C_4 , dan C_7 , diperoleh dari hasil kalibrasi empiris sesuai dengan data kegempaan yang menjadi acuan dalam pengembangan persamaan ini (Sadigh K, 1997).

3. Persamaan Empiris Campbell (1981)

Persamaan empiris Campbell (1981) dikembangkan dari data percepatan tanah maksimum (PGA) yang direkam pada 27 kejadian gempabumi bermagnitudo 5,0-7,7 di California, termasuk gempa San Fernando

1971 dan Imperial Valley 1979 dengan sumber gempa kurang dari 50 Km (Campbell, 1981).

$$PGA = a e^{bM} (R + c_1 e^{c_2 M})^{-d}$$

Pada persamaan ini, PGA merepresentasikan percepatan tanah dalam satuan *gal*, sedangkan M adalah momen magnitudo (Mw). Parameter R menyatakan jarak hiposenter dalam kilometer. Nilai konstanta empiris yang digunakan yaitu $a = 0,0159$, $b = 0,868$, $c_1 = 0,0606$, $c_2 = 0,700$, dan $d = 1,09$. Seluruh konstanta tersebut diperoleh dari hasil kalibrasi empiris terhadap data rekaman gempabumi sehingga persamaan ini dianggap representatif untuk kondisi kegempaan dengan karakteristik serupa.

4. Persamaan Empiris Fukushima & Tanaka (1990)

Fukushima dan Tanaka (1990) menyusun persamaan empiris berdasarkan 1372 data percepatan tanah horizontal maksimum (PGA) yang diperoleh dari 28 gempabumi di Jepang serta 15 kejadian gempa dari Amerika Serikat dan wilayah lain. Persamaan ini dikembangkan dengan teknik regresi dua tahap untuk mengurangi pengaruh korelasi antara magnitudo dan jarak, sehingga hubungan atenuasi yang dihasilkan lebih sesuai dengan karakteristik seismotektonik Jepang (Fukushima, 1990).

$\log_{10} A = 0,41M - \log_{10}(R + 0,032 \times 10^{0,41M}) - 0,0034R + 1,30$
 Pada persamaan tersebut, A menunjukkan percepatan tanah puncak rata-rata dari dua komponen horizontal (cm/s^2), M adalah magnitudo gelombang permukaan, dan R merupakan jarak terdekat dari lokasi pengamatan ke sumber gempa (km).

5. Persamaan Empiris Donovan (1973)

Persamaan ini dikembangkan berdasarkan analisis data percepatan tanah dari gempa San Fernando 1971 dengan memanfaatkan 670 rekaman percepatan dari berbagai sumber internasional. Model ini memperhitungkan pengaruh magnitudo dan jarak terhadap atenuasi percepatan tanah, sekaligus mempertimbangkan kondisi geologi setempat yang dapat memperkuat atau meredam gelombang seismik (Donovan, 1973).

$$\alpha = \frac{1080 \times e^{0,5M}}{(R+25)^{1,32}}$$

Dalam persamaan tersebut, α adalah percepatan tanah puncak (*gal*), M menyatakan magnitudo gempa, dan R merupakan jarak hiposenter dalam kilometer. Persamaan Donovan ini banyak digunakan karena dinilai mampu memberikan estimasi konservatif nilai PGA, khususnya pada lokasi dengan lapisan tanah setebal lebih dari 6 meter di atas batuan dasar.

Pengambilan data dari Pusgen 2017 dilakukan dengan menggunakan nilai rentang tertinggi hasil perhitungan peta bahaya gempa deterministik (PGA) pada batuan dasar akibat sumber gempa sesar dangkal dengan tingkat kepercayaan 84 percentile (150% median). Pemilihan data dilakukan berdasarkan grid yang sesuai dengan cakupan persamaan empiris yang digunakan, yaitu sebanyak 391 titik. Selanjutnya, nilai percepatan tanah yang diperoleh dari persamaan empiris dibandingkan dengan hasil perhitungan deterministik melalui analisis selisih. Hasil perbandingan tersebut kemudian disajikan dalam bentuk statistik untuk mengidentifikasi persamaan empiris yang memberikan kesesuaian paling baik dengan hasil deterministik.

Hasil dan Diskusi

Berdasarkan hasil perhitungan nilai Peak Ground Acceleration (PGA) menggunakan metode empiris dengan parameter gempabumi, penelitian ini menghitung nilai PGA melalui lima persamaan empiris, yaitu Mc.Guire (1963), Sadigh (1997), Campbell (1983), Fukushima & Tanaka (1990), serta Donovan (1973), dengan jumlah data sebanyak 351. Tabel 1 menunjukkan bahwa sebaran nilai selisih antara hasil empiris dan deterministik (Pusgen, 2017) berada pada rentang -0,7 hingga 0,5 g. Nilai selisih yang paling sering muncul berkisar antara -0,3 hingga 0,1 g, mengindikasikan bahwa hasil perhitungan empiris secara umum cukup mendekati nilai deterministik, meskipun terdapat variasi antar model.

Ditinjau berdasarkan hasil masing-masing persamaan empiris, persamaan Mc.Guire menunjukkan distribusi data yang lebih merata di sepanjang rentang nilai dengan frekuensi tertinggi pada interval -0,1 hingga 0,0 g. Sementara itu, persamaan Sadigh, Campbell, Fukushima & Tanaka, serta Donovan memiliki puncak distribusi pada rentang -0,3 hingga -0,2 g. Secara keseluruhan, seluruh model empiris menunjukkan kecenderungan underestimate terhadap nilai deterministik Pusgen (2017). Namun, distribusi selisih pada Mc.Guire yang lebih dekat ke nol memperlihatkan bahwa model ini memberikan hasil prediksi yang paling akurat di antara seluruh persamaan yang digunakan.

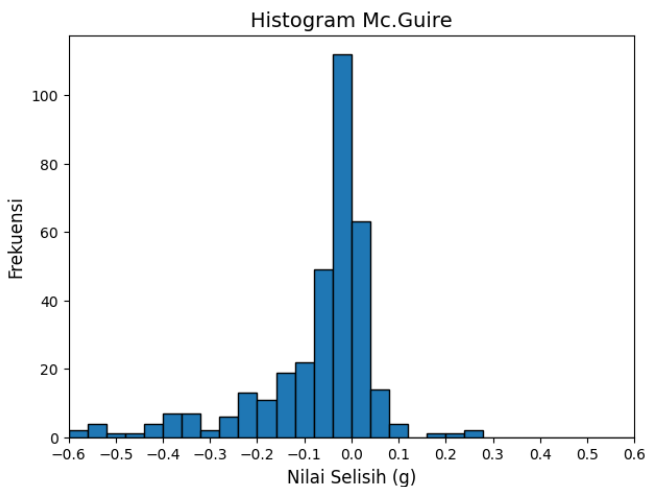
Pada hasil histogram semakin memperjelas gambaran distribusi data selisih. Histogram memperlihatkan puncak frekuensi pada interval -0,2 hingga 0,0, yang menandakan mayoritas perhitungan empiris lebih rendah sedikit dari nilai Pusgen. Dari sisi bentuk, histogram menunjukkan pola yang menyerupai *bell shaped curve* atau kurva lonceng. Ciri khas kurva lonceng adalah frekuensi tertinggi berada di tengah (sekitar nol), lalu menurun secara bertahap ke arah nilai negatif maupun positif. Fenomena ini

menunjukkan bahwa distribusi data selisih mendekati pola distribusi normal. Artinya, sebagian besar hasil empiris memiliki kecenderungan untuk mendekati nilai tengah (Pusgen), sementara nilai selisih yang ekstrem jumlahnya relatif sedikit. Keberadaan residual yang lebih panjang pada sisi negatif Mc.Guire menunjukkan bias ke arah *underestimate*, sedangkan

Sadigh, Campbell, Donovan, dan Fukushima & Tanaka menunjukkan penyebaran data yang lebih terpusat di pada interval $-0,3$ hingga $-0,2$ g. Dengan demikian, bentuk kurva lonceng pada histogram dapat diartikan bahwa metode empiris Mc.Guire cukup representatif dalam memperkirakan nilai PGA untuk wilayah kajian.

Tabel.1 Nilai selisih antara PUSGEN dan Empiris di Wilayah Sumatera Bagian Selatan

Rentang selisih Nilai PGA	Banyak Data Selisih Empiris dan Pusgen 2017				
	Mc.Guire	Sadigh	Campbell	Fukushima & Tanaka	Donovan
-0,7- -0,6	6	0	0	0	0
-0,6 - -0,5	7	0	0	0	0
-0,5 - -0,4	5	0	0	0	0
-0,4 - -0,3	15	0	0	0	0
-0,3 - -0,2	20	246	254	268	247
-0,2 - -0,1	44	65	81	51	84
-0,1 - 0,0	169	20	13	22	12
0,0 - 0,1	79	10	3	7	6
0,1 - 0,2	3	2	0	3	2
0,2 - 0,3	3	5	0	0	0
0,3 - 0,4	0	0	0	0	0
0,4 - 0,5	0	3	0	0	0



Gambar 1. Hasil Histogram Mc.Guire

Perbedaan distribusi antar persamaan erat kaitannya dengan faktor-faktor yang memengaruhi nilai dalam masing-masing model empiris. Persamaan Mc.Guire (1963) hanya mempertimbangkan dua parameter utama, yaitu magnitudo gempa (M) dan jarak hiposenter (R). Persamaan ini awalnya dikembangkan berdasarkan data gempa di zona San Andreas, sehingga penerapannya pada wilayah dengan karakter geologi berbeda seperti Sumatra dapat menyebabkan hasil yang sedikit lebih rendah dari nilai aktual atau cenderung *underestimate*. Meskipun demikian, persamaan Mc.Guire (1963) menunjukkan kesesuaian yang paling baik dibandingkan dengan

persamaan empiris lainnya karena dirancang untuk sumber gempa dangkal dengan magnitudo menengah hingga besar—kondisi yang serupa dengan gempa acuan dalam penelitian ini. Selain itu, karakter geotektonik Sumatra bagian Selatan yang didominasi oleh sistem sesar aktif semakin memperkuat kesesuaian model ini, menghasilkan nilai percepatan tanah yang lebih realistis dan mendekati hasil perhitungan deterministik Pusgen (2017). Sebaliknya, persamaan Sadigh (1997), Campbell (1983), Fukushima & Tanaka (1990), serta Donovan (1973) menghasilkan nilai yang lebih rendah karena tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi sumber gempa dan karakteristik geologi lokal, sehingga memperlihatkan efek peredaman yang lebih besar terhadap nilai PGA dan kurang tepat dalam menggambarkan intensitas guncangan aktual di wilayah kajian.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa perbandingan antara metode empiris dan deterministik menunjukkan tingkat kesesuaian yang bervariasi terhadap kondisi geotektonik Sumatra bagian Selatan. Dari lima persamaan empiris yang digunakan—Mc.Guire (1963), Sadigh (1997), Campbell (1983), Fukushima & Tanaka (1990), dan Donovan (1973)—persamaan Mc.Guire memberikan hasil yang paling mendekati nilai percepatan tanah deterministik Pusgen (2017). Hal ini disebabkan oleh kesesuaian karakteristik dasar persamaan Mc.Guire dengan kondisi sumber gempa

dangkal dan magnitudo menengah-besar yang dominan di wilayah kajian. Sementara itu, keempat persamaan lainnya cenderung menghasilkan nilai underestimate karena tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi geologi dan mekanisme sesar setempat. Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan persamaan empiris yang mempertimbangkan kesesuaian kondisi geotektonik lokal dapat meningkatkan akurasi estimasi percepatan tanah. Oleh karena itu, persamaan Mc.Guire memberikan nilai yang paling mendekati hasil Pusegn (2017) dibandingkan persamaan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa model Mc.Guire memiliki kesesuaian paling baik terhadap kondisi sumber gempa dangkal di Sumatera bagian Selatan, serta berpotensi menjadi acuan awal dalam pengembangan model bahaya seismik yang lebih spesifik di Indonesia.

Daftar Pustaka

- Campbell, K. W. (1981). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), 2039-2070.
- Donovan, N. C. (1973). A statistical evaluation of strong motion data including the February 9, 1971 San Fernando earthquake. In *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 1, pp. 1252-1261.
- Fujii, Y. S. (2020). Slip distribution of the 2005 Nias earthquake (M w 8.6) inferred from geodetic and far-field tsunami data. *Geophysical Journal International*, 223(2), 1162-1171.
- Fukushima, Y. &. (1990). A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bulletin of the seismological Society of America*, 80(4), 757-783.
- Hartanto. (2020). Perbandingan perhitungan percepatan tanah antara metode empiris dengan hasil yang terbaca pada accelerograph untuk daerah Jayapura dan sekitarnya. *Prosiding Seminar Nasional Fisika PPs UNM*, 2, 84-87.
- Hutchings, S. J. (2021). The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 22, Issue 9, pp. 1-42.
- Mase, L. Z. (2018). Seismic response analysis along the coastal area of Bengkulu during the september 2007 earthquake. *Makara Journal of Technology*, 22(1), 6.
- Mc. Guire, J. F. (1963). Estimation of Ground Motion in Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 283-298. .
- Meltzner, A. J. (2006). Uplift and subsidence associated with the great Aceh-Andaman earthquake of 2004. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B2).
- Puri, N. &. (2016). Deterministic seismic hazard analysis for the state of Haryana, India. *Indian Geotechnical Journal*, 46(2), 164-174.
- Sadigh K, C. C. (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquake based on California strong motion. *Data Seismological Research Letters Seismological Society of America*, vol 68 pp 180-189.
- Santoso, E. W. (2011). Studi Hazard Seismik dan Hubungannya dengan Intensitas Seismik di Pulau Sumatera dan Sekitarnya. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 12(2): 129 – 136. .
- Satake, K. N. (2013). Tsunami source of the 2010 Mentawai, Indonesia earthquake inferred from tsunami field survey and waveform modeling. *Pure and Applied Geophysics*, 170(9), 1567-1582.
- Spence W, S. S. (1989). Measuring the size of an earthquake. *Earthq Inf Bull*, 21:58-63.
- Taruna, R. M. (2020). Penentuan Rumus Percepatan Tanah Akibat Gempabumi Di Kota Mataram Menggunakan Metode Euclidean Distance. *JST (Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 9(1), 20-29.