

GROUND MOTION ATTENUATION EQUATION UNTUK KEJADIAN GEMPA DI ZONA SUBDUKSI SUMATRA

Salsa Ayu Faradilla¹, Rusnardi Rahmat Putra²

^{1,2}Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, 25132, Indonesia

Email: rusnardi.rahmat@ft.unp.ac.id

Abstrak : Zona subduksi Sumatra merupakan wilayah rawan gempa bumi karena merupakan tempat terjadinya subduksi lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui persamaan atenuasi gerakan tanah berdasarkan catatan gempa yang pernah terjadi di zona subduksi Sumatera. Digunakan data percepatan tanah akibat gempa yang didapat dari alat accelerograph dari tahun 2008-2018. Dari pengumpulan data percepatan tanah didapatkan 101 data kejadian gempa dengan 150 data percepatan tanah. Data percepatan tanah disesuaikan dengan event gempa untuk mendapatkan parameter sumber gempa. Melalui analisis regresi linier multiplikatif didapat persamaan atenuasi untuk kejadian gempa di zona subduksi Sumatra yaitu $\text{Log PGA} = 3,3501 - 1,6217 \text{LogRh} + 0,181 \text{Mw} + 0,1321$ dimana PGA merupakan percepatan tanah maksimum, Rh merupakan jarak hiposenter dan Mw merupakan momen magnitudo. Dibandingkan dengan beberapa persamaan atenuasi lainnya, persamaan atenuasi ini relatif baik dan mendekati hasil PGA observasi dengan tingkat korelasi yang cukup kuat yaitu sebesar 0,785 dan tingkat error yang kecil sebesar 0,437.

Kata Kunci : Gerakan Tanah, Atenuasi, PGA, Accelerograph, Regresi.

Abstract : *The Sumatra subduction zone is a seismically active region due to the subduction of the Indo-Australian and Eurasian tectonic plates. The purpose of this research is to determine the ground motion attenuation equation based on earthquake records that have occurred in the Sumatra subduction zone. Ground acceleration data from earthquakes obtained from accelerographs between 2008 and 2018 were used. From the collection of ground acceleration data, 101 earthquake events with 150 ground acceleration data were obtained. The ground acceleration data were adjusted to match the earthquake events to obtain earthquake source parameters. Through multiple linear regression analysis, the attenuation equation for earthquake events in the Sumatra subduction zone was obtained as $\text{Log PGA} = 3.3501 - 1.6217\text{LogRh} + 0.181\text{Mw} + 0.1321$, where PGA represents the maximum ground acceleration, Rh represents the hypocenter distance, and Mw represents the moment magnitude. Compared to several other attenuation equations, this attenuation equation is relatively good and closely approximates the observed PGA results with a relatively strong correlation level of 0.785 and a small error level of 0.437.*

Keyword : *Ground Motion, Attenuation, PGA, Accelerograph, Regression.*

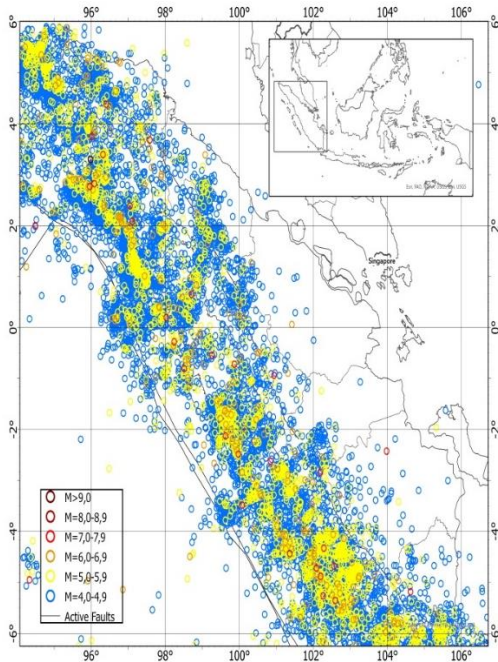
PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu bencana alam yang memiliki potensi risiko besar bagi kehidupan dan infrastruktur manusia. Indonesia merupakan

salah satu negara yang sangat rentan terhadap gempa bumi, karena berada di wilayah tumbukan

antara beberapa lempeng tektonik besar, seperti Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan

Lempeng Pasifik (Amelia, 2017). Akibatnya, Indonesia sering mengalami gempa-gempa kuat yang menyebabkan kerusakan signifikan dan korban jiwa. Salah satu zona subduksi yang paling aktif di Indonesia terletak di bagian barat Pulau Sumatera karena merupakan tempat pertemuan lempeng Eurasia yang berinteraksi secara konvergen dengan lempeng Indo-Australia (Putra, 2021).



Gambar 1. Seismisitas Sumatera 1923-2023

Untuk mengurangi dampak buruk dari gempa bumi, perencanaan dan desain bangunan tahan gempa menjadi sangat penting. Perencanaan ini memerlukan pemahaman yang baik tentang intensitas gerakan tanah yang mungkin terjadi di suatu wilayah akibat gempa (Lin, dkk., 2008). Oleh karena itu, persamaan atenuasi gerakan tanah menjadi krusial dalam upaya mitigasi risiko gempa dan perencanaan bangunan yang aman (Pawirodikromo, 2012).

Atenuasi gerakan tanah (*ground motion attenuation*) adalah suatu proses redaman atau penurunan energi gelombang yang terjadi akibat gempa bumi. Atenuasi terjadi karena mekanisme penyerapan, dispersi, dan hamburan gelombang saat merambat melalui tanah dan batuan. Energi gelombang ini akan terlihat pada gerakan tanah yang akan berkurang pada jarak yang semakin jauh dari sumber gempanya (Pawirodikromo, 2012).

Persamaan atenuasi gerakan tanah (*ground motion attenuation equation*) dapat diartikan sebagai suatu persamaan matematis yang dapat digunakan untuk

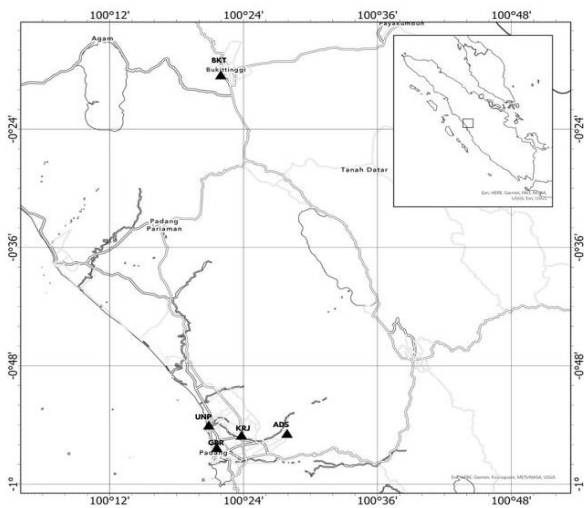
memperkirakan besarnya gerakan tanah yang berkurang seiring dengan jarak dari sumber gempa pada saat terjadi gempa bumi berdasarkan kekuatan gempa, jarak dan keadaan lokasi pada daerah tersebut (Aprilianto, dkk., 2016). Persamaan ini merupakan model yang dikembangkan berdasarkan analisis data seismik dari berbagai gempa bumi dan digunakan untuk memprediksi gerakan tanah pada jarak tertentu dari sumber gempa (Sukarasa, dkk., 2017).

Persamaan atenuasi gerakan tanah dapat berbeda-beda untuk setiap jenis gempa dan karakteristik geologi suatu wilayah. Penentuan parameter atenuasi gerakan tanah harus disesuaikan berdasarkan kondisi geologi, seismologi, percepatan gerakan tanah maksimum, dan frekuensi gempa. Para peneliti menggunakan berbagai teknik dan pendekatan matematis untuk mengembangkan persamaan atenuasi berdasarkan data seismik yang dikumpulkan dari gempa-gempa sebelumnya (Priyanto, dkk., 2018).

Persamaan atenuasi gerakan tanah dapat digunakan untuk menginterpretasikan dan memberikan pemahaman tentang bagaimana intensitas gelombang gempa menurun saat merambat melalui medium, terutama melalui kerak bumi (Pawirodikromo, 2012). Banyak faktor yang mempengaruhi suatu fungsi atenuasi gerakan tanah, namun pengaruh jarak terhadap sumber gempa akan tetap menjadi parameter utama. Dengan menggunakan persamaan atenuasi gerakan tanah, para ahli dapat memprediksi intensitas gerakan tanah pada berbagai jarak dari sumber gempa, yang membantu dalam perencanaan dan perancangan struktur yang kuat dan aman. Selain itu, persamaan ini juga berperan penting dalam pemahaman seismologi dan pengembangan model geologi yang lebih baik untuk menghadapi potensi bahaya gempa bumi (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017).

Meskipun telah banyak penelitian yang dilakukan mengenai persamaan atenuasi gerakan tanah di berbagai wilayah di dunia namun khusus untuk Indonesia, penelitian tentang persamaan atenuasi masih relatif terbatas dan perlu diperdalam. Karena terbatasnya data atenuasi gerakan tanah di Indonesia, untuk perhitungan resiko gempa di wilayah Indonesia digunakan data atenuasi gerakan tanah dari wilayah lain. Data seismik dari gempa-gempa yang terjadi di Indonesia harus dipelajari dan dianalisis secara cermat untuk mengembangkan persamaan atenuasi yang sesuai dengan karakteristik seismik dan geologi wilayah Indonesia (Pandadaran, dkk., 2019).

Dari permasalahan diatas, agar parameter fungsi atenuasi gerakan tanah untuk event gempa di zona subduksi Sumatera dapat dimodelkan secara akurat menggunakan data percepatan tanah kejadian gempa aktual pada daerah tersebut maka peneliti tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul “*Ground Motion Attenuation Equation* untuk Kejadian Gempa di Zona Subduksi Sumatera”. Pada penelitian ini digunakan parameter nilai percepatan tanah maksimum/ *peak ground acceleration* (PGA) untuk merepresentasikan gerakan tanah akibat gempa bumi. Parameter ini dipilih karena parameter PGA dapat menggambarkan potensi kerusakan yang terjadi akibat gempa bumi. Persamaan atenuasi dikembangkan dengan analisis regresi linier multiplikatif statistik menggunakan data percepatan tanah yang didapat pada alat *accelerograph* yang ada di Sumatera Barat. Terdapat 5 alat *accelerograph* yang ada di Sumatera Barat yang dipasang oleh EWBJ (*Engineers Without Borders Japan*). 4 alat dipasang di Kota Padang dan 1 alat dipasang di Kota Bukittinggi. Lokasi tempat alat *accelerograph* dipasang dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Lokasi Alat *Accelerograph*

METODE PENELITIAN

Data Penelitian

Data sekunder dalam penelitian adalah data rekaman percepatan tanah dari alat *accelerograph* serta katalog gempa dari *United States Geological Survey* (USGS).

Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian yang digunakan dalam penelitian adalah Arcgis online untuk memetakan episenter sumber gempa, Seismosignal untuk koreksi data percepatan tanah *accelerograph*,

microsoft excel untuk membantu perhitungan, Matlab untuk analisis regresi.

Variabel Penelitian

1. Variabel Dependen

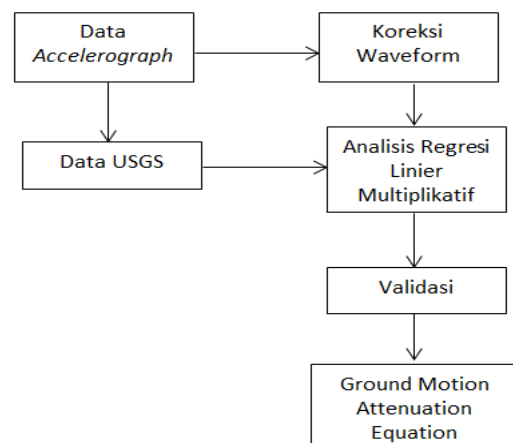
Variabel dependen (terikat) adalah variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat karena adanya variabel bebas. Variabel terikat pada penelitian ini adalah *Peak Ground Acceleration* (PGA).

2. Variabel Independen

Variabel independen (bebas) adalah variabel yang mempengaruhi atau yang menjadi sebab perubahan atau timbulnya variabel dependen. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah magnitudo gempa dan jarak hiposenter gempa.

Prosedur Penelitian

Data percepatan gempa yang didapat dari alat *accelerograph* disesuaikan dengan data katalog gempa USGS untuk mendapatkan parameter gempa lainnya. Selanjutnya episenter dipetakan di Arcgis untuk menentukan jenis gempa yang terjadi. Data percepatan dikoreksi dengan *software* Seismosignal dan diambil nilai percepatan tanah maksimum. Jarak hiposenter digunakan dalam penelitian ini. Dilakukan analisis regresi dan uji hasil analisis regresi serta validasi persamaan atenuasi yang telah didapatkan. Prosedur penelitian dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Teknik Analisis Data

Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis regresi linier multiplikatif. Analisis regresi linier multiplikatif adalah metode analisis yang digunakan untuk meramalkan nilai pengaruh dua variabel bebas atau lebih terhadap satu variabel terikat. Persamaan umum analisis regresi linier multiplikatif adalah

sebagai berikut :

$$Y = a + bX_{1i} + cX_{2i} + d \dots \dots \dots (1)$$

Dimana :

$i = 1, 2, \dots, n$

$a, b, c,$ = Koefesien regresi

d = Galat

Y = Peak Ground Acceleration (PGA)

X_1 = Jarak hiposenter

X_2 = Magnitudo momen

Dalam notasi matriks, persamaan diatas dapat diubah ke dalam bentuk :

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} \\ 1 & X_{12} & X_{22} \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

$$Y = X\beta + \varepsilon \dots \dots \dots (2)$$

Untuk mendapatkan koefisien regresi digunakan rumus berikut.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum X_{1i} & \sum X_{2i} \\ \sum X_{1i} & \sum X_{1i}^2 & \sum X_{1i}X_{2i} \\ \sum X_{2i} & \sum X_{1i}X_{2i} & \sum X_{2i}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum X_{1i} Y_i \\ \sum X_{2i} Y_i \end{bmatrix}$$

Untuk mendapatkan besaran galat digunakan metode *root mean square error* (RMSE). Metode ini digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan prediksi model dengan nilai sebenarnya dari suatu data. RMSE mengukur akar rata-rata dari kuadrat selisih antara nilai prediksi dengan nilai observasi dengan rumus berikut.

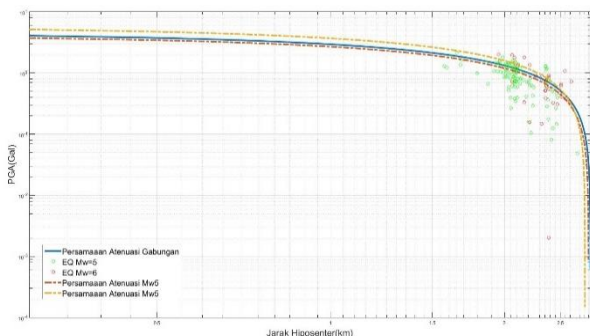
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \dots \dots \dots (3)$$

Sumber : Sugiarto (1992)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Persamaan Atenuasi Gerakan Tanah

Dari hasil analisis regresi didapat persamaan atenuasi dari kejadian gempa di zona subduksi sumatera barat yaitu : $\text{Log PGA} = 3,3501 - 1,6217 \text{Log Rh} + 0,181 \text{Mw} + 0,1321$ dengan PGA merupakan percepatan tanah maksimum, Rh merupakan jarak hiposenter dan Mw merupakan momen magnitudo.



Gambar 4. Persamaan Atenuasi

Uji Hipotesis

Hasil analisis regresi linier multiplikatif yang telah didapatkan, dilakukan uji hasil regresinya untuk melihat apakah hasil regresi layak digunakan. Adapun uji regresi adalah sebagai berikut.

1. Uji f

Untuk uji f dilakukan dengan membandingkan nilai signifikansi uji f dengan α . Nilai signifikansi uji f $< \alpha$ ($3,17146E-18 < 0,05$) sehingga dapat disimpulkan semua variabel independen yaitu magnitudo momen dan jarak hiposenter secara simultan merupakan penjelas yang signifikan terhadap variabel dependen yaitu PGA.

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	2	14,46723621	7,233618	53,66437081	3,17146E-18
Residual	147	19,81467118	0,134794		
Total	149	34,28190739			

Gambar 5. Uji f

2. Uji t

Uji t dilakukan dengan membandingkan nilai signifikansi uji t dengan α . Uji t dilakukan pada setiap variabel independen. Untuk variabel jarak hiposenter, nilai signifikansi uji t $< \alpha$ ($4,09074E-18 < 0,05$) hal ini menunjukkan jarak hiposenter berpengaruh secara signifikan terhadap PGA. Untuk variabel magnitudo momen, nilai signifikansi uji t $< \alpha$ ($0,016083072 < 0,05$) hal ini menunjukkan magnitudo momen berpengaruh secara signifikan terhadap PGA.

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	3,35068805	0,393290769	8,51962	1,74739E-14
Log R	-1,62169933	0,163218101	-9,93578	4,09074E-18
Mw	0,180962004	0,074312646	2,435144	0,016083072

Gambar 6. Uji t

3. Koefisien Determinasi (R²)

Regression Statistics	
Multiple R	0,649621362
R Square	0,422007914
Adjusted R Square	0,414144076
Standard Error	0,36714259
Observations	150

Gambar 7. Koefisien Deteeminasi

Dari gambar di atas, nilai koefisien determinasi adalah sebesar 0,422 atau sebesar 42,2%. Hal ini menunjukkan variabel independen yaitu magnitudo momen dan jarak hiposenter menjelaskan variabel dependen yaitu PGA sebesar 42,2% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain.

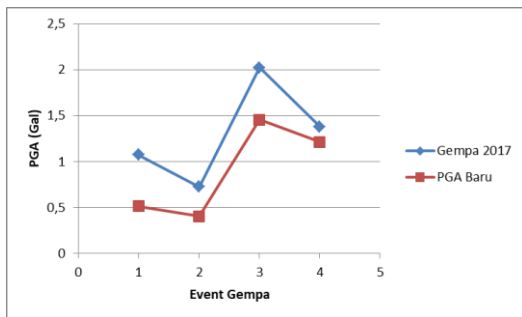
Dari uji hasil analisis regresi dapat disimpulkan bahwasannya persamaan atenuasi yang didapatkan layak digunakan karena variabel independen yaitu magnitudo momen dan jarak hiposenter secara bersamaan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap variabel dependen yaitu PGA.

Validasi Persamaan Atenuasi Gerakan Tanah

Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai PGA dari persamaan atenuasi yang didapatkan dengan nilai PGA hasil rekaman accelerograph, serta membandingkan dengan persamaan atenuasi lainnya.

Perbandingan PGA Observasi dengan PGA Persamaan Baru

Perbandingan nilai PGA observasi dengan nilai PGA yang didapat dengan persamaan atenuasi baru bertujuan untuk melihat kemampuan dan ketepatan persamaan atenuasi dalam menentukan nilai PGA. Dalam melakukan perbandingan digunakan data kejadian gempa tahun 2017. Hasil perbandingan ditampilkan dalam bentuk grafik pada gambar di bawah ini.



Gambar 5. Perbandingan PGA Observasi dengan PGA Persamaan Baru

Dari grafik perbandingan di atas, dapat dilihat nilai PGA persamaan atenuasi baru cukup mendekati nilai PGA gempa 2017 sehingga persamaan yang didapat dapat dikatakan relatif cukup baik.

Perbandingan PGA Persamaan Atenuasi Baru dengan PGA Persamaan Atenuasi Lainnya

Persamaan atenuasi yang didapat pada penelitian dibandingkan dengan persamaan atenuasi lainnya dengan cara sebagai berikut.

Perbandingan Nilai PGA

Untuk melihat kemampuan persamaan atenuasi dalam menentukan nilai PGA, selanjutnya dilakukan perbandingan persamaan atenuasi baru dengan persamaan atenuasi lainnya dalam menghasilkan nilai PGA. Persamaan atenuasi yang

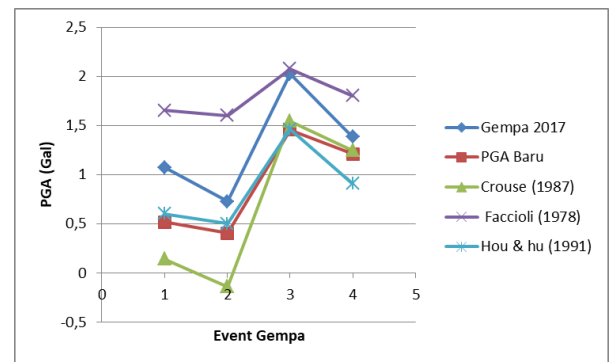
akan dijadikan sebagai pembanding adalah persamaan Crouse (1987), Faccioli (1978) dan Hou & Hu (1991). Persamaan tersebut merupakan persamaan yang umum dipakai pada kajian mengenai atenuasi pergerakan tanah.

Nilai PGA yang akan digunakan sebagai perbandingan adalah PGA data gempa 2017 yang dapat dilihat pada tabel 1.

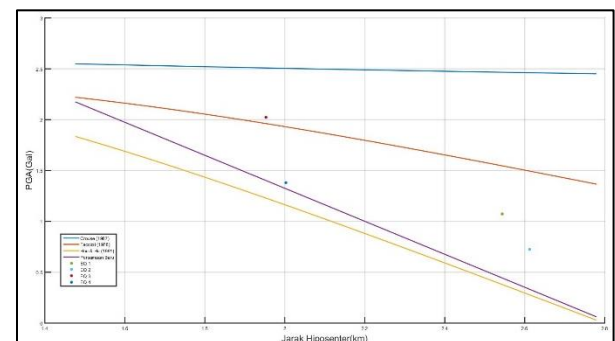
Tabel 1. Data Gempa 2017

No	Time	Mw	PGA	Log PGA
1	2017-08-13T09:53:24	6.4	11.669	1.073304969
2	2017-08-13T10:25:49	6.4	5.368	0.725029297
3	2017-08-31T23:50:41	6.3	105.265	2.021613
4	2017-01-09T18:15:19	5.4	24.164	1.381386

Perbandingan nilai PGA yang dihasilkan oleh persamaan atenuasi dengan PGA kejadian gempa 2017 dapat dilihat pada gambar 6, 7 dan 8.



Gambar 6. Perbandingan PGA Persamaan Atenuasi Baru Dengan PGA Persamaan Atenuasi Lainnya



Gambar 7. Perbandingan Nilai PGA Persamaan Atenuasi Baru Dengan Persamaan Atenuasi Lain

Nilai PGA dari setiap persamaan atenuasi terlihat mendekati nilai PGA gempa 2017 begitu juga dengan persamaan atenuasi baru. Nilai PGA dari persamaan atenuasi baru terlihat lebih mendekati nilai PGA gempa 2017, sehingga persamaan atenuasi baru dikatakan cukup baik dalam merepresentasikan nilai PGA bila dibandingkan dengan persamaan atenuasi lainnya.

Selanjutnya dilakukan perbandingan hasil verifikasi statistik setiap persamaan atenuasi. Verifikasi atenuasi yang dilakukan ialah koefisien korelasi (correlation coefficient) dan nilai tengah ralat kuadrat (root mean square error). Hasil verifikasi statistik untuk setiap persamaan atenuasi dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Verifikasi Statistik

Persamaan Atenuasi	Model Baru	Crouse	Faccioli	Hou & Hu
R (Kolerasi)	0,785335	0,785277	0,554481	0,5606
RSM Error	0,437234	0,683313	0,566156	0,451283

Dari perbandingan statistik, dapat terlihat bahwa nilai koefisien korelasi (r) berada diantara 0,6 - 0,8 yang mana nilai ini mendekati 1 sehingga dapat dikatakan semua persamaan atenuasi memiliki hubungan linier yang kuat. Koefisien korelasi tertinggi terletak pada persamaan atenuasi baru yaitu 0,7853 yang menunjukkan persamaan ini memiliki korelasi yang paling kuat diantara persamaan atenuasi lainnya. Selanjutnya dilihat berdasarkan nilai RSME pada tiap persamaan atenuasi. Pada tabel 4 dapat dilihat nilai RSME berkisar antara 0,4-0,7 dan nilai RSME terkecil ada di persamaan atenuasi baru yaitu 0,437. Hal ini menunjukkan persamaan atenuasi baru memberikan hasil yang relatif baik dibandingkan persamaan atenuasi lainnya.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis regresi didapat persamaan atenuasi untuk kejadian gempa di zona subduksi sumatera adalah $\text{Log PGA} = 3,3501 - 1,6217 \text{Log Rh} + 0,181 \text{Mw} + 0,1321$. Dengan PGA adalah nilai percepatan tanah maksimum, Rh adalah jarak hiposenter dalam km dan Mw adalah magnitudo momen. Berdasarkan validasi persamaan atenuasi, persamaan atenuasi yang didapatkan dari penelitian ini memiliki tingkat kecocokan yang cukup tinggi dengan hasil PGA observasi. Dibandingkan dengan beberapa persamaan

atenuasi yang sudah ada sebelumnya, persamaan atenuasi dari penelitian ini relatif lebih baik dan mendekati hasil PGA observasi dengan tingkat korelasi yang kuat sebesar 0,785 dan tingkat eror yang kecil sebesar 0,437.

DAFTAR PUSTAKA

Amelia, Piski. (2017). "Analisis Mekanisme Fokus Gempa 2 Maret 2016 di Barat Daya Kepulauan Mentawai dengan Metode Inversi Waveform". Diploma Thesis. Universitas Andalas.

Aprilianto, Samsul., Bagus Jaya Santosa., & Bambang Sunardi. (2016). "Ground Motion Modeling Wilayah Sumatera Selatan Berdasarkan Analisis Bahaya Gempa Probabilistik". Jurnal Sains dan Seni ITS. Vol. 5. No. 2. Hlm 2337-3520.

Lin, Po Shen dan Chyi Tyi Lee. (2008). "Ground Motion attenuation Relationship for Subduction Zone Earthquake in Northeastern Taiwan". Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 98 No. 1. Hlm 220-240.

Pandadaran, Sidiq Hargo., Aziz Widiarso., Arif Alhazmi Fauzi., Sigit Eko Kurniawan., Adi Surya Widya Wibawa. (2019). "Penentuan Model Atenuasi Percepatan Tanah untuk Wilayah Sumatera Barat Berdasarkan Sumber Gempa Bumi Subduksi Interface". Prosiding Seminar Nasional Kebuian Ke-12. Hlm 750-766.

Pawirodikromo, Widodo. (2012). Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.

Priyanto, Dwi Karyadi., K.N. Suarbawa., & Ardianto Septiadhi. (2018). "Penentuan Model Formula Empiris Percepatan Getaran Tanah Daerah Denpasar". Buletin Fisika. Vol. 19. No. 1. Hlm 23 – 27.

Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Pemukiman.

Putra, Rusnardi Rahmat. (2021). "Karakteristik Gempa Foreshock dan Aftershock pada Sumber Gempa Interplate Berdasar Distribusi Kejadian Gempa". Jurnal of Civil Engineering and Vocational Education. Vol. 8. No. 2. Hlm. 76-84.

Sugiarto. (1992). Tahap Awal + Aplikasi Analisis Regresi. Yogyakarta: Andi Offset.

Sukarasa, I Ketut & Ni Luh Putu Trisnawati.
(2017). “ANALISA GEMPABUMI DENGAN
MENGUNAKAN DATA PERCEPATAN
GETARAN TANAH (STUDI KASUS GEMPA
BUMI NTB TANGGAL 1 AGUSTUS 2016)”.
Skripsi. Universitas Udayana.