GRAVITASI
Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains
Vol (9) No (01) Edisi Juni Tahun 2026

https://ejurnalunsam.id/index.php/JPFS

# Analisis Nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) Gempa Tapanuli Utara Menggunakan Metode Atkinson–Boore dan Rekaman Akselerograf

**Fatimah Isma[1], Lailatul Husna Lubis[1], Patra Mesiari Tarigan[2], Sugeng[2]**

[1]Program Studi Fisika FST Universitas Islam Negeri Sumatera Utara
[2]Stasiun Geofisika Kelas I Deli Serdang
Jln. Lapangan Golf No. 120, Kecamatan Pancur Batu, Kab. Deli Serdang,
Propinsi Sumatera Utara, 20353
Email Korespondensi: lailatulhusnalubis@uinsu.ac.id

**ABSTRAK**

*Kabupaten Tapanuli Utara merupakan wilayah dengan aktivitas seismik tinggi karena dipengaruhi oleh sistem Sesar Sumatera dan zona subduksi. Pada tanggal 15 September 2024, telah terjadi gempa bumi dengan magnitudo 5,7 pada kedalaman 131 km. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai Peak Ground Acceleration (PGA) melalui dua pendekatan, yaitu rekaman langsung instrumen akselerograf dan estimasi empiris menggunakan metode Ground Motion Prediction Equation (GMPE) Atkinson-Boore (2003) tipe in-slab. Analisis dilakukan pada 36 titik grid di wilayah Tapanuli Utara dengan mempertimbangkan pengaruh jarak hiposenter dan kondisi tanah setempat Vs30. Hasil penelitian menunjukkan nilai PGA maksimum dari metode Atkinson-Boore sebesar 0,0416 g, sedangkan data rekaman akselerograf menunjukkan nilai 0,0211 g. Variasi nilai PGA dipengaruhi secara signifikan oleh kondisi geologi lokal; wilayah dengan Vs30 rendah (Site Class C dan D) yang didominasi material lunak seperti Tuffa Toba menunjukkan amplifikasi guncangan yang lebih tinggi. Konversi nilai PGA ke skala Modified Mercalli Intensity (MMI) menghasilkan tingkat intensitas IV hingga V MMI, yang dikategorikan sebagai guncangan ringan hingga sedang. Secara statistik, metode Atkinson-Boore cenderung overestimate terhadap data aktual dengan nilai residual 0,12–0,37 dengan rata rata sebesar 0,26, dan nilai RMSE sebesar 0,0152 menunjukkan bahwa model ini masih cukup akurat dan representatif untuk digunakan dalam upaya mitigasi bencana gempa bumi di wilayah tersebut.*

*Kata kunci: Akselerograf, Atkinson-Boore, Peak Ground Acceleration (PGA), Tapanuli Utara, Vs30.*

**ABSTRACT**

*North Tapanuli Regency is an area with high seismic activity due to its influence by the Sumatran Fault system and subduction zone. On September 15, 2024, an earthquake with a magnitude of 5.7 occurred at a depth of 131 km. This study aims to analyze the Peak Ground Acceleration (PGA) value through two approaches, namely direct recordings of accelerograph instruments and empirical estimation using the Atkinson-Boore (2003) in-slab type Ground Motion Prediction Equation (GMPE) method. The analysis was carried out at 36 grid points in the North Tapanuli region by considering the influence of hypocenter distance and local soil conditions Vs30. The results showed the maximum PGA value from the Atkinson-Boore method was 0.0416 g, while the accelerograph recording data showed a value of 0.0211 g. Variations in PGA values were significantly influenced by local geological conditions; areas with low Vs30 (Site Class C and D) dominated by soft materials such as Toba Tuffa showed higher shock amplification. Conversion of PGA values to the Modified Mercalli Intensity (MMI) scale produces intensity levels of IV to V MMI, which are categorized as mild to moderate shaking. Statistically, the Atkinson-Boore method tends to overestimate the actual data with residual values of 0.12–0.37 with an average of 0.26, and an RMSE value of 0.0152 indicating that this model is still accurate and representative enough to be used in earthquake disaster mitigation efforts in the region.*

*Keywords: Accelerograph, Atkinson–Boore, Peak Ground Acceleration (PGA), North Tapanuli, Vs30*

## A. PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Interaksi ketiga lempeng tersebut menyebabkan tingginya aktivitas tektonik sehingga Indonesia menjadi salah satu wilayah dengan tingkat seismisitas tertinggi di dunia (Pratiwi dkk., 2024). Kondisi ini menyebabkan Indonesia sering mengalami gempa bumi yang berpotensi menimbulkan kerusakan infrastruktur, kerugian material, dan korban jiwa di berbagai wilayah.

Wilayah Sumatera Utara secara khusus berada pada zona subduksi aktif di bagian barat Pulau Sumatera, dimana Lempeng Indo-Australia menunjam ke bawah Lempeng Eurasia. Kondisi ini membentuk Pegunungan Bukit Barisan serta sistem patahan besar yang dikenal sebagai Sesar Sumatera. Sesar ini terbagi menjadi beberapa segmen aktif, antara lain segmen Renun, Toru, Angkola, dan Barumun, yang berperan penting dalam mengontrol aktivitas gempa bumi di wilayah tersebut (Natawidjaja, 2018).

Salah satu daerah di Sumatera Utara yang memiliki potensi kegempaan tinggi adalah Kabupaten Tapanuli Utara. Wilayah ini dipengaruhi oleh aktivitas subduksi dan keberadaan sesar aktif seperti Sesar Semangko yang menyebabkan deformasi kerak bumi secara intensif (Amiroh dkk., 2023). Pada tanggal 15 September 2024, gempa bumi berkekuatan magnitudo 5,7 (Mw) terjadi di wilayah Tapanuli Utara dengan koordinat episenter 1,86° LU dan 98,96° BT serta kedalaman hiposenter sekitar 131 km. Gempa ini tergolong sebagai gempa menengah dan berpotensi menimbulkan guncangan yang dirasakan masyarakat di sekitar episenter serta wilayah-wilayah sekitarnya.

Parameter penting yang digunakan untuk mengukur tingkat guncangan gempa bumi adalah *Peak Ground Acceleration* (PGA), yaitu nilai percepatan maksimum gerakan tanah akibat gelombang seismik. Nilai PGA sangat dipengaruhi oleh magnitudo gempa, kedalaman sumber, jarak dari episenter, serta kondisi tanah setempat (Fenty Anggraeni & Arif, 2025). Semakin tinggi nilai PGA, semakin besar potensi kerusakan bangunan dan infrastruktur.

Nilai PGA dapat diperoleh melalui dua pendekatan utama, yaitu rekaman langsung dari alat akselerograf yang mencatat percepatan tanah secara *real-time* dan perhitungan empiris menggunakan *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE) Atkinson-Boore (2003). Metode Atkinson-Boore telah banyak digunakan dalam penyusunan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 oleh Pusat Studi Gempa Nasional karena mempertimbangkan faktor magnitudo, kedalaman, jarak hiposenter, serta klasifikasi situs tanah (Vs30).

Penelitian mengenai estimasi *Peak Ground Acceleration* (PGA) dengan metode Atkinson–Boore telah banyak dilakukan pada wilayah rawan gempa (Atkinson & Boore, 2003). Namun, penelitian sebelumnya umumnya hanya berfokus pada perhitungan empiris tanpa membandingkan hasilnya dengan data rekaman akselerograf. Selain itu, kajian terkait kesesuaian metode Atkinson–Boore terhadap data observasi di wilayah Tapanuli Utara masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk membandingkan nilai PGA hasil metode Atkinson–Boore dengan data rekaman akselerograf di wilayah Tapanuli Utara.

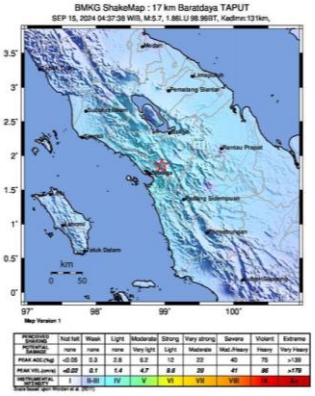
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai PGA hasil observasi dari rekaman alat akselerograf dengan nilai PGA yang dihitung menggunakan metode Atkinson-Boore (2003) pada gempa bumi Tapanuli Utara tanggal 15 September 2024. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis pengaruh jarak gempa dan kondisi tanah (Vs30) terhadap besaran PGA, serta melakukan konversi nilai PGA ke skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI) untuk mengetahui tingkat intensitas guncangan yang dirasakan. Hasil analisis diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai karakteristik guncangan gempa dan mendukung upaya mitigasi bencana di wilayah rawan seismik Sumatera Utara.

Analisis PGA yang mengombinasikan data rekaman akselerograf dengan perhitungan menggunakan metode Atkinson–Boore (2003) penting dilakukan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat, terutama pada wilayah dengan kondisi geologi yang kompleks seperti Tapanuli Utara. Pendekatan ini dapat memberikan informasi mengenai karakteristik guncangan gempa di wilayah

penelitian. Selain memiliki nilai ilmiah, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam upaya mitigasi bencana dan pengurangan risiko gempa bumi di masa mendatang.

## B. METODE PENELITIAN

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer merupakan rekaman akselerograf gempa bumi Tapanuli Utara yang terjadi pada tanggal 15 September 2024. Parameter gempa yang diperoleh meliputi magnitudo Mw = 5,7, kedalaman hiposenter h = 131 km, serta koordinat episenter 1,86° LU dan 98,96° BT. Data sekunder meliputi nilai kecepatan gelombang geser rata-rata 30 meter teratas (Vs30) yang diambil dari USGS Earth Explorer dan data batas wilayah administrasi Kabupaten Tapanuli Utara yang diperoleh dari web https://www.lapakgis.com/.

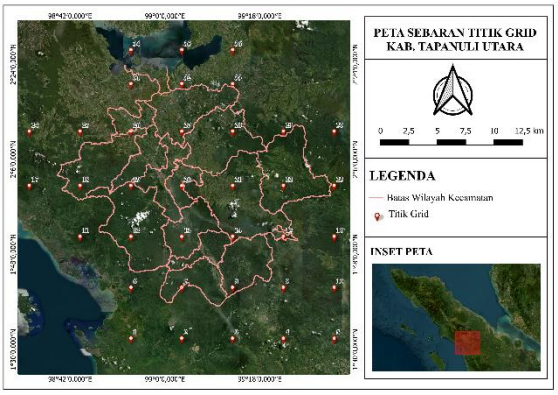



**Gambar 1.** ShakeMap Gempa Bumi Tapanuli Utara 15 September 2024 (Sumber: BMKG, 2024)

Alat yang digunakan terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras yang digunakan adalah laptop untuk pengolahan data. Perangkat lunak yang digunakan meliputi *Microsoft Excel* untuk perhitungan PGA dan analisis statistik, *ArcMap 10.8* untuk pemrosesan data spasial dan pembuatan peta sebaran PGA, dan *Google Earth* untuk penentuan titik grid penelitian. Adapun bahan utama pada penelitian ini adalah data rekaman PGA dari akselerograf dan layer Vs30.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan langkah-langkah sebagai berikut:

Wilayah penelitian dibagi menjadi 36 titik grid dengan jarak antar titik 0,095° menggunakan *Google Earth.* Pembagian grid ini bertujuan untuk memperoleh distribusi spasial yang merata di seluruh Kabupaten Tapanuli Utara.




**Gambar 2.** Peta Sebaran 36 Titik Grid Penelitian

Perhitungan jarak episenter (R_Epi) mengacu pada Ainun, dkk (2023), yang dinyatakan pada Persamaan (2.1):

$$R_{epi} = \sqrt{\left[\left(Lon_{grid} - Lon_{epi}\right) \times 111\right]^2 + \left[\left(Lat_{grid} - Lat_{epi}\right) \times 111\right]^2} \quad (2.1)$$

Selanjutnya, jarak hiposenter (R_Hipo) dihitung dengan memasukkan kedalaman gempa menggunakan persamaan menurut Ainun, dkk (2023), yaitu pada Persamaan (2.2):

$$R_{hipo} = \sqrt{R_{epi}^2 + h^2} \quad (2.2)$$

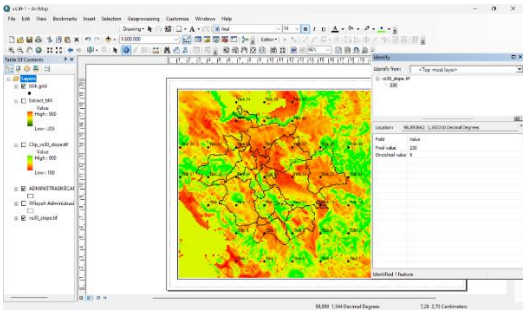
Penentuan Nilai Vs30 dan Klasifikasi *Site Class* mengacu pada standar NEHRP (1994) pada **Tabel 1.**

**Tabel 1.** Klasifikasi Jenis Tanah Berdasarkan Nilai Vs30

| Klasifikasi | Profil Tanah | Kecepatan Gelombang Geser (Vs30) |
|---|---|---|
| A | Batuan Keras | >1500 m/s |
| B | Batuan | >760−1500 m/s |
| SC | Tanah Sangat Padat dan Batuan Lunak | >360−750 m/s |
| SD | Tanah Sedang | 175−350 m/s |
| SE | Tanah Lunak | <175 m/s |

(Sumber: NEHRP, 1994)

Kemudian nilai Vs30 diekstrak dan diidentifikasi menggunakan *ArcMap 10.8.*



**Gambar 3.** Identifikasi Nilai Vs30 Tapanuli Utara

Nilai PGA dihitung menggunakan persamaan *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE) Atkinson-Boore (2003) yang dinyatakan pada Persamaan (2.3)

$$\log Y = c_1 + c_2 M + c_3 h + c_4 R - g \log R + c_5 sl_{SC} + c_6 sl_{SD} + c_7 sl_{SE} \quad (2.3)$$

dimana $Y$ adalah PGA dalam satuan gal, $M$ adalah magnitudo, $R$ adalah jarak hiposenter, dan $g$, $c_1$–$c_7$, serta $sl$ adalah konstanta empiris untuk tipe *interface* dan *in-slab.*

Menurut Atkinson-Boore (2003), pemilihan koefisien *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE) dibedakan berdasarkan tipe mekanisme gempa subduksi. Koefisien interface digunakan untuk gempa dengan kedalaman hiposenter 0–70 km, sedangkan koefisien in-slab digunakan untuk kedalaman hiposenter lebih dari 70 km. Konstanta empiris yang digunakan disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

**Tabel 2.** Konstanta Empiris Atkinson-Boore *Interface*

| Parameter | c1 | c2 | c3 | c4 | c5 | c6 | c7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PGA | 2.9910 | 0.03525 | 0.00759 | 0.00206 | 0.19 | 0.24 | 0.29 |

(Sumber: Atkinson-Boore, 2003)

**Tabel 3.** Konstanta Empiris Atkinson-Boore *In-Slab*

| Parameter | c1 | c2 | c3 | c4 | c5 | c6 | c7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PGA | -0.04713 | 0.6909 | 0.01130 | -0.00202 | 0.19 | 0.24 | 0.29 |

(Sumber: Atkinson-Boore, 2003)

Konversi nilai PGA ke skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI) menggunakan rumus Wald (1999) yang dinyatakan pada Persamaan (2.4):

$$MMI = 3.66 \log(PGA) - 1.6 \quad (4.4)$$

Tabel 4 menunjukkan hubungan antara nilai PGA dan skala intensitas MMI yang digunakan dalam penelitian ini.

**Tabel 4.** Konversi Nilai PGA Menjadi Indeks MMI

| No | Rentang PGA | Skala MMI |
|---|---|---|
| 1 | < 0,17 | I |
| 2 | 0,17 – 1,4 | II - III |
| 3 | 1,4 – 3,9 | IV |
| 4 | 3,9 – 9,2 | V |
| 5 | 9,2 – 18 | VI |
| 6 | 18 – 34 | VII |
| 7 | 34 – 65 | VIII |
| 8 | 65 – 124 | IX |
| 9 | >124 | X |

(Sumber: Wald, 1999)

Untuk mengetahui tingkat kesesuaian sekaligus kecenderungan penyimpangan antara nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) hasil estimasi metode Atkinson-Boore (2003) dengan data rekaman akselerograf, digunakan parameter statistik residual dan *Root Mean Square Error* (RMSE).

Residual menunjukkan arah kesalahan, yaitu selisih antara nilai hasil model dan nilai observasi aktual, sehingga dapat diketahui apakah model cenderung *overestimate* atau *underestimate* (Pramono dkk., 2020). Yang dinyatakan pada Persamaan (2.5)

$$R = \log_{10}(\text{PGA}_{\text{expected}}) - \log_{10}(\text{PGA}_{\text{actual}}) \quad (2.5)$$

dimana nilai $\text{PGA}_{\text{expected}}$ dari model Atkinson, sedangkan $PGA_{actual}$ adalah nilai PGA hasil observasi akselerograf.

Sementara itu, RMSE digunakan untuk mengukur besarnya rata-rata deviasi antara hasil perhitungan dan data observasi di lapangan, sehingga memberikan gambaran tingkat akurasi model secara keseluruhan (Iida, 2024). Yang dinyatakan pada Persamaan (2.6)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(Y_{rm1} - Y_{rm2})^2} \quad (2.6)$$

dimana $Y_{rm1}$merupakan nilai PGA hasil perhitungan model Atkinson, sedangkan $Y_{rm2}$ merupakan nilai PGA hasil observasi dari akselerograf.

## C. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

Gempa bumi yang dianalisis memiliki magnitudo 5,7 dengan kedalaman 131 km. Nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dihitung menggunakan metode *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE) yang

dikembangkan oleh Gail M. Atkinson dan David M. Boore (2003), serta menggunakan data rekaman akselerograf sebagai acuan observasi.

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai PGA mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak dari sumber gempa. Selain itu, nilai maksimum PGA yang diperoleh dari metode Atkinson adalah sebesar 0,0416 g, sedangkan nilai maksimum dari data akselerograf adalah sebesar 0,0211 g.

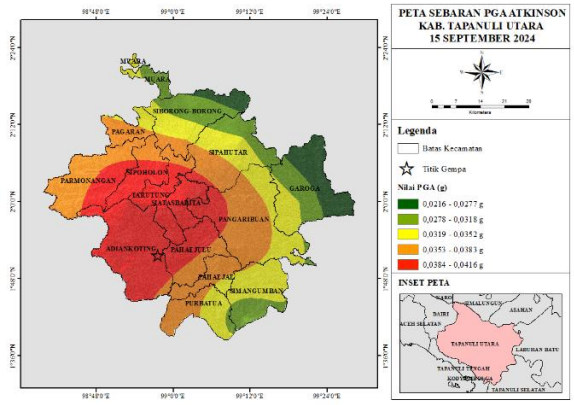
Berdasarkan hasil pengolahan nilai kecepatan gelombang geser rata-rata hingga kedalaman 30 meter (Vs30) pada 36 titik penelitian, diperoleh rentang nilai antara 220 m/s hingga 862 m/s. Klasifikasi tanah dilakukan mengacu pada (NEHRP, 1994). Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah termasuk dalam Site Class C (tanah sedang hingga padat), dengan sebagian lainnya termasuk dalam Site Class B dan D.

Variasi nilai PGA yang cukup signifikan ditemukan pada 36 titik pengamatan, termasuk pada lokasi dengan jarak hiposenter yang relatif sama.

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Titik Grid | Lon | Lat | R_Epi | R_Hypo | Vs30 | Site Class | SC | SD | SE | Log Y | PGA (gal) | PGA (g) |
| 1 | 98.88 | 1.55 | 35.5373 | 135.735 | 230 | D | 0 | 1 | 0 | 1.5968 | 39.5187 | 0.04028 |
| 2 | 99.03 | 1.55 | 35.2764 | 135.667 | 668 | C | 1 | 0 | 0 | 1.54732 | 35.2633 | 0.03595 |
| 3 | 99.18 | 1.55 | 42.1946 | 137.628 | 574 | C | 1 | 0 | 0 | 1.53243 | 34.0745 | 0.03473 |
| 4 | 99.33 | 1.55 | 53.5798 | 141.534 | 564 | C | 1 | 0 | 0 | 1.50322 | 31.8584 | 0.03248 |
| 5 | 99.48 | 1.55 | 67.1986 | 147.23 | 479 | C | 1 | 0 | 0 | 1.46166 | 28.951 | 0.02951 |
| 6 | 98.88 | 1.7 | 19.8563 | 132.496 | 365 | C | 1 | 0 | 0 | 1.57174 | 37.3024 | 0.03802 |
| 7 | 99.03 | 1.7 | 19.3853 | 132.427 | 520 | C | 1 | 0 | 0 | 1.57228 | 37.349 | 0.03807 |
| 8 | 99.18 | 1.7 | 30.1953 | 134.435 | 803 | B | 0 | 0 | 0 | 1.36676 | 23.2679 | 0.02372 |
| 9 | 99.33 | 1.7 | 44.7455 | 138.431 | 737 | C | 1 | 0 | 0 | 1.52637 | 33.6027 | 0.03425 |
| 10 | 99.48 | 1.7 | 60.3905 | 144.25 | 773 | B | 0 | 0 | 0 | 1.29326 | 19.6453 | 0.02003 |
| 11 | 98.73 | 1.85 | 25.5541 | 133.469 | 530 | C | 1 | 0 | 0 | 1.5642 | 36.6606 | 0.03737 |
| 12 | 98.88 | 1.85 | 8.94911 | 131.305 | 442 | C | 1 | 0 | 0 | 1.58102 | 38.1083 | 0.03885 |
| 13 | 99.03 | 1.85 | 7.84889 | 131.235 | 664 | C | 1 | 0 | 0 | 1.58157 | 38.1567 | 0.0389 |
| 14 | 99.18 | 1.85 | 24.4452 | 133.261 | 668 | C | 1 | 0 | 0 | 1.56581 | 36.7965 | 0.03751 |
| 15 | 99.33 | 1.85 | 41.085 | 137.292 | 574 | C | 1 | 0 | 0 | 1.53497 | 34.2745 | 0.03494 |
| 16 | 99.48 | 1.85 | 57.7307 | 143.157 | 764 | B | 0 | 0 | 0 | 1.30126 | 20.0107 | 0.0204 |
| 17 | 98.58 | 2 | 44.9516 | 138.498 | 546 | C | 1 | 0 | 0 | 1.52587 | 33.5639 | 0.03421 |
| 18 | 98.73 | 2 | 29.8877 | 134.366 | 587 | C | 1 | 0 | 0 | 1.55729 | 36.0816 | 0.03678 |
| 19 | 98.88 | 2 | 17.8982 | 132.217 | 220 | D | 0 | 1 | 0 | 1.62391 | 42.0637 | 0.04288 |
| 20 | 99.03 | 2 | 17.3742 | 132.147 | 351 | D | 0 | 1 | 0 | 1.62445 | 42.1164 | 0.04293 |
| 21 | 99.18 | 2 | 28.9453 | 134.16 | 391 | C | 1 | 0 | 0 | 1.55887 | 36.2138 | 0.03692 |
| 22 | 99.33 | 2 | 43.9117 | 138.164 | 699 | C | 1 | 0 | 0 | 1.52839 | 33.7587 | 0.03441 |
| 23 | 99.48 | 2 | 59.7753 | 143.993 | 790 | B | 0 | 0 | 0 | 1.29513 | 19.7302 | 0.02011 |
| 24 | 98.58 | 2.16 | 53.7405 | 141.595 | 490 | C | 1 | 0 | 0 | 1.50277 | 31.8253 | 0.03244 |
| 25 | 98.73 | 2.16 | 41.9603 | 137.556 | 446 | C | 1 | 0 | 0 | 1.53297 | 34.117 | 0.03478 |
| 26 | 98.88 | 2.16 | 34.4637 | 135.458 | 370 | C | 1 | 0 | 0 | 1.54892 | 35.3932 | 0.03608 |
| 27 | 99.03 | 2.16 | 34.1945 | 135.389 | 373 | C | 1 | 0 | 0 | 1.54944 | 35.4357 | 0.03612 |
| 28 | 99.18 | 2.16 | 41.2944 | 137.354 | 521 | C | 1 | 0 | 0 | 1.5345 | 34.237 | 0.0349 |
| 29 | 99.33 | 2.16 | 52.8738 | 141.268 | 760 | B | 0 | 0 | 0 | 1.31519 | 20.6629 | 0.02106 |
| 30 | 99.48 | 2.16 | 66.637 | 146.974 | 770 | B | 0 | 0 | 0 | 1.2735 | 18.7717 | 0.01914 |
| 31 | 98.88 | 2.3 | 49.6407 | 140.09 | 618 | C | 1 | 0 | 0 | 1.51395 | 32.655 | 0.03329 |
| 32 | 99.03 | 2.3 | 49.4542 | 140.024 | 803 | B | 0 | 0 | 0 | 1.32444 | 21.1077 | 0.02152 |
| 33 | 99.18 | 2.3 | 54.6048 | 141.925 | 862 | B | 0 | 0 | 0 | 1.31033 | 20.433 | 0.02083 |
| 34 | 98.88 | 2.4 | 60.5942 | 144.335 | 600 | C | 1 | 0 | 0 | 1.48264 | 30.3833 | 0.03097 |
| 35 | 99.03 | 2.4 | 60.4415 | 144.271 | 600 | C | 1 | 0 | 0 | 1.4831 | 30.4161 | 0.03101 |
| 36 | 99.18 | 2.4 | 64.7236 | 146.117 | 479 | C | 1 | 0 | 0 | 1.46969 | 29.4912 | 0.03006 |

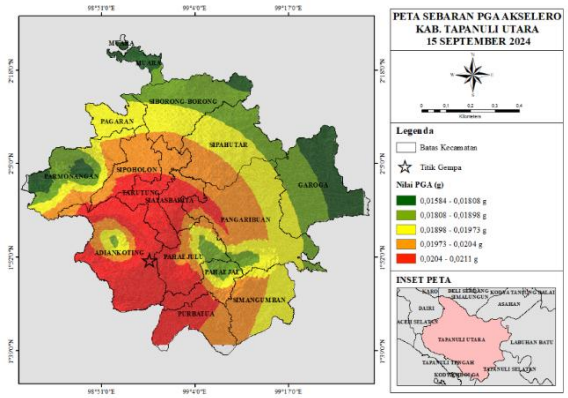
**Gambar 4.** Perbandingan Site Class PGA Atkinson

Sebaran spasial nilai PGA hasil perhitungan metode Atkinson ditampilkan pada (Gambar 5.)




**Gambar 5.** Peta Sebaran PGA Atkinson

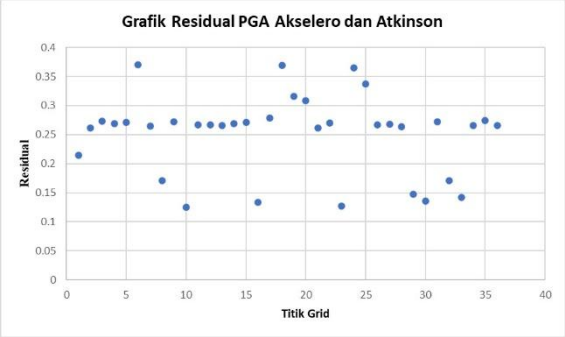
Sedangkan distribusi nilai PGA berdasarkan data observasi akselerograf ditampilkan pada (Gambar 6.)




**Gambar 6.** Peta Sebaran PGA Akselerograf

Hasil konversi nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) ke dalam skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI) menunjukkan adanya perbedaan tingkat intensitas antara hasil perhitungan metode Atkinson–Boore (2003) dan data observasi akselerograf. Berdasarkan hasil pengolahan, metode Atkinson menghasilkan rentang intensitas hingga MMI V, yang termasuk dalam kategori guncangan sedang, sedangkan data akselerograf menunjukkan intensitas yang relatif lebih rendah, yaitu berkisar pada MMI IV, yang tergolong guncangan ringan hingga sedang.

Berdasarkan analisis statistik, diperoleh nilai residual pada rentang 0,12 hingga 0,37, serta nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0,0152. Distribusi nilai residual pada setiap titik pengamatan ditampilkan pada Gambar 7, yang menunjukkan hubungan antara nilai residual dengan titik grid penelitian.




**Gambar 7.** Grafik Residual PGA Akselero dan Atkinson

## Pembahasan

Gempa yang dianalisis memiliki magnitudo 5,7 dengan kedalaman 131 km. Nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dihitung menggunakan metode *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE) yang dikembangkan oleh Gail M. Atkinson dan David M. Boore (2003), kemudian dibandingkan dengan data rekaman akselerograf. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai PGA menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber gempa, yang mencerminkan proses atenuasi gelombang seismik, yaitu pelemahan energi gelombang selama perambatan dari hiposenter menuju permukaan.

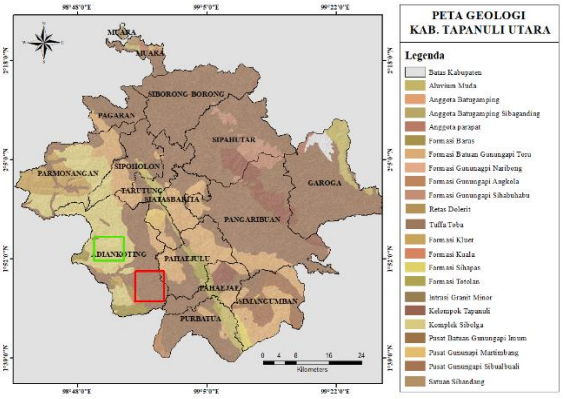
Berdasarkan klasifikasi Atkinson–Boore (2003), gempa ini termasuk jenis *in-slab* karena kedalamannya lebih dari 70 km. Hasil pengolahan nilai Vs30 pada 36 titik menunjukkan rentang 220–862 m/s. Klasifikasi tanah mengacu pada *National Earthquake Hazards Reduction Program*, dimana wilayah penelitian didominasi oleh Site Class C, dengan sebagian lainnya termasuk Site Class B dan D (NEHRP, 1994).

Perbedaan kondisi tanah ini memengaruhi nilai PGA, dimana tanah dengan Vs30 rendah (lebih lunak) cenderung menghasilkan amplifikasi gelombang yang lebih besar dibandingkan tanah keras. Hal ini terlihat pada beberapa titik dengan jarak hiposenter yang hampir sama namun memiliki nilai PGA berbeda, yang menunjukkan adanya pengaruh *site effect* (Dialosa dkk., 2020).

Distribusi PGA pada 36 titik menunjukkan variasi yang cukup signifikan, sehingga mengindikasikan bahwa selain jarak, kondisi tanah lokal juga berperan penting. Perbandingan antara peta PGA metode Atkinson dan akselerograf menunjukkan pola yang relatif sama, namun dengan perbedaan nilai, dimana metode Atkinson menghasilkan nilai maksimum yang lebih tinggi dibandingkan data observasi (Bustari & Wibowo, 2023).

Fenomena tidak meratanya nilai guncangan di sekitar episenter menunjukkan bahwa jarak dari sumber gempa bukan satu-satunya faktor penentu besarnya dampak yang dirasakan. Meskipun secara teoritis wilayah yang dekat dengan episenter mengalami guncangan paling kuat, keberadaan zona dengan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) yang rendah di tengah zona bernilai tinggi dapat terjadi akibat pengaruh kondisi geologi lokal dan litologi yang lebih kompak (Gandini, 2025). Karakteristik fisik tanah, seperti jenis batuan dasar yang keras atau lapisan sedimen yang tipis, dapat memicu terjadinya deamplifikasi yang melemahkan gelombang seismik sebelum mencapai permukaan (Nugraheni, 2025).

Untuk memahami hal tersebut, digunakan peta geologi Kabupaten Tapanuli Utara yang ditampilkan pada Gambar 8.




**Gambar 8.** Peta Geologi Tapanuli Utara

Berdasarkan peta geologi tersebut, terlihat bahwa wilayah dengan nilai PGA rendah umumnya berada pada batuan keras seperti granit atau Komplek Sibolga, yang memiliki kemampuan meredam energi gelombang. Sebaliknya, wilayah dengan nilai PGA tinggi didominasi oleh material lunak seperti aluvium muda dan Tuffa Toba yang cenderung memperkuat amplifikasi gelombang. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi litologi sangat berpengaruh terhadap distribusi percepatan tanah di permukaan (Putra dkk., 2019).

Nilai PGA kemudian dikonversi ke dalam skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI), yang menunjukkan bahwa metode Atkinson menghasilkan intensitas hingga MMI V, sedangkan data akselerograf berada pada sekitar MMI IV (Wibowo dkk., 2024). Hal ini menunjukkan bahwa model cenderung memberikan estimasi intensitas yang lebih tinggi dibandingkan kondisi aktual di lapangan.

Analisis residual menunjukkan rentang nilai 0,12–0,37 dengan rata-rata sekitar 0,26, yang mengindikasikan bahwa metode Atkinson–Boore (2003) cenderung *overestimate* terhadap data observasi (Pramono dkk., 2020). *Overestimation* pada *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE) terjadi ketika model memprediksi nilai PGA lebih tinggi dibandingkan data observasi di lapangan. Hal ini umumnya disebabkan karena model belum sepenuhnya menangkap kondisi sebenarnya, seperti perbedaan karakteristik sumber gempa, jalur rambat gelombang, dan kondisi tanah lokal (Vandana dkk., 2023).

Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) yang diperoleh sebesar 0,0152 menunjukkan bahwa tingkat kesalahan model relatif kecil dan masih dalam batas yang dapat diterima (Iida, 2024), sehingga model ini tetap memiliki tingkat akurasi yang baik dan dapat digunakan dalam analisis bahaya gempa dengan mempertimbangkan kondisi tanah dan geologi lokal.

## D. KESIMPULAN

Gempa bumi di Tapanuli Utara (15 September 2024) dengan magnitudo 5,7 dan kedalaman 131 km menunjukkan bahwa nilai PGA menurun seiring bertambahnya jarak akibat atenuasi gelombang. Metode Atkinson-Boore menghasilkan nilai maksimum lebih tinggi (0,0416 g) dibandingkan akselerograf (0,0211 g). Variasi PGA juga dipengaruhi oleh *site effect*, dimana tanah lunak (Vs30 rendah) seperti Tuffa Toba dan aluvium memperkuat getaran.

Konversi ke MMI menunjukkan intensitas MMI V (Atkinson) dan MMI IV (akselerograf), yaitu guncangan ringan hingga sedang. Secara statistik, model cenderung *overestimate* dengan residual 0,12–0,37 (rata-rata 0,26), dan RMSE 0,0152 menunjukkan akurasi masih baik.

Analisis disarankan untuk membandingkan beberapa model GMPE guna meningkatkan ketelitian hasil. Selain itu, kajian kondisi tanah dan geologi lokal perlu dilakukan lebih detail karena berpengaruh signifikan terhadap distribusi percepatan tanah.

## E. DAFTAR PUSTAKA


Ainun, N., Lubis, L. H., & Sirait, R. (2023). Pemetaan tingkat rawan gempa berdasarkan nilai PGA (peak ground acceleration) menggunakan metode Mc. Guirre R.K dan Donovan. *Journal of Physics (JoP)*, 8(3), 75–79.

Amiroh, S., Lubis, L. H., Sirait, R., dkk. (2023). Analisis peak ground acceleration wilayah Sumatera Utara menggunakan metode Mc. Guirre R.K dan metode Campbell. *Journal of Physics (JoP)*, 8(2), 37–41.

Anggraeni, E. F., & Arif, J. (2025). Analisis dinamika tanah Kota Agung menggunakan HVSR untuk estimasi peak ground acceleration. *Jurnal Media Informatika (JUMIN)*, 6(6), 3092–3100. http://ejournal.sisfokomtek.org/index.php/jumin

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. https://doi.org/10.1785/0120020156

Bustari, A. A., & Wibowo, N. B. (2023). Pemetaan sebaran nilai Vs30, faktor amplifikasi tanah, dan peak ground acceleration wilayah Bantul Timur. *Cakrawala: Jurnal Ilmiah Bidang Sains*, 1(2), 127–139. https://doi.org/10.28989/cakrawala.v1i2.1436

Building Seismic Safety Council. (1994). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings, 1994 edition, Part 1 – Provisions* (FEMA 222A). Federal Emergency Management Agency.

Dialosa, K., Rustadi, Mulyatno, B. S., & Sulaeman, C. (2018). Analisis tingkat resiko dampak gempabumi di Kabupaten Cilacap menggunakan metode DSHA dan data mikrotremor. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 4(3), 299–311. https://doi.org/10.23960/jge.v4i3.42

Gandini, D. R. A., Setiawan, Y. A., Madrinovella, I., dkk. (2022). Hasil awal analisis peak ground acceleration di Bali. *Jurnal Geofisika*, 20(2), 71–75.

Iida, T. (2024). Identifying causes of errors between two wave-related data using performance metrics. *Applied Ocean Research*, 148, 104024. https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104024

Jannah, D. M., Khoirunnisa, S., Rosyida, H., dkk. (2024). Analisis indeks kerentanan seismik berdasarkan nilai Vs30 pada zona terdampak gempa bumi (Studi kasus: Gempa Cianjur 21 November 2022). *KURVATEK*, 9(2), 107–116.

Natawidjaja, D. H. (2018). Major bifurcations, slip rates, and a creeping segment of Sumatran fault zone in Tarutung-Sarulla-Sipirok-Padangsidempuan, Central Sumatra, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*, 5(2), 137–160. https://doi.org/10.17014/IJOG.5.2.137-160

Nugraheni, A. S. (2025). Variasi nilai peak ground acceleration di Kecamatan Prambanan, Kabupaten Klaten. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 3(5), 222–230. https://doi.org/10.61132/venus.v3i5.1214

Pramono, S., Prakoso, W. A., Rohadi, S., dkk. (2020). Influence of seismicity declustering on ground motion prediction equations for Central Sulawesi seismic region. *International Journal of GEOMATE*, 19(71), 61–68. https://doi.org/10.21660/2020.71.28369

Pratiwi, N. M., Lubis, L. H., Sirait, R. S., & Sipayung, R. S. (2024). Analysis of soil vulnerability level due to earthquake in Tarutung region and its surroundings using probabilistic seismic hazard analysis method. *Jurnal Fisika Flux*, 21(1), 10. https://doi.org/10.20527/flux.v21i1.17157

Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta deagregasi bahaya gempa Indonesia untuk perencanaan dan evaluasi infrastruktur tahan gempa*.

Putra, M. F. N., Rustadi, Haerudin, N., & Sulaeman, C. (2019). Analisis site effect berdasarkan data mikrotremor dan nilai peak ground acceleration pada sesar Opak, Kabupaten Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta.

Vandana, Dadhich, H. K., Mittal, H., & Mishra, O. P. (2024). *Ground motion prediction equation for NW Himalaya and its surrounding region*. Quaternary Science Advances, 13, 100136. https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100136

Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., & Kanamori, H. (1999). Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and Modified Mercalli Intensity in California. *Earthquake Spectra*, 15(3), 557–564. https://doi.org/10.1193/1.1586058