Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 15, No. 4, Juli 2026, hal. 414 – 422
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.15.4.414-422.2026

Open Access

Deteksi Gempa Bumi *Real-Time* Menggunakan Sensor MPU6050 dengan Koreksi *Drift* Adaptif dan Sistem ESP32 Berbasis IoT

Nadila Gusriyani*, Maria Evita
Departemen Fisika, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 40135

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 20 Februari 2026
Direvisi: 15 Mei 2026
Diterima: 31 Juli 2026

Kata kunci:
Akselerometer
ESP32
Kecepatan tanah puncak
MPU6050
Percepatan tanah puncak

ABSTRAK

Indonesia terletak pada wilayah paling aktif secara seismik di dunia, sehingga membuat kebutuhan mendesak akan sistem pemantauan gempa bumi yang terjangkau. Penelitian ini menyajikan sistem deteksi peristiwa gempa bumi secara *real-time* berdasarkan akselerometer MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*) MPU6050 dengan koreksi drift adaptif yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 dan transmisi data berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem mengakuisisi percepatan tanah tiga sumbu secara *real-time*, kompensasi bias adaptif, penekanan *drift* menggunakan pembaruan kecepatan nol (Zero-Velocity Update/ZUPT), dan deteksi peristiwa berdasarkan ambang batas adaptif relatif terhadap garis dasar *noise* lokal. Parameter seismik utama, termasuk Percepatan Tanah Puncak (*Peak Ground Acceleration*/PGA) dan Kecepatan Tanah Puncak (*Peak Ground Velocity*/PGV), dihitung secara real-time, sementara karakterisasi domain frekuensi dilakukan secara luring menggunakan analisis *Fast Fourier Transform* (FFT). Pengukuran stasioner jangka panjang selama sekitar 60 menit menunjukkan karakteristik noise yang stabil, dengan tingkat noise RMS (*root mean square*) sebesar 0,0067 m/s², 0,0039 m/s², dan 0,0027 m/s² pada sumbu X, Y, dan Z. Sistem menunjukkan stabilitas garis dasar yang sangat baik, dengan variasi PGA hanya 0,7% dan laju *drift* terukur sebesar 0,00088 m/s² per jam. Validasi komparatif terhadap sensor referensi berbasis smartphone menunjukkan tingkat deteksi peristiwa 100%, dan kesalahan estimasi PGA ±2%, dengan linearitas melebihi koefisien determinasi 0,99.

Keywords:
Accelerometer
ESP32
Peak ground velocity
MPU6050
Peak ground acceleration

Penulis Korespondensi:
Maria Evita
Email: mariaevita19@itb.ac.id

Indonesia is located in the most seismically active region in the world, creating an urgent need for an affordable earthquake monitoring system. This study presents a real-time earthquake event detection system based on an MPU6050 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) accelerometer with adaptive drift correction integrated with an ESP32 microcontroller and Internet of Things (IoT)-based data transmission. The system acquires three-axis ground acceleration in real time, adaptive bias compensation, drift suppression using zero-velocity update (ZUPT), and event detection based on an adaptive threshold relative to a local noise baseline. Key seismic parameters, including Peak Ground Acceleration (PGA) and Peak Ground Velocity (PGV), are calculated in real time, while frequency domain characterization is performed offline using Fast Fourier Transform (FFT) analysis. Long-term stationary measurements over approximately 60 minutes showed stable noise characteristics, with root mean square (RMS) noise levels of 0.0067 m/s², 0.0039 m/s², and 0.0027 m/s² in the X, Y, and Z axes, respectively. The system demonstrated excellent baseline stability, with a PGA variation of only 0.7% and a measured drift rate of 0.00088 m/s² per hour. Comparative validation against a smartphone-based reference sensor demonstrated a 100% event detection rate, and a PGA estimation error of ±2%, with linearity exceeding a coefficient of determination of 0.99.

Copyright © 2026 Author(s).

I. PENDAHULUAN

Indonesia sangat aktif secara seismik karena berada di pertemuan tiga lempeng utama, sehingga sering mengalami gempa dari skala kecil hingga destruktif. (Badan Meteorologi, 2017). Gempa bumi adalah pelepasan energi mendadak di kerak bumi yang menghasilkan gelombang seismik. (Widiyantoro dkk., 2020). Dampak gempa dapat dinilai menggunakan parameter gerak tanah seperti PGA dan PGV untuk memperkirakan intensitas dan potensi kerusakan. (I. S. Hidayat dan A. Setiawan, 2018). Sistem deteksi gempa dini penting untuk mitigasi, namun instrumen konvensional yang mahal dan kompleks membatasi penerapannya secara luas di tingkat komunitas (Nugraha, 2018). Penelitian terbaru telah mengeksplorasi penggunaan akselerometer Sistem Mikro-Elektro-Mekanikal (MEMS) sebagai solusi alternatif untuk pemantauan gempa bumi karena ukurannya yang kompak, konsumsi daya rendah, dan keterjangkauannya (R. Arokhman dan M. H. Saputra, 2023).

Dalam penelitian sebelumnya, akselerometer berbasis MEMS dan sensor inersia telah diimplementasikan dalam sistem pemantauan vulkanik berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mengamati getaran tanah, variasi kemiringan akibat tanah longsor, serta parameter geofisika lainnya (Evita, 2021). Penelitian lain juga telah mengembangkan sistem deteksi gempa berbasis MPU6050 dan ESP32, namun sebagian besar masih berfokus pada kemampuan akuisisi data dan transmisi informasi tanpa penanganan yang memadai terhadap karakteristik sinyal seismik yang bersifat transien serta rentan dipengaruhi oleh bias dan *drift* sensor (Wikantama, 2022). Akumulasi *drift* pada akselerometer MEMS dapat menyebabkan kesalahan estimasi parameter penting seperti *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan *Peak Ground Velocity* (PGV), sedangkan penggunaan ambang batas tetap juga berpotensi menghasilkan deteksi palsu ketika tingkat *noise* lingkungan berubah. Selain itu, integrasi antara koreksi *drift,* deteksi adaptif, dan perhitungan parameter seismik secara *real-time* masih jarang dilaporkan pada sistem berbasis sensor MEMS berbiaya rendah. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem yang tidak hanya mampu mendeteksi peristiwa gempa secara *real-time*, tetapi juga memiliki mekanisme mitigasi *drift* dan deteksi adaptif agar hasil pengukuran lebih stabil dan andal. Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem deteksi gempa bumi *real-time* berbasis MPU6050 dan ESP32 dengan koreksi *drift* adaptif, algoritma deteksi berbasis *adaptive threshold*, serta perhitungan parameter PGA dan PGV secara *real-time* melalui platform IoT.

II. METODE

2.1 Kerangka Penelitian



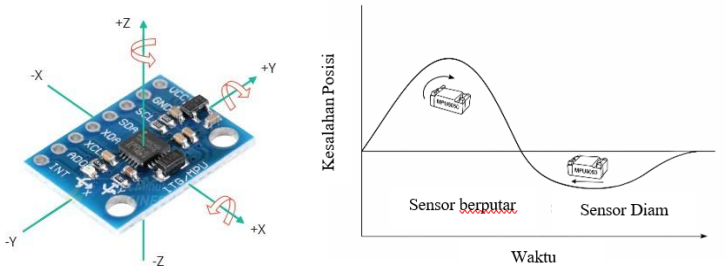
Gambar 1 Diagram blok sistem deteksi gempa bumi yang menunjukkan alur pemrosesan berurutan dari akuisisi data hingga validasi

Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, prosedur dimulai dengan akuisisi kontinu data percepatan tiga sumbu menggunakan sensor MPU6050 dengan frekuensi pengambilan sampel 128 Hz. Sebelum proses pengukuran, dilakukan kalibrasi awal menggunakan 500 sampel pada kondisi diam untuk memperoleh nilai bias akselerometer dan giroskop, kemudian nilai bias tersebut dikurangkan dari seluruh data pengukuran sehingga diperoleh percepatan yang telah terkoreksi. Selanjutnya, data percepatan ditransformasikan ke kerangka koordinat global menggunakan algoritma Madgwick AHRS, kemudian diterapkan *low-pass filter* eksponensial dengan koefisien $\alpha = 0{,}25$ untuk mereduksi fluktuasi *noise* frekuensi tinggi tanpa menghilangkan karakteristik *transien* sinyal gempa. Koreksi *drift* dilakukan menggunakan pendekatan *adaptive Zero-Velocity Update* (ZUPT) dengan mendeteksi kondisi stasioner berdasarkan dua parameter, yaitu besar kecepatan sudut giroskop kurang dari 0,02 rad/s dan selisih antara besar percepatan sesaat terhadap *moving average* kurang dari 0,03 m/s². Garis dasar *noise* lokal dihitung menggunakan *moving average* dengan ukuran jendela 50 sampel, sedangkan *offset drift* diperbarui secara adaptif menggunakan *learning rate* 0,01 sehingga akumulasi kesalahan akibat integrasi percepatan dapat ditekan. Tahapan praproses ini bertujuan menghasilkan sinyal percepatan yang stabil dengan mengurangi pengaruh bias, noise acak, dan drift sensor sebelum dilakukan deteksi peristiwa.

Setelah tahap praproses, percepatan terkoreksi pada ketiga sumbu dihitung menjadi percepatan resultan dan digunakan sebagai masukan algoritma deteksi peristiwa adaptif. Suatu peristiwa dinyatakan sebagai kandidat gempa apabila nilai percepatan resultan melebihi ambang minimum 0,02g (≈0,196 m/s²) sekaligus lebih besar dari 2,5 kali garis dasar *noise* lokal hasil *moving average* (Rawana dkk., 2025). Untuk menghindari deteksi palsu akibat gangguan sesaat, peristiwa hanya dinyatakan valid apabila berlangsung sedikitnya 1000 ms, sedangkan dua lonjakan percepatan masih dianggap berada dalam satu peristiwa apabila dipisahkan oleh jeda kurang dari 500 ms.

Parameter seismik dihitung menggunakan data percepatan yang telah melalui seluruh tahapan praproses. *Peak Ground Acceleration* (PGA) ditentukan sebagai nilai maksimum percepatan resultan selama interval peristiwa yang terdeteksi. Selanjutnya, percepatan terkoreksi diintegrasikan secara numerik terhadap waktu untuk memperoleh komponen kecepatan pada masing-masing sumbu, kemudian dihitung besar kecepatan resultan sebagai *Peak Ground Velocity* (PGV). Selama proses integrasi, mekanisme *adaptive* ZUPT diterapkan dengan me-*reset* kecepatan secara bertahap ketika sistem berada pada kondisi stasioner selama lebih dari 2 s, disertai faktor peluruhan (*velocity decay*) sebesar 0,98 untuk membatasi akumulasi *drift* jangka panjang. Dengan demikian, estimasi PGA dan PGV secara langsung merepresentasikan karakteristik gerakan tanah yang telah dikoreksi dari pengaruh bias, *noise*, dan *drift* sensor. Selanjutnya, sinyal peristiwa yang telah teridentifikasi dianalisis pada domain frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk memperoleh karakteristik spektral dan frekuensi dominan getaran (R. M. Dinata, 2025).

2.2 Prosedur Akuisisi Data dan Koreksi Bias

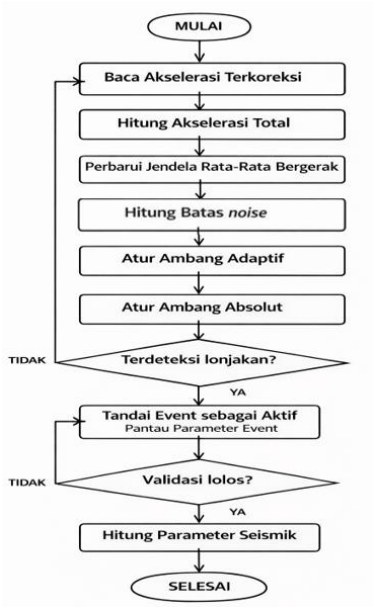


(b)

Gambar 2 (a) Orientasi Sumbu Sensor MPU6050 (b) Pembaruan kecepatan nol digunakan untuk mengurangi kesalahan *drift*.

Gerak tanah direkam menggunakan akselerometer MEMS tiga sumbu yang dipasang pada permukaan yang kaku dan datar, seperti diilustrasikan pada Gambar 2 (a). Sebelum akuisisi, sensor dikondisikan diam untuk menentukan *offset* tiap sumbu, komponen gravitasi pada sumbu vertikal dihilangkan, dan seluruh *offset* dikurangkan dari data mentah selama operasi (Firman, 2016). Data percepatan yang telah dikoreksi kemudian dikirimkan secara nirkabel ke platform eksternal untuk pemantauan dan pemrosesan lebih lanjut (F. Mangkusasmito, 2020). Seperti diilustrasikan pada Gambar 2(b), kesalahan posisi akibat proses integrasi akan terus bertambah ketika sensor mengalami pergerakan sehingga drift meningkat seiring waktu. Ketika sensor memasuki kondisi stasioner, algoritma Zero Velocity Update (ZUPT) mengasumsikan bahwa kecepatan sebenarnya bernilai nol, kemudian memperbarui estimasi kecepatan menjadi nol sehingga akumulasi *drift* dapat ditekan (I. Feriadi, 2019). Dengan demikian, error posisi yang sebelumnya meningkat secara bertahap mulai berkurang setelah kondisi diam terdeteksi, sebagaimana diilustrasikan oleh perubahan kurva pada Gambar 2(b). Keluaran sensor yang telah dikoreksi dianalisis untuk menentukan garis dasar percepatan sebagai acuan ambang batas adaptif dalam membedakan gerak tanah nyata dari *noise* sensor. (S. Das, 2025). Sisa bias dan *drift* frekuensi rendah dikurangi dengan mengidentifikasi interval stasioner menggunakan informasi besaran percepatan gabungan dan laju sudut. Hasilnya menunjukkan bahwa efek bias, *noise*, dan *drift* berkurang secara signifikan melalui praproses yang diterapkan (R. A. Rahayu, 2024).

2.3 Model Deteksi Peristiwa



Gambar 3 Diagram Alir Algoritma Deteksi Peristiwa

Gerak tanah akibat gempa berupa percepatan transien berdurasi singkat yang sering sulit dibedakan dari *noise*, bias, dan *drift* pada keluaran akselerometer MEMS, sehingga metode deteksi berbasis ambang tetap cenderung menghasilkan sensitivitas yang rendah ketika karakteristik *noise* berubah (A. Sadela Suhada, 2023). Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan algoritma deteksi peristiwa adaptif berbasis aturan (*rule-based adaptive event detection*) yang bekerja pada domain waktu, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Pendekatan ini memanfaatkan kombinasi antara ambang percepatan absolut dan estimasi *noise* lokal sehingga keputusan deteksi tetap stabil pada kondisi lingkungan yang bervariasi (S. Asia, 2023).

Pada setiap waktu pengambilan sampel, besar percepatan resultan dihitung dari tiga komponen percepatan yang telah melalui tahap kompensasi bias, penyaringan *noise*, dan koreksi *drift* menggunakan:

$$a_{tot(k)} = \sqrt{a_x^2(k) + a_y^2(k) + a_z^2(k)} \tag{1}$$

dengan a_x, a_y, dan $a_z$merupakan percepatan linier terkoreksi pada masing-masing sumbu ortogonal. Besaran ini digunakan sebagai representasi tunggal intensitas gerakan tanah pada setiap sampel.

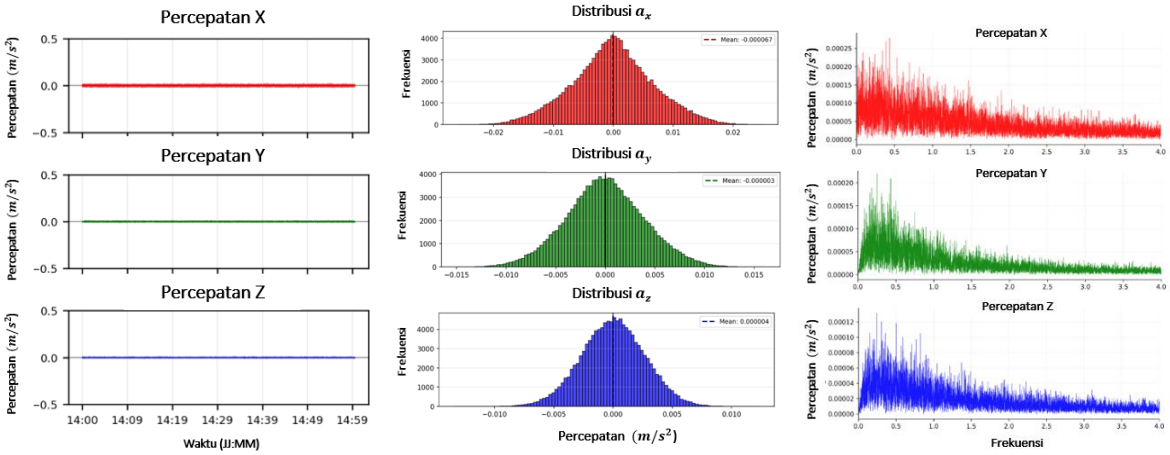
Untuk memperoleh referensi kondisi lingkungan secara adaptif, sistem menghitung garis dasar (*noise baseline*) menggunakan metode *moving average* terhadap 50 sampel percepatan resultan terbaru, sesuai dengan parameter implementasi pada sistem, sehingga diperoleh.

$$a_{noise}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^{k} a_{tot}(i), N = 50 \tag{2}$$

Persamaan (2) tidak digunakan sebagai estimasi tingkat *noise* lokal yang diperbarui secara kontinu sehingga mampu mengikuti perubahan karakteristik getaran lingkungan sekaligus mereduksi fluktuasi acak jangka pendek (Baskoro dkk., 2025). Selanjutnya, suatu peristiwa seismik dinyatakan terdeteksi apabila percepatan resultan memenuhi dua kondisi secara bersamaan, yaitu melebihi ambang percepatan minimum sebesar 0,02g (≈0,196 m/s²) dan lebih besar dari 2,5 kali nilai *noise baseline* hasil Persamaan (2). Kombinasi kedua kriteria tersebut memungkinkan sistem membedakan lonjakan percepatan akibat gempa dari fluktuasi *noise* biasa, sekaligus mengurangi kemungkinan terjadinya deteksi palsu pada kondisi lingkungan dengan tingkat *noise* yang berubah-ubah.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Karakteristik Noise dan Drift Garis Dasar



(a) (b) (c)

Gambar 4 (a) Data pengukuran yang dikumpulkan pada siang hari di ITB (b) Distribusi karakteristik *noise* akselerometer MPU6050 (c) Plot FFT dari data yang dikumpulkan pada siang hari di ITB

Data percepatan kontinu direkam dalam kondisi stasioner selama 60 menit untuk memeriksa perilaku noise garis dasar dan karakteristik *drift* jangka panjang. Pengukuran menghasilkan 115.946 sampel. Pengukuran dilakukan dalam kondisi siang hari di kampus ITB, seperti diilustrasikan pada Gambar 4 (a) (Levin & Klein, 2025). Selama perekaman, 108 sampel menunjukkan lonjakan transien, dengan karakteristik *noise* yang relatif stabil meski terjadi perubahan kecil (±14–24%) antar sumbu antara pengukuran jangka pendek dan panjang, sesuai perilaku akselerometer MEMS berbiaya rendah dalam operasi lama. (Rzucidło dkk., 2024). Distribusi *noise* keseluruhan, ditunjukkan pada Gambar 4 (b), menunjukkan perilaku yang stabil di semua sumbu.

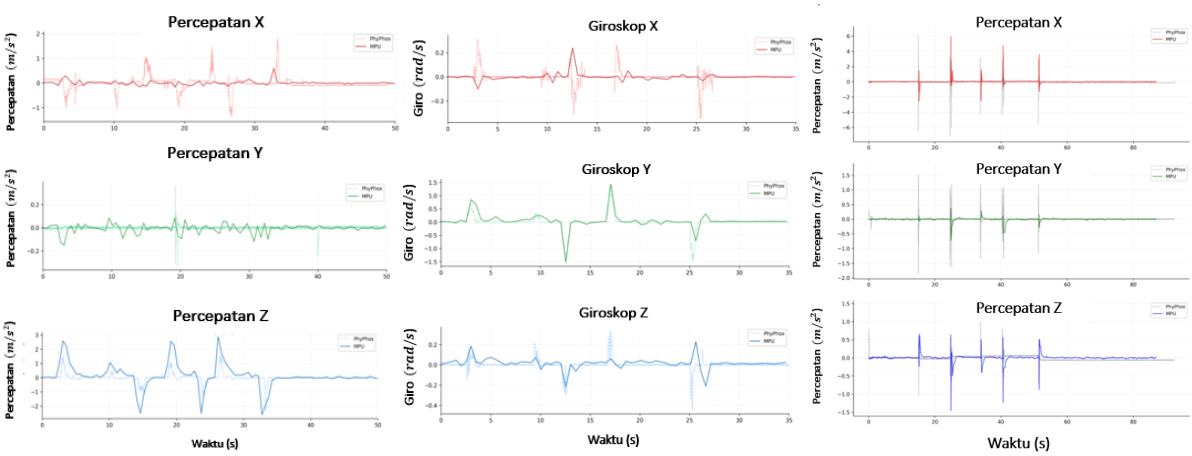
Stabilitas garis dasar lebih lanjut diperiksa menggunakan nilai PGA yang dihitung dalam kondisi stasioner (Islam, 2025). Garis dasar PGA tetap stabil dengan perbedaan sekitar 0,7% antara pengukuran jangka pendek dan panjang, menunjukkan variasi minimal selama 60 menit operasi kontinu (Cardoni et al., 2024). Laju *drift* yang diamati adalah sekitar 0,00088 m/s² per jam. *Offset* percepatan rata-rata tetap mendekati nol untuk semua sumbu, dengan nilai $-6{,}7 \times 10^{-5}$ m/s² (sumbu X), -3×10^{-6} m/s² (sumbu Y), dan 4×10^{-6} m/s² (sumbu Z). Semua *offset* berada di bawah 1×10^{-4} m/s², menunjukkan kompensasi bias yang stabil selama durasi penuh uji.

Analisis domain frekuensi terlihat pada Gambar 4 (c), dilakukan pada data percepatan yang direkam dalam kondisi stasioner untuk memeriksa karakteristik spektral keluaran sensor tanpa adanya eksitasi seismik (Hasani dkk., 2024). Dataset yang dianalisis terdiri dari sekitar 3.717 detik (≈ 62 menit) pengukuran kontinu yang diambil sampelnya pada frekuensi median 35,71 Hz, menghasilkan total 76.526 titik data. Berdasarkan laju pengambilan sampel ini, rentang frekuensi yang dianalisis meluas dari 0 hingga 17,86 Hz. Spektrum frekuensi percepatan sumbu X menunjukkan distribusi beramplitudo rendah dan hampir seragam di seluruh rentang frekuensi yang dianalisis (Kumari, 2021).

3.2 Validasi Respons Orientasi dan Rotasi

Respons orientasi dan perilaku *rotasional* sistem MPU6050-ESP32 dievaluasi melalui pengukuran komparatif terhadap referensi berbasis *smartphone* menggunakan aplikasi *PhyPhox* (Imtinan & Kuswanto, 2023). Gambar 5 (a) menunjukkan perbandingan sinyal percepatan tiga sumbu dari sensor MPU6050 dan referensi *smartphone* dalam kondisi stasioner. Sinyal percepatan tetap stabil di sekitar nol dengan *drift* minimal, meskipun tingkat *noise* MPU6050 sedikit lebih tinggi (±1,2–1,7 kali) dibandingkan sensor referensi, dengan respons *rotasional* dianalisis melalui data giroskop saat rotasi terkontrol (Krzysztofik & Blasiak, 2024). Gambar 5 (b) menunjukkan perbandingan sinyal kecepatan sudut giroskop tiga sumbu dari MPU6050 dan referensi *smartphone* selama rotasi manual terkontrol selama interval 35 detik.

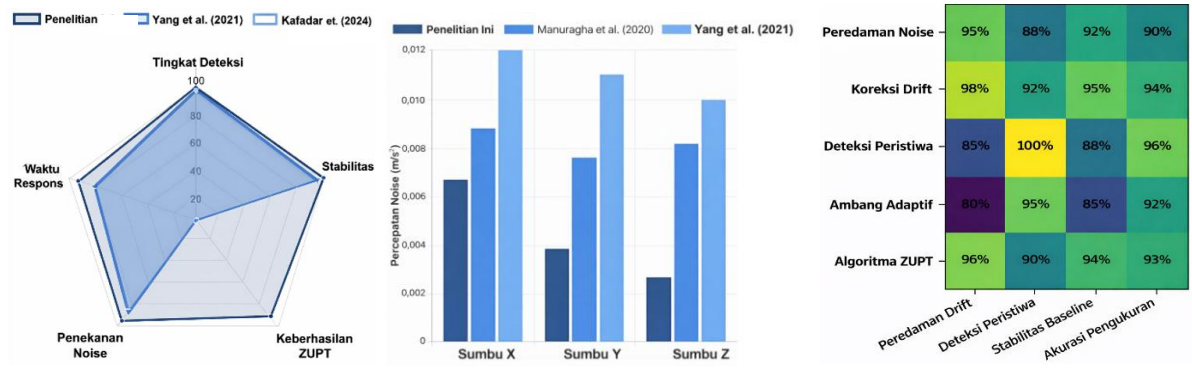
Kinerja deteksi serta kesesuaian PGA dan PGV dievaluasi dengan membandingkan MPU6050 dan sensor *smartphone* (*PhyPhox*), yang menunjukkan identifikasi konsisten lima peristiwa gangguan pada ketiga sumbu dalam jendela 0–90 detik (Hsu & Nieh, 2020). MPU6050 berhasil mendeteksi semua lima peristiwa yang diamati dalam data referensi, tanpa ada deteksi yang terlewat atau pemicu palsu tambahan. Kesalahan absolut rata-rata yang sesuai adalah sekitar ±2,0%, ±1,0%, dan ±1-2% untuk sumbu X, Y, dan Z. Hubungan antara nilai PGA yang diukur dan referensi tetap linier di semua peristiwa, dengan koefisien determinasi melebihi 0,99.



(b) (c)

Gambar 5 (a) Respons orientasi dan penekanan *drift* (b) Kinerja respons rotasional giroskop MPU6050 (c) Kinerja PGA dan PGV akselerometer MPU6050

3.3 Perbandingan Kinerja dengan Metode yang Ada



(b) (c)

Gambar 6 (a) Ringkasan Kinerja Sistem (b) Perbandingan Karakteristik *Noise* (c) Matriks Korelasi Kinerja Sistem

Tabel 1 Analisis komparatif dengan metode yang sudah ada

Aspek	Studi Ini (2026)	Manugraha et al. (2020)	Das et al. (2025)	Yang et al. (2021)	Kafadar et al. (2024)
Metode	*Adaptive* ZUPT + Koreksi *Drift*	Koreksi Bias Statis	Filter Komplementer	Jaringan MEMS PGA/PGV	Deteksi Berbasis MMI
Laju Drift (m/s²/jam)	0.00088	0.0045	0.008	—	—
Tingkat Deteksi (%)	100	—	—	98.5	97.2
Alarm Palsu (%)	0	—	—	1.8	2.5
Latensi (ms)	450	—	—	620	580
Noise (m/s²)	0.0044	0.0082	0.011	0.011	—
Kesalahan PGA (%)	±1.7	—	—	±3.2	±4.1

Gambar 5 (a) menunjukkan kinerja sistem secara keseluruhan dalam hal stabilitas garis dasar dan keandalan deteksi peristiwa selama periode pengukuran yang diperpanjang. Sistem mencapai akurasi deteksi peristiwa 100%, mengidentifikasi semua peristiwa uji dengan benar dengan nol deteksi

palsu selama interval stasioner. Analisis Percepatan Tanah Puncak jangka panjang menunjukkan variasi garis dasar sekitar 0,7% selama 60 menit, sesuai dengan stabilitas garis dasar 99,3%. Gambar 5 (b) menunjukkan kinerja *noise* sistem yang dievaluasi menggunakan percepatan *root mean square* (RMS) dalam kondisi stasioner. Dibandingkan dengan Manugraha et al. (2020) dan Yang et al. (2021), pengurangan *noise* berkisar dari 24,7% hingga 67,1%. Gambar 5 (c) menunjukkan kinerja penekanan *drift* sistem yang dievaluasi selama periode pengamatan kontinu 60 menit. Laju *drift* yang diukur adalah sekitar 0,00088 m/s² per jam, mewakili pengurangan lebih dari 90% dibandingkan dengan tingkat *drift* referensi 0,01 m/s² setelah 60 detik. Efektivitas pendekatan mitigasi lebih lanjut didukung oleh tingkat identifikasi pembaruan kecepatan nol sebesar 91% di semua sampel dan 100% selama interval stasioner sebelum peristiwa.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem deteksi peristiwa gempa bumi secara real-time berbasis akselerometer MEMS MPU6050 yang terintegrasi dengan ESP32 dan komunikasi IoT untuk pemantauan seismik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki stabilitas pengukuran yang baik dengan RMS noise kurang dari 0,007 m/s², laju *drift* sekitar 0,00088 m/s² per jam, serta mampu mendeteksi seluruh peristiwa uji tanpa pemicu palsu dengan latensi rata-rata 450 ms. Validasi terhadap sensor referensi berbasis *smartphone* menunjukkan kesesuaian yang tinggi, ditunjukkan oleh deviasi *Peak Ground Acceleration* (PGA) sekitar ±2% dan koefisien determinasi $R^2 > 0,99$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu memberikan pengukuran percepatan tanah yang stabil, akurat, dan andal untuk mendukung pemantauan aktivitas seismik berbasis sensor MEMS berbiaya rendah.

Meskipun demikian, penelitian ini masih menggunakan konfigurasi sensor tunggal, sehingga kemampuan dalam menentukan distribusi spasial maupun lokasi sumber getaran masih terbatas. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya dapat diarahkan pada integrasi jaringan sensor *multi-node* untuk meningkatkan ketangguhan sistem, akurasi spasial, serta cakupan pemantauan sehingga lebih sesuai untuk implementasi pada lingkungan vulkanik aktif maupun aplikasi pemantauan seismik skala luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Institut Teknologi Bandung (ITB) melalui hibah penelitian, penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial yang diberikan untuk penyelesaian penelitian ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GENERATIF DAN TEKNOLOGI BERBASIS AI

GPT hanya digunakan untuk mengoreksi kesalahan tata bahasa dan tipografi. Penulis bertanggung jawab penuh atas isi dan integritas publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

A. Nugraha. (2018). Sistem Monitoring Gempa Bumi Menggunakan Sensor Akselerometer. Jurnal Fisika Indonesia.

A. Rawana, B. H. R. E. T. & N. N. (2025). Development of a MEMS-Based Intensitymeter with STA/LTA Event Detection Algorithm and Multi-Channel Alert System. Jurnal Otomasi Kontrol Dan Instrumentasi.

A. Sadela Suhada, R. K. M. Z. dan S. (2023). Penghitungan Peak Ground Acceleration (PGA) di Desa Kuta Menggunakan Persamaan Empiris pada Gempabumi 19 Agustus 1977 (Mw = 8.3). Jurnal Penelitian Dan Pembelajaran Fisika Indonesia.

B. M. Yang, H. M. dan Y. M. W. (2021). Real-Time Production of PGA, PGV, Intensity, and Sa Shakemaps Using Dense MEMS-Based Sensors in Taiwan. Sensors, 21.

Badan Meteorologi, K. dan G. (BMKG). (2017). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia. https://perpustakaan.bmkg.go.id/buku/peta-sumber-dan-bahaya-gempa-indonesia-tahun-2017

Baskoro, F., Asto, B. I. G. P., Rohman, M., Soeadyfa, F. D. A., & Nurdiansyah, A. P. (2025). Impact of Sample Size Variation on Moving Average Filter Performance for Stability and Accuracy in Ultrasonic Sensor Measurements. TEM Journal, 14(2), 1681–1688. https://doi.org/10.18421/TEM142-65

BMKG. (2020). Katalog Gempabumi Merusak Indonesia. https://www.bmkg.go.id/gempabumi/mitigasi/katalog-gempabumi-tsunami

Cardoni, M., Pau, D. Pietro, Rezaei, K., & Mura, C. (2024). Inertial Measurement Unit Self-Calibration by Quantization-Aware and Memory-Parsimonious Neural Networks. Electronics (Switzerland), 13(21). https://doi.org/10.3390/electronics13214278

F. Mangkusasmito, D. Y. T. H. W. dan E. W. (2020). Peningkatan Akurasi Sensor GY-521 MPU-6050 dengan Metode Koreksi Faktor Drift. Ultima Computing : Jurnal Sistem Komputer.

Firman, B. (2016). Implementasi Sensor IMU MPU6050 Berbasis Serial I2C Pada Self-Balancing Robot. Jurnal Teknologi Technoscientia.

Hasani, H., Freddi, F., Piazza, R., & Ceruffi, F. (2024). A Wireless Data Acquisition System Based on MEMS Accelerometers for Operational Modal Analysis of Bridges. Sensors, 24(7). https://doi.org/10.3390/s24072121

Hsu, T. Y., & Nieh, C. P. (2020). On-site earthquake early warning using smartphones. Sensors (Switzerland), 20(10). https://doi.org/10.3390/s20102928

I. Feriadi, F. A. dan M. I. N. (2019). Analisis Sistem Pengukuran Getaran MEMS Accelerometer ADXL345. Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur.

I. S. Hidayat dan A. Setiawan. (2018). Analisis Peak Ground Acceleration (PGA) Gempa Bumi di Wilayah Indonesia. Jurnal Meteorologi Dan Geofisika, 19.

Imtinan, N., & Kuswanto, H. (2023). The Use of Phyphox Application in Physics Experiments: A Literature Review. JIPF (Jurnal Ilmu Pendidikan Fisika), 8(2), 183. https://doi.org/10.26737/jipf.v8i2.4167

Islam, M. S. (2025). Development of a Regional Ground Motion Prediction Equation for Peak Ground Acceleration Using Japanese Earthquake Data: A Least Squares Regression Approach. In International Journal of Geoinformatics Science and Technology (Vol. 1).

Krzysztofik, I., & Blasiak, S. (2024). Analytical Solutions of the 3-DOF Gyroscope Model. Electronics (Switzerland), 13(10). https://doi.org/10.3390/electronics13101843

Kumari, S. (2021). Vibration Measurement Using Accelerometer Sensor and Fast Fourier Transform. Lecture Notes in Electrical Engineering, 740 LNEE, 273–280. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6393-9_28

Levin, M., & Klein, I. (2025). Orientation-Free Neural Network-Based Bias Estimation for Low-Cost Stationary Accelerometers. http://arxiv.org/abs/2511.13071

M. B. Manugraha. (2020). Peningkatan Akurasi Sensor GY-521 MPU6050 dengan Metode Koreksi Faktor Drift. Computing Journal.

M. Evita, H. I. N. S. A. et al. (2021). Development of an Internet of Things Based Volcano Monitoring System. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Mazhar, H. (n.d.). Master Computer Science Detecting Critical Driving Events using Messy Smartphone Sensor Data.

Ö. Kafadar, S. T. dan B. T. (2024). ESenTRy: An On-Site Earthquake Early Warning System Based on the Instrumental Modified Mercalli Intensity. Earth Science Informatics.

P. T. Wikantama. (2022). Design of Earthquake Detection System Using MPU6050 Sensor and ESP32. ELPER-Tech, 5.

R. A. Rahayu, K. N. S. S. dan A. Z. (2024). Aplikasi Sensor Micro Electro Mechanical System (MEMS) Accelerometer Berbasis IoT dalam Pengukuran Percepatan Maksimum Getaran Struktur Jembatan. Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan.

R. Arokhman dan M. H. Saputra. (2023). Rancang Bangun Sistem Deteksi Gempa Berbasis Sensor MPU6050. Prosiding SENATIB.

R. M. Dinata, A. A. & M. I. Y. (2025). Sistem Deteksi Gempa Berbasis IoT dengan Visualisasi Real-Time dan Notifikasi Cerdas. INTI Nusa Mandiri.

Rzucidło, P., Kopecki, G., Szczerba, P., & Szwed, P. (2024). Analysis of Stochastic Properties of MEMS Accelerometers and Gyroscopes Used in the Miniature Flight Data Recorder. Applied Sciences (Switzerland), 14(3). https://doi.org/10.3390/app14031121

S. Asia. (2023). Perhitungan Peak Ground Acceleration (PGA) dan Peak Ground Velocity (PGV) untuk Pemetaan Tingkat Risiko Akibat Gempa Bumi di Provinsi Banten. UIN Syarif Hidayatullah Jakarta.

S. Das, S. N. S. C. J. S. dan T. H. (2025). Implementation of Complementary Filter on MPU6050. World Scientific News.

S. Widiyantoro et al. (2020). Seismicity and tectonics of Indonesia. Journal of Asian Earth Sciences, 196.

Suvorkin, V., Garcia-Fernandez, M., González-Casado, G., Li, M., & Rovira-Garcia, A. (2024). Assessment of Noise of MEMS IMU Sensors of Different Grades for GNSS/IMU Navigation. Sensors, 24(6). https://doi.org/10.3390/s24061953