

Rancang Bangun *Intensitymeter* Berbasis MEMS Dengan Algoritma Pendeteksi Kejadian STA/LTA dan Sistem Peringatan Multi-Saluran

Development of a MEMS-Based Intensitymeter with STA/LTA Event Detection Algorithm and Multi-Channel Alert System

¹Aziz Rawana ^{*}), ¹Benyamin Heryanto Rusanto, ¹Edward Trihadi, ¹Nardi

¹Program Studi Instrumentasi MKG, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi, dan Geofisika, 15119, Tangerang, Indonesia

^{*}) corresponding email: aziz.insa.21@gmail.com

Abstrak

Indonesia merupakan negara rawan gempa karena berada di pertemuan tiga lempeng tektonik utama. Untuk mendukung mitigasi bencana, diperlukan sistem pemantauan gempa yang andal dan terjangkau. Penelitian ini bertujuan merancang *intensitymeter* berbasis MEMS WT61C dengan algoritma deteksi STA/LTA, menggunakan Raspberry Pi 4 sebagai pemroses dan GNSS Ublox Neo-M8N untuk sinkronisasi waktu serta lokasi. Sistem mendukung operasi *online* maupun *offline* dengan mekanisme *store-and-forward*, serta diseminasi multi-saluran melalui alarm *buzzer*, SMS, dan Telegram. Sensor WT61C dikonfigurasi dengan *bandwidth* 20 Hz dan *sampling rate* 100 Hz. Hasil pengujian menunjukkan perangkat mampu mendeteksi gempa lokal, menghitung *Peak Ground Acceleration* (PGA), dan mengestimasi intensitas MMI. Pada uji simulator gempa Lombok 2018 (M7,0), sistem menghasilkan nilai PGA 0,5704 g (*error* 23,3%) dan 0,7495 g (*error* 0,8%) dibanding data referensi 0,744 g, dengan estimasi konsisten pada MMI VIII. SMS terkirim serial dengan latensi 5–7 detik, sedangkan Telegram terkirim paralel secara *real-time*. Keterbatasan penelitian ini adalah validasi masih terbatas pada simulator gempa BMKG dengan satu data gempa, tanpa uji pada berbagai kondisi tanah maupun variasi magnitudo. Kesimpulannya, sistem *intensitymeter* ini dapat menjadi solusi pemantauan intensitas gempa dan berpotensi dikembangkan lebih lanjut untuk mendukung sistem peringatan dini.

Kata Kunci: Intensitas gempa bumi, *intensitymeter*, STA/LTA, MEMS WT61C, SMS, Telegram

Abstract

Indonesia is an earthquake-prone country due to its location at the convergence of three major tectonic plates. To support disaster mitigation, a reliable and affordable monitoring system is required. This study presents a low-cost *intensitymeter* using a MEMS WT61C sensor with the STA/LTA detection algorithm, Raspberry Pi 4 for processing, and a Ublox Neo-M8N GNSS module for time and location synchronization. The system supports online and offline modes with a store-and-forward mechanism and delivers alerts via buzzer, SMS, and Telegram. The WT61C was configured with 20 Hz bandwidth and 100 Hz sampling rate. Tests showed the device detected local earthquakes, calculated Peak Ground Acceleration (PGA), and estimated Modified Mercalli Intensity (MMI). In simulations of the Lombok 2018 earthquake (M7.0), it produced PGA values of 0.5704 g (23.3% error) and 0.7495 g (0.8% error) against the reference 0.744 g, both consistent with MMI VIII. SMS was sent serially with 5–7 s latency, while Telegram worked in real time. Validation was limited to a simulator with one dataset, without diverse soil or magnitude scenarios. In conclusion, the system provides an effective, low-cost solution for earthquake intensity monitoring and has potential for early warning applications.

Keywords: Earthquake intensity, *intensitymeter*, STA/LTA, MEMS WT61C, SMS, Telegram

Makalah diterima 03 Agustus 2025 – makalah direvisi 18 September 2025 – disetujui 23 September 2025

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



1 Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat aktivitas seismik tinggi karena berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Kondisi ini menjadikan wilayah Indonesia rentan terhadap gempa bumi dengan frekuensi kejadian tinggi dan potensi dampak signifikan terhadap keselamatan masyarakat serta infrastruktur [1],[2]. Gempa disebabkan oleh panas inti bumi sehingga menyebabkan lempeng bumi bergeser, bertabrakan dengan lempeng lain, serta menimbulkan patahan di antara lempeng-lempeng tersebut [3]. *Intensitymeter* adalah alat yang digunakan untuk mengukur intensitas gempa bumi. Perangkat ini merupakan komponen vital dalam jaringan pemantauan gempa bumi kuat yang dikelola oleh BMKG [4]. Tingkat dampak gempa di suatu lokasi dinyatakan dalam skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI), yang bersifat subjektif dan diklasifikasikan dari tingkat I hingga XII [5]. Skala ini

digunakan oleh BMKG untuk menyusun *ShakeMap* yang menunjukkan distribusi intensitas gempa di suatu wilayah.

Keterbatasan jumlah perangkat pemantauan yang merata di seluruh wilayah, khususnya di daerah terpencil, menjadi tantangan dalam upaya mitigasi. Peralatan seismik konvensional seperti seismograf dan akselerograf memerlukan biaya tinggi, infrastruktur khusus, dan proses kalibrasi yang kompleks [6]. Hal ini mendorong penggunaan sensor berbiaya rendah, seperti *accelerometer* berbasis MEMS, sebagai alternatif yang lebih fleksibel dan mudah diimplementasikan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa akselerograf berbasis MEMS berbiaya rendah dapat menjadi alternatif sensor konvensional, meskipun masih terdapat keterbatasan pada parameter tertentu [7]. Teknologi MEMS dapat menurunkan biaya dibandingkan sensor konvensional dan memungkinkan penerapan jaringan pemantauan yang lebih rapat, walaupun masih menghadapi tantangan berupa tingkat *noise* yang tinggi dan respon frekuensi rendah [8]. Salah satu sensor yang digunakan adalah MEMS WT61C, yaitu sensor enam sumbu yang mampu mendeteksi percepatan dan dilengkapi algoritma Kalman filter untuk mereduksi *noise* [9]. Kalman filter digunakan untuk mengurangi *noise* acak dan mengompensasi bias *drift* pada data sensor dengan menggabungkan model dinamika sistem dan hasil pengukuran secara iteratif [10],[11].

Dalam deteksi kejadian seismik, algoritma *Short-Term Average/Long-Term Average* (STA/LTA) merupakan metode yang banyak digunakan karena sederhana dan efektif dalam mengenali perubahan amplitudo sinyal sebagai indikator gempa [12],[13]. Selain itu, untuk memastikan informasi cepat sampai ke pengguna, diperlukan mekanisme diseminasi *real-time* seperti Telegram dan *Short Message Service* (SMS) yang dapat menjangkau wilayah dengan keterbatasan akses internet. SMS bekerja secara serial dan bergantung pada kekuatan sinyal seluler yang memungkinkan untuk mengirim dan menerima pesan antar pengguna. [14],[15].

Tujuan utama penelitian ini adalah merancang, mengimplementasikan, dan memvalidasi sebuah *intensitymeter* berbasis MEMS yang berbiaya rendah dengan fungsionalitas menyeluruh (*end-to-end*), meliputi akuisisi data, deteksi kejadian, estimasi intensitas, serta diseminasi peringatan multi-saluran. Perancangan dan pengembangan *intensitymeter* ini berbasis sensor MEMS WT61C dan Raspberry Pi 4 Model B dengan algoritma pendeteksi kejadian gempa menggunakan STA/LTA, serta sistem diseminasi informasi gempa melalui SMS dan Telegram. Sistem dirancang mendukung kondisi *online* dan *offline* dengan penyimpanan data lokal dan sinkronisasi otomatis ke *server*.

Keterbaruan penelitian ini meliputi integrasi dual-mode operasi, multi-saluran notifikasi, dan mekanisme *store-and-forward*. Kinerja sistem divalidasi melalui pengujian *self-noise*, *tilt test*, komparasi GNSS, serta uji lapangan menggunakan simulator gempa. Dengan desain yang sederhana, biaya rendah, serta dukungan multi-saluran notifikasi, sistem ini berpotensi untuk pengembangan dalam bidang *earthquake early warning system* (EEWS) serta menjadi solusi untuk memperluas jaringan pemantauan gempa, khususnya di wilayah minim infrastruktur.

2 Metode

Sistem *intensitymeter* ini dirancang dengan algoritma STA/LTA untuk mendeteksi kejadian gempa dan menghitung nilai PGA, serta mengintegrasikan komponen utama berupa sensor *accelerometer* MEMS WT61C, modul GNSS Ublox Neo-M8N, dan *single board computer* Raspberry Pi 4 Model B.

2.1 Landasan Teoretis

Penelitian ini menggunakan dua parameter utama dalam deteksi dan penilaian gempa bumi, yaitu *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan algoritma *Short-Term Average/Long-Term Average* (STA/LTA). PGA merupakan percepatan maksimum tanah akibat gempa yang digunakan sebagai indikator kuantitatif untuk menilai potensi kerusakan bangunan. Nilai PGA dihitung dari komponen horizontal terbesar karena gaya lateral dari komponen horizontal memiliki dampak paling signifikan terhadap struktur bangunan [16]. Persamaan perhitungan PGA yang digunakan adalah:

$$PGA = \max [|a_{NS}|, |a_{EW}|] \quad (1)$$

Dengan $|a_{NS}|$ dan $|a_{EW}|$ adalah data akselerasi komponen utara-selatan dan timur-barat. Banyak persamaan telah dikembangkan untuk memprediksi PGA berdasarkan magnitudo, jarak, kondisi tanah, dan parameter lainnya [17]. Nilai PGA kemudian dikonversi menjadi intensitas skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI) melalui relasi empiris [18], seperti yang digunakan oleh BMKG dan USGS. Tabel 1 menunjukkan hubungan antara nilai PGA dan intensitas gempa MMI yang digunakan BMKG. Satuan %g menyatakan percepatan relatif terhadap gravitasi bumi, dengan $1 \text{ g} = 100 \text{ \%g}$. Nilai percepatan ini selanjutnya digunakan dalam estimasi skala intensitas MMI melalui pemetaan PGA–MMI.

Tabel 1. Hubungan PGA dengan intensitas gempa bumi dalam skala MMI yang digunakan BMKG.

Getaran Dirasakan	Tidak Terasa	Lemah	Ringan	Biasa	Kuat	Sangat Kuat	Parah	Sangat Parah	Ekstrem
Potensi Kerusakan	Tidak	Tidak	Tidak	Sangat Ringan	Ringan	Sedang	Sedang/Berat	Berat	Sangat Berat
PGA (%g)	<0,05	0.3	2.8	6.2	12	22	40	75	>139
Instrumental Intensity	I	II - III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Selain PGA, algoritma STA/LTA digunakan untuk mendeteksi terjadinya gempa. Algoritma ini membandingkan rata-rata amplitudo sinyal pada jendela waktu pendek (STA) dengan jendela waktu panjang (LTA). Peningkatan signifikan rasio STA terhadap LTA digunakan sebagai penanda awal kejadian gempa. Persamaan matematis metode STA/LTA adalah sebagai berikut:

$$STA = \frac{1}{N_S} + \sum_{i=1}^{N_S} |x_i| \quad (2)$$

$$LTA = \frac{1}{N_L} + \sum_{i=1}^{N_L} |x_i| \quad (3)$$

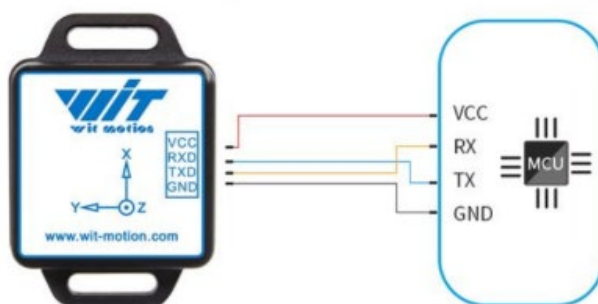
$$R = \frac{STA}{LTA} \quad (4)$$

Dengan N_S dan N_L adalah jumlah sampel pada jendela pendek dan panjang, serta $|x_i|$ adalah amplitudo absolut sinyal ke- i . Jika rasio R melebihi ambang batas (*trigger*), sistem akan mendeteksi kejadian gempa, sedangkan jika R turun di bawah ambang batas *detrigger*, status sistem kembali normal [12],[13].

Selain metode di atas, penelitian ini juga memanfaatkan *accelerometer* MEMS WT61C. Sensor ini merupakan sensor enam sumbu yang dapat mengukur percepatan, kecepatan sudut, dan sudut kemiringan. WT61C memiliki ukuran kecil, konsumsi daya rendah, biaya relatif murah, serta dilengkapi Kalman filter internal. Kalman filter dapat digunakan untuk mengurangi *noise* dan memperbaiki estimasi data secara *real-time* [11]. Sensor MEMS WT61C mendukung pengaturan *bandwidth* antara 5–256 Hz dan *sampling rate* 0.2–200 Hz melalui konfigurasi *software* bawaan. Namun, respons frekuensi *gain/phase* tidak tersedia dalam *datasheet* resmi, sehingga karakteristik *roll-off* maupun distorsi fase hanya dapat diasumsikan berdasarkan spesifikasi pabrikan. Keterbatasan ini membuat interpretasi sinyal, perlu dilakukan dengan hati-hati

Tabel 2. Spesifikasi *accelerometer* MEMS WT61C.

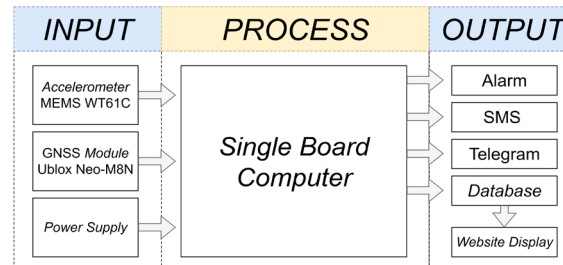
Parameter	Kondisi	Nilai
Range		±16g
Resolusi	±16g	0.0005 g/LSB (16bit)
RMS Noise	Bandwidth = 100Hz	0.75 - 1 mg-rms
Static Zero Drift	Placed horizontally	±20 - 40 mg
Temperature Drift	-40°C ~ +85°C	±0.15 mg/°C
Bandwidth		5 - 256 Hz
Sampling Rate		0.2 - 200Hz



Gambar 1. *Accelerometer* MEMS WT61C.

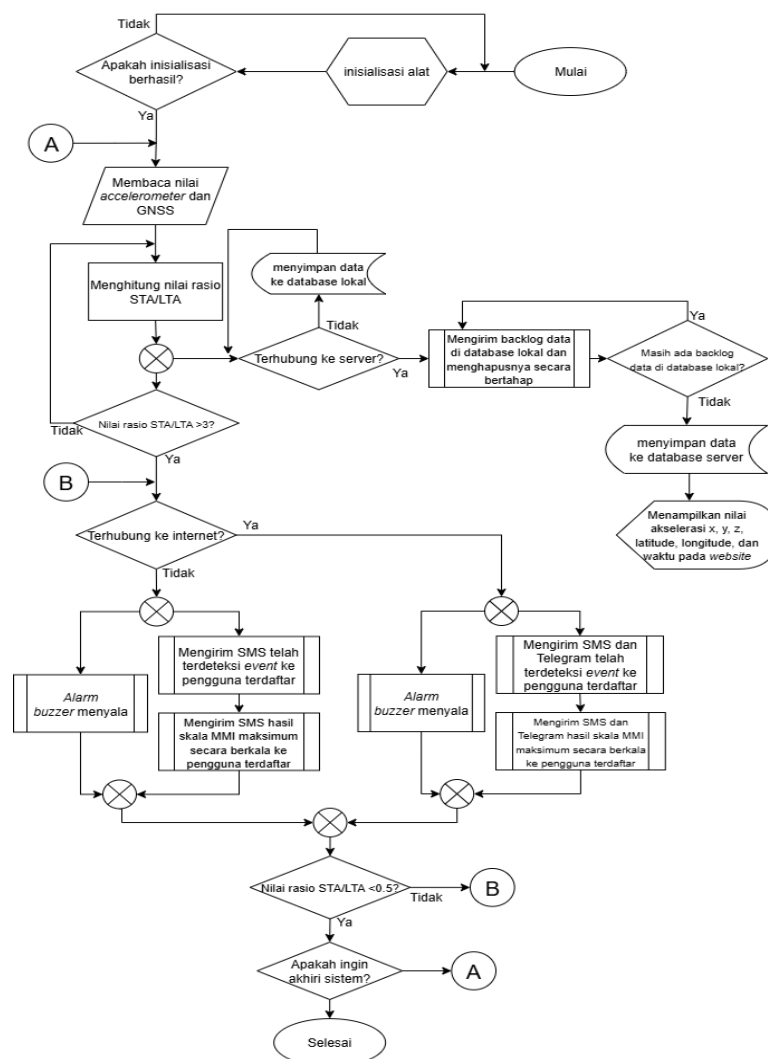
2.2 Desain Sistem dan Alur Kerja

Sistem *intensitymeter* yang dikembangkan terdiri atas tiga komponen utama, yaitu akuisisi data dari sensor, pemrosesan untuk deteksi kejadian seismik, serta diseminasi dan penyimpanan data. Perangkat keras yang digunakan mencakup sensor *accelerometer* MEMS WT61C sebagai sumber data percepatan tiga sumbu, modul GNSS Ublox Neo-M8N untuk informasi waktu dan lokasi, serta Raspberry Pi 4 Model B sebagai inti pemrosesan. *Accelerometer* MEMS WT61C dikonfigurasi dengan *bandwidth* 20 Hz dan *sampling rate* 100 Hz, serta memiliki sensitivitas sebesar 0.0005 g/LSB.



Gambar 2. Blok diagram sistem.

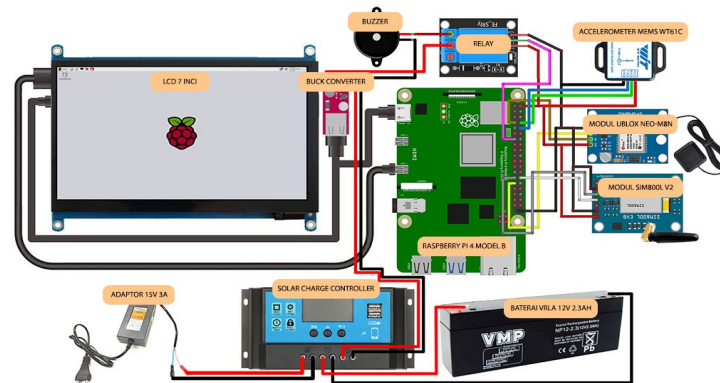
Data percepatan direkam kemudian dianalisis oleh Raspberry Pi menggunakan algoritma STA/LTA untuk mendeteksi *event* gempa bumi. Jika terjadi *event* gempa, sistem akan menghitung nilai PGA dan mengonversinya menjadi estimasi intensitas gempa dalam skala MMI. Informasi ini disajikan dalam bentuk grafik *real-time* melalui *website*, dan disebarluaskan melalui alarm *buzzer*, pesan SMS menggunakan SIM800L v2, serta notifikasi Telegram menggunakan Telegram Bot API.



Gambar 3. Diagram alir sistem.

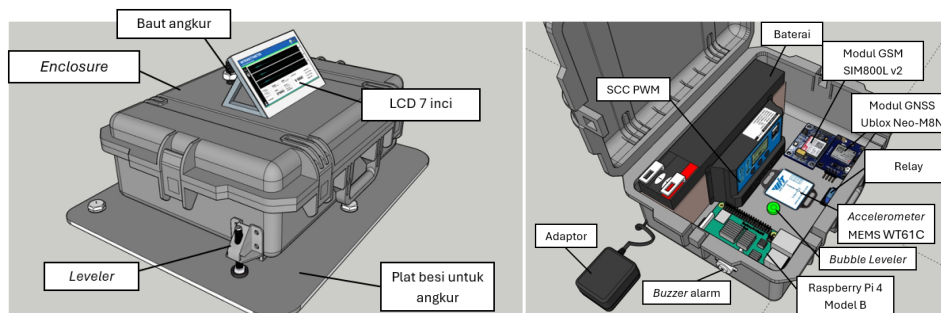
Sistem *intensitymeter* diawali dengan inialisasi modul *accelerometer* MEMS WT61C dan GNSS Ublox Neo-M8N. Setelah inialisasi berhasil, sistem membaca data percepatan dan posisi untuk menghitung rasio STA/LTA. Jika nilai STA/LTA melebihi ambang *trigger*, maka dianggap sebagai kejadian gempa. Data kemudian disimpan ke *server*, atau ke *database* lokal bila koneksi tidak tersedia, dan akan disinkronkan otomatis ketika koneksi kembali. Proses sinkronisasi dilakukan secara bertahap agar data tetap berurutan dan tidak ada yang hilang. Informasi hasil perhitungan ditampilkan melalui *website*. Saat gempa terdeteksi, sistem mengirim notifikasi berupa SMS saat kondisi *offline* atau SMS dan Telegram saat kondisi *online* serta menyalakan alarm *buzzer*. Selama getaran berlangsung, pembaruan nilai MMI maksimum dikirim berkala hingga rasio STA/LTA turun di bawah ambang *detrigger*, yang menandakan gempa berakhir.

Komponen-komponen seperti Raspberry Pi, MEMS WT61C, GNSS, SIM800L v2, *relay*, dan *buzzer* dirangkai dalam satu unit sistem. Catu daya utama berasal dari adaptor 15V 3A, sementara cadangan daya disediakan oleh baterai VRLA 12V 2.3Ah. Pengisian daya dikendalikan oleh *Solar Charge Controller* (SCC) yang juga mendistribusikan daya ke komponen melalui *buck converter*.



Gambar 4. Skematik diagram sistem.

Sensor MEMS dipasang dengan orientasi horizontal sesuai sumbu X, Y, dan Z, kemudian distabilkan menggunakan plat besi dan leveler agar posisi tetap rata serta meminimalkan pengaruh guncangan dari *enclosure*. Seluruh sistem ditempatkan dalam *enclosure* berbahan plastik jenis *safety box* yang kokoh dan tahan terhadap berbagai kondisi, sehingga mampu melindungi komponen dari debu, kelembaban, dan getaran mekanis eksternal. Untuk memastikan getaran tanah dapat tersalurkan dengan baik ke sensor, *enclosure* dipasang secara permanen menggunakan baut angkur, sehingga respons getaran yang direkam lebih merepresentasikan gerakan tanah sebenarnya.



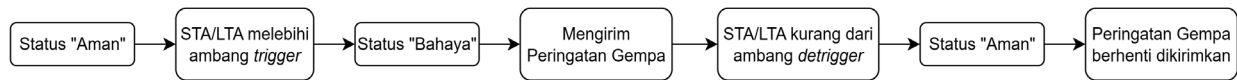
Gambar 5. Desain *enclosure*.

2.3 Algoritma Deteksi Kejadian Gempa dan Sistem Peringatan

Proses deteksi kejadian pada penelitian ini menggunakan algoritma STA/LTA terhadap sinyal percepatan yang telah diatur dengan *bandwidth* 20 Hz, yang bisa diubah melalui *software* bawaan sensor. Parameter yang umum digunakan untuk deteksi gempa lokal adalah durasi STA 0,3–0,5 detik, LTA 30–60 detik, dengan rasio *trigger* 4–8 dan *detrigger* 2–3 [12]. Namun, penelitian ini menggunakan konfigurasi STA 1,5 detik, LTA 20 detik, dengan nilai *trigger* 3 dan *detrigger* 0,5, disertai *sampling rate* 100 Hz. Pemilihan parameter ini mempertimbangkan bahwa sensor MEMS WT61C memiliki sensitivitas lebih rendah dibandingkan peralatan seismometer operasional, sehingga diperlukan penyesuaian untuk meningkatkan keberhasilan dan mencegah kesalahan dalam mendeteksi gempa. Ketika nilai rasio STA/LTA melebihi ambang *trigger*, sistem mengidentifikasi adanya kejadian seismik dan mengubah status menjadi “bahaya”. Pada saat itu, sistem

menghitung nilai PGA dari komponen horizontal dan mengonversinya ke skala MMI. Estimasi MMI ini digunakan untuk menentukan klasifikasi intensitas gempa serta potensi kerusakannya.

Sistem diseminasi pada sistem ini terdiri atas tiga jalur, yaitu alarm *buzzer*, SMS, dan Telegram. Ketika status “bahaya”, *buzzer* akan berbunyi sebagai peringatan langsung, dan mati 10 detik setelah status kembali “aman”. Untuk notifikasi, sistem mengirim dua jenis pesan, pertama saat status “bahaya” aktif, dan pesan pembaruan berkala jika PGA meningkat. SMS dikirim melalui modul SIM800L v2 secara serial, sedangkan Telegram dikirim melalui Bot API secara paralel. Daftar nomor telepon dan *chat ID* pengguna disinkronkan saat koneksi tersedia.



Gambar 6. Diagram alir sistem peringatan.

2.4 Penyimpanan dan Sinkronisasi Data

Sistem dirancang untuk beroperasi baik secara *online* maupun *offline*, dengan dukungan mekanisme penyimpanan lokal dan sinkronisasi otomatis ke *server*. Saat terhubung ke *server*, data hasil pembacaan alat dikirim secara langsung ke *server* melalui REST API. Data ini kemudian disimpan dalam basis data MySQL dan ditampilkan melalui antarmuka *website*.

Jika perangkat tidak terhubung ke *server*, data akan disimpan terlebih dahulu di *database* lokal (MariaDB) pada Raspberry Pi. Proses sinkronisasi ke *server* dilakukan secara otomatis saat koneksi kembali tersedia, menggunakan metode *store-and-forward*. Sistem mendahulukan pengiriman data yang tertunda secara berurutan, untuk memastikan tidak ada data yang hilang dan teracak. Metode ini digunakan agar tidak ada data yang hilang baik saat *online* maupun *offline*.

2.5 Metode Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk memastikan sistem *intensitymeter* berfungsi dalam berbagai kondisi operasional. Sistem diuji dalam mode *online*, di mana data dikirim ke *server* dan ditampilkan secara *real-time* melalui *website*. Lalu dalam mode *offline*, di mana data disimpan ke *database* lokal dan disinkronkan otomatis saat koneksi tersedia kembali. *Output* sistem juga diuji untuk mengevaluasi respons sistem terhadap kejadian seismik secara *end-to-end*, mulai dari deteksi hingga diseminasi.

2.5.1 Pengujian *Self-Noise*

Uji *self-noise* dilakukan pada malam hari selama 1 jam untuk meminimalisir gangguan lingkungan. Data percepatan yang direkam dengan *sampling rate* 100 sampel/detik, diubah menjadi spektrum frekuensi menggunakan metode Welch. Hasil spektrum dibandingkan dengan kurva *New High Noise Model* (NHNM), *New Low Noise Model* (NLNM), serta spektrum gempa M_L 4 [19]. Analisis ini bertujuan mengevaluasi tingkat *self-noise* sensor MEMS WT61C dan membandingkannya dengan standar referensi instrumen seismik.

2.5.2 Pengujian *Tilt Test* dan Komparasi Modul GNSS

Tilt test dilakukan dengan pendampingan langsung dari pegawai BMKG untuk memvalidasi respons amplitudo dan arah dari sensor MEMS WT61C terhadap percepatan gravitasi. Sensor ditempatkan pada tilt meter, kemudian dimiringkan secara bertahap pada tiga sumbu koordinat X, Y, dan Z hingga mencapai kondisi ± 1 g. Setiap posisi kemiringan dipertahankan selama 10 detik dengan *sampling rate* 100 sampel/detik. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan terhadap nilai acuan untuk mengevaluasi linearitas terhadap arah gaya gravitasi. Metode *tilt test* ini umum digunakan dalam pengujian *accelerometer* operasional.

Untuk menguji akurasi sensor dalam penentuan lokasi dan sinkronisasi waktu, dilakukan validasi modul GNSS dengan cara membandingkan data hasil pencatatan 10 sampel dari sensor MEMS WT61C terhadap peralatan GPS referensi. Parameter yang dianalisis meliputi selisih waktu (Δt) dan perbedaan posisi spasial (Δs).

2.5.3 Uji Lapangan dengan Simulator Gempa

Pengujian lapangan dilakukan menggunakan simulator gempa milik BMKG Pusat. Pemanfaatan simulator dipilih karena kejadian gempa bumi tidak dapat diprediksi secara pasti, sehingga sulit menunggu peristiwa nyata dalam rentang waktu penelitian. Uji ini dilakukan sebanyak dua kali dengan menggunakan rekaman gempa Lombok 2018 (M_{7.0}). Pada pengujian pertama, sumber gempa dimodelkan dalam kondisi lebih jauh dari lokasi sensor, sedangkan pada pengujian kedua jarak sumber lebih dekat. Tujuan uji ini adalah untuk

menilai kinerja sistem secara menyeluruh mulai dari tahap akuisisi sinyal, deteksi kejadian gempa menggunakan metode STA/LTA, perhitungan parameter seismik, hingga tahap diseminasi informasi melalui SMS, Telegram, dan alarm *buzzer* peringatan.

3 Hasil dan Diskusi

Bagian ini menyajikan hasil implementasi, pengujian, dan hasil sistem *intensimeter* yang telah dikembangkan. Setiap hasil dianalisis untuk menilai bahwa sistem dapat bekerja sebagaimana mestinya.

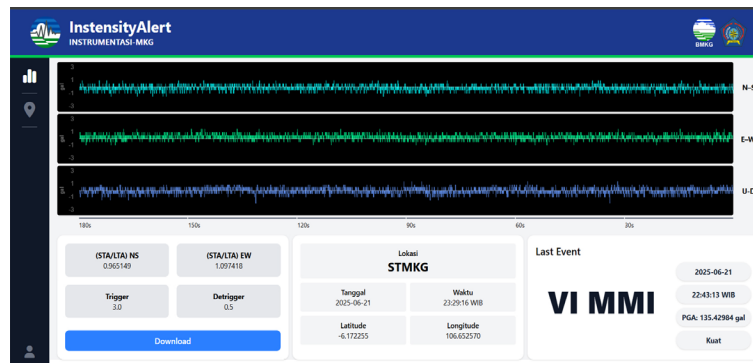
3.1 Implementasi Sistem

Perangkat *intensimeter* diimplementasikan sebagai sistem pemantauan gempa. Seluruh komponen dirakit dalam satu *enclosure box* tahan guncangan. Sensor diposisikan horizontal dengan petunjuk arah peletakan di bagian atas. Catu daya berasal dari adaptor 15V dan baterai cadangan 12V yang dikendalikan oleh SCC.

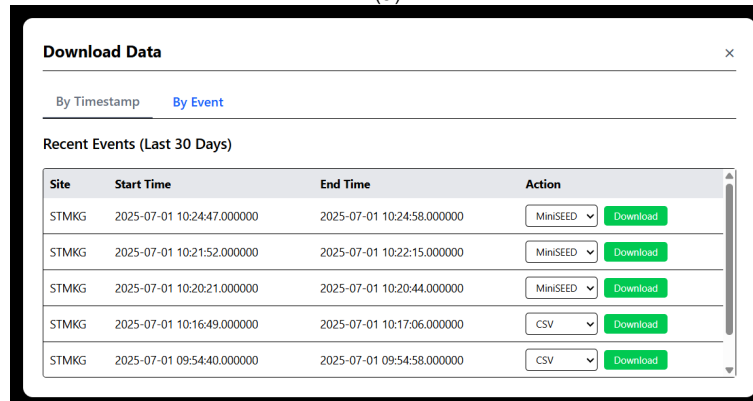


Gambar 7. Implementasi sistem dari bagian depan (a), atas (b), kiri (c), kanan (d), dan dalam (e).

Sistem dilengkapi dengan antarmuka *website* yang menampilkan informasi kejadian secara *real-time*, termasuk nilai PGA, nilai MMI, dan grafik pembacaan sensor. *Website* ini juga terdapat menu *Download Data* untuk mengunduh hasil pengukuran dalam format CSV dan MiniSEED.



(a)



(b)

Gambar 8. Tampilan utama website (a) dan menu *download data* (b).

3.2 Evaluasi Kondisi *Online* dan *Offline*

Sistem diuji dalam dua kondisi operasional. Pada kondisi *online*, data kejadian dikirim secara *real-time* ke server melalui API, disimpan di database MySQL, dan ditampilkan langsung di antarmuka website. Pada kondisi *offline*, data disimpan sementara di database lokal (MariaDB) pada Raspberry Pi. Saat koneksi kembali tersedia, sistem melakukan sinkronisasi otomatis ke server menggunakan metode *store-and-forward* secara berurutan. Seluruh data berhasil tersinkron tanpa kehilangan atau duplikasi.

```
[OFFLINE] 100 data ke DB lokal. Status: aman, RatioX=0.00, RatioY=0.00, MMI=2
[OFFLINE] 100 data ke DB lokal. Status: aman, RatioX=0.00, RatioY=0.00, MMI=2
[OFFLINE] 100 data ke DB lokal. Status: aman, RatioX=0.00, RatioY=0.00, MMI=2
[OFFLINE] 100 data ke DB lokal. Status: aman, RatioX=0.00, RatioY=0.00, MMI=2
[OFFLINE] 100 data ke DB lokal. Status: aman, RatioX=0.00, RatioY=0.00, MMI=2
[OFFLINE] 100 data ke DB lokal. Status: aman, RatioX=0.00, RatioY=0.00, MMI=2
```

(a)

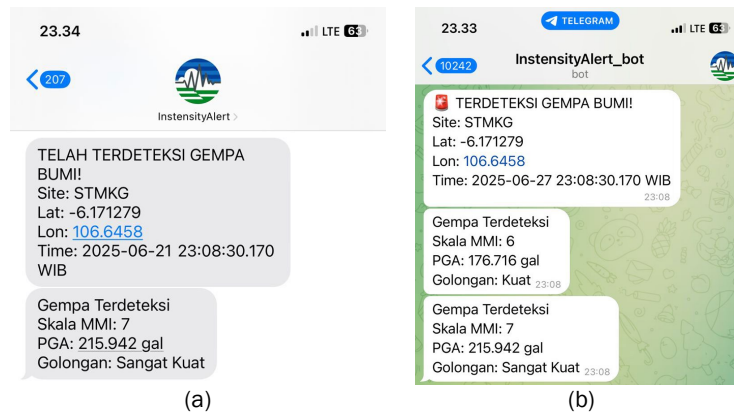
```
[SYNC] Server respon: 201
[ONLINE] 100 data disimpan ke lokal (backlog: 1000). Status: aman, RatioX=0.00, RatioY=0.00, MMI=2
[SYNC] 1000 data dikirim ke server dan dihapus dari DB.
[ONLINE] 100 data disimpan ke lokal (backlog: 100). Status: aman, RatioX=0.00, RatioY=0.00, MMI=2
[SYNC] Server respon: 201
[SYNC] 200 data dikirim ke server dan dihapus dari DB.
[ONLINE] 100 data dikirim langsung ke server. Status: aman, RatioX=0.00, RatioY=0.00, MMI=2
[ONLINE] 100 data dikirim langsung ke server. Status: aman, RatioX=0.00, RatioY=0.00, MMI=2
[ONLINE] 100 data dikirim langsung ke server. Status: aman, RatioX=0.00, RatioY=0.00, MMI=2
```

(b)

Gambar 9. Log pengiriman data saat *offline* (a) dan saat kembali *online* (b).

3.3 Verifikasi Sistem Peringatan

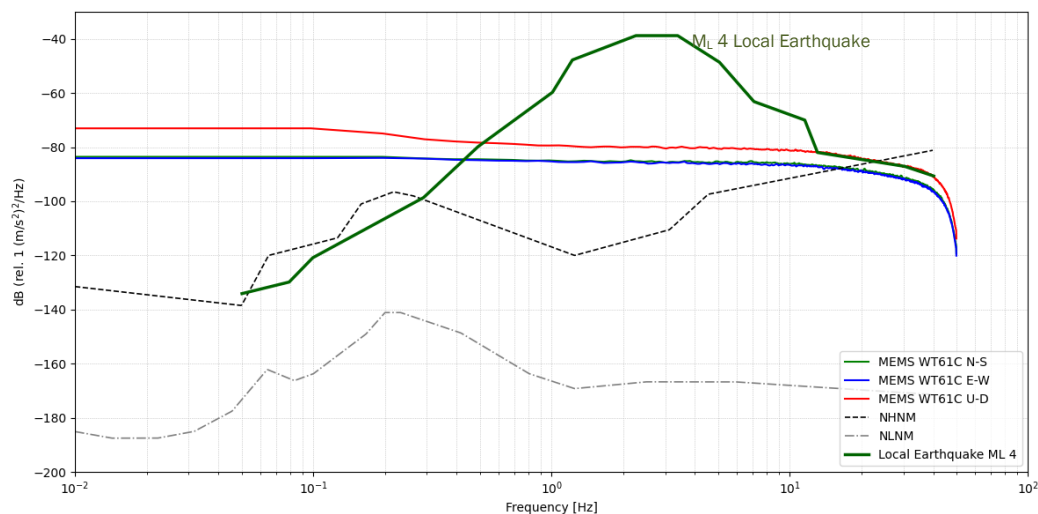
Pengujian sistem peringatan dilakukan untuk memastikan sistem dapat mengirimkan peringatan. Alarm *buzzer* menyala setelah status “bahaya” terdeteksi dan berhenti 10 detik setelah status kembali “aman”. Notifikasi SMS berhasil dikirim melalui SIM800L v2 ke seluruh nomor pengguna, baik untuk pesan awal maupun pembaruan. Notifikasi Telegram dikirim melalui Bot API. SMS dikirim secara serial dengan latensi 5–7 detik tergantung kualitas sinyal, sedangkan Telegram dikirim paralel secara *real-time*. Seluruh pesan diterima pengguna dan sesuai struktur rancangan.



Gambar 10. Notifikasi SMS dan Telegram.

3.4 Validasi Umum Sistem

Sebelum digunakan secara menyeluruh, perangkat telah melalui pengujian dasar untuk memastikan stabilitas dan keandalan sistem. Pengujian mencakup *self-noise* untuk memastikan bahwa *noise* sensor tidak lebih besar dari sinyal gempa lokal, dan *tilt test* pada *accelerometer* MEMS WT61C untuk mendapat *G-offset* guna memastikan sensor mampu merekam perubahan orientasi dengan konsisten.



Gambar 11. Grafik perbandingan spektrum *self-noise* WT61C dengan sinyal gempa lokal 4 M_L .

Grafik ini memperlihatkan perbandingan *Power Spectral Density* (PSD) sinyal *self-noise* hasil rekaman sensor MEMS WT61C pada tiga komponen dengan model *noise* seismik global *New High Noise Model* (NHNM) dan *New Low Noise Model* (NLNM) yang digunakan secara internasional sebagai standar acuan *self-noise* peralatan seismik serta kurva spektrum gempa M_L 4. Terlihat bahwa tingkat *self-noise* dari sensor MEMS WT61C pada sebagian besar rentang frekuensi berada di luar cakupan kurva NHNM dan NLNM, menandakan bahwa performa *noise* instrumen belum sebaik peralatan seismik standar. Namun, kurva PSD dari gempa lokal M_L 4 memiliki amplitudo yang jauh lebih tinggi dibandingkan tingkat kebisingan instrumen sehingga puncak atau *peak* sinyal gempa tetap dapat terekam dengan jelas. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun karakteristik *self-noise* sensor tidak sepenuhnya berada di dalam standar NHNM dan NLNM, sensor WT61C masih dapat digunakan untuk mendeteksi gempa lokal M_L 4 dan memperoleh parameter nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA).

Tabel 3. Hasil *tilt test* MEMS WT61C.

Sumbu	Orientasi	Percepatan rata-rata (g)	G-offset rata-rata (g)	Error rata-rata (%)	RMSE (g)
X	+1g	+1.0091	-0.0091	0.91%	0.009075748
	-1g	-0.9877	-0.0123	1.23%	0.012252606
Y	+1g	+0.99067	+0.00933	0.93%	0.009334691
	-1g	-1.00619	+0.00619	0.62%	0.006208548
Z	+1g	+0.9997	+0.0003	0.03%	0.000547494
	-1g	-0.9961	-0.0039	0.39%	0.003883632

Hasil pengujian *tilt test* menunjukkan bahwa rata-rata G-offset pada ketiga sumbu berada pada kisaran $\pm 0,01$ g. Jika dihitung sebagai persentase *error* terhadap nilai acuan ± 1 g, *error* maksimum tercatat sekitar 1,23% pada sumbu X (-1 g), sedangkan *error* minimum sekitar 0,03% pada sumbu Z (+1 g). Nilai RMSE keseluruhan juga relatif kecil ($< 0,013$ g), sehingga masih berada dalam batas toleransi. Hal ini membuktikan bahwa sensor MEMS WT61C bekerja dalam kisaran normal dan mampu merespons perubahan orientasi dengan baik.

Sistem juga diuji untuk akurasi waktu dan lokasi dengan membandingkan modul GNSS Ublox Neo-M8N terhadap perangkat GPS Nanometric operasional sebagai GPS referensi.

Tabel 4. Hasil komparasi modul GNSS Ublox Neo-M8N.

	GPS Referensi	Ublox Neo-M8N	Selisih(Δ)	Error
Lokasi (Rata-rata)				
Latitude (°)	-6.156544	-6.156460	+0.000084	0.0084 %
Longitude (°)	106.840954	106.840952	-0.000002	0.0002 %
Deviasi maksimal				<10 m
Waktu UTC (Rata-rata)				
Tanggal	03/06/2025	03/06/2025	-	-
Waktu UTC	03:02.00	03:02.00	00:00.00	-
Deviasi maksimal				<1 detik

Hasil menunjukkan perbedaan koordinat <10 meter dan deviasi waktu UTC <1 detik, yang dianggap cukup akurat sehingga sinkronisasi waktu dapat diandalkan untuk pencatatan data seismik. Namun untuk deviasi waktu, kemungkinan terdapat perbedaan beberapa milidetik yang tidak tercatat karena keterbatasan pembulatan.

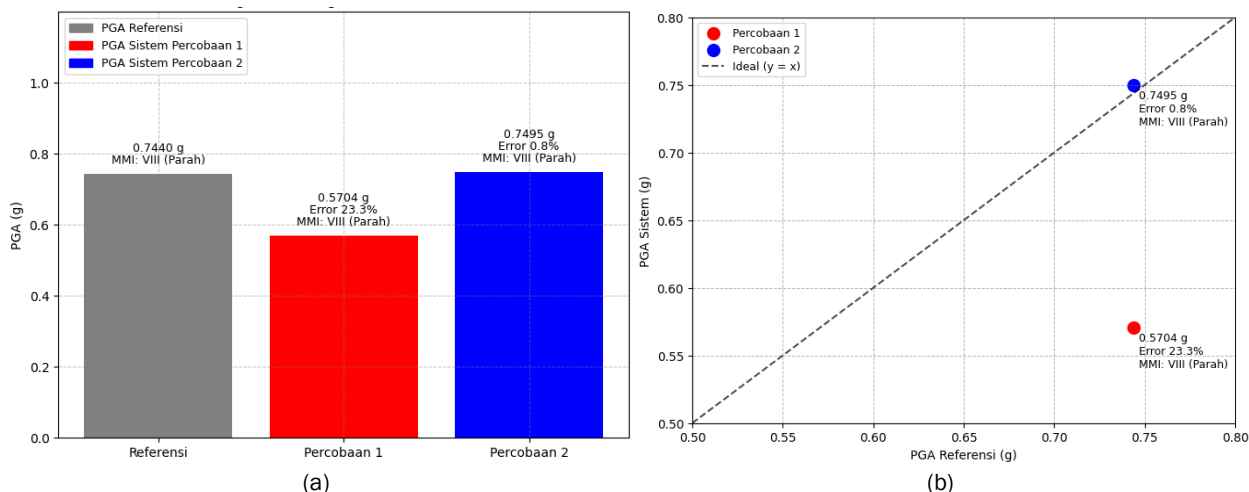
Hasil menunjukkan bahwa sensor bekerja dalam kisaran normal dan sistem merespons perubahan *input* dengan baik. Hasil ini mengindikasikan bahwa perangkat dapat digunakan sebagai alat monitoring intensitas gempa lokal dengan frekuensi menengah hingga tinggi, karena sensor menunjukkan kestabilan, dan modul GNSS mampu memberikan akurasi waktu serta posisi yang memadai.

3.5 Pengujian Sistem

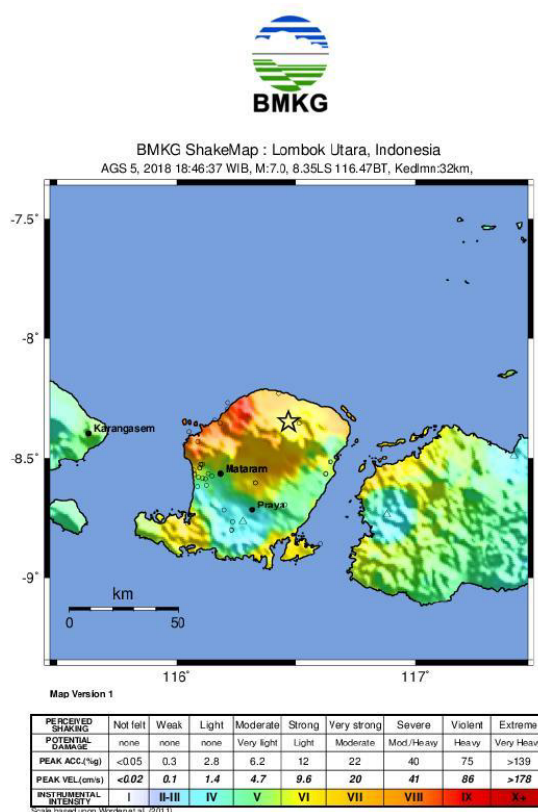
Untuk menguji kinerja sistem secara menyeluruh, dilakukan simulasi gempa menggunakan simulator gempa milik BMKG Pusat. Data masukan yang digunakan berasal dari peristiwa gempa Lombok pada 5 Agustus 2018 dengan magnitudo 7,0, berlokasi di $8,35^\circ$ LS dan $116,47^\circ$ BT pada kedalaman 15 km. Pengujian dilakukan dua kali dengan menggunakan data yang sama, namun dengan jarak yang berbeda dari sumber gempa. Percobaan pertama menggunakan jarak yang lebih jauh dibandingkan percobaan kedua, meskipun jarak pasti dari masing-masing skenario tidak diketahui. Hasil percobaan pertama menunjukkan nilai PGA sebesar 0,5704 g (57,04 %g). Pada percobaan kedua, sistem memperoleh nilai PGA sebesar 0,7495 g (74,95%g). Kedua percobaan ini menghasilkan nilai yang ekuivalen dengan intensitas MMI VIII. Hasil tersebut sejalan dengan data USGS yang mencatat nilai PGA maksimum sebesar 0,744 g untuk gempa Lombok 2018 [20], serta konsisten dengan klasifikasi intensitas MMI VIII pada *ShakeMap* BMKG [21].

Tabel 5. Hasil pengujian sistem dengan simulator gempa dengan data gempa Lombok 2018.

Parameter	Data gempa Lombok 2018	Hasil sistem <i>Intensitymeter</i> Percobaan 1 (lebih jauh dari sumber gempa)	Hasil sistem <i>Intensitymeter</i> Percobaan 2 (lebih dekat dari sumber gempa)
Lokasi gempa	Lombok, NTB	Simulator gempa data gempa Lombok 2018	Simulator gempa data gempa Lombok 2018
Skala Intensitas (MMI)	VIII (Parah)	VIII (Parah)	VIII (Parah)
Peak Ground Acceleration (PGA)	0,744 g (74,4 %g)	0,5704 g (57,04 %g)	0,7495 g (74,95%g)
Error PGA	–	23,3%	0.8%



Gambar 12. Grafik diagram batang (a) dan scatter plot (b) perbandingan PGA referensi dengan sistem.



Gambar 13. ShakeMap Corrected gempa Lombok 5 Agustus 2018 [21]

Pada percobaan pertama diperoleh selisih sekitar 23,3%, sedangkan pada percobaan kedua sekitar 0,8% terhadap nilai PGA gempa Lombok 2018. Meskipun demikian, estimasi intensitas MMI dari sistem tetap konsisten dengan *ShakeMap*. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti *noise* internal pada sensor MEMS, keterbatasan akurasi simulator gempa yang tidak sepenuhnya mereplikasi spektrum getaran asli, serta perbedaan algoritma perhitungan. Simulasi gempa juga memiliki keterbatasan karena proses konversi sinyal, lokasi uji yang tidak identik dengan pusat gempa, dan skala getaran yang telah disesuaikan untuk tujuan edukasi, sehingga akurasi hasil dapat terpengaruh. Keterbatasan lain adalah sistem belum diuji pada berbagai kondisi tanah dan variasi magnitudo yang dapat memengaruhi amplifikasi PGA. Kesalahan estimasi intensitas MMI hingga ± 1 tingkat masih dianggap sebagai toleransi yang wajar dan tidak signifikan, sehingga hasil sistem ini tetap dapat diterima untuk tujuan pemantauan intensitas gempa [22].

4 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem intensimeter berbasis sensor *low-cost* MEMS WT61C dengan algoritma deteksi kejadian gempa STA/LTA. Sistem dilengkapi mekanisme diseminasi multi-saluran (alarm *buzzer*, SMS, dan Telegram) serta mampu beroperasi dalam mode *online* maupun *offline* melalui metode *store-and-forward*, sehingga data tetap terjaga dan dapat diakses melalui *website* dengan fitur unduh data CSV dan MiniSEED. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kejadian gempa lokal dengan frekuensi menengah hingga tinggi, menghitung nilai PGA, mengestimasi intensitas gempa dalam skala MMI, serta mengirimkan notifikasi secara *real-time* kepada pengguna.

Validasi sistem dilakukan melalui pengujian *self-noise*, *tilt test*, dan komparasi GNSS yang menunjukkan bahwa sensor bekerja dalam batas toleransi dengan tingkat akurasi yang memadai. Pada uji simulator gempa Lombok 2018 (M7,0), percobaan pertama menghasilkan nilai PGA 0,5704 g dengan selisih sekitar 23,3% terhadap data referensi (0,744 g), sedangkan percobaan kedua memperoleh 0,7495 g dengan selisih sekitar 0,8%. Meskipun terdapat perbedaan pada nilai PGA dari kedua percobaan, hasil konversi ke skala intensitas MMI menunjukkan tingkat VIII (Parah), yang sejalan dengan klasifikasi guncangan pada *ShakeMap* BMKG.

Kebaruan penelitian ini terletak pada sensor MEMS berbiaya rendah dengan dukungan operasi *online* dan *offline*, mekanisme *store-and-forward*, serta diseminasi peringatan multi-saluran secara *real-time*. Kontribusi utama sistem ini adalah menyediakan solusi pemantauan gempa yang sederhana, terjangkau, dan aplikatif untuk wilayah dengan keterbatasan infrastruktur, sekaligus mendukung pengembangan *Earthquake Early Warning System* (EEWS). Sistem ini dapat dikembangkan lebih lanjut melalui optimasi parameter algoritma STA/LTA, penerapan metode reduksi *noise*, serta integrasi ke jaringan sensor berbasis *Internet of Things* (IoT).

Keterbatasan penelitian ini adalah ketiadaan kurva respons *gain/phase* resmi dari WT61C, meskipun sensor mendukung variasi pengaturan *bandwidth* dan *sampling rate* melalui *software* bawaan. Selain itu, pengujian lapangan masih terbatas pada simulator gempa BMKG dengan data gempa Lombok 2018, tanpa uji pada berbagai kejadian gempa nyata di lokasi berbeda. Sistem juga belum diuji pada berbagai kondisi tanah dan variasi magnitudo, sehingga pengaruh *site effect* terhadap amplifikasi PGA belum terpenuhi. Dengan demikian, hasil penelitian ini bersifat generalisasi pada gempa nyata sehingga memerlukan studi lanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) atas dukungan fasilitas dan data yang diberikan, serta kepada seluruh pihak yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini namun tidak dapat disebutkan satu per satu.

Referensi

- [1] H. A. Nugraha, Y. Tasar, Y. Yusup, M. Putra, D. A. Soeprapto, A. Furqon, A. P. Pramugasta, T. Sandro, D. P. Djenal, and A. Aziz, "Rancang bangun sistem sirine tsunami terintegrasi," *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro*, UIN Sunan Gunung Djati Bandung, 2020, pp. 1–10. [Online]. Available: [https://senter.ee.uinsgd.ac.id/repositori/index.php/prosiding/article/download/senter2020p1/senter202020p1/378](https://senter.ee.uinsgd.ac.id/repositori/index.php/prosiding/article/download/senter2020p1/senter2020p1/378)
- [2] N. B. Wibowo and J. N. Sembri, "Analisis peak ground acceleration (PGA) dan intensitas gempa bumi berdasarkan data gempa bumi terasa tahun 1981–2014 di Kabupaten Bantul Yogyakarta," *Indonesian Journal of Applied Physics*, vol. 6, no. 1, pp. 65–72, 2016, doi: <https://doi.org/10.13057/ijap.v6i01.1804>
- [3] P. N. Crisnapati, P. D. Wulaning, I. N. R. Hendrawan, and A. A. K. B. Bandanagara, "Earthquake damage intensity scaling system based on Raspberry Pi and Arduino Uno," in *Proceedings of the 2018 6th*

- International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*, 2018, pp. 1–4, doi : <https://doi.org/10.1109/CITSM.2018.8674321>
- [4] BMKG, "Alat Operasional Utama Geofisika," Stasiun Geofisika Kupang. Accessed: 23 January 2025 [Online]. Available: <https://stageof-kupang.bmkg.go.id/alat-operasional-utama-geofisika/>
- [5] F. S. Rahmatullah, E. Santoso, O. Sativa, A. Y. Octantyo, N. H. Oktavia, F. B. Utomo, R. Billyanto, M. R. J. Utama, D. Sugianto, D. T. Reza, A. Sabtaji, K. R. Dewi, A. Wijaya, J. S. Pradita, N. F. Habibah, A. Kaluku, N. Winata, M. B. Nugroho, A. S. Rahman, Y. D. Persada, H. A. Efendi, C. T. Pamungkas, R. Swastikarani, Istofiyah, L. Himantara, A. H. Fajri, U. N. Silvia, A. F. Miftakhunisa, E. Makhdafa, R. Pratama, D. Lasmita, and S. F. Angesthi, *Peta skenario model tingkat guncangan (ShakeMap) gempa bumi Indonesia untuk pengurangan risiko bencana dan pembangunan nasional*, Cetakan kedua. Jakarta: PSGT–BMKG, 2023. Accessed 6 February 2025 [Online]. Available: <https://yogyakarta.bmkg.go.id/buletin-mkg/peta-skenario-model-tingkat-guncangan-shakemap-gempa-bumi-indonesia-versi-2-0/>
- [6] C. C. Wang and G. H. Wei, "A low-cost design of earthquake detector with rescue message deliver using mobile device," *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, vol. 2, pp. 4–5, 2016. Accessed 8 February 2025 [Online]. Available: <https://ojs.imeti.org/index.php/PETI/article/view/218>
- [7] M. A. Bravo-Haro, X. Ding, and A. Y. Elghazouli, "MEMS-based low-cost and open-source accelerograph for earthquake strong-motion," *Engineering Structures*, vol. 230, p. 111675, 2021, doi : <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111675>
- [8] S. Scudero, A. D'Alessandro, L. Greco and G. Vitale, "MEMS technology in seismology: A short review," in *2018 IEEE International Conference on Environmental Engineering (EE)*, Milan, Italy, 2018, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/EE1.2018.8385252>
- [9] S. C. Mandiangan, "Analisis Getaran Pemesinan Frais dan Pengujian Wireless Accelerometer Sensor dengan Arduino-ESP32," Skripsi, Program Sarjana Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya, 2022. <http://repository.unsri.ac.id/id/eprint/76598>
- [10] G. Pang and H. Liu, "Evaluation of a low-cost MEMS accelerometer for distance measurement," in *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, Seoul, Korea, 2001, pp. 4010–4015, doi : <https://doi.org/10.1023/A:1008113324758>
- [11] D. Li, B. Zhou, Z. Wang, S. Yang, and P. Liu, "The identification and compensation of static drift induced by external disturbances for LiDAR SLAM," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–12, 2021, doi : <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072935>
- [12] A. Trnkoczy, "Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm (Information Sheet IS 8.1)," Kinemetrics SA, 1999, doi : https://doi.org/0.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_8.1
- [13] Y. Vaezi and M. Van der Baan, "Comparison of the STA/LTA and power spectral density methods for microseismic event detection," *Geophysical Journal International*, vol. 203, no. 3, pp. 1896–1908, 2015, doi : <https://doi.org/10.1093/gji/ggv419>
- [14] W. Perkasa, "Rancang bangun aplikasi SMS gateway untuk penyampaian informasi di wilayah Kabupaten Tanggamus (Studi kasus PNPM Kabupaten Tanggamus)," *Proceeding KMSI*, vol. 2, no. 1, 2014. [Online]. Available: <https://jurnal.stmikpringsewu.ac.id/index.php/kmsi/article/view/253>
- [15] J. Brown, B. Shipman, and R. Vetter, "SMS: The short message service," *Computer IEEE*, vol. 40, no. 12, pp. 106–110, 2007, doi : <https://doi.org/10.1109/MC.2007.440>
- [16] M. Caprio, B. Tarigan, C. B. Worden, S. Wiemer, and D. J. Wald, "Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 105, no. 3, pp. 1476–1490, 2015, doi : <https://doi.org/10.1785/0120140286>
- [17] J. Douglas, "Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: A review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates," *Earth-Science Reviews*, vol. 61, pp. 43–104, 2003, doi : [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00112-5)
- [18] C. B. Worden, M. C. Gerstenberger, D. A. Rhoades, and D. J. Wald, "Probabilistic relationships between ground-motion parameters and Modified Mercalli Intensity in California," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 102, no. 1, pp. 204–221, 2012, doi : <https://doi.org/10.1785/0120110156>
- [19] A. D'Alessandro, S. Scudero, and G. Vitale, "A review of the capacitive MEMS for seismology," *Sensors*, vol. 19, no. 14, p. 3093, 2019, doi : <https://doi.org/10.3390/s19143093>
- [20] U.S. Geological Survey, "M 6.9 - 36 km NW of Labuan Lombok, Indonesia," (Agustus 2018). Accessed 2 September 2025 [Online]. Available: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000g3ub/shakemap/metadata>
- [21] BMKG, "Ulasan Guncangan Tanah Akibat Gempa Lombok Timur 05 Agustus 2018," (6 Agustus 2018). Accessed 2 September 2025 [Online]. Available: <https://www.bmkg.go.id/gempabumi/ulasan-guncangan-tanah/ulasan-guncangan-gempa-lombok-timur-05-agustus-2018>
- [22] G. M. Atkinson and D.J. Wald, "'Did you feel it?' Intensity data: A surprisingly good measure of earthquake ground motion," *Seismological Research Letters*, Vol. 78, no. 3, pp 362–368, 2007, doi : <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.3.362>