

## ***Design and Construction of Low-Cost Seismometer using Geophone Sensor Based on Single Board Computer***

**Article History:**

Received

1 August 2025

Revised

9 September 2025

Accepted

12 November 2025

**RAIHAN AHMAD FAUZAN, BENYAMIN HERYANTO  
RUSANTO, MARZUKI SINAMBELA, EDWARD TRIHADI**

Instrumentasi-MKG Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi  
dan Geofisika, Indonesia

Email: [raihanahmad3012@gmail.com](mailto:raihanahmad3012@gmail.com)

### **ABSTRAK**

*Tingginya biaya pemasangan jaringan seismograf menjadi kendala dalam meningkatkan cakupan sistem pemantauan seismik. Penelitian ini bertujuan untuk merancang low-cost seismometer menggunakan metode prototipe, yang terdiri dari sensor geophone EG-4.5-II, rangkaian signal conditioning, ADS1256, GPS Neo-7M, dan Raspberry Pi 3 Model B+. Data ditampilkan secara realtime pada antarmuka berbasis website melalui protokol komunikasi MQTT. Hasil pengujian melalui analisis power spectral density terhadap perbandingan data event gempa bumi menunjukkan sistem mampu merekam sinyal gempa tanpa gangguan noise yang signifikan untuk pengamatan gempa lokal (near-source) pada jarak 10 km dengan  $M_L > 1,5$ . Terdapat 84,8% titik frekuensi background noise sensor berada dalam batasan NHNM/NLNM. Prototipe ini memberikan solusi low-cost seismometer yang efektif untuk pemantauan seismik.*

**Kata kunci:** geophone, low-cost, Raspberry Pi, power spectral density

### **ABSTRACT**

*The high installation cost of seismograph networks remains a challenge in expanding seismic monitoring coverage. This research aims to design a low-cost seismometer using the prototyping method, consisting of a EG-4.5-II geophone sensor, signal conditioning, ADS1256, GPS Neo-7M, and Raspberry Pi 3 Model B+. Real-time data are visualized via a web-based interface using the MQTT communication protocol. Test results through power spectral density analysis against earthquake event data comparisons show that the system is able to record earthquake signals without significant noise interference for local earthquake observations (near-source) at a distance of 10 km with  $M_L > 1,5$ . Furthermore, 84,8% of the background noise frequencies fall within the NHNM/NLNM range. This prototype provides an effective low-cost seismometer solution for seismic monitoring.*

**Keywords:** geophone, low-cost, Raspberry Pi, power spectral density

*This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license*



## 1. PENDAHULUAN

Salah satu faktor utama dalam upaya peningkatan pemantauan seismik adalah penerapan jaringan sensor seismik yang dilakukan dengan penyebaran dan interkoneksi instrumen secara menyeluruh (**Santos, dkk, 2019**). Indonesia memiliki sistem pemantauan gempa bumi yang dioperasikan oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Sistem tersebut terhubung dalam satu jaringan yang disebut jaringan *Indonesia Tsunami Early Warning System* (InaTEWS) (**Yusuf, dkk, 2016**). Saat ini, BMKG memiliki kurang lebih 507 seismograf yang tersebar di wilayah Indonesia. Namun, seismograf digital yang digunakan BMKG memiliki ukuran yang besar dengan konstruksi yang rumit. Data yang dihasilkan oleh seismograf tersebut juga masih berupa data mentah yang harus diolah lebih lanjut oleh perangkat yang terpisah (**Priyadi, dkk, 2021**).

Selain itu, tingginya biaya pemasangan dan operasional stasiun seismik menyebabkan satu stasiun dalam sistem monitoring seismik tradisional sering kali bertanggung jawab atas area yang lebih luas untuk mendeteksi gempa bumi. Hal itu dapat mengakibatkan titik buta yang tidak tercakup oleh stasiun tersebut (**Kwon, dkk, 2020**). Untuk mengurangi keterbatasan sistem monitoring seismik tradisional, sudah banyak penelitian yang berhasil melakukan pengembangan sensor *low-cost* dalam pemantauan gempa bumi, seperti *geophone* dan sensor seismik MEMS lainnya (**Santoso, dkk, 2017**). Penggunaan sensor *low-cost* tersebut telah menunjukkan potensi pada penerapan seismologi dan integrasi ke dalam jaringan pemantauan seismik dan perkotaan (**Esposito, dkk, 2024**). Penggunaan sensor *geophone* menjadi referensi pilihan bagi para peneliti dalam hal pengambilan data dan aplikasi pemantauan seismik lokal karena keandalannya yang sangat baik dan sensitivitas yang tinggi (**Kafadar, 2020**). Satu sensor seismik *geophone* yang ditempatkan bersama dengan sensor infrasonik berbasis *mikrokontroler* dapat digunakan untuk menjalankan algoritma pendekripsi gelombang seismik (**Schimmel, dkk, 2022**). Penelitian yang dilakukan oleh Belli (**Belli, dkk, 2022**) menggunakan seismometer LE-3Dlite MkIII untuk merekam sinyal getaran tanah dalam rentang pengukuran 1-100Hz.

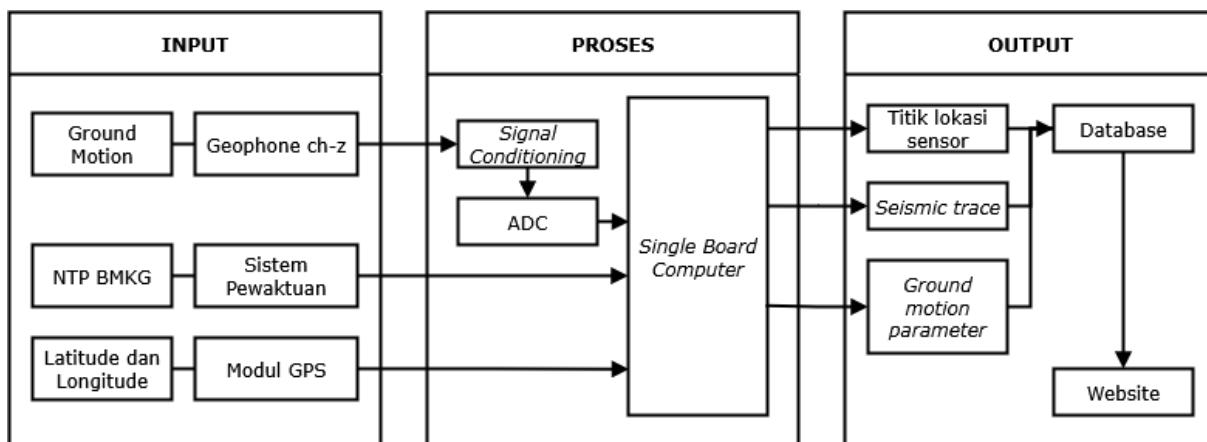
Penelitian yang dilakukan oleh Lutfian Hanif (**Hanif, 2019**) telah berhasil merancang *low-cost seismometer* yang mampu menampilkan *waveform* dengan baik. Namun, rancangan tersebut memiliki ukuran yang relatif besar dan belum menjelaskan secara mendalam kualitas performa sensor berdasarkan analisis *Power Spectral Density* (PSD). Oleh karena itu, diperlukan pengembangan *low-cost seismometer* yang lebih kompak dengan evaluasi tingkat *background noise* melalui analisis PSD untuk menilai kemampuan sensor yang digunakan dalam merekam sinyal.

Berdasarkan latar belakang dan permasalahan tersebut, penelitian ini akan membahas mengenai: (i) bagaimana merancang *low-cost seismometer* menggunakan sensor *geophone* yang mampu merekam sinyal gempa dengan tingkat *background noise* yang terukur, dan (ii) bagaimana merancang *Graphical User Interface* (GUI) berbasis *website* untuk menampilkan data pengukuran dari sistem yang telah dirancang secara *realtime*. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang prototipe sistem seismometer yang ekonomis, kompak, dan andal untuk memperluas cakupan jaringan pemantauan seismik di Indonesia. Ruang lingkup penelitian ini mencakup perancangan, pengujian, dan evaluasi sistem di laboratorium pengujian untuk memastikan performa sensor, serta uji lapangan pada salah satu *site* seismik jaringan InaTEWS untuk menguji kemampuan alat dalam merekam sinyal. Penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan peralatan pemantauan gempa bumi berbiaya rendah dan memiliki kualitas yang sama dengan peralatan operasional serta turut mendukung terciptanya kerapatan jaringan sensor seismik yang ada di Indonesia.

## 2. RANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

### 2.2 Diagram Blok

Diagram blok merupakan representasi visual yang menggambarkan komponen-komponen utama dalam suatu sistem yang memiliki fungsi dan alur kerja tersendiri. Diagram blok pada penelitian ini berisi tentang gambaran dasar dari sistem pemantauan data seismik yang terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *input*, proses, dan *output*. Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem dari penelitian yang akan dirancang.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

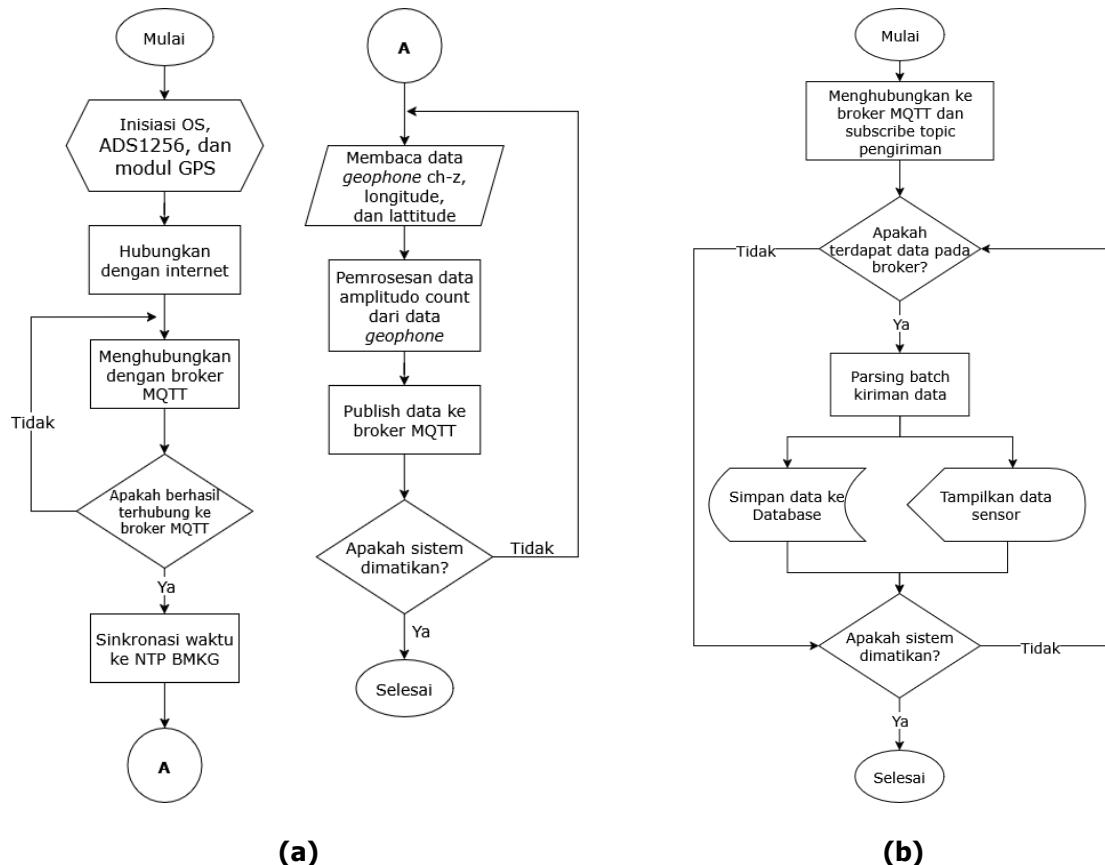
Komponen *input* berisi tentang informasi masukan sistem berupa *resources*, sensor *geophone*, dan modul GPS. Sensor *Geophone* digunakan untuk mengukur besaran fisis berupa pergerakan tanah vertikal (sumbu-z) dalam satuan tegangan. Tipe sensor *geophone* yang digunakan adalah EG-4.5-II, sebuah seismometer inersia jenis *geophone* vertikal yang menggunakan prinsip *moving coil* sebagai modul sensor dalam mendeteksi getaran yang memiliki natural frekuensi pada 4,5Hz yang menandakan sensor tersebut dapat merespons frekuensi getaran secara optimal pada 4,5Hz. Modul GPS digunakan untuk menentukan titik lokasi di permukaan bumi dengan menghitung posisi *latitude* dan *longitude* sensor. Kemudian, sistem pewaktuan menggunakan NTP yang terhubung ke server BMKG.

Selanjutnya, bagian proses berfungsi dalam pengolahan data yang didapatkan dari bagian *input*. Komponen yang berfungsi dalam bagian proses pada penelitian adalah rangkaian *signal conditioning*, ADC, dan *single board computer*. *Output* dari *geophone* yang berupa sinyal analog akan mengalami penguatan dan *filterisasi* oleh rangkaian *signal conditioning*. Kemudian, sinyal tersebut akan dikonversi menjadi sinyal digital melalui ADC 24-bit supaya dapat diolah lebih lanjut oleh *single board computer* dan menghasilkan data pengukuran berupa ADC *counts*. ADC merupakan komponen utama dalam proses akuisisi data. Modul ADC pada penelitian ini menggunakan IC ADS1256 sebagai komponen ADC utama dengan resolusi 24-bit yang memiliki kecepatan data hingga 30.000 sampel per detik (SPS) sehingga cocok digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan akurasi tinggi secara *realtime*, seperti data seismik yang memiliki sinyal dengan frekuensi rendah. ADS1256 menggunakan arsitektur sigma-delta ( $\Sigma-\Delta$ ) yang berfungsi dalam mengurangi noise melalui teknik *oversampling* dan *noise shaping*, sehingga membantu meningkatkan akurasi serta kualitas sinyal digital yang dihasilkan. *Sigma-delta converter* merupakan jenis konverter ADC yang mampu mengonversi sinyal analog pada rentang frekuensi yang luas, mulai dari DC hingga beberapa megahertz, dengan konsumsi daya yang rendah dan resolusi tinggi (**Sharma, dkk, 2025**).

Kemudian, komponen *output* merupakan bagian yang berisi tentang keluaran sistem yang diperoleh dari hasil pengolahan bagian proses. *Output* yang dihasilkan berupa data pengukuran lokasi sensor, seismogram (*seismic traces*), dan parameter *ground motion* (kecepatan, percepatan, dan perpindahan). Data tersebut disimpan pada database dan kemudian ditampilkan pada *website*.

## 2.2 Diagram Alir Sistem

Diagram alir sistem pada penelitian ini terdiri dari dua bagian, yaitu sistem pengukuran data pada sensor dan penyajian data oleh sistem antarmuka berbasis *website*. Kedua proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Sistem: (a) Seismometer; (b) Antarmuka

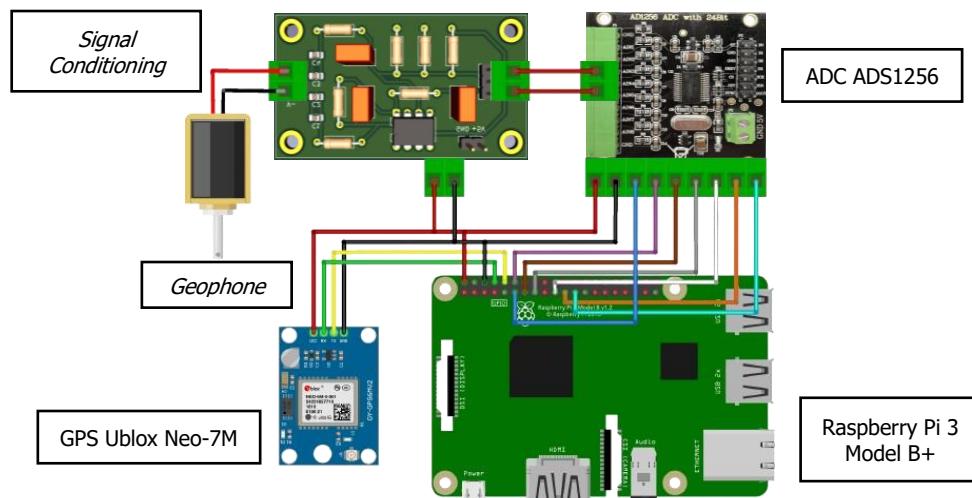
Gambar 2a menunjukkan proses akuisisi data pada seismometer yang dimulai dengan *Single Board Computer* (SBC) mendapatkan suplai tegangan dari adaptor daya. SBC akan menjalankan proses inisiasi pada sistem operasi dan komponen yang terhubung, seperti modul ADC ADS1256 dan GPS Ublox Neo-7M. Kemudian, apabila terdapat koneksi internet, SBC akan mencoba melakukan koneksi ke broker MQTT. Percobaan tersebut dilakukan secara terus-menerus hingga perangkat berhasil terhubung ke broker MQTT. MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) adalah protokol komunikasi terbuka dengan model *publish-subscribe* yang digunakan untuk aplikasi telemetri. Broker MQTT berperan sangat penting dalam menentukan sebuah fungsionalitas dari MQTT seperti perantara antara *publisher* dan *subscriber*, mengatur aliran pesan, topik penyimpanan, serta memastikan pengiriman pesan kepada penerima (**Akbar, dkk, 2023**).

Setelah berhasil terhubung ke broker MQTT, SBC akan melakukan sinkronisasi waktu melalui NTP BMKG untuk memastikan akurasi pewaktuan data. Selanjutnya, SBC akan melakukan pembacaan data dari sensor *geophone* dan modul GPS. Data yang dihasilkan sensor *geophone* berupa sinyal analog, sehingga diperlukan perangkat ADC untuk mengubah sinyal tersebut menjadi sinyal digital agar dapat diproses lebih lanjut oleh SBC. Data yang diperoleh berupa nilai amplitudo getaran tanah dalam satuan *ADC counts*, serta data lokasi sensor. Data tersebut kemudian dikirimkan ke server melalui broker MQTT dalam bentuk JSON dengan *topic* pengiriman yang sudah ditentukan. Sistem ini akan terus melakukan proses akuisisi dan pengiriman data secara berulang selama perangkat masih aktif.

Proses penyajian data dapat dilihat pada Gambar 2b yang merupakan sistem antarmuka untuk menerima dan menampilkan data hasil akuisisi dari seismometer secara *realtime*. Proses dimulai dengan inisiasi koneksi ke broker MQTT dan melakukan *subscribe* pada *topic* pengiriman data yang telah ditentukan sebelumnya. Kemudian, sistem akan terus memantau ketersediaan data baru pada broker MQTT. Apabila terdapat data baru yang masuk, sistem akan melakukan proses *parsing* data pada *batch* yang diterima. Data yang telah berhasil di-*parsing* kemudian akan diproses menjadi dua jalur, yaitu disimpan ke dalam *database* dan ditampilkan secara langsung pada *front-end website*. Proses ini akan berlangsung secara terus-menerus seperti dalam sebuah *loop*. Sistem akan memeriksa ketersediaan data baru pada broker MQTT dan memperbarui tampilan data selama perangkat dalam kondisi. Proses akan berhenti jika sistem dimatikan oleh pengguna.

### 2.3 Gambaran Rancangan Modul

Perancangan modul bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai bentuk fisik prototipe seismometer secara keseluruhan dalam bentuk skema rangkaian dan rancangan perangkat keras sistem. Skema rangkaian pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3, yang dibuat menggunakan aplikasi Fritzing.



Gambar 3. Skema Rangkaian Sistem

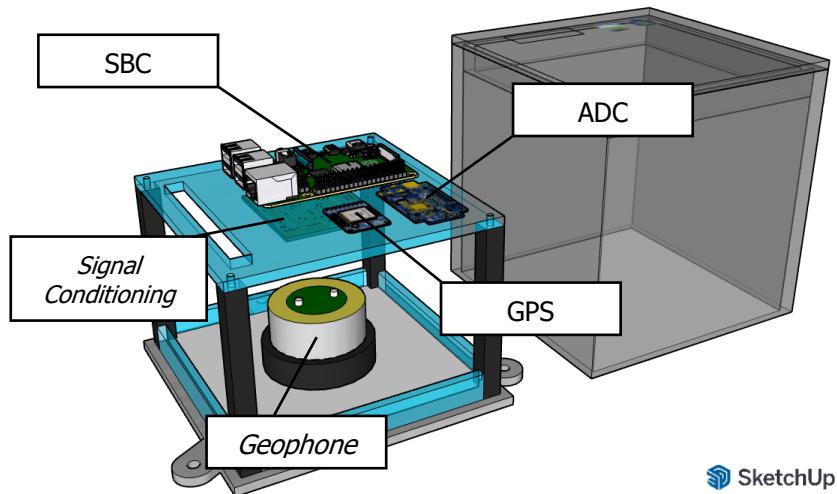
Gambar 3 di atas merupakan skema rangkaian secara keseluruhan yang mengintegrasikan antar komponen di dalamnya melalui jalur pengkabelan (*wiring*) dengan kode warna tertentu untuk membedakan fungsi dan jenis koneksi pada masing-masing komponen. Sensor *geophone* EG-4.5-II dan modul GPS Ublox Neo-7M merupakan komponen *input*. ADC ADS1256 dan rangkaian *signal conditioning* merupakan komponen proses dari sinyal keluaran *geophone*. Raspberry Pi 3 Model B+ berfungsi sebagai komponen akuisisi data dalam mengolah dan mengirimkan data pengukuran.

Tabel 1 memberikan konfigurasi tentang koneksi komunikasi seriap SPI yang digunakan antara modul ADC ADS125 dengan Raspberry Pi 3 model B+.

**Tabel 1. Konfigurasi Pin ADS1256 ke Raspberry Pi**

Deskripsi Pin	ADS1256 Pin-Out	Raspberry Pi Pin-Out
Power	VCC	2
Ground	GND	6
Data Ready	DRDY	11
Reset	RST	12
Power Down	PDWN	13
Chip Select	CS	15
MOSI	DIN	19
MISO	DOUT	21
Serial Clock	SCLK	23

Skema rangkaian tersebut akan diimplementasikan ke dalam desain perangkat keras sistem dengan menggunakan *enclosure* sebagai wadah untuk menempatkan seluruh komponen. Visualisasi rancangan perangkat keras sistem ditunjukkan pada Gambar 4. Desain rancangan tersebut dibuat menggunakan aplikasi SketchUp, yang merupakan aplikasi 3D modeling sehingga dapat memberikan gambaran bentuk fisik alat dari segala arah.



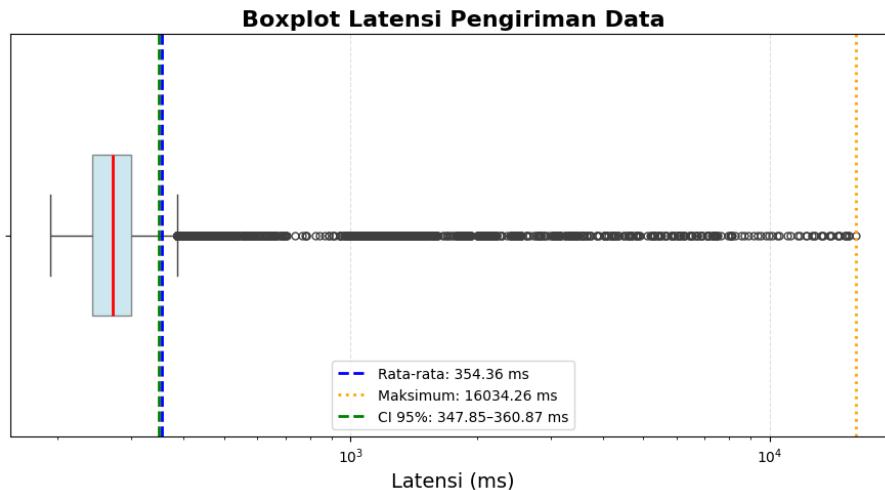
**Gambar 4. Rancangan Perangkat Keras Sistem**

Gambar 4 menunjukkan *enclosure* sensor yang tersusun dari dua bagian, yaitu bagian bawah dijadikan sebagai tempat sensor *geophone* dan rangkaian *signal conditioning*, serta bagian atas yang digunakan untuk komponen SBC, ADC, dan modul GPS. Bahan material penyusun yang digunakan pada *enclosure* tersebut terdiri dari akrilik, filamen ABS, dan aluminium.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Pengujian Latensi Pengiriman Data

Pengujian ini dilakukan menggunakan metode *One-Way Delay* (OWD) berulang, yaitu dengan menghitung selisih waktu kirim dengan waktu tiba paket data secara berulang untuk melihat kecepatan dari protokol komunikasi MQTT dalam mengirimkan sebuah data sensor. Jaringan internet yang digunakan sensor didapatkan dari modul WiFi Raspberry Pi 3 Model B+ yang terhubung ke *router* telkomsel. Hasil pengujian dapat dilihat dari Gambar 5.

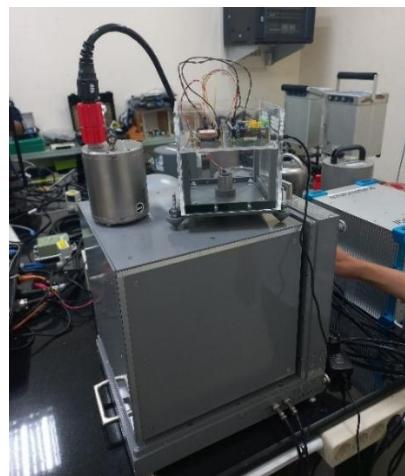


**Gambar 5. Distribusi Hasil Pengujian Latensi Pengiriman Data**

Grafik pada Gambar 5 menunjukkan distribusi latensi kiriman data selama  $\pm 5$  jam pengujian. Berdasarkan grafik histogram tersebut diketahui bahwa rata-rata kecepatan pengiriman data adalah 354,36 ms dengan *confidence interval* 95% antara 341 – 367 ms. Adapun *outlier* yang terlihat cukup signifikan memiliki nilai maksimum sebesar 16.034,26 ms. Hal ini dapat disebabkan oleh penggunaan jaringan internet publik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki latensi pengiriman data yang cukup baik. Nilai latensi tersebut berada di bawah 10 detik yang ditetapkan oleh sistem BMKG Seedlink Monitor sebagai indikator kinerja optimal untuk kualitas jaringan stasiun seismik.

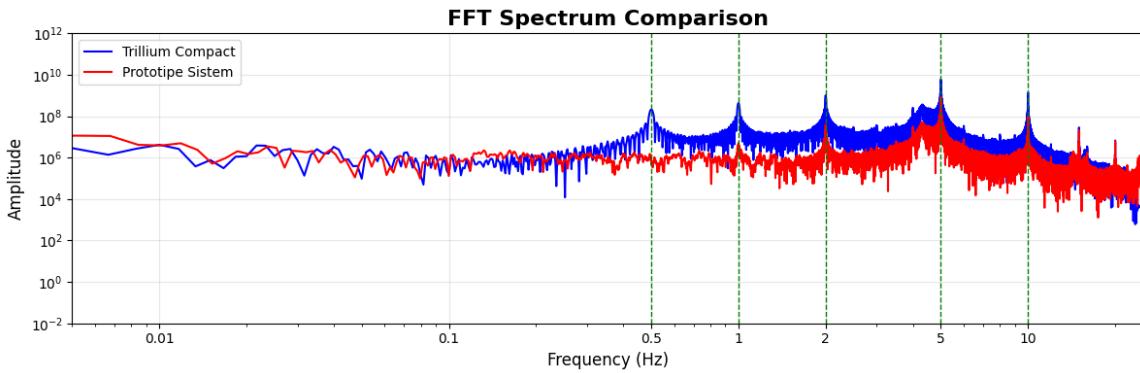
### 3.2 Pengujian Frekuensi Respons

Pengujian dilakukan menggunakan metode *Frequency Response Analysis* (FRA) untuk melihat kemampuan sistem dalam merespons getaran yang diberikan pada frekuensi tertentu secara terkontrol. Pengujian dilakukan dengan menempatkan sistem bersama dengan seismometer Trillium Compact sebagai referensi pada *shake table* tipe Volna VS4 (lihat Gambar 6), kemudian dianalisis menggunakan *FFT Spectrum Comparison* untuk memperoleh karakteristik respons frekuensi sistem.



**Gambar 6. Penempatan Sensor dalam Pengujian Frekuensi Respons**

Terdapat lima set point frekuensi getaran yang diberikan, yaitu 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, dan 10 Hz. Hasil pengujian frekuensi respons dapat dilihat pada grafik spektrum frekuensi (lihat Gambar 7).

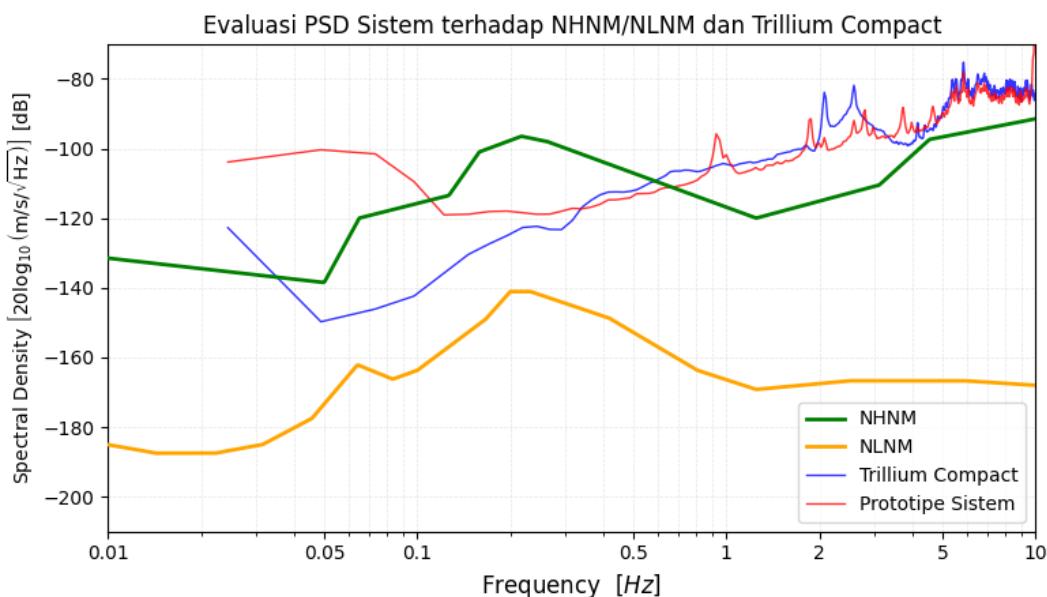


**Gambar 7. Grafik Perbandingan Spektrum Sinyal pada Sistem dan Alat Operasional**

Grafik tersebut menunjukkan bahwa sistem belum mampu mendeteksi sinyal *input* pada frekuensi 0,5 Hz. Sistem mulai dapat menangkap sinyal dengan baik pada frekuensi 1 Hz, meskipun amplitudo puncak yang dihasilkan masih relatif rendah dibandingkan dengan sinyal referensi. Pada frekuensi 2 Hz, 5 Hz, dan 10 Hz, puncak spektrum menunjukkan peningkatan amplitudo yang signifikan, menandakan bahwa sistem mampu merespons sinyal *input* dengan lebih optimal pada rentang frekuensi tersebut. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa performa sistem dalam menangkap dan merepresentasikan sinyal bekerja secara optimal pada frekuensi di atas 1 Hz.

### 3.3 Pengujian *Background Noise*

Pengujian *background noise* dilakukan dengan menempatkan prototipe sistem bersamaan dengan alat operasional Trillium Compact sebagai pembanding pada *pier* seismik, yaitu suatu struktur standar yang dirancang khusus untuk pemasangan peralatan pemantauan seismik dalam meminimalkan gangguan getaran eksternal. Penggunaan *pier* seismik bertujuan untuk memastikan bahwa hasil pengukuran hanya dipengaruhi oleh respons alami lingkungan tanpa adanya interferensi dari getaran buatan atau lingkungan sekitar. Pengujian ini dilakukan di laboratorium kalibrasi peralatan geofisika BMKG Pusat yang berlokasi di pusat perkotaan dengan kondisi lingkungan tergolong cukup ramai. Waktu pengambilan data dilakukan pada malam hari pukul 22.30 – 05.00 WIB. Hasil pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 8.



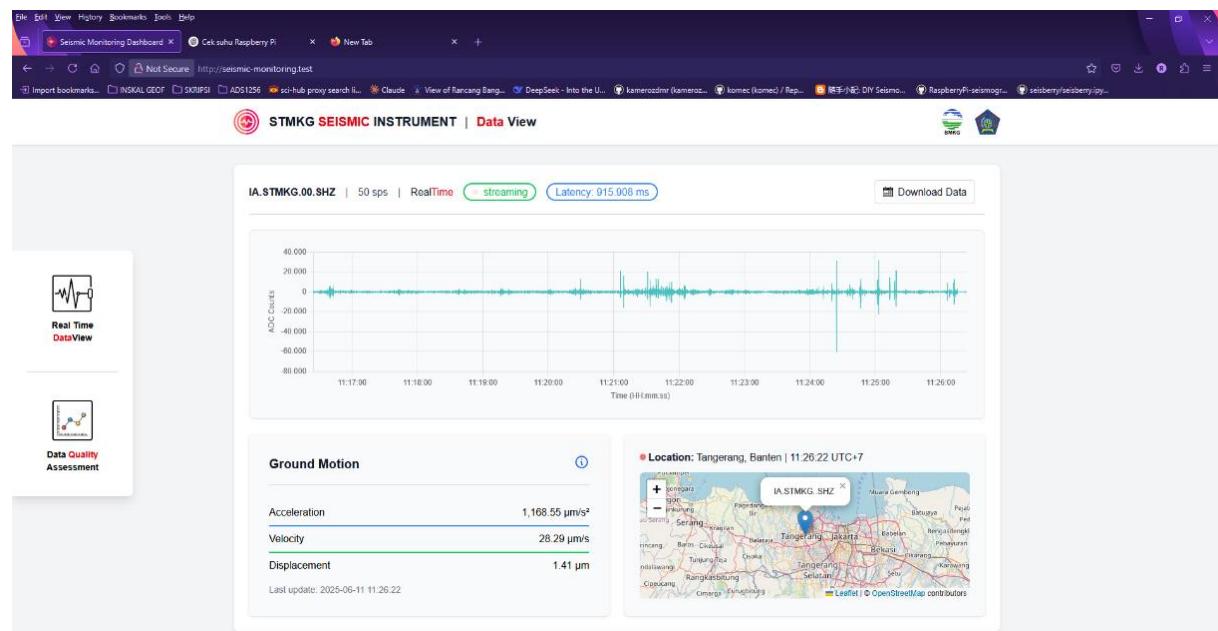
**Gambar 8. Grafik Perbandingan PSD pada Batasan NHNM/NLNM**

Grafik di atas menunjukkan performa sistem dan referensi dalam merekam sinyal terhadap standar kebisingan global (batasan Peterson NHNM/NLNM). Standarisasi tinggi dan rendahnya *seismic noise* mengacu pada model Peterson, yaitu *New High Noise Model* (NHNM) dan *New Low Noise Model* (NLNM) (**Trismahargyono & Indah Pertiwi, 2023**). Data diperoleh melalui perekaman dengan kecepatan sampling sebesar 50 Hz. Metode standar yang dapat digunakan untuk mengevaluasi karakteristik *noise* pada sebuah sensor seismik adalah dengan menghitung PSD (*Power Spectral Density*) yang dihitung menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT). *Fast Fourier Transform* merupakan sebuah algoritma matematika yang digunakan untuk mempercepat perhitungan *Discrete Fourier Transform* (DFT) dengan memecah sinyal menjadi bagian genap dan ganjil, sehingga memungkinkan transformasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi secara cepat. Algoritma DFT sendiri digunakan untuk mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi (**Nguyen, dkk, 2025**). Perhitungan PSD dilakukan dengan mentransformasikan data percepatan ke domain frekuensi menggunakan FFT, kemudian menghitung distribusi spektrum daya per satuan frekuensi dalam bentuk  $(m^2/s^4)/Hz$ . Nilai PSD kemudian dikonversikan ke skala desibel (dB) menggunakan rumus  $20 \log_{10}(m/s^2)/\sqrt{Hz}$ .

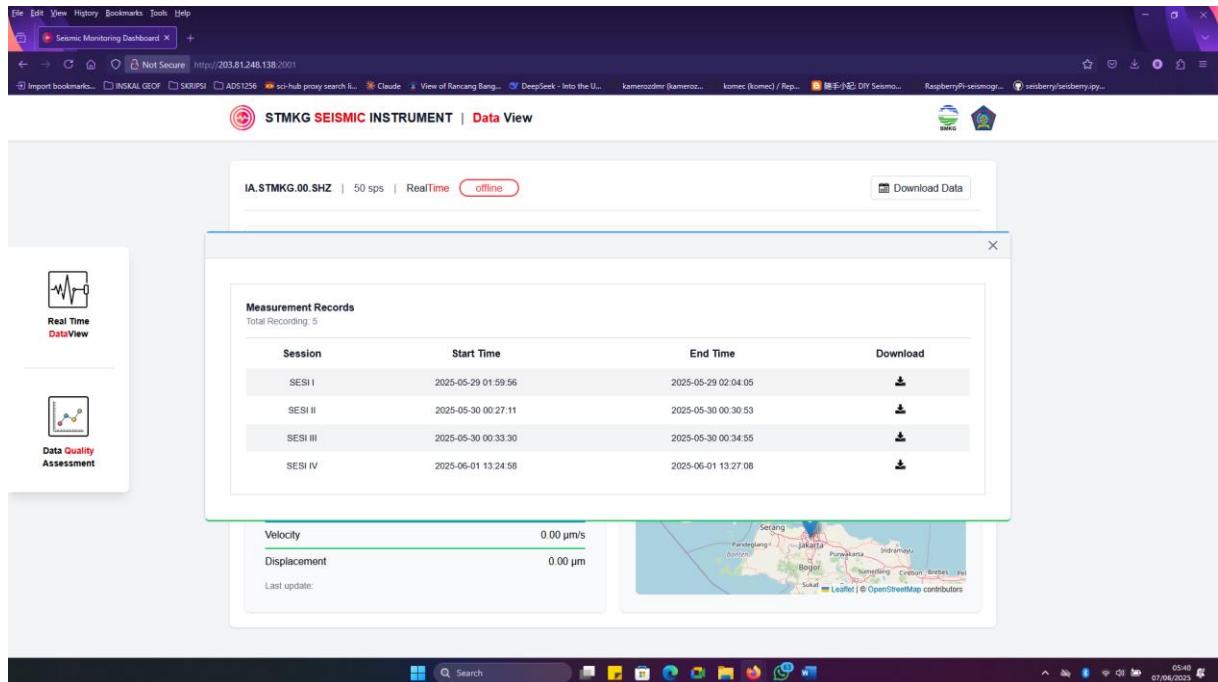
Secara umum, respons frekuensi sistem menunjukkan kesesuaian dengan kurva referensi di atas 0,5 Hz. Namun, pada frekuensi di bawah 0,3 Hz, nilai PSD sistem cenderung tinggi. Hal ini mengindikasikan adanya *noise floor* yang signifikan serta keterbatasan sistem dalam merespons frekuensi rendah (*low-frequency signal attenuation*). Adapun bentuk kurva PSD yang sebagian besar melewati batas NHNM pada frekuensi di atas 0,6 Hz disebabkan oleh kondisi lingkungan pengukuran yang terletak di area perkotaan dengan tingkat kebisingan latar belakang (*ambient noise*) yang tinggi.

### 3.4 Pengujian Aplikasi Website

Pengujian aplikasi web merupakan *functional testing* yang dilakukan untuk memastikan aplikasi *website* yang dibuat dapat diakses secara publik dan seluruh menu *dashboard* dapat berfungsi dengan baik. Aplikasi web penelitian ini dapat diakses melalui browser dengan alamat *IP address* <http://203.81.248.138:2001/>.



Gambar 9. Tampilan Data *Display Sensor* pada *Website*

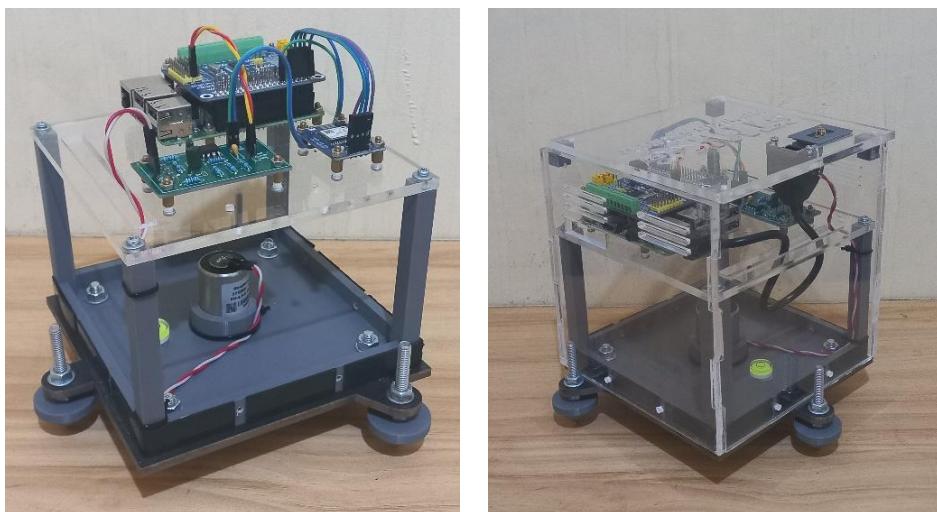


**Gambar 10. Tampilan Menu *Download* Data miniSEED**

Gambar 9 di atas merupakan halaman awal *dashboard* pada *user interface* data display sensor. Halaman ini terdiri dari tiga bagian utama, yaitu main menu, menu *download*, dan *sidebar*. Main menu merupakan bagian yang berfungsi untuk menampilkan data kiriman dari sensor. Terdapat tiga panel, yaitu *seismic trace* sebagai data display dari *geophone* yang berupa *adc counts*, tabel *ground motion* untuk data turunan dari *adc counts*, dan peta titik lokasi sebagai data *display* dari modul GPS. Kemudian, terdapat fitur unduh data yang dapat dilihat pada Gambar 10. Pengguna dapat mengunduh data sensor yang berupa *file* miniSEED berdasarkan ketersediaan rekaman sensor pada setiap sesi yang telah dilakukan.

### 3.5 Pengujian Sistem secara Keseluruhan

Pengujian sistem secara keseluruhan merupakan implementasi yang dilakukan pada hasil rancangan penelitian yang telah dirancang melalui serangkaian uji lapangan (*field test*) untuk mengetahui kinerja dan fungsionalitas perangkat.



**Gambar 11. Perancangan Perangkat Keras**

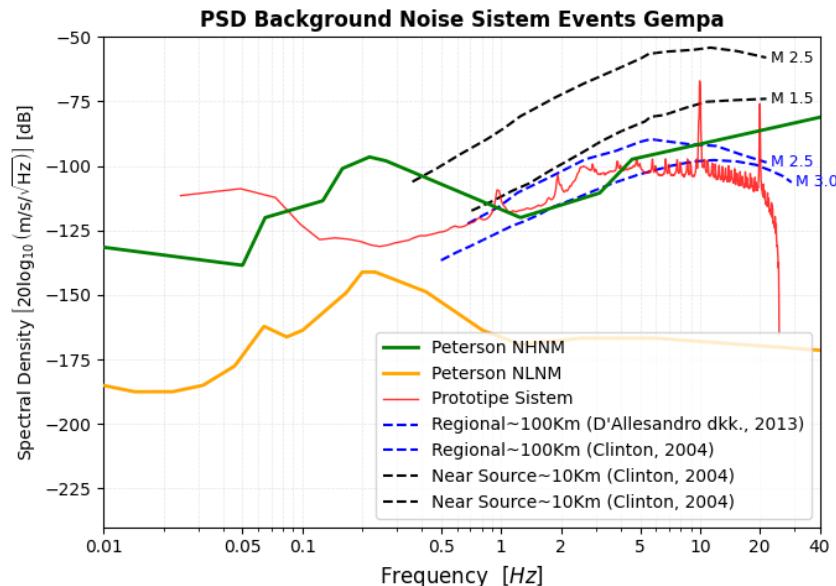
Hasil perancangan perangkat keras dapat dilihat pada Gambar 11 di atas. Sistem terdiri dari Raspberry Pi 3 Model B+, sensor *geophone* EG4.5-II, rangkaian *signal conditioning*, modul ADC ADS1256, modul GPS Ublox Neo-7M, kabel ekstensi LAN RJ45, kabel UFL-to-SMA, dan *receiver GPS*. Komponen tersebut tersusun di sebuah *enclosure* yang merupakan tempat *mounting* dan pelindung. *Enclosure* terdiri dari dua bagian, yaitu tempat *mounting* sensor *geophone* yang terbuat dari bahan filamen PLA (*3D printing*), serta tempat *mounting* komponen lain dan pelindung yang terbuat dari bahan akrilik dengan ketebalan 0.5 cm.



**Gambar 12. Dokumentasi Pengujian Lapangan pada Site InaTEWS-TNGI**

Sistem yang telah dirancang kemudian dilakukan sebuah pengujian lapangan. Pengujian tersebut dilakukan di site InaTEWS - TNGI yang berlokasi di Stasiun Geofisika kelas I Tangerang (lihat Gambar 12).

Hasil pengujian lapangan ini ditujukan untuk melihat kemampuan sistem dalam menangkap sinyal *background noise* terhadap batasan standar kebisingan global model Peterson 1993. Hasil pengujian lapangan dapat di lihat pada Gambar 13.

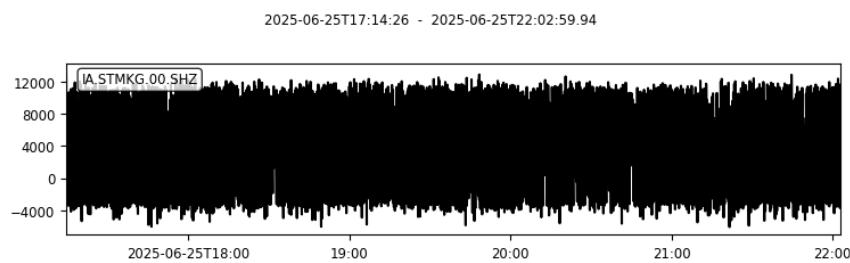


**Gambar 13. Nilai PSD Sistem pada Batasan NHMM/NLNM**

Perhitungan nilai PSD dilakukan menggunakan metode Welch terhadap data rekaman yang memiliki laju sampling sebesar 50 Hz. Berdasarkan teorema Nyquist, frekuensi maksimum yang dapat dianalisis adalah 25 Hz, sehingga terlihat grafik PSD sistem seperti mengalami pemotongan sinyal (*signal truncation*) pada frekuensi tersebut.

Hasil pengujian didapatkan bahwa sebanyak 868 dari 1024 (84,8%) titik frekuensi berada dalam rentang batasan tersebut. Nilai PSD yang melebihi batas atas (NHNM) berada pada frekuensi di bawah 0,08 Hz dan 1 – 4 Hz. Secara umum, sistem menunjukkan performa yang cukup baik dalam merekam sinyal *background noise*. Namun, terdapat pola *spike* pada frekuensi di atas 5 Hz, mengindikasikan adanya *noise* internal yang cukup tinggi. Fenomena ini kemungkinan besar disebabkan oleh konfigurasi dan *wiring* komponen pada rangkaian *signal conditioning* yang kurang optimal.

Kemudian, jika dibandingkan dengan kurva PSD *event* gempa bumi pada penelitian yang dilakukan oleh Clinton (**Clinton, 2004**) dan D'Alessandro (**D'Alessandro, dkk, 2013**) (lihat Gambar 13), nilai *noise* yang dihasilkan sistem berada di bawah kurva tersebut. Kondisi ini menunjukkan sistem mampu merekam sinyal *event* gempa bumi hingga jarak maksimum 100 km (kategori gempa regional) dengan magnitudo minimum yang dapat terdeteksi sebesar  $M_L > 3,0$  tanpa gangguan *noise* yang signifikan. Meskipun demikian, kinerja sistem lebih optimal jika digunakan untuk pengamatan gempa lokal (*near-source*) dengan jarak sekitar 10 km dari episentrum dan  $M_L > 1,5$ .



**Gambar 14. Data Pengukuran Pengujian Lapangan**

*Output* data pengukuran pada pengujian lapangan dapat diunduh melalui menu *download* pada *dashboard* pertama. Data rekaman tersebut sudah dibentuk dalam format miniSEED sehingga dapat digunakan pada *software* aplikasi pengamatan seismologi seperti PQL atau SeisGram. Hasil *output* data sensor dapat dilihat pada Gambar 14.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian rancang bangun *low-cost* seismometer berbasis *single board computer* yang telah dilaksanakan memberikan kesimpulan bahwa sistem *low-cost* seismometer berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan baik. Pengembangan *low-cost seismometer* berbasis *geophone* dengan komponen utama berupa rangkaian *signal conditioning*, modul ADC ADS1256, GPS Ublox Neo-7M, dan Raspberry Pi 3 Model B+ telah berhasil diimplementasikan sebagai solusi efektif untuk perluasan jaringan pemantauan seismik. Sistem ini mampu menampilkan data secara *realtime* melalui antarmuka berbasis *web* dengan protokol MQTT dan menyimpan data dalam format miniSEED. Sistem aplikasi *web* yang telah dibuat dapat menampilkan data seismik secara *realtime* dan titik lokasi sensor melalui tampilan map. Hasil pengujian menunjukkan sistem memiliki tingkat *background noise* sensor yang cukup baik. Analisis tingkat *background noise* pada sistem menunjukkan bahwa terdapat 84,8% titik frekuensi berada dalam batasan NHNM/NLNM. sistem mampu merekam sinyal gempa tanpa gangguan *noise* yang signifikan hingga jarak  $\pm 100$  km  $M_L > 3,0$  dan lebih optimal untuk pengamatan gempa lokal (*near-source*) pada jarak sekitar 10 km dari episentrum dengan  $M_L > 1,5$ . Penelitian ini membuka peluang pengembangan lebih lanjut, seperti optimasi penambahan komponen horizontal dan integrasi dengan sistem perhitungan magnitudo gempa.

## DAFTAR RUJUKAN

- Akbar, R. M. R., Arif, T. Y., & Irhamsyah, M. (2023). Analisis Performansi Protokol MQTT pada Sistem Pemantauan Kualitas Udara Ruangan berbasis IoT. *Jurnal Komputer, Informasi Teknologi, dan Elektro*, 8(3), 102–109.
- Belli, G., Walter, F., Mc Ardell, B., Gheri, D., & Marchetti, E. (2022). Infrasonic and Seismic Analysis of Debris-Flow Events at Illgraben (Switzerland): Relating Signal Features to Flow Parameters and to the Seismo-Acoustic Source Mechanism. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127(6).
- Clinton, J. F. (2004). *Modern Digital Seismology – Instrumentation, and Small Amplitude Studies in the Engineering World*, Doctoral Dissertation, California Institute of Technology.
- D'Alessandro, A., Badal, J., D'Anna, G., Papanastassiou, D., Baskoutas, I., & Özel, N. M. (2013). Location Performance and Detection Threshold of the Spanish National Seismic Network. *Pure and Applied Geophysics*, 170(11), 1859–1880.
- Esposito, M., Marzorati, S., Belli, A., Ladina, C., Palma, L., Calamita, C., Pantaleo, D., & Pierleoni, P. (2024). Low-cost MEMS Accelerometers for Earthquake Early Warning Systems: A Dataset Collected during Seismic Events in Central Italy. *Data in Brief*, 53, 1–15.
- Hanif, L. (2019). *Rancang Bangun Seismograf Portable menggunakan Geophone berbasis Single Board Computer*, Skripsi Sarjana Terapan, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Kafadar, O. (2020). A Geophone-based and Low-cost Data Acquisition and Analysis System Designed for Microtremor Measurements. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 9(2), 365–373.
- Kwon, Y. W., Ahn, J. K., Lee, J., & Lee, C. H. (2020). Earthquake Early Warning using Low-Cost MEMS Sensors. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, (pp. 6635–6637).
- Nguyen, T. Q., Nguyen, D. P., Nguyen, P. T., & Nguyen, T. T. (2025). Advanced Structural Damage Detection in Steel Beams using Discrete Wavelet Transform and Fast Fourier Transform. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 44(2), 800–816.
- Priyadi, I., Hadi, F., Khotimah, S., & Besperi. (2021). Modul Deteksi dan Perekaman Data Gempa berbasis Database Earthquake Intensity (DEI). *Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 9(3), 648–662.

- Santos, J., Catapang, A. N., & D. Retya, E. (2019). Understanding the Fundamentals of Earthquake Signal Sensing Networks. *Analog Dialogue*, 53(3), 1–10.
- Santoso, D. R., Maryanto, S., Nadhir, A., & Sugiharto, T. (2017). A Simple and Low-cost Data Acquisition System with Multi-nodes Facility for Geophone Array Sensors. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(10), 2109–2114.
- Schimmel, A., Coviello, V., & Comiti, F. (2022). Debris Flow Velocity and Volume Estimations based on Seismic Data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(6), 1955–1968.
- Sharma, B. P., Gupta, A., Shekhar, C., Chauhan, R., & Chamola, V. (2025). Design of Low Power Energy Efficient Sigma-delta ADC for Biomedical IoT Applications. *Scientific Reports*, 15(1).
- Trismahargyono, & Indah Pertiwi, I. (2023). Identifikasi Kualitas Site Seismik di Sulawesi Tenggara berdasarkan Analisis Spektrum Noise Seismik. *Jurnal Geosaintek*, 9(1), 62–71.
- Yusuf, M., Kardoso, R., & Tasar, Y. (2016). Evaluasi Kualitas Stasiun Seismograph berdasarkan Analisis Spektrum pada Jaringan Seismograph InaTEWS. *PPI KIM Conference 42*.