

Perancangan Sensor Terdistribusi untuk Pendeteksi Gempa Bumi Menggunakan Protokol Komunikasi MQTT

Dody Ichwana Putra¹, Faiq Genia Fauzul², Shelvi Ekariani³

dody.ichwana@it.unand.ac.id, shelviekariani@sci.unand.ac.id

^{1,2}Departemen Teknik Komputer, Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Andalas

³Departemen Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Informasi Artikel

Diterima : 15 Jun 2023

Direview : 25 Jun 2023

Disetujui : 30 Jun 2023

Kata Kunci

Sensor terdistribusi,
Sistem pendeteksi
gempa, Protokol MQTT

Abstrak

Sebagai ibu kota Provinsi Sumatera Barat, Kota Padang memiliki risiko tinggi terhadap gempa bumi dan tsunami karena letaknya di antara dua lempeng benua dan adanya Patahan Semangko. Beberapa tempat perlindungan di Padang berfungsi sebagai lokasi evakuasi dan penyelamatan saat terjadi tsunami. *Paper* ini menyajikan sebuah sistem pendeteksi gempa bumi yang menggunakan sensor terdistribusi. Identifikasi gempa bumi dilakukan dengan menghitung nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dari gelombang P dan gelombang S menggunakan sensor piezoelektrik dan akselerometer. Sistem yang diusulkan merupakan jaringan sensor node terdistribusi yang berkomunikasi menggunakan protokol MQTT. Untuk mengevaluasi kinerja sistem, kami mengimplementasikannya menggunakan Raspberry Pi, sensor piezoelektrik, akselerometer MPU-6050, dan modul Xbee untuk komunikasi data. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem ini dapat mendeteksi magnitudo dan intensitas gempa bumi dengan akurat.

Keywords

*Distributed sensor,
Earthquakes detection,
MQTT protocol*

Abstrak

As the capital of West Sumatra Province, Padang City is at high risk of earthquakes and tsunamis due to its location between two continental plates and the presence of the Semangko Fault. Several shelters in Padang serve as evacuation and rescue locations during tsunami events. This paper presents an earthquake detection system that utilizes distributed sensors. Earthquake identification is performed by calculating the Peak Ground Acceleration (PGA) values from the P-wave and S-wave using piezoelectric and accelerometer sensors. The proposed system is a distributed sensor node network that communicates using the MQTT protocol. To evaluate the system's performance, we implemented it using Raspberry Pi, piezoelectric sensors, MPU-6050 accelerometer, and Xbee module for data communication. The experimental results demonstrate that the system can accurately detect earthquake magnitudes and intensities.

A. Pendahuluan

Gempa bumi adalah fenomena alam yang dapat terjadi tanpa dapat diprediksi dan terjadi ketika terjadi pelepasan energi, pergeseran elastis, atau tumbukan antar lempeng bumi pada patahan tertentu [1]. Gempa bumi mengakibatkan getaran pada permukaan bumi yang disebabkan oleh gelombang seismik. Pendeteksian dini gempa bumi merupakan langkah penting dalam upaya mitigasi dan pengurangan risiko dampak yang ditimbulkan oleh gempa bumi [2].

Kota Padang merupakan kota terbesar yang terletak di pantai barat Pulau Sumatera dan berfungsi sebagai ibu kota Provinsi Sumatera Barat, Indonesia. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2020, populasi penduduknya mencapai 902.413 jiwa [3]. Provinsi Sumatera Barat memiliki tingkat risiko bencana gempa bumi yang tinggi karena terletak di antara dua lempeng benua besar, yaitu lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia, serta berada di sepanjang patahan Semangko [4]. Menurut data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), antara tanggal 1 Januari 2017 hingga 12 Maret 2018, terjadi sekitar 130 kejadian gempa di wilayah Sumatera Barat, baik di darat maupun di laut. Sebagian besar gempa di perairan laut terjadi di kabupaten Mentawai, yang berpotensi menyebabkan terjadinya tsunami [5].

Saat ini, Kota Padang telah melengkapi diri dengan sistem peringatan dini tsunami [6]. Operasional sistem ini melibatkan penggunaan sensor yang ditempatkan di perairan lepas pantai untuk mendeteksi adanya gelombang tsunami yang sedang mendekat. Informasi mengenai ancaman tsunami kemudian disampaikan kepada masyarakat yang tinggal di sepanjang pantai melalui sirine sebagai tanda agar segera melakukan evakuasi. Namun, kesuksesan sistem ini sangat bergantung pada pengetahuan masyarakat mengenai lokasi-lokasi evakuasi terdekat yang harus mereka tuju. Sayangnya, banyak penduduk yang tidak memiliki pemahaman yang memadai mengenai lokasi evakuasi yang tersedia, dengan mayoritas hanya mengetahui satu titik evakuasi saja. Akibatnya, proses evakuasi dapat mengalami kendala berupa kemacetan lalu lintas yang parah [6]. Selain itu, kerusakan pada sensor yang terletak di perairan lepas pantai semakin meningkat karena keterbatasan dana perawatan dari pemerintah.

Dalam beberapa tahun terakhir, protokol komunikasi MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) telah menjadi populer dalam industri *Internet of Things* (IoT) karena keunggulannya dalam efisiensi dan reliabilitas komunikasi. Penelitian untuk mendapatkan magnitudo dan intensitas gempa menggunakan *Peak Ground Acceleration* (PGA) telah dilakukan sebelumnya [7] [8] [9]. Pada penelitian ini tidak membahas perancangan sistem sensor secara terdistribusi. *Paper* ini memperkenalkan sistem sensor terdistribusi untuk pendeteksi gempa bumi menggunakan protokol komunikasi MQTT. Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang sebuah sistem yang terdiri dari sensor gempa bumi terdistribusi menggunakan *accelerometer* and *piezoelectric* sensor dan saling terhubung melalui jaringan menggunakan protokol MQTT. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi gempa bumi secara real-time, mengumpulkan data seismik, dan mengirimkan informasi dengan cepat dan akurat kepada pengguna atau sistem pemantauan.

B. Teori

1. Gelombang Gempa

Gelombang seismik terjadi saat deformasi atau perubahan struktur dalam kerak bumi. Ada dua jenis gelombang seismik, yaitu gelombang badan yang merambat di dalam bumi dan gelombang permukaan yang merambat di permukaan bumi. Gelombang badan terdiri dari gelombang *p-wave* (primer) yang merambat lebih cepat dan gelombang *s-wave* (sekunder) yang merambat lebih lambat. *P-wave* adalah gelombang kompresi dengan frekuensi di bawah 4 Hz, sedangkan *s-wave* adalah gelombang transversal [10]. *S-wave* tidak dapat merambat melalui fluida dan dapat melewati inti bumi bagian dalam.

Peak Ground Acceleration (PGA) ditentukan berdasarkan pengukuran akselerometer terhadap percepatan pada sumbu *x*, *y*, dan *z*. Gempa bumi terjadi pada bidang *x* dan *y* karena disebabkan oleh polarisasi *s-wave* horizontal. Pada bidang *x*, *y*, sumbu *z* memiliki nilai yang konstan sehingga dapat diabaikan dalam mengukur PGA suatu gempa bumi. Nilai sumbu *x* dan *y* yang diperoleh dari sensor akselerometer, dan persamaan 1 digunakan mendapatkan nilai resultan:

$$\text{Resultan} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

Nilai PGA diperoleh dari nilai tertinggi pada resultan selama peristiwa gempa bumi.

2. Penggunaan Protokol MQTT untuk Sistem Sensor Terdistribusi

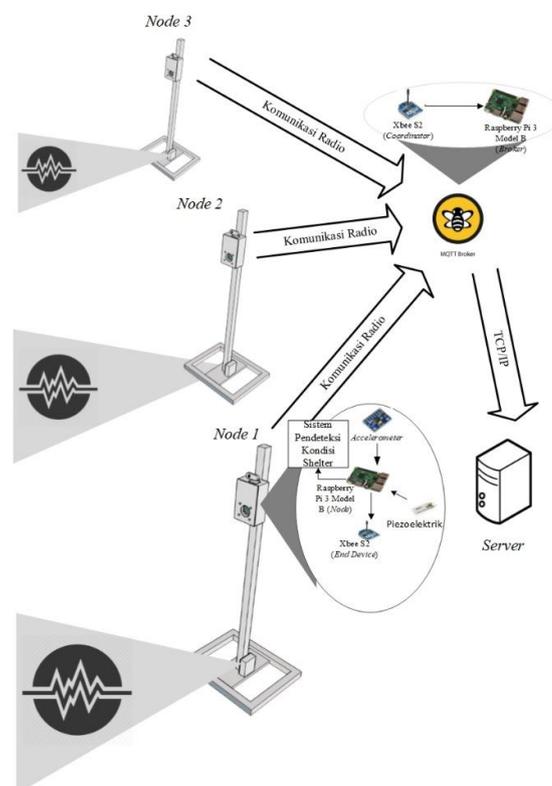
Protokol komunikasi MQTT telah populer dalam industri *Internet of Things* (IoT) akhir-akhir ini. Keunggulannya adalah efisiensi dan reliabilitas komunikasi, menjadikannya solusi yang cocok untuk aplikasi yang membutuhkan pertukaran data cepat dan andal. Dalam konteks deteksi gempa bumi, penggunaan MQTT dalam jaringan wireless memungkinkan pengiriman data seismik secara efisien dan real-time antara sensor-sensor yang terdistribusi [11]. MQTT berperan sebagai protokol komunikasi dalam sistem sensor terdistribusi untuk pengiriman data seismik antar node sensor. Penggunaan MQTT mengoptimalkan penggunaan *bandwidth* dan daya baterai pada node sensor dengan *overhead* komunikasi yang rendah. Dengan metode *publish-subscribe*, data gempa bumi dapat dikirimkan kepada pihak yang membutuhkannya, meminimalkan beban jaringan dan memungkinkan respons yang cepat terhadap gempa bumi [12]. Reliabilitas komunikasi yang tinggi pada MQTT memastikan pengiriman data gempa bumi yang cepat dan akurat, mendukung identifikasi dan analisis gempa bumi secara *real-time*, dan berperan penting dalam mitigasi risiko dan perlindungan terhadap dampak gempa bumi.

C. Metodologi

1. Arsitektur Sistem

Sistem pendeteksi gempa bumi terdiri dari beberapa sensor yang berfungsi sebagai node yang terdistribusi di setiap shelter evakuasi. Node-node tersebut saling berkomunikasi menggunakan teknologi wireless dengan menggunakan protokol MQTT. Setiap node terdiri dari sensor piezoelektrik, akselerometer untuk mendeteksi getaran, dan raspberry-pi sebagai pengolah data sensor. Modul Xbee digunakan untuk komunikasi wireless antar node. Arsitektur sistem pendeteksi gempa bumi dapat dilihat pada Gambar 1.

Dalam rancangan sistem ini, sensor piezoelektrik digunakan untuk membaca getaran yang datang. Sinyal analog keluaran dari sensor tersebut kemudian diperkuat dan diubah menjadi sinyal digital sebelum dikirimkan ke mikrokontroler. Mikrokontroler akan mencari frekuensi gelombang dan jika frekuensinya kurang dari 4 Hz, sensor Accelerometer akan diaktifkan untuk membaca getaran *s-wave*. Hasil bacaan tersebut akan dikirimkan ke mikrokontroler untuk menghitung nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dari *s-wave* dan melanjutkan proses perhitungan intensitas dan magnitudo gempa bumi.

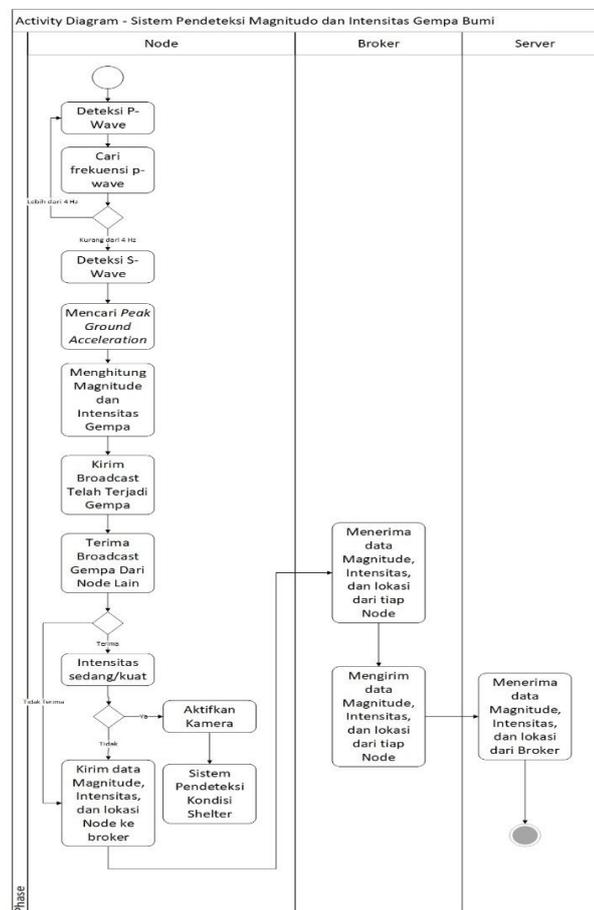


Gambar 1. Arsitektur Sistem Sensor Terdistribusi

Jika intensitas gempa mencapai skala sedang atau lebih, kamera akan diaktifkan dan sistem akan melanjutkan ke sub-sistem Penentuan Kondisi Shelter Pasca Gempa Bumi [12]. Node akan melakukan *broadcast* menggunakan Xbee untuk menginformasikan adanya gempa, dan jika menerima *broadcast* dari node lain, dapat disimpulkan bahwa terjadi gempa. Setelah kondisi shelter teridentifikasi, data lokasi, magnitudo, intensitas, dan kondisi shelter akan dikirimkan ke koordinator/broker melalui Xbee. Broker akan mengirimkan data dari setiap node ke server sebagai *subscriber*.

2. Proses Deteksi Gempa Bumi

Berdasarkan diagram aktivitas pada Gambar 2, sistem pendeteksi gempa beroperasi melalui langkah-langkah berikut. Pertama, node membaca *P-wave* sebagai langkah awal. Jika *p-wave* terdeteksi dengan frekuensi di bawah 4 Hz, proses dilanjutkan. Jika tidak, node akan melakukan pembacaan ulang *p-wave*. Selanjutnya, node mendeteksi *s-wave* dan mikrokontroler menghitung nilai PGA, serta menghitung intensitas dan magnitudo gempa. Node kemudian melakukan siaran tentang keberadaan gempa dan memeriksa apakah ada siaran serupa dari node lain. Jika tidak ada, data segera dikirimkan ke server. Namun, jika node menerima siaran serupa, proses berlanjut. Jika intensitas gempa rendah, node mengirimkan data intensitas dan magnitudo gempa ke broker. Namun, jika intensitas gempa berada pada skala sedang atau lebih tinggi, sistem beralih ke sub-Penentuan Kondisi Shelter Pasca Gempa Bumi. Broker menerima data dari setiap node dan meneruskannya ke server.

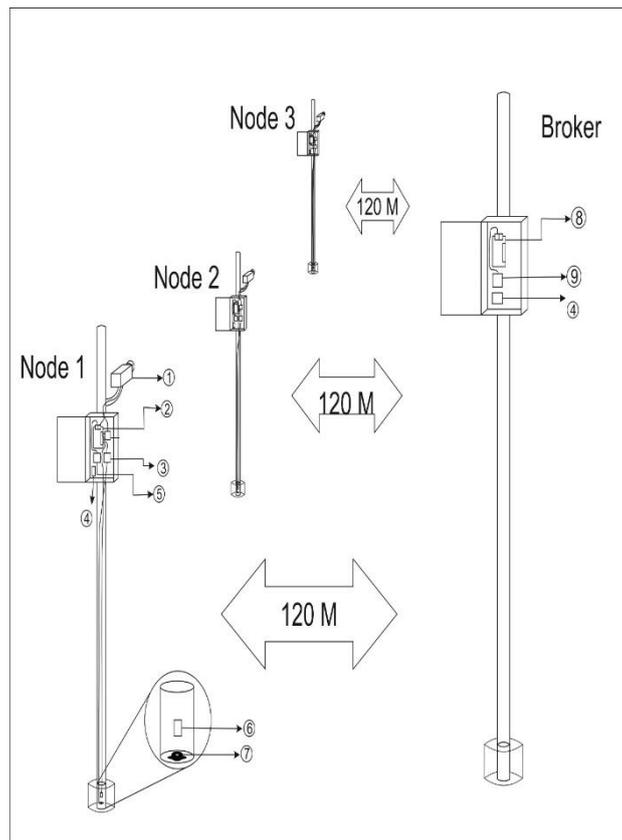


Gambar 2. Diagram Aktivitas

3. Rancangan Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Sistem sensor terdistribusi pendeteksi gempa ini dirancang dengan perangkat keras berupa, webcam untuk mengambil gambar shelter, raspberry PI

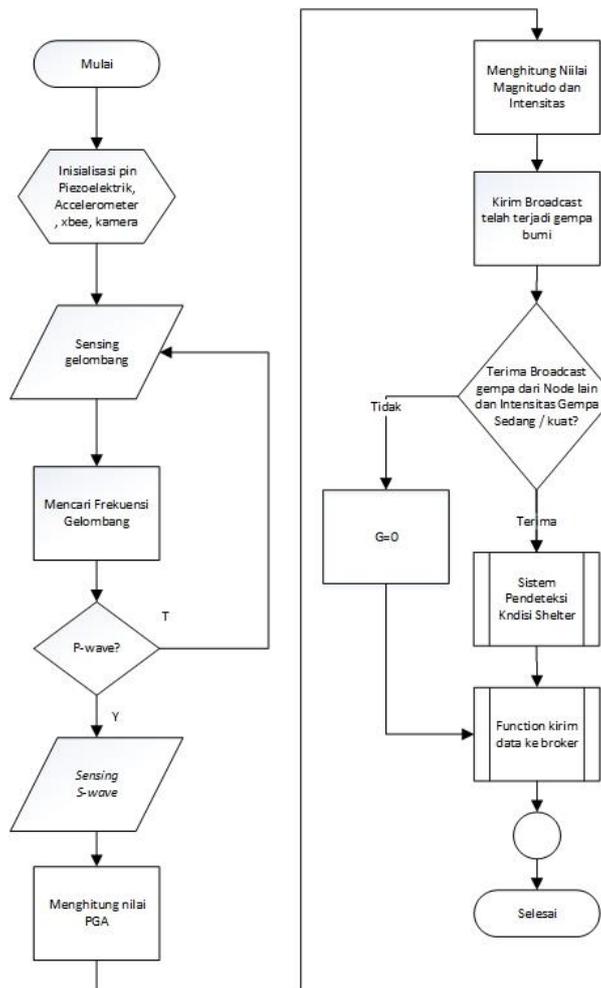
sebagai pengontrol sistem, modul pizelektrik untuk menguatkan dan mengubah sinyal A/D, baterai sebagai sumber daya, Xbee untuk pengiriman data melalui radio, akselerometer untuk mendeteksi getaran, dan koordinator/broker untuk menerima dan mengirim data antara node dan server. *Xbee Coordinator* bertugas mengumpulkan data dari seluruh node. Dengan perangkat keras ini, sistem pendeteksi gempa dapat beroperasi dengan efektif dalam mengumpulkan dan memonitor data gempa. Gambar 3 memperlihatkan rancangan sistem pendeteksi gempa bumi .



Gambar 3. Rancangan perangkat keras

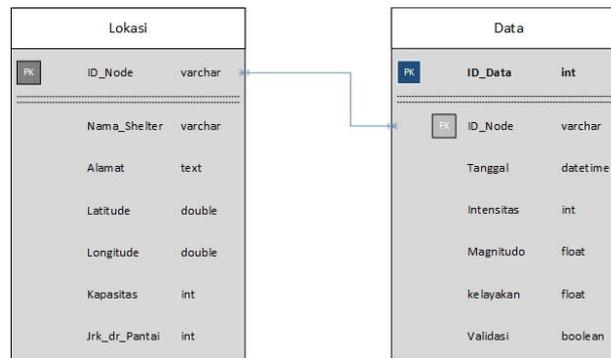
Perancangan perangkat lunak menggunakan script python dan berfungsi sebagai alur program pada sistem. Pada awal program, dilakukan inialisasi sistem dan variabel yang digunakan. Perancangan perangkat lunak pada mikrokontroler menjelaskan deteksi gempa, penghidupan kamera, dan pengiriman data ke broker. Diagram Alir (Gambar 4) menggambarkan penggunaan sensor dan aktuator yang dikendalikan oleh mikrokontroler. Pembacaan getaran dilakukan oleh sensor piezoelektrik, dan jika terdeteksi *p-wave*, sensor akselerometer akan diaktifkan untuk membaca *s-wave*. Mikrokontroler menghitung akselerasi maksimum dari *s-wave*, dan kemudian menghitung magnitudo dan intensitas berdasarkan data akselerasi tersebut. Sistem mengirimkan *broadcast* "terjadi gempa bumi" ke node lain, dan jika tidak ada tanggapan, data magnitudo dan intensitas langsung dikirim ke broker sebagai bukan data gempa. Namun, jika ada tanggapan, proses akan melanjutkan ke tahap selanjutnya. Jika intensitas gempa lemah, mikrokontroler mengirimkan data magnitudo dan intensitas ke broker. Namun, jika intensitas

gempa sedang atau kuat, mikrokontroler mengaktifkan kamera, mengambil kondisi shelter, dan mengirimkan data magnitudo, intensitas, dan kondisi shelter ke broker.



Gambar 4. Flowchart sistem

Dalam sistem ini, database berperan penting untuk menyimpan data yang diperlukan oleh server dan untuk keperluan pelaporan gempa bumi. Perancangan database dilakukan menggunakan diagram ER. Dapat dilihat pada Gambar 5, sistem pendeteksi magnitudo dan intensitas gempa bumi ini menggunakan satu database dengan dua tabel, yaitu Tabel Lokasi yang menyimpan informasi terkait lokasi setiap Node, dan Tabel Data yang menyimpan informasi data dari setiap Node.



Gambar 5. Rancangan database

D. Hasil dan Pembahasan

1. Implementasi Sistem

Implementasi sistem deteksi gempa dapat dilihat dalam Gambar 6. Sistem ini menggunakan beberapa perangkat keras, seperti piezoelektrik, akselerometer, Xbee, dan raspberry-pi. Terdapat dua jenis input yang digunakan, yaitu piezoelektrik dan akselerometer. Input piezoelektrik berfungsi untuk mendeteksi *P-wave* gempa dengan frekuensi di bawah 4 Hz. Input ini terhubung ke raspberry-pi melalui modul komunikasi untuk mempermudah interaksi antara mikrokontroler dan sensor. Selain itu, akselerometer digunakan untuk mendeteksi percepatan yang dihasilkan oleh *S-wave* gempa.

Implementasi sistem ini menggunakan data percepatan terbesar dari accelerometer yang disebut PGA (*Peak Ground Acceleration*) untuk menentukan magnitudo dan intensitas gempa bumi. Selain itu, komunikasi Xbee digunakan untuk mengirimkan data antara node-node dan ke broker melalui frekuensi radio yang terhubung ke raspberry-pi melalui adapter Xbee menggunakan kabel USB untuk memudahkan penggunaan modul Xbee. Gambar 6 memperlihatkan implementasi perangkat keras sensor.



Gambar 6. Implementasi perangkat keras

Perangkat lunak pada sistem ini terdiri dari tiga komponen utama. Pertama, perangkat lunak pada setiap node, bertugas mengolah data masukan dari sensor piezoelektrik dan akselerometer untuk mendapatkan informasi magnitudo dan

intensitas gempa. Selanjutnya node akan mengaktifkan sistem pendeteksian kondisi shelter. Selain itu, perangkat lunak ini juga bertanggung jawab dalam mengirimkan sinyal gempa ke node lain dan menerima sinyal gempa dari node lain. Fungsi tambahan dari perangkat lunak ini adalah mengirimkan data ke broker. Kedua, perangkat lunak yang terpasang pada broker. Perangkat lunak ini berperan dalam menerima data dari node (*publisher*) dan meneruskannya ke server (*subscriber*) menggunakan protokol MQTT. Ketiga, terdapat program yang terpasang pada server. Perangkat lunak ini digunakan untuk melakukan proses subscribing, yaitu meminta dan mengambil data dari broker.

Server berfungsi untuk melakukan langganan data dari broker dan memasukkannya ke dalam database. Proses langganan data dilakukan dengan mengakses IP/Domain dan port yang digunakan oleh broker. Setelah terhubung dengan broker, subscriber akan meminta data berdasarkan topik kepada broker. Selanjutnya, server akan memecah paket data yang diterima dari broker berdasarkan fungsi data tersebut, karena data yang diperoleh masih berbentuk paket. Setelah paket data dipisahkan berdasarkan fungsinya, data akan segera dimasukkan ke dalam database.

Data pada server ditampilkan melalui sebuah situs web, seperti yang terlihat pada Gambar 7. Informasi yang ditampilkan di situs web tersebut meliputi: ID data yang berdasarkan urutan masuk dari node data, tanggal yang mencatat waktu saat data dari node masuk ke server, nama dan alamat shelter, intensitas dan magnitudo gempa, serta kelayakan. Jika status kelayakan ditandai dengan warna merah, maka shelter dianggap sangat tidak layak. Jika status kelayakan ditandai dengan warna hijau, maka shelter dianggap sangat layak. Selain itu, terdapat juga status gempa, di mana status gempa akan ditampilkan sebagai merah jika sinyal yang terdeteksi adalah gempa, dan akan ditampilkan sebagai putih jika sinyal yang terdeteksi bukan gempa.

ID Data	Tanggal	Nama Shelter	Alamat	Intensitas	Magnitudo	Kelayakan	Status Data
55	2018-09-07 18:22:27.871590	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	9	tidak layak sekali	gempa
56	2018-09-07 19:29:29.861545	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	9	tidak layak sekali	gempa
57	2018-09-07 19:31:44.454940	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	9	tidak layak sekali	gempa
58	2018-09-07 19:33:58.807859	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	9	tidak layak sekali	gempa
59	2018-09-07 19:36:13.484483	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	9	tidak layak sekali	gempa
60	2018-09-07 19:38:28.070750	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	9	tidak layak sekali	gempa
61	2018-09-07 19:40:42.873780	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	9	tidak layak sekali	gempa
62	2018-09-07 19:42:57.218122	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	9	tidak layak sekali	gempa
63	2018-09-07 19:45:11.656666	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	9	tidak layak sekali	gempa
64	2018-09-07 19:47:27.006164	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	9	tidak layak sekali	gempa
65	2018-10-04 16:12:11.113934	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	10	tidak layak sekali	Bukan Gempa
66	2018-10-04 16:12:35.560163	Masjid Prov. Sumbar	Jl. Khatib Sulaiman	5	10	tidak layak sekali	gempa
67	2018-10-04 16:12:35.041982	Masjid Raya Sumbar	Jl. Khatib Sulaiman	5	10	tidak layak sekali	gempa
68	2018-10-04 16:16:36.502407	Masjid Prov. Sumbar	Jl. Khatib Sulaiman	5	10	tidak layak sekali	gempa
69	2018-10-04 16:16:37.534720	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	10	tidak layak sekali	gempa
70	2018-10-04 16:18:38.809581	Masjid Prov. Sumbar	Jl. Khatib Sulaiman	2	5	tidak layak sekali	gempa
71	2018-10-04 16:21:37.718454	Masjid Prov. Sumbar	Jl. Khatib Sulaiman	2	5	tidak layak sekali	gempa
72	2018-10-04 16:25:14.328098	Masjid Prov. Sumbar	Jl. Khatib Sulaiman	2	5	tidak layak sekali	Bukan Gempa
73	2018-10-04 16:29:00.482634	Masjid Prov. Sumbar	Jl. Khatib Sulaiman	2	5	tidak layak sekali	Bukan Gempa
74	2018-10-04 16:40:57.210300	Masjid Prov. Sumbar	Jl. Khatib Sulaiman	2	5	tidak layak sekali	Bukan Gempa
75	2018-10-04 16:43:42.699539	Masjid Prov. Sumbar	Jl. Khatib Sulaiman	2	5	tidak layak sekali	Bukan Gempa
76	2018-10-04 16:46:13.984523	Masjid Prov. Sumbar	Jl. Khatib Sulaiman	5	10	tidak layak sekali	gempa
77	2018-10-04 16:48:33.875284	Masjid Prov. Sumbar	Jl. Khatib Sulaiman	2	5	tidak layak sekali	Bukan Gempa
78	2018-10-04 16:50:52.896165	Kantor Gubernur	Jl. Jend. Sudirman No. 51, Padang Barat	5	9	tidak layak sekali	gempa

Gambar 7. Tampilan web status node

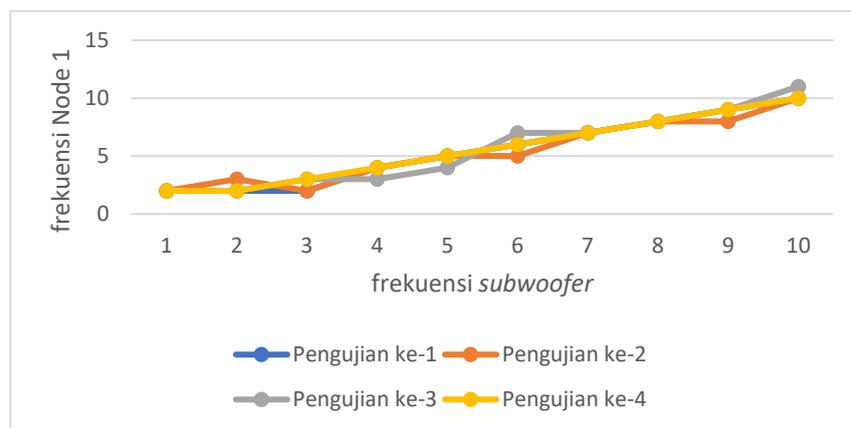
2. Pengujian Sistem

Pengujian P-wave dan S-wave

Pengujian dilakukan untuk mendeteksi *p-wave* pada setiap node. Pengujian ini dilakukan sebanyak empat kali menggunakan *subwoofer* untuk mengirimkan

sinyal frekuensi di bawah 10 Hz. *Subwoofer* merupakan perangkat audio yang menghasilkan suara dengan frekuensi rendah. Sinyal tersebut kemudian dideteksi oleh sensor piezoelektrik dan diproses oleh mikrokontroler untuk memperoleh frekuensi sinyal. Hasil pengujian deteksi *p-wave* pada node 1 terlihat pada grafik di Gambar 8.

Selanjutnya, untuk menguji deteksi *s-wave* pada setiap node, dilakukan evaluasi terhadap akurasi pembacaan PGA. Pengujian ini melibatkan penggetaran akselerometer pada setiap node secara simultan dengan menggunakan percepatan yang sama. Hasil evaluasi deteksi *s-wave* pada node 1 dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 8. Pengujian untuk pendeteksian *P-wave* pada node 1

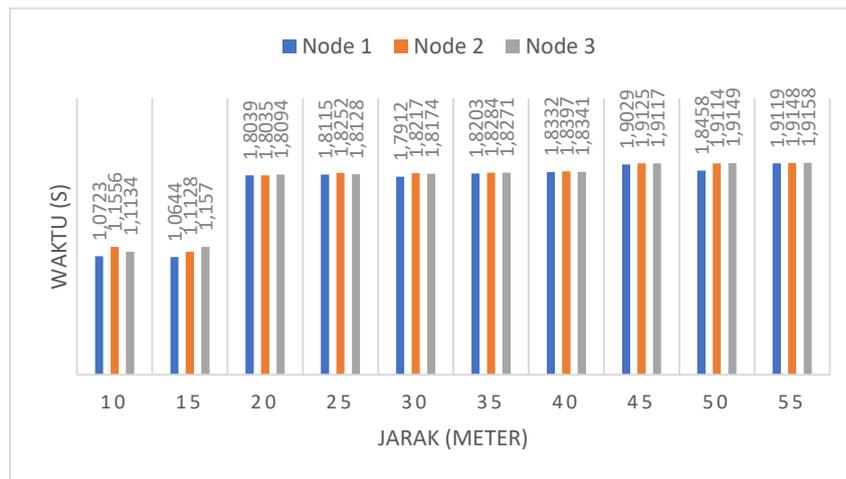
Tabel 2. Evaluasi deteksi gelombang S dan perhitungan magnitudo serta intensitas gempa.

PGA referensi	Node 1			
	PGA	Magnitudo	Intensitas	Error PGA (%)
1.23	1.79	6	4	44.44372
2.05	2.36	7	4	14.69156
2.46	2.13	7	4	13.75882
4.35	4.49	8	4	3.061922
5.62	5.66	8	5	0.670954
6.77	6.59	9	5	2.687554
7.00	7.44	9	5	6.145003
10.40	9.95	9	5	4.335767
12.08	11.62	9	5	3.826168
13.73	13.43	10	5	2.19724
Error rata-rata				9.68
Standar deviasi Error				13.46

Berdasarkan hasil pengujian, rata-rata kesalahan pembacaan *p-wave* pada node 1 adalah 15.4%. Sedangkan, untuk pengujian *S-wave*, kesalahan rata-rata pembacaan PGA pada node 1 adalah 9,68% dengan standar deviasi 13,46%.

Pengujian Waktu Komunikasi antar Node

Pengujian waktu komunikasi antar-node dilakukan untuk menentukan waktu yang diperlukan oleh setiap node dalam mengirimkan informasi gempa ke node lainnya. Pengujian ini melibatkan pengukuran waktu yang dibutuhkan oleh node untuk mengirimkan *broadcast* gempa hingga menerima siaran gempa dari node lainnya. Setiap node menjalani pengujian dengan jarak transmisi yang berbeda-beda. Gambar 9 memperlihatkan waktu komunikasi dari sensor node yang terdistribusi.



Gambar 9. Waktu komunikasi antar node

Dari hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa jarak dapat mempengaruhi waktu transmisi antara node untuk mengirimkan informasi bahwa terjadi gempa. Semakin jauh jarak antara node, semakin lama waktu transmisi data. Rata-rata waktu yang dibutuhkan oleh node 1 dari deteksi gempa hingga data tiba di server adalah 135,251 detik dengan deviasi standar 0,362 detik. Rata-rata waktu yang dibutuhkan oleh node 2 dari deteksi gempa hingga data tiba di server adalah 135,293 detik dengan deviasi standar 0,634 detik. Sedangkan, rata-rata waktu yang dibutuhkan oleh node 3 dari deteksi gempa hingga data tiba di server adalah 135,797 detik dengan deviasi standar 0,634 detik. Kesimpulan dari pemeriksaan waktu dari terjadinya gempa hingga data tiba di server adalah bahwa waktu transmisi data dipengaruhi oleh noise saat transmisi data dari node ke broker, serta oleh koneksi Internet saat transmisi data dari broker ke server.

E. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, penggunaan sensor piezoelektrik untuk mendeteksi *p-wave* menunjukkan kinerja yang baik dengan tingkat kesalahan rata-rata sebesar 9,86%. Penggunaan akselerometer untuk mendeteksi *s-wave* juga menghasilkan hasil yang baik dengan tingkat kesalahan rata-rata sebesar 11,72%. Waktu rata-rata yang dibutuhkan oleh sistem untuk mengirimkan data gempa yang terdeteksi ke server adalah 135,25 detik. Sistem ini berhasil mengaktifkan aplikasi sub-sistem penemuan tempat perlindungan tsunami setelah terjadinya gempa.

Untuk pengembangan sistem di masa depan, disarankan untuk menambahkan sensor getar yang lebih sensitif seperti *geophone* untuk mendeteksi *p-wave*. Selain itu, penambahan alat komunikasi data antar node yang memiliki jangkauan lebih luas daripada Xbee akan menjadi tambahan yang bermanfaat.

Reference

- [1] "BMKG Indonesia," Badan Meteorologi dan Geofisika, [Online]. Available: http://inatews2.bmkg.go.id/new/tentang_eq.php. [Accessed 14 June 2023].
- [2] D. Ichwana Putra and J. Tutun , "Implementation of Mobile Data Collection System for Disaster Rapid Emergency Response System Using Open Data Kit," in *International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*, Bandung - Padang, 2018.
- [3] "Badan Pusat Statiska Kota Padang," BPS Kota Padang, [Online]. Available: <https://padangkota.bps.go.id/indicator/161/350/1/jumlah-penduduk.html>. [Accessed 14 June 2023].
- [4] A. Edward, "BAHAYA GEMPA BUMI ZONA PATAHAN SUMATERA," im Pusdalops PB BPBD Prov. Sumatera Barat, Padang, 2015.
- [5] "Badan Penanggulangan Bencana Daerah," BPBD Kota Padang, [Online]. Available: <https://bpbd.padang.go.id/konten/mengenang-gempa-2009-di-kota-padang>. [Accessed 14 June 2023].
- [6] "Peringatan Dini Tsunami Kota Padang," *Republika*, 23 April 2023. [Online]. Available: <https://news.republika.co.id/berita/rtnaoc383/peringatan-dini-tsunami-dicabut-warga-padang-kembali-pulang-ke-rumah>. [Accessed 14 June 2023].
- [7] M. Said, A. Siraj Ramadhan and A. Kusmiran, "ANALISIS KECOCOKAN NILAI PGA METODE DONOVAN TERHADAP DATA ACCELEROGRAPH (STUDI KASUS GEMPA MAMUJU, 14 JANUARI 2021)," *Journal Online of Physic*, vol. 8, no. 2, pp. 29-36, 2023.
- [8] E. Ariani, "ANALISIS NILAI PGA (PEAK GROUND ACCELERATION) MENGGUNAKAN METODE GUTTENBERG DAN RICHTER DI KABUPATEN PANDEGLANG (STUDI KASUS GEMPA BANTEN TAHUN 2008-2018)," *Delta Journal of Physics*, vol. 1, no. 1, pp. 123-130, 2023.
- [9] T. Hariyanto and F. Biorsita, "189 PERHITUNGAN INTENSITAS GEMPA BUMI BERDASARKAN NILAI PGA (PEAK GROUND ACCELERATION) MENGGUNAKAN DATA GEMPA BUMI MULTI-EVENT (STUDI KASUS: KABUPATEN PANDEGLANG, BANTEN)," *Journal of Geodesi and Geomatics*, vol. 15, no. 2, pp. 185-195, 2020.
- [10] I. Retno Palupi and W. Raharjo, "Studi Automatic Picking Waktu Tiba Gelombang P dan S dengan Menggunakan Spektogram pada Obspy Python," *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika* , vol. 8, pp. 77-83, 2020.
- [11] D. Ichwana Putra, F. Genia Fauzul, S. Ekariani and S. Lioni, "Distributed sensor for earthquake identification system to activate tsunami shelter finding system," in *International Conference on Disaster Mitigation and Management (ICDMM 2021)*, Padang, 2021.

- [12] D. Ichwana Putra, S. Setianto and S. Ekariani, "Sistem Penilai Kelayakan Bangunan Bertingkat sebagai Shelter Tsunami Berdasarkan Metode Cross-Correlation Template Matching dan Fuzzy Logic Menggunakan MQTT," *Jurnal Nasional Teknologi Informasi (Teknosi)*, vol. 8, no. 3, 2022.
- [13] D. Ichwana Putra and T. Juhana, "Implementation of Mobile Data Collection System for Disaster Rapid Emergency Response System Using Open Data KIT," in *International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*, Bandung, 2018.