

RANCANG BANGUN ALAT DETEKSI GELOMBANG SEISMIK. STUDI KASUS GELOMBANG RAYLEIGH

Hilmi Dzaki Setiawan¹, Sotyohadi², Bima Romadhon Parada Dian Palevi³

Teknik Elektro S1, ITN Malang, Malang Indonesia

hilmi.dzaki86@gmail.com¹, sotyohadi@lecturer.itn.ac.id², bimarped@lecturer.itn.ac.id³

Abstrak— Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sebuah alat deteksi gelombang seismik dengan fokus pada identifikasi gelombang Rayleigh, salah satu jenis gelombang permukaan yang umum terjadi saat gempa bumi. Sistem ini menggunakan sensor IMU (Inertial Measurement Unit) 9 DOF yang terdiri dari akselerometer, gyroscope, dan magnetometer untuk mendeteksi percepatan, kecepatan sudut, dan orientasi dalam tiga sumbu (x, y, z). Pada penelitian ini berfokus pada gelombang Rayleigh, yang dimana sumbu yang diambil hanya dua (x dan z). Pengujian dilakukan dengan memberikan getaran buatan melalui media tong tanah pada kedalaman ± 10 cm. Hasil pengukuran menunjukkan nilai percepatan sebesar $-0,000488$ g pada sumbu X dan $+0,000976$ g pada sumbu Z, sesuai kategori gempa kecil. Pola getaran yang terekam membentuk lintasan elips retrograde, konsisten dengan teori gelombang Rayleigh. Perhitungan error relatif menggunakan metode RMSE menunjukkan tingkat kesalahan rata-rata sebesar $\pm 3,5\%$, yang menandakan bahwa sensor memiliki sensitivitas cukup baik untuk mendeteksi getaran berskala kecil.

Kata Kunci: Gempa bumi, sensor IMU 9-DOF, Gelombang Rayleigh

I. PENDAHULUAN

Indonesia, sebagai salah satu negara yang terletak di kawasan Cincin Api Pasifik, sering mengalami aktivitas seismik yang tinggi. Gempa bumi merupakan berguncangnya bumi yang disebabkan oleh tumbukan antar lempeng bumi, patahan aktif, aktifitas gunung api dan runtuhnya batuan[1]. Sedangkan menurut Primus Supriyono, merupakan suatu fenomena dimana bumi bergetar akibat adanya pelepasan energi yang tidak terduga dari dalam tanah[2]. Salah satu upaya mitigasi gempa bumi adalah melalui analisis bahaya gempa. Tahapan penting dalam analisis ini mencakup investigasi bawah permukaan untuk memahami karakteristik dinamis tanah. Salah satu metode untuk menentukan karakteristik dinamis ini adalah dengan memperkirakan nilai kecepatan gelombang geser[3].

Pada penelitian ini akan menggunakan gempa bumi dengan menghasilkan gelombang Rayleigh. Gelombang Rayleigh adalah jenis gelombang permukaan yang terjadi akibat adanya interferensi antara gelombang tekan dengan gelombang geser secara konstruktif. Gerakan partikel pada wavefront

gelombang Rayleigh terdiri dari kombinasi gelombang P dan S pada bidang vertikal dengan pola gerakan partikel secara ellipse retrograde. Gelombang Rayleigh merupakan salah satu jenis gelombang permukaan yang merambat pada medium tak berlapis [4]. Gempa tidak dapat dilakukan dengan real time. Selain itu, seismograf analog menghasilkan seismogram berbentuk kertas memerlukan perlakuan khusus dalam penyimpanannya. Saat ini sudah hadir seismograf digital yang analisa datanya dapat dilakukan secara lebih cepat dan mudah. Namun harga seismograf masih relatif tinggi. Sehingga pada penelitian ini menggunakan alat yang lebih modern serta menggunakan sistem embedded dengan mikrokontroler atau prosesor digital yang memungkinkan pemrosesan data dan akan menampilkan gelombang secara digital menggunakan delphi secara real time[5].

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Tinjauan Dari Sistem Yang Ada

Penelitian terdahulu telah banyak mengembangkan alat ukur seismik berbasis Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan teknologi Inertial Measurement Unit (IMU). Salah satu pendekatan yang digunakan adalah pemanfaatan sensor IMU, yang terdiri dari akselerometer dan giroskop, untuk mengukur getaran dan pergerakan tanah akibat aktivitas seismik secara real-time. Data yang diperoleh dari sensor ini kemudian dikirim melalui modul komunikasi nirkabel ke server IoT untuk pemantauan jarak jauh. Selain itu, beberapa studi telah meneliti efektivitas accelerometer dalam mendeteksi amplitudo getaran gempa bumi, yang memungkinkan sistem untuk mengonversi data sensor ke sinyal digital dan melakukan analisis guna memberikan peringatan dini. Implementasi teknologi ini menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan akurasi serta efisiensi pemantauan aktivitas seismik, yang pada akhirnya dapat membantu dalam mitigasi risiko gempa bumi dan perlindungan infrastruktur [6].

Dalam penelitian terdahulu oleh Andika Putra pada Tahun 2022 tentang Sistem Peringatan Dini Bencana alam tanah longsor berbasis Internet of things menggunakan

sensor MPU60506 axis. Pada alat tersebut masih mempunyai kekurangan dimana axis yang digunakan untuk mendeteksi pergeseran tanah masih menggunakan 3 Accelerometer dan 3 Gyro. Sehingga pada penelitian ini menggunakan MPU 9250 yang mempunyai 3 Accelerometer, 3 Gyro, dan 3 Magnetometer [7].

Sedangkan pada penelitian lainnya yang turut serta memanfaatkan komunikasi IoT, yang menggunakan pengiriman data dari ESP32, lalu dikirim melalui WiFi yang belum bisa mengirim data jarak jauh[8]. Sehingga, pada penelitian ini menggunakan tambahan alat mikrotik sebagai komunikasi dan pengiriman data, supaya untuk jarak pengiriman data bisa lebih jauh.

Berdasar dari uraian diatas mempertimbangkan hal tersebut, maka dari itu dapat dikembangkan dengan Sensor yang lebih bagus menggunakan IMU 9 Dof dan pengiriman data pergeseran tanah secara realtime menggunakan aplikasi delphi 7. Alat ini bekerja dengan cara memonitoring pergerakan tanah dengan memanfaatkan 6 axis dari sensor Imu yaitu 3-axis gyroscope dan 3-axis accelerometer. Data axis ini yang nantinya akan di proses oleh ESP 32, ditampilkan pada aplikasi delphi 7 berupa data grafik dari pergeseran atau pergerakan tanah.

B. Seismik

Pada penelitian ini berfokus pada gempa bumi yang lebih merujuk pada pendekatan karakteristik Gelombang rayleigh. Seismik adalah gelombang yang dapat merambat melalui bumi sebagai akibat dari adanya gempa bumi. Pada perambatan ini bergantung dari elastisitas batuan, jenis dari gelombang seismik ada dua yaitu [9].

1)Gelombang Primer

Pada gambar 1.(a) menjelaskan gelombang primer atau gelombang kompresi merupakan gelombang badan (body wave), gelombang ini mempunyai kecepatan paling tinggi dari pada gelombang S. Gelombang ini bergerak secara longitudinal yang merambat bolak-balik dengan arah rambatannya. Karena mempunyai kecepatan tinggi gelombang ini mempunyai waktu yang lebih cepat dari pada gelombang S [10].

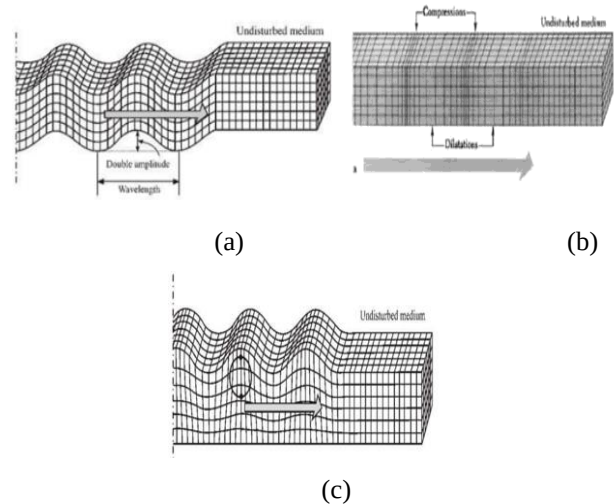
2)Gelombang Sekunder

Pada gambar 1.(b) menjelaskan gelombang sekunder biasanya disebut dengan gelombang S (Secendory Wave), merupakan jenis gelombang body yang dihasilkan oleh aktivitas seismik. Gelombang ini lebih lambat dari pada gelombang primer, sehingga pencatat alat gempa aka nada sedikit keterlambatan dari pada gelombang primer. Gelombang S pergerakannya bersifat transversal, yang artinya arah gerakannya tegak lurus terhadap arah gelombangnya, Kejadian ini akan mengakibatkan Gerakan tanah akan terasa seperti kanan-kiri atau naik-turun.

3) Gelombang rayleigh

Pada gambar 1.(c) menjelaskan rayleigh adalah gelombang yang arah Gerakan partikel mediannya merupakan gerakanya yang disebabkan oleh gerakan gabungan dari gelombang primer dan gelombang sekunder,

yang mempunyai lintas gerak berbentuk menyerupai elips[11]. Gelombang Rayleigh mempunyai efek yang sangat merusak di karenakan terkonsentrasi di permukaan bumi. Gerakan pada gelombang rayleigh adalah horizontal dan vertical atau arah gelombangnya maji-mundur, atas bawah, dan ada sedikit arah gerakannya kanan-kiri. Gelombang dapat merambat di benda padat, dan cair.



Gambar 1. (a) Gelombang Primer, (b) Gelombang Sekunder, (c) Gelombang Rayleigh

B. Magnitudo

Magnitudo merupakan parameter untuk mengukur energi yang dikeluarkan selam gempa bumi terjadi[12]. Jika semakin besar magnitudo, maka akan semakin besar pula energi atau kerusakan yang ditimbulkan. Sejak 2008, BMKG sudah mengganti skala richter dengan skala magnitudo, karena magnitudo memiliki keakuratan yang tinggi dibandingkan dengan skala richter. Dibawah ini adalah perhitungan Skala Magnitudo untuk mengubah nilai pada sumbu x, y, dan z pada sensor IMU 9DOF menjadi besaran magnitudo dapat menggunakan suatu rumus (1)

$$M = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1)$$

Keterangan :

M = Magnitudo

x = getaran pada sumbu x (m/s²)

y = getaran pada sumbu y (m/s²)

z = getaran pada sumbu z (m/s²)

Tabel 1. Kondisi Gempa Bumi

Magnitudo	Intensitas	Status
2,5	Meskipun tidak terasa, seismograf dapat merekamnya.	Kecil
2,5 – 5,4	Ada dan sering dirasakan, tetapi menyebabkan sedikit kerusakan	Kecil
5,5 – 6,0	Dapat menyebabkan kerusakan ringan pada beberapa bangunan dan struktur lainnya.	Ringan
6,1 – 6,9	Ada kemungkinan menyebabkan kerusakan kecil pada bangunan dan struktur lainnya.	Sedang
7,0 – 7,9	Terjadi gempa bumi besar yang menyebabkan banyak kerusakan.	Kuat
8,0 atau lebih besar	Gempa bumi hebat dapat menghancurkan kota-kota di dekat pusat gempa.	Besar

Pada gambar 1. Skala magnitudo gempa bumi memberikan gambaran mengenai tingkat kekuatan dan dampak yang ditimbulkan oleh suatu peristiwa seismik. Pada rentang magnitudo 2,5 atau lebih kecil, gempa bumi umumnya tidak dapat dirasakan oleh manusia, namun masih dapat terekam oleh instrumen seismograf. Gempa dengan magnitudo 2,5 hingga 5,4 biasanya dapat dirasakan masyarakat, tetapi hanya menimbulkan kerusakan yang sangat kecil. Selanjutnya, gempa dengan magnitudo 5,5 hingga 6,0 berpotensi menimbulkan kerusakan ringan pada bangunan atau struktur tertentu. Sementara itu, gempa dengan magnitudo 6,1 hingga 6,9 memiliki dampak yang lebih signifikan dengan kemungkinan kerusakan kecil hingga sedang pada berbagai bangunan. Pada rentang magnitudo 7,0 hingga 7,9, gempa bumi tergolong besar dan dapat menyebabkan kerusakan luas pada infrastruktur. Adapun gempa dengan magnitudo 8,0 atau lebih besar dikategorikan sebagai gempa bumi hebat, yang mampu menghancurkan kota-kota di sekitar pusat gempa dan menimbulkan dampak bencana yang sangat besar.

C. Skala Richter

.Skala richter diciptakan pertama kali oleh Charles Richter pada tahun 1934. Skala richter biasa disebut SR yang menjadi skala yang banyak digunakan di seluruh dunia. Dasar perhitungan pada skala richter menggunakan amplitudo. Tetapi pada perhitungan ini mempunyai kelemahan yakni tidak dapat menggambarkan energi secara lengkap pada gempa terutama pada gempa di atas kekuatan 6,0 maka perhitungan skala richter menjadi kurang akurat. Seiring perkembangan ilmu dari seismologi skala richter mulai digantikan oleh skala magnitudo momen (Momen magnitude Scale), yang lebih akurat dalam mendeteksi gempa besar. Skala ini mem pertimbangkan luas patahan, pergeseran batuan, dan karakteristik elastisitas medium tempat gempa. Di bawah ini adalah skala perhitungan skala richter[13].

Tabel 2. Daftar Besaran Skala Richter

Richter	Intensitas	Status
2,0	Gempa kecil dan tidak terasa	Kecil
2,0-2,9	Gempa tidak dapat dirasakan akan tetapi terekam	Kecil
4,0-4,9	Gempa dapat diidentifikasi dengan gemetar perabotan dan suara bergetar. Tingkat kerusakan tidak signifikan.	Ringan
5,0-5,9	Konstruksi yang baik biasanya mengalami kerusakan kecil.	Sedang
6,0-6,9	Dapat menyebabkan kerusakan hingga jarak 160 km	Kuat
7,0-7,9	Mengakibatkan kerusakan yang signifikan dengan jangkauan kerusakan yang lebih luas	Kuat
8,0-8,9	Bisa menyebabkan kerusakan ratusan mil	Besar
9,0-9,9	Terjadi kehancuran hingga ribuan mil	Dahsyat
10,0-10,9	Dapat mengakibatkan kehancuran sebuah benua	Dahsyat

Pada gambar2. Menjelaskan skala Richter merupakan acuan yang digunakan untuk mengukur kekuatan gempa bumi berdasarkan amplitudo gelombang seismik yang tercatat oleh seismograf. Pada magnitudo 2,0, gempa bumi tergolong kecil dan umumnya tidak terasa oleh manusia, meskipun dapat terekam oleh instrumen seismik. Rentang magnitudo 2,0 hingga 2,9 juga termasuk kategori kecil, di mana aktivitas seismik tidak dapat dirasakan secara langsung, namun tetap terdeteksi melalui rekaman instrumen. Pada magnitudo 4,0 hingga 4,9, gempa dapat diidentifikasi melalui getaran perabotan maupun bunyi bergetar, walaupun tingkat kerusakan yang ditimbulkan relatif tidak signifikan dan masih tergolong ringan. Selanjutnya, gempa dengan magnitudo 5,0 hingga 5,9 berpotensi menimbulkan kerusakan kecil pada bangunan dengan konstruksi yang baik, sehingga dikategorikan sebagai intensitas sedang. Gempa dengan magnitudo 6,0 hingga 6,9 sudah tergolong kuat, karena mampu menimbulkan kerusakan dengan jangkauan hingga 160 km dari pusat gempa. Pada rentang 7,0 hingga 7,9, gempa bumi dapat mengakibatkan kerusakan signifikan dengan cakupan yang lebih luas. Gempa dengan magnitudo 8,0 hingga 8,9 termasuk kategori besar karena mampu menimbulkan kerusakan dalam radius ratusan mil. Sementara itu, gempa dengan magnitudo 9,0 hingga 9,9 digolongkan dahsyat, karena dapat menimbulkan kehancuran dalam jarak ribuan mil. Bahkan, secara teoritis, gempa dengan magnitudo 10,0 hingga 10,9 berpotensi menimbulkan kehancuran dalam skala benua.

D. ESP-32

Pada gambar 2. menjelaskan ESP-32 adalah mikrokontroler yang dikenalkan oleh Espressif System yang merupakan penerus dari ESP8266. Pada mikrokontroler ini sudah tersedia modul WiFi 2,4GHz dalam chip sehingga dapat mendukung untuk membuat sistem Internet of Thing[14]. Pada ESP32 ini mempunyai banyak fitur tambahan dan keunggulan dari pada generasi sebelumnya. Pada ESP32 terdapat inti CPU serta WiFi yang lebih cepat, GPIO yang lebih banyak dan dukungan bluetooth 4.2, serta konsumsi daya yang lebih rendah, sehingga cocok untuk membuat proyek berbasis Internet of Thing.



Gambar 2. ESP-32

E. Router

Pada gambar 3. Router Tenda O3 merupakan perangkat wireless outdoor CPE (Customer Premises Equipment) yang dirancang khusus untuk transmisi data jarak jauh menggunakan jaringan WiFi pada frekuensi 2.4 GHz. Perangkat ini dilengkapi dengan antenna directional 12 dBi, yang memungkinkan jangkauan transmisi sinyal hingga 5 kilometer dalam kondisi ideal Line of Sight (LOS). Tenda O3 mendukung standar jaringan IEEE 802.11b/g/n dan memiliki kecepatan transfer data hingga 150 Mbps, yang cukup untuk kebutuhan transmisi data real-time seperti pemantauan sensor, kamera, dan IoT[15]



Gambar 3. Router tenda 03

F. Sensor IMU 9 DOF

Sensor IMU (Inertial Measurement Unit) 9 DoF (Degrees of Freedom) adalah jenis sensor yang mampu mengukur gerakan dan orientasi suatu objek di ruang 3D. Sensor ini memiliki 9 derajat kebebasan (DoF) yang berasal dari gabungan tiga sensor yaitu:

- 1) Accelerometer (3 DoF): Mengukur percepatan linier pada sumbu X, Y, dan Z.
- 2) Gyroscope (3 DoF): Mengukur kecepatan sudut (rotasi) pada sumbu X, Y, dan Z.
- 3) Magnetometer (3 DoF): Mengukur medan magnet untuk menentukan arah (kompas) pada sumbu X, Y, dan Z.



Gambar 4. Sensor IMU 9-DOF

Pada gambar 4. menjelaskan untuk menggabungkan data dari ketiga sensor ini, sensor IMU 9 DoF mampu memberikan informasi yang lebih lengkap tentang posisi, kecepatan, orientasi, dan arah suatu objek dalam ruang tiga dimensi. Ini sering digunakan dalam aplikasi seperti drone, robotika, smartphone, dan sistem navigasi[16].

G. Kabel Jumper

Pada Gambar 5. Menjelaskan kabel jumper adalah kabel yang digunakan untuk menghubungkan komponen dalam membuat prototype. Kabel jumper biasa dihubungkan ke mikrokontroler seperti NodeMCU melalui breadboard. Sesuai kebutuhannya, kabel jumper tersedia dengan 3 macam versi, yaitu male to female, male to male dan female to female. Karakteristik dari kabel ini memiliki panjang antara 10-20cm. kabel ini mempunyai jenis kabel serabut yang housingnya berbentuk bulat. Dalam merancang sebuah desain rangkaian elektronik, maka dibutuhkan sebuah kabel yang digunakan untuk menghubungkannya.



Gambar 5. Kabel Jumper

H. Router



Pada gambar 6. menjelaskan Router adalah salah satu komponen pada jaringan komputer yang mampu melewati data melalui sebuah jaringan atau internet menuju sarannya, melalui sebuah proses yang dikenal sebagai routing. Router berfungsi sebagai penghubung antar 2 (dua) atau lebih jaringan untuk meneruskan data dari jaringan ke jaringan[15].

Gambar 6. Router Dual Band

I. Bateriai LiPo

Pada gambar 7. penelitian ini menggunakan sumber daya yang dipergunakan adalah sebuah baterai Lithium Ion Polymer (LiPo) dengan tegangan 12 volt dan kapasitas 5200 miliampere hour (mAh). Baterai LiPo adalah jenis baterai yang dapat diisi ulang sehingga smart infusion dapat digunakan secara berulang dan memiliki dampak positif terhadap lingkungan. Baterai Lithium Ion Polymer (LiPo) diperkirakan memiliki kapasitas untuk menyediakan daya pada smart infusion selama periode 12 hingga 15 jam, dengan proses pengisian ulang yang memerlukan waktu sekitar 1 hingga 2 jam hingga baterai mencapai kapasitas penuh [17].



Gambar 7. Baterai LiPo

J. Arduino IDE

Pada gambar 8. Menggunakan aplikasi arduino sebagai pemrogramannya, arduino adalah perangkat lunak IDE (Integrated Development Environment) seperti Sebuah perangkat lunak yang memudahkan kita mengembangkan aplikasi mikrokontroler mulai dari menuliskan source program, kompilasi, upload hasil kompilasi, dan uji coba secara terminal serial. Mikrokontroler itu sendiri adalah chip atau IC (integrated circuit) yang bisa 177ahasa177r177 menggunakan bahasa177r. Tujuan menanamkan program pada mikrokontroler adalah agar rangkaian elektronik dapat membaca input, memproses input tersebut dan kemudian menghasilkan output sesuai yang diinginkan. Esp8266 ini bisa dijalankan di komputer dengan berbagai macam platform karena didukung atau berbasis Java. Source program yang dibuat untuk aplikasi mikrokontroler adalah bahasa C/C++.

Gambar 8. Arduino

K. Draw IO

Pada gambar 9. menggunakan draw io, yang dimana draw io merupakan sebuah situs yang didesain khusus untuk menggambar diagram secara online. Untuk mengaksesnya hanya diperlukan browser yang mendukung HTML5 dan juga koneksi internet. Draw.io sudah terintegrasi dengan Google Drive untuk penyimpanan file selain mengeksport dalam bentuk JPG/PNG/SVG/XML



Gambar 9. Draw Io

L. Delphi 7

Pada gambar 10. menggunakan delphi 7 sebagai hasil untuk melihat grafik, yang dimana delphi 7 merupakan salah satu perangkat lunak untuk membuat merancang program aplikasi yang berpenampilan seperti aplikasi lainnya yang berbasis windows. Kemampuan Borland delphi secara umum adalah menyediakan anda Komponen komponen yang dapat membuat aplikasi yang sesuai dengan tampilan tertentu, Dan dengan di perkuat Bahasa Pemrograman yang handal yaitu Objek Pascal yang sangat terkenal.



Gambar 10. Delphi 7.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Objek dan Subjek Penelitian

Objek pada penelitian ini yaitu membuat inovasi dan pemilihan penggunaan sensor IMU 9DOF dalam pendeteksian bencana gempa bumi, sedangkan subjek dalam penelitian ini yaitu menampilkan grafik gelombang rayleigh.

B. Alat dan Bahan Penelitian

Penulis dalam penelitian ini menggunakan alat-alat sebagai pendukung penelitian, serta memanfaatkan bahan-bahan yang diperlukan untuk menunjang proses penelitian. Pada penelitian ini, alat dan bahan yang digunakan meliputi perangkat lunak dan perangkat keras, yang tertera pada tabel 3 dan tabel 4

1) Hardware

Tabel 3. Daftar Kebutuhan Hardware

No.	Nama	Kegunaan
1	Laptop	Digunakan untuk membuat program pada Arduino IDE. Spesifikasi laptop yang digunakan yaitu laptop Lenovo V14 dengan prosesor AMD Ryzen 5 5800H, memory RAM 16 GB, storage 512 GB, tipe grafis Radeon, dan menggunakan sistem operasi Windows 11 Home Single Language
2	Sensor Accelerometer IMU 9DOF Grove	Digunakan untuk mendeteksi percepatan suatu getaran.
3	ESP 32	Digunakan untuk memprogram dan menghubungkan perangkat elektronik ke internet.
4	Mikrotik	Digunakan untuk penghubung antara Router dengan PC.
5	Router	Digunakan untuk penghubung antara ESP dengan Mikrotik
6	Baterai	Digunakan sebagai catu daya.

Pada tabel 3. Menjelaskan perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa komponen utama yang terintegrasi. Laptop Lenovo V14 dengan prosesor AMD Ryzen 5, RAM 16 GB, penyimpanan 512 GB, dan sistem operasi Windows 11 berfungsi sebagai pusat pemrograman melalui Arduino IDE. Sensor Accelerometer IMU 9DOF Grove digunakan untuk merekam percepatan getaran pada sumbu tertentu, sementara mikrokontroler ESP32 berperan sebagai unit pemroses sekaligus penghubung ke jaringan internet. Komunikasi data difasilitasi oleh router dan Mikrotik yang menghubungkan ESP32 dengan PC. Selain itu, sistem dilengkapi baterai sebagai sumber catu daya portabel agar dapat beroperasi secara mandiri di lapangan.

2) Software

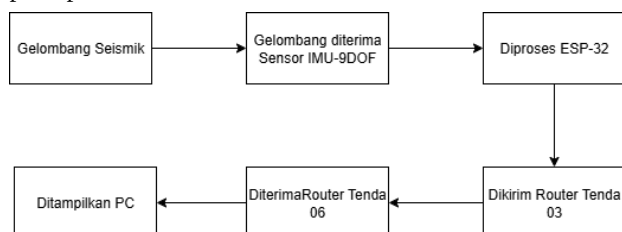
Tabel 4. Daftar Kebutuhan Software

No.	Nama	Kegunaan
1	Arduino IDE	Digunakan untuk membuat program yang akan diupload ke Arduino Uno.
2	Draw IO	Digunakan untuk berbagai macam diagram, seperti diagram penelitian, blok diagram, dan flowchart.
3	Delphi 7	Digunakan untuk menampilkan data.

Pada tabel 4. menjelaskan perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa aplikasi utama yang berfungsi mendukung proses perancangan, pemrograman, serta visualisasi data. Arduino IDE dimanfaatkan untuk membuat, menyusun, sekaligus mengunggah program ke dalam mikrokontroler Arduino Uno yang berperan sebagai pusat kendali sistem. Selain itu, aplikasi Draw.io digunakan untuk membantu pembuatan berbagai macam diagram, seperti diagram penelitian, blok diagram, maupun flowchart, yang berguna dalam memperjelas alur perancangan sistem secara sistematis dan terstruktur. Selanjutnya, Delphi 7 digunakan sebagai perangkat lunak untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor dalam bentuk visual pada komputer, sehingga memudahkan dalam proses pemantauan serta analisis terhadap kinerja sistem yang dikembangkan.

C. Block Diagram

Pada block diagram menjelaskan dasar dari perangkat keras yang akan digunakan untuk mendukung operasional suatu sistem. Berikut merupakan gambar dari blok diagram pada penelitian ini.

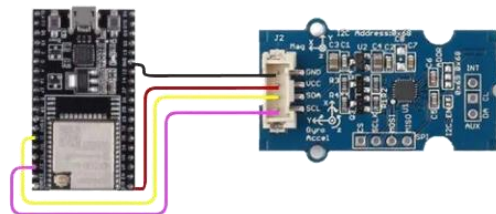


Gambar 11. Block Diagram

Pada gambar 11. diagram blok proses pendeteksian gelombang seismik yang dimulai dengan penerimaan gelombang sinyal seismik yang dihasilkan oleh pergerakan tanah, seperti gempa bumi, menggunakan sensor IMU 9-DOF. Sinyal tersebut kemudian diproses oleh sistem embedded yang berfungsi untuk mengolah data yang diterima oleh

gelombang seismik, penyaringan sinyal, dan deteksi pola tertentu untuk menemukan perbedaan amplitudo, frekuensi, atau getaran yang signifikan. Hasil pengolahan data tersebut diteruskan melalui sistem komunikasi yang berperan mentransmisikan data ke perangkat lain atau pusat pengendali menggunakan media komunikasi wireless. Tahap akhir adalah tampilan data, di mana informasi yang sudah diproses divisualisasikan dalam bentuk grafik yang menunjukkan waktu kejadian, intensitas sinyal seismik, dan lokasi sumber gelombang, sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan analisis lebih lanjut.

D. Skema Rangkaian



Gambar 12. Rangkaian IMU 9DOF

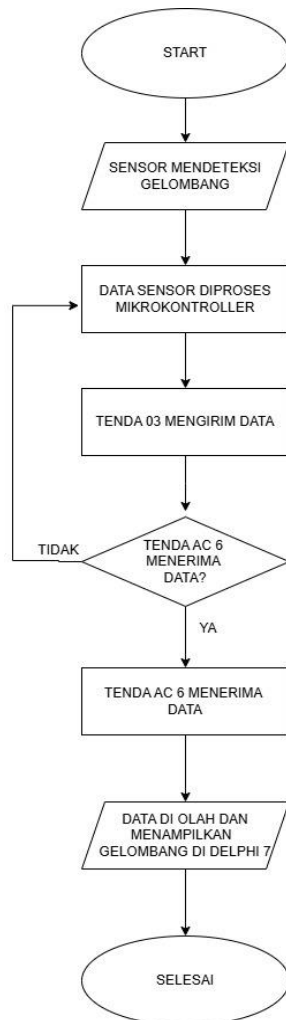
Pada gambar 12. menjelaskan rangkaian untuk sensor Pada skema rangkaian penelitian ini, aspek kestabilan tegangan menjadi faktor penting agar sensor IMU 9DOF dan mikrokontroler ESP32 dapat berfungsi secara optimal. Tegangan kerja sensor dipasang melalui jalur VCC (3,3 V) yang sesuai dengan kebutuhan operasional ESP32, sehingga mencegah risiko overvoltage maupun ketidakstabilan data akibat suplai daya berlebih. Pin GND digunakan sebagai referensi arus listrik dan jalur pengembalian tegangan, yang berfungsi menjaga kestabilan sistem serta meminimalkan gangguan *noise*. Pemilihan pin komunikasi juga dilakukan dengan pertimbangan kompatibilitas perangkat keras. Jalur SCL dihubungkan ke pin 21 dan SDA ke pin 22 pada ESP32 karena kedua pin tersebut merupakan default I²C bus, sehingga mempermudah proses inisialisasi program tanpa konfigurasi tambahan.

Tabel 5. Pin Wiring IMU 9DOF

IMU 9DOF	ESP-32
VCC	VCC
GND	GND
SCL	Pin 21
SDA	Pin 22

Pada tabel 5. konfigurasi pin pada rangkaian sistem dilakukan dengan menghubungkan jalur komunikasi dan catu daya sensor ke mikrokontroler. Pin VCC pada sensor dihubungkan ke pin VCC mikrokontroler sebagai sumber tegangan, sedangkan pin GND sensor dihubungkan ke pin GND mikrokontroler untuk memastikan referensi ground yang sama. Jalur komunikasi data menggunakan protokol I²C, di mana pin SCL sensor terhubung ke pin 21 mikrokontroler sebagai jalur clock, dan pin SDA sensor terhubung ke pin 22 mikrokontroler sebagai jalur data. Konfigurasi ini bertujuan untuk menjamin proses pertukaran data sensor dengan mikrokontroler berjalan stabil dan sesuai standar komunikasi I²C.

E. Flowchart Sistem



Gambar 13. Flowchart Sistem

Pada gambar 13. flowchart pembuatan alat menggunakan software aplikasi untuk mengimplementasikan hasil perancangan ke dalam sistem. Software yang digunakan yaitu Arduino IDE yang digunakan untuk merancang dan memprogram mikrokontroler Arduino dan Delphi 7 untuk menampilkan data. Kemudian setelah sensor IMU-9DOF mendeteksi getaran dan pergerakan tanah, data tersebut akan diolah menggunakan ESP32, dan data akan dikirim menggunakan router ke mikrotik lalu grafik gelombang rayleigh ditampilkan pada PC menggunakan software delphi 7.

IV. HASIL DAN ANALISA

A. Teknik Pengujian

Pada penelitian ini, proses pengujian alat dilakukan dengan metode penguburan sistem embedded ke dalam sebuah tong pada kedalaman sekitar 10 cm dari permukaan tanah. Tujuan dari penguburan ini adalah untuk menempatkan sensor sedekat mungkin dengan sumber getaran agar pendeteksian gelombang dapat dilakukan secara optimal. Sistem embedded yang dimaksud terdiri dari rangkaian sensor yang telah dirancang khusus untuk menangkap gelombang

seismik, khususnya gelombang Rayleigh yang merambat di permukaan medium elastis. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan rangsangan berupa pukulan ke permukaan tong. Pukulan tersebut dilakukan secara sistematis dan melingkar, mengikuti arah sumbu x, y, dan z untuk memastikan bahwa alat mampu mendeteksi gelombang dari berbagai arah. Teknik ini bertujuan untuk mensimulasikan datangnya gelombang dari berbagai arah seolah-olah berasal dari sumber gempa atau getaran alami, sehingga performa dan sensitivitas alat terhadap gelombang Rayleigh dapat dievaluasi secara menyeluruh. Dengan pendekatan ini, diharapkan sistem mampu mengenali pola getaran dan arah datangnya gelombang dengan akurasi yang tinggi.

B. Hasil Perancangan Hardware

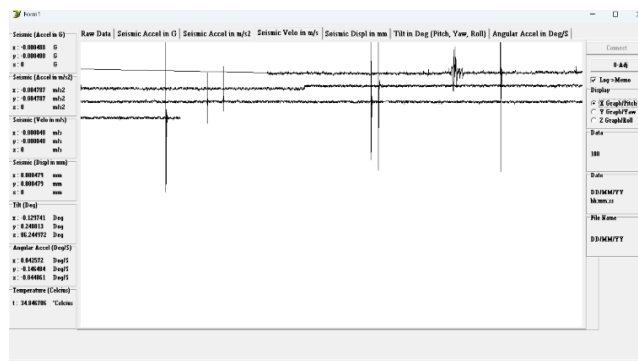
Pada gambar 14. hasil perancangan hardware ini menggunakan mikrokontroler Esp32, sensor IMU 9 DOF dimana pada sensor IMU pin yang digunakan yaitu, +3.3v, GND, SDA, SCL.



Gambar 14. Hasil Perancangan Alat

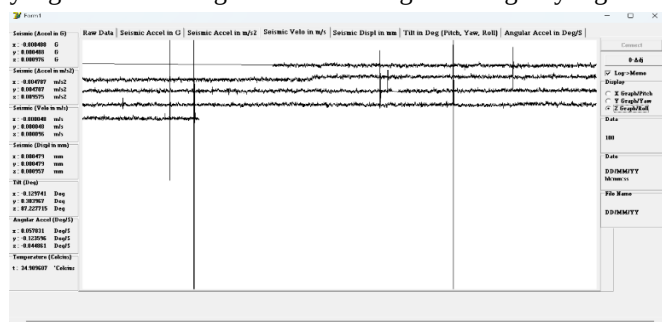
C. Pengambilan data

Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan menggunakan sensor IMU 9-DOF (Inertial Measurement Unit dengan 9 Degrees of Freedom), yang mampu mendeteksi percepatan, kecepatan sudut, dan medan magnet pada tiga sumbu utama, yaitu x, y, dan z. Data yang diperoleh dari sensor ini kemudian dikirim dan ditampilkan secara real-time melalui aplikasi yang dibangun menggunakan Delphi 7, sebuah platform pemrograman visual yang memungkinkan pengguna untuk memantau dan merekam data secara langsung. Fokus utama dari penelitian ini adalah pada pengambilan dan analisis data gelombang Rayleigh, yaitu salah satu jenis gelombang permukaan yang umum ditemukan pada fenomena seismik. Gelombang ini memiliki karakteristik pergerakan eliptikal yang terjadi pada bidang vertikal, sehingga sumbu x (horizontal) dan sumbu z (vertikal) menjadi dua komponen utama yang diamati dalam penelitian ini. Dengan memusatkan perhatian pada kedua sumbu tersebut, diharapkan dapat diperoleh representasi yang lebih akurat mengenai perilaku gelombang Rayleigh saat merambat melalui medium uji. Data yang dikumpulkan akan digunakan untuk mengevaluasi sensitivitas sensor, ketepatan sistem dalam mendeteksi arah dan amplitudo gelombang, serta efektivitas perangkat lunak dalam menampilkan dan mengolah informasi seismik secara efisien.



Gambar 15. Sumbu X

pada gambar 15. hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor IMU 9-DOF mampu merekam perubahan percepatan pada sumbu X (horizontal) dan Z (vertikal) dengan nilai masing-masing -0,000488 g dan +0,000976 g. Pola pergerakan ini sesuai dengan teori gelombang Rayleigh, di mana lintasan partikel permukaan tanah membentuk elips retrograde akibat kombinasi gelombang primer (P) dan sekunder (S) pada bidang vertikal. Pada sumbu X teramati adanya pergerakan maju-mundur, sedangkan pada sumbu Z teramati pergerakan naik-turun yang lebih dominan. Kombinasi kedua sumbu tersebut menghasilkan pola elips yang konsisten dengan karakteristik gelombang Rayleigh.



Gambar 16. Sumbu Z

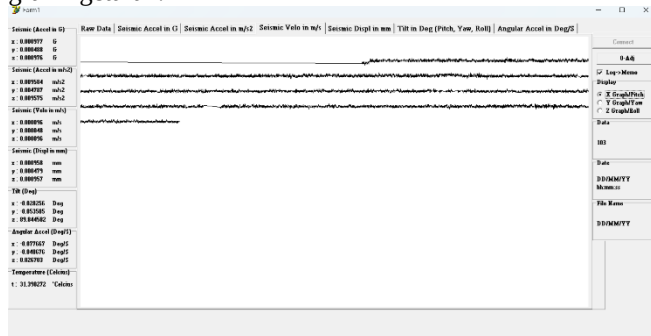
Pada gambar 16. hasil data sumbu Z menghasilkan gelombang berupa grafik, pola dari gelombang menunjukkan adanya getaran atau pergerakan yang terdeteksi, yang dimana untuk gelombang rayleigh membutuhkan sumbu X dan Z. Nilai Z didapatkan dengan percepatan getaran yang didapatkan dengan nilai percepatan getaran 0,000976g.



Gambar 17. RAW Data

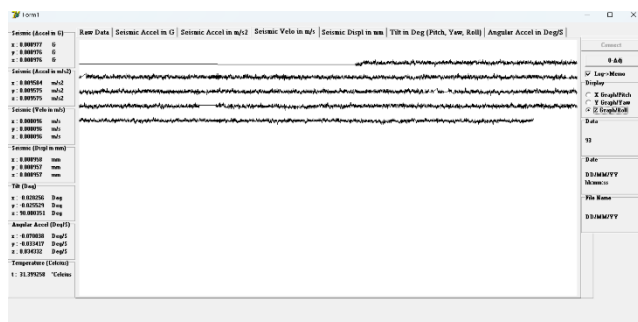
Pada gambar 17. data RAW, yang dimana data RAW merupakan data dari hasil uji coba alat deteksi getaran atau pergerakan tanah, yang dimana data dari sensor IMU 9DOF akan tersimpan pada excel berupa numerik atau angka. Yang digunakan untuk memantau pergerakan tanah atau getaran

seismik. Data akan dilanjutkan sebagai pemrosesan data grafik getaran.



Gambar 18. Sumbu X

Pada gambar 18. menunjukkan data yang diperoleh sumbu x yang ditampilkan pada aplikasi delphi 7, bahwa kondisi sekitar saat melakukan pengukuran berada dalam keadaan stabil tanpa adanya getaran yang signifikan. Yang di dapatkan dengan nilai 0,000977g pada sumbu X, pada sumbu Z didapatkan dengan nilai 0,000976, yang menandakan bahwa adanya aktifitas getaran yang sangat rendah, sehingga dapat diinterpretasikan sebagai kondisi diam (steady state) dari sistem.



Gambar 19. Sumbu Z

Pada gambar 19. menunjukkan data yang ditampillkan pada delphi 7, bahwa pada saat melakukan pengukuran getaran tidak terjadi getaran yang signifikan dalam keadaan stabil, yang didapatkan pada sumbu X dengan nilai 0,000977, pada sumbu Z mendapatkan nilai 0,000976, yang menandakan bahwa adanya aktifitas getaran yang sangat lemah, nilai percepatan yang terdeteksi berada dalam kondisi yang sangat rendah atau alat berada dalam kondisi tidak terpengaruh oleh getaran yang signifikan.

D. Analisis Error

Untuk mengetahui keakuratan sensor, dilakukan perhitungan error dengan membandingkan nilai pembacaan sensor terhadap nilai acuan (percepatan gravitasi $1\text{ g} \approx 9,81\text{ m/s}^2$). Nilai error dihitung menggunakan Root Mean Square Error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x_{error} + x_{acuan})^2}{n}} \quad (2)$$

Hasil perhitungan menunjukkan rata-rata error relatif berada pada $\pm 3,5\%$, yang masih dapat diterima untuk pengujian awal sistem seismik berbasis IMU.

E. Analisis Pola gelombang dan Sensivitas Sensor

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor IMU 9DOF mampu merekam perubahan percepatan pada sumbu X

(horizontal) dan Z (vertikal) dengan nilai masing-masing -0,000488 g dan +0,000976 g. Pola pergerakan ini konsisten dengan teori gelombang Rayleigh, di mana lintasan partikel permukaan tanah membentuk elips retrograde akibat kombinasi gelombang primer (P) dan sekunder (S) pada bidang vertikal. Pada sumbu X teramati pergerakan maju-mundur, sedangkan pada sumbu Z teramati pergerakan naik-turun yang lebih dominan. Dari sisi sensitivitas sensor, nilai percepatan yang terukur relatif kecil, namun tetap dapat direkam dengan stabil dan divisualisasikan dalam grafik real-time. Hal ini membuktikan bahwa IMU 9DOF memiliki tingkat kepekaan yang memadai untuk mendeteksi getaran seismik buatan berskala kecil. Tingkat error relatif yang dihitung sebesar $\pm 3,5\%$ juga mengindikasikan bahwa sensor memiliki akurasi yang cukup baik. Walaupun demikian, untuk pengujian gempa nyata dengan amplitudo lebih besar, kalibrasi lanjutan tetap diperlukan guna meningkatkan presisi sistem.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pola hasil pengukuran telah sesuai dengan teori gelombang Rayleigh, dan sensor IMU 9DOF cukup sensitif untuk mendeteksi getaran permukaan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pengujian alat deteksi gelombang seismik yang difokuskan pada studi kasus gelombang rayleigh, dapat disimpulkan bahwa sensor IMU 9-DOF mampu mendeteksi getaran tanah dengan sensitivitas yang cukup tinggi. Sensor yang digunakan mampu mendeteksi percepatan sudut untuk memantau perubahan posisi dan rotasi alat. Pengambilan data sampling menggunakan cara pengambilan data tertinggi yang selanjutnya data tersebut diubah kedalam besaran magnitude vibrasi yang mewakili magnitude gempa.

- 1) Dari percobaan di atas data dapat ditampilkan secara real time.
- 2) Visualisasi data real-time memudahkan pemantauan langsung serta mendukung analisis pasca-rekaman.
- 3) Dari percobaan di atas pada sensor IMU 9DOF dapat mendeteksi gelombang Rayleigh yang bersumbu pada sumbu X dan Z.
- 4) Pola getaran yang terekam sesuai dengan karakteristik gelombang Rayleigh, ditunjukkan oleh adanya pergerakan pada sumbu horizontal (X) dan vertikal (Z).

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Maharani, "Tingkat Pengetahuan Siswa Tentang Kesiapsiagaan Bencana Gempa Bumi Di Smpn 3 Kuta Selatan Badung Provinsi Bali," *Pendipa Journal Of Science Education*, Vol. 4, No. 3, Pp. 32–38, Sep. 2020, Doi: 10.33369/Pendipa.4.3.32-38.
- [2] Anita, "Pengembangan Media Pop Up Book Berbasis Pengetahuan Mitigasi Bencana Gempa Bumi Untuk Anak Usia 4-5 Tahun," *Jurnal Review Pendidikan Dan Pengajaran*, Vol. Volume 6 Nomor 4, Pp. 1–6, 2023.
- [3] B. Sunardi, "Vs30 Mapping And Soil Classification In The Southern Part Of Kulon Progo Using Rayleigh Wave Ellipticity Inversion," *Jgise: Journal Of Geospatial Information Science And Engineering*, Vol. 1, No. 2, Jan. 2019, Doi: 10.22146/Jgise.39780.
- [4] A. Profdrrenat Bagus Jaya Santosa And S. Sungkono, "Development Of Inverting Rayleigh-Wave In Gibson Half-Space Based On Levenberg-Marquardt (L-M) And Singular Value Decomposition (Svd) Rohmatul Aminah Nrp 1111 100 078 Physics Department Faculty Of Mathematics And Natural Sciences Sepuluh Nopember Institute Of Technology Surabaya 2015."
- [5] D. D. W. F. S. Dan A. D. G. Adib Banuboro, "Analisa Parameter Desain Akuisisi Seismik 2d Dengan Metode Dinamik Pada Lingkungan Vulkanik, Studi Kasus : Cekungan Jawa Barat Bagian Utara," *Jurnal Teknik Its*, Vol. Vol. 6, No. 2, Pp. 1–6, 2017.
- [6] M. S. Zayyan, K. A. Widodo, B. Romadhon, And P. D. Palevi, "Rancang Bangun Alat Ukur Seismik Menggunakan Inertial Measurement Unit (Imu) Berbasis Iot 1."
- [7] K. Prayoga *Et Al.*, "Monitoring Getaran Tanah Berbasis Iot Blynk Menggunakan Sensor Grove Imu 9 Dof."
- [8] S. P. Dini *Et Al.*, "Usm) 2 Prodi Teknik Informarmatika, Fakultas Teknik," 2017. [Online]. Available: [Http://Journal.Lembagakita.Org/Index.Php/Jtik](http://Journal.Lembagakita.Org/Index.Php/Jtik)
- [9] A. R. Timor, H. Andre, And A. Hazmi, "Analisis Gelombang Elektromagnetik Dan Seismik Yang Ditimbulkan Oleh Gejala Gempa," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, Vol. 5, No. 3, Oct. 2016, Doi: 10.20449/Jnte.V5i3.297.
- [10] A. Wahyuni *Et Al.*, "Analisis Besar Kecepatan Gelombang Primer Pada Stasiun Bmkg Wilayah Iv Makassar," 2017.
- [11] R. R. Putra And D. Saputra, "Assessment Tingkat Kerentanan Bangunan Bertingkat Di Kampus Universitas Negeri Padang Menggunakan Gelombang Rayleigh," *Serambi Engineering*, Vol. Vii, No. 1, 2022.
- [12] I. Maulita And A. M. Wahid, "Prediksi Magnitudo Gempa Menggunakan Random Forest, Support Vector Regression, Xgboost, Lightgbm, Dan Multi-Layer Perceptron Berdasarkan Data Kedalaman Dan Geolokasi," *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia*, Vol. 4, No. 5, Pp. 221–232, Dec. 2024, Doi: 10.52436/1.Jpti.470.

- [13] S. Febri Saputra, "Prototype Sistem Peringatan Dini Bencana Gempa Bumi Dan Tsunami Berbasis Internet Of Things," 2022, [Online]. Available: [https://www.amongguru.com/pengertian-](https://www.amongguru.com/pengertian-https://www.amongguru.com/pengertian-)
- [14] A. Imran And M. Rasul, "Pengembangan Tempat Sampah Pintar Menggunakan Esp32," 2020.
- [15] M. Dicky Syahputra Lubis *Et Al.*, "Membangun Router Pada Jaringan Komputer Menggunakan Ubuntu Os," *Jurnal Teknik Informatika Kaputama (Jtik)*, Vol. 4, No. 2, 2020.
- [16] M. S. Zayyan, K. A. Widodo, B. Romadhon, And P. D. Palevi, "Rancang Bangun Alat Ukur Seismik Menggunakan Inertial Measurement Unit (Imu) Berbasis Iot 1."
- [17] K. Seiya Ekiawan, E. Lydia, V. Ahmad, And E. Maulana, "Infus Pintar Untuk Meminimalisasi Terjadinya Penyumbatan Pada Selang Infus Terintegrasi Fuzzy Logic."

VII. BIODATA PENULIS



Hilmi Dzaki Setiawan, lahir di Tulungagung, 25 Mei 2002. Penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Rejotangan tahun 2021. Setelah itu pada tahun 2021 penulis melanjutkan Pendidikan Studi diperguruan tinggi swasta Institut Teknologi Nasional

Malang program studi Teknik Elektro S-1 dengan konsentrasi Teknik Elektronika Kendali dan Instrumentasi. Akhir kata dari penulis mengucapkan terimakasih dan rasa syukur yang sebanyak-banyaknya atas selesainya penelitian ini dengan judul "Rancang Bangun Alat Deteksi Gelombang Seismik. Studi Kasus Gelombang Rayleigh.