Magnetika
https://ejournal.itn.ac.id/magnetika
Vol. X No. X pp. xx–xx Month Year e-ISSN: 2597-7881

PERANCANGAN SISTEM DETEKSI TANAH LONGSOR DALAM PETA DIGITAL DAERAH RAWAN BENCANA MENGGUNAKAN SENSOR IMU DAN CURAH HUJAN DENGAN PENGOLAHAN SECARA FUZZY

Devan Arya Danindra[1], Bima Romadhon Parada Dian Palevi[2], Kartiko Ardi Widodo[3]
Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia
[1]devanarya007@gmail.com, [2]bimarpdp@lecturer.itn.ac.id, [3]tiko_@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Penelitian ini merancang sistem deteksi tanah longsor yang mengintegrasikan sensor IMU untuk membaca kemiringan dan percepatan linear serta sensor curah hujan ke dalam antarmuka peta digital. Sistem ini berarsitektur dua lapis, yakni *Node* di lokasi pengamatan dan *Sink* yang terhubung ke PC melalui komunikasi LoRa. PC bertindak sebagai pusat pengolahan yang menyaring sinyal menggunakan algoritma *Moving Average*, lalu mengeksekusinya menggunakan Logika *Fuzzy* Mamdani dengan 75 basis aturan untuk menentukan tingkat kerawanan (Aman, Waspada, Siaga, dan Awas). Hasil pengujian menunjukkan penyimpangan rata-rata pembacaan kemiringan sebesar 1,22%, sedangkan fluktuasi statis percepatan linear sebesar 0,08 m/s² turun menjadi 0,004 m/s². Sensor curah hujan memiliki ketetapan 0,38 mm per jungkitan. Pada pengujian LoRa, tingkat keberhasilan pengiriman mencapai 100% pada jarak 50 meter dan 90% pada 100 meter, namun menyusut ke 40% pada jarak 200 meter akibat halangan rintangan. Pemfilteran sinyal *Moving Average* mereduksi lonjakan data sensor hingga 64,8% (dari 0,6386 m/s² menjadi 0,2245 m/s²). Nilai akhir tingkat kerawanan divisualisasikan secara langsung pada dasbor peta digital dalam wujud indikator warna lingkaran (*heatmap*), sekaligus mentransmisikan instruksi balik ke lapangan untuk memicu alarm suara ketika tingkat bahaya meningkat.

Kata Kunci: Deteksi Tanah Longsor, Logika Fuzzy, Sensor IMU, LoRa, Peta Digital.

Abstract— This study designs a landslide detection system that integrates an IMU sensor to measure slope inclination and linear acceleration, along with a rainfall sensor, into a digital map interface. The system employs a two-tier architecture comprising a Node at the observation site and a Sink connected to a PC via LoRa communication. The PC serves as a centralized processing hub that filters signals using the Moving Average algorithm and evaluates risk levels using Mamdani Fuzzy Logic with 75 rule bases to determine hazard categories (Safe, Alert, Standby, and Danger). Experimental results show an average deviation in slope inclination readings of 1.22%, while static fluctuations in linear acceleration decrease from 0.08 m/s² to 0.004 m/s² following baseline correction. The rainfall sensor achieves a calibration constant of 0.38 mm per tip. In LoRa transmission tests, the packet delivery rate reaches 100% at a distance of 50 meters and 90% at 100 meters, but drops to 40% at 200 meters under non-line-of-sight conditions. The Moving Average filter attenuates sensor data spikes by 64.8% (from 0.6386 m/s² to 0.2245 m/s²). The final hazard status is dynamically visualized on a digital map dashboard through circular radius heatmap indicators, while simultaneously transmitting feedback instructions to the field to trigger an audible alarm when the threat level escalates.

Keywords: Landslide Detection, Fuzzy Logic, IMU Sensor, LoRa, Digital Map.

I. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki topografi dataran tinggi dengan sudut kemiringan lereng terjal di atas 25° serta iklim bercurah hujan tinggi [1], [2], [3], [4] . Kombinasi intensitas curah hujan, kontur tanah lunak, dan kemiringan lereng menjadikan sebagian besar wilayah di Indonesia rentan terhadap bencana tanah longsor [5]. Sepanjang tahun 2024, Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) mencatat ratusan kejadian tanah longsor yang memicu pengungsian masif dan memakan korban jiwa [6]. Kejadian ini umumnya dipicu oleh interaksi multivariabel fisik, terutama fluktuasi curah hujan, percepatan linear tanah, dan perubahan sudut kemiringan lereng.

Sistem deteksi merupakan instrumen penting dalam manajemen kebencanaan. Permasalahan utama pada sistem konvensional adalah penggunaan ambang batas (*threshold*) statis dalam membaca parameter lingkungan. Pendekatan statis memicu risiko kesalahan deteksi (*false alarm*) akibat kondisi alam yang fluktuatif. Selain itu, sistem yang ada umumnya tidak berintegrasi dengan visualisasi spasial, sehingga identifikasi titik kritis pada proses evakuasi membutuhkan waktu lebih lama.

Penelitian ini mengusulkan sistem deteksi tanah longsor dinamis terintegrasi pemetaan spasial yang memanfaatkan sensor kemiringan IMU BNO055 dan *Tipping Bucket Rain Gauge* sebagai instrumen akuisisi data. Transmisi nirkabel

menggunakan modul radio frekuensi LoRa SX1278 untuk memfasilitasi pertukaran data di daerah minim infrastruktur jaringan.

Pembaruan dari penelitian ini terletak pada pemisahan arsitektur antara *Node* pengirim dengan pusat komputasi. Pemrosesan algoritma tingkat tinggi tidak dilakukan di dalam mikrokontroler, melainkan dieksekusi sepenuhnya pada PC lokal. PC bertindak sebagai mesin inferensi yang menerapkan algoritma *Fuzzy Logic Mamdani* untuk mengolah multivariabel lingkungan menjadi empat klasifikasi status kerawanan: Aman, Waspada, Siaga, dan Kritis. Pendekatan terpusat ini menurunkan beban komputasi *Node*. Klasifikasi status kerawanan ditampilkan pada antarmuka peta digital (*WebGIS*) menggunakan pustaka *Leaflet.js*, dan PC memberikan instruksi umpan balik (*feedback*) ke *Node* untuk mengaktifkan alarm *buzzer*.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Penelitian mitigasi tanah longsor berbasis jaringan nirkabel telah banyak dikembangkan dengan berbagai pendekatan instrumentasi. Penelitian [7] menguji transmisi LoRa pada wilayah berbukit, menunjukkan bahwa kondisi topografi memengaruhi persentase kehilangan paket data (*packet loss*). Terkait akuisisi pergerakan tanah, penelitian [8] dan [9] menggunakan instrumen sensor IMU pada jaringan nirkabel untuk mengklasifikasikan tipe kegagalan lereng berdasarkan parameter percepatan linear. Untuk menangani gangguan derau (*noise*) pada pembacaan sensor fisik, penelitian [10] dan [11] mengaplikasikan filter *Simple Moving Average* (SMA) pada data akselerasi IMU. Pendekatan ini menunjukkan tingkat peredaman lonjakan sinyal tanpa menambah beban komputasi pada mikrokontroler. Pada aspek komunikasi data yang melibatkan banyak titik pengamatan, penelitian [12] dan [13] menerapkan metode penjadwalan transmisi (*polling*) pada arsitektur LoRa untuk mencegah tabrakan paket data (*collision*) di udara.

Pada aspek pemrosesan data, penelitian [14] dan [15] menggunakan logika *fuzzy* sebagai pengganti nilai ambang batas statis, menghasilkan klasifikasi tingkat kerawanan yang lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan. Terkait penyajian data spasial, penelitian [16] dan [17] memanfaatkan *WebGIS* terpusat untuk menampilkan informasi geografis daerah rawan bencana sebagai dasar pengambilan keputusan. Tinjauan terhadap penelitian terdahulu memperlihatkan adanya celah riset (*research gap*) pada arsitektur integrasi sistem. Mayoritas penelitian sebelumnya mengeksekusi komputasi analitik, seperti filter data dan logika *fuzzy*, di dalam mikrokontroler sehingga berisiko memberikan beban berlebih pada *Node*. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mendelegasikan seluruh proses komputasi matematika ke PC lokal, kemudian mengintegrasikan keluaran *fuzzy* secara langsung ke peta digital *WebGIS* beserta transmisi instruksi aktuasi alarm lokal pada *Node*.

B. Tanah Longsor

Tanah longsor merupakan fenomena perpindahan massa batuan atau sedimen menuju elevasi yang lebih rendah akibat tarikan gaya gravitasi bumi. Proses terjadinya kegagalan lereng dipengaruhi oleh interaksi tiga variabel fisik utama. Pertama, sudut kemiringan lahan bertindak sebagai parameter dasar yang menentukan besaran dorongan gaya luncur searah dengan arah gravitasi. Kedua, intensitas curah hujan bertindak sebagai pemicu eksternal yang secara bertahap meningkatkan tekanan air pori dan menurunkan daya kohesi struktur tanah. Ketiga, percepatan linear tanah bertindak sebagai parameter kinetik yang mengonfirmasi terjadinya transisi pergeseran mekanis pada massa batuan tersebut secara aktual.

C. Inertial Measurement Unit (IMU)

Inertial Measurement unit merupakan perangkat berbasis MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*) yang berfungsi untuk mengukur gaya spesifik serta orientasi objek [18]. Sistem ini mengintegrasikan akselerometer untuk menangkap percepatan linear dan gyroscope untuk mengukur orientasi rotasi. Pada aplikasi geoteknik, IMU menangkap dinamika pergerakan tanah secara kontinu untuk mendeteksi deformasi lereng, sehingga menghasilkan data kinetik bagi sistem deteksi [8]. Akselerometer digunakan untuk mengkalkulasi percepatan linear tanah, sedangkan gyroscope melengkapi data orientasi untuk menstabilkan hasil pembacaan [19].

Instrumen yang digunakan pada penelitian ini adalah BNO055, yakni System-on-Chip yang memproses algoritma *sensor fusion* secara *on-board* untuk mereduksi *drift* keluaran [20]. Mekanisme ini memungkinkan mikrokontroler eksternal menerima data terproses tanpa melakukan komputasi matematis tambahan. Orientasi pergerakan tanah direpresentasikan menggunakan Sudut Euler (*pitch* dan *roll*) untuk mendeskripsikan rotasi objek relatif terhadap bidang horizontal [21].

Perhitungan kemiringan dilakukan menggunakan data sudut pitch dan roll melalui persamaan:

$$\theta = \sqrt{\text{pitch}^2 + \text{roll}^2} \tag{1}$$

Keterangan:

θ = kemiringan total
pitch = sudut rotasi sumbu X
roll = sudut rotasi sumbu Y

Berdasarkan persamaan (1), penghitungan percepatan linear dilakukan dengan menggunakan data percepatan dari akselerometer pada sumbu X, Y, dan Z untuk mengonfirmasi tingkat aktivitas perubahan lereng [9]. Nilai percepatan linear total diperoleh melalui persamaan resultan dibawah.

$$A = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{2}$$

Keterangan:

A = percepatan linear total
x = percepatan linear sumbu X
y = percepatan linear sumbu Y
z = percepatan linear sumbu Z

Berdasarkan persamaan (2), perhitungan resultan percepatan linear ini nilainya kemudian ditransmisikan menuju PC sebagai variabel masukan untuk diproses menggunakan logika fuzzy.

D. Sensor Curah Hujan (Rain Gauge)

Curah hujan merupakan parameter eksternal pemicu pelemahan struktur tanah melalui mekanisme infiltrasi yang meningkatkan tekanan air pori [22]. Pengukuran intensitas presipitasi pada sistem ini dilakukan menggunakan instrumen

tipping bucket. Perangkat mekanis ini mengonversi akumulasi air hujan menjadi sinyal kelistrikan melalui pergerakan tuas jungkit yang dilengkapi dengan magnet permanen [23].

Setiap kali tuas menjungkit akibat tercapainya ambang batas beban volume air spesifik, pergerakan magnet akan melintasi transduser *Hall Effect*. Interaksi magnetik tersebut memicu keluaran pulsa digital diskrit. Pulsa kelistrikan ini kemudian dicacah dan diakumulasikan secara kontinu oleh *Node* untuk dikalkulasikan menjadi data kuantitatif curah hujan dalam satuan milimeter (mm). Data hidrologi mentah ini selanjutnya ditransmisikan ke PC sebagai variabel pendukung untuk menganalisis eskalasi pelemahan stabilitas lereng.

E. Mikrokontroller ESP32

Mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai unit kendali akuisisi dan transmisi data. Perangkat ini diimplementasikan pada dua titik arsitektur utama, yakni pada sisi *Node* dan *Sink*, dengan fungsi dan tugas utama yang terpisah.

Pada sisi *Node* di lokasi pengamatan, ESP32 bertugas mengatur pembacaan data sudut kemiringan dan percepatan dari sensor IMU serta menghitung akumulasi volume air dari sensor curah hujan. Seluruh data mentah tersebut kemudian dikemas ke dalam satu paket informasi (*payload*) untuk dipancarkan secara *wireless* melalui modul LoRa. Sebaliknya, ESP32 pada sisi *Sink* beroperasi murni sebagai perangkat penerima. Perangkat ini menangkap paket data *wireless* tersebut dan langsung meneruskannya ke PC melalui kabel komunikasi serial USB. Pemisahan tugas ini dilakukan untuk mengurangi beban kerja mikrokontroler ESP32.

F. Modul Komunikasi LoRa

LoRa (*Long Range*) merupakan teknologi komunikasi *wireless* jarak jauh yang beroperasi dengan menggunakan frekuensi gelombang radio. Pada rancangan sistem ini, modul LoRa tipe SX1278 digunakan sebagai jalur penghubung utama antara *Node* di titik pengambilan data dan *Sink*. Penggunaan modul LoRa didasarkan pada jangkauan sinyalnya yang dapat menembus rintangan fisik tanpa bergantung pada ketersediaan jaringan internet.

Setelah *Node* membaca data sudut kemiringan, curah hujan, dan percepatan linear, data tersebut dikemas menjadi satu paket informasi. Paket ini kemudian dipancarkan secara *wireless* melalui modul LoRa. Pada sisi penerima, perangkat *Sink* menangkap paket data tersebut dan langsung meneruskannya ke PC menggunakan kabel USB. Alur pengiriman ini menjaga aliran informasi dari lokasi pengamatan hingga ke PC tanpa memerlukan infrastruktur jaringan.

G. Metode Logika Fuzzy

Logika *fuzzy* merupakan metode inferensi kecerdasan buatan yang mengolah data menggunakan pendekatan berbasis linguistik. Penerapan logika *fuzzy* pada sistem kebencanaan sangat efektif untuk menyelesaikan permasalahan dengan tingkat ketidakpastian alamiah yang tinggi, sekaligus menggantikan metode ambang batas (*threshold*) biner yang kaku agar keputusan status kerawanan lereng menjadi jauh lebih adaptif.

H. Metode Moving Average Filter

Data mentah hasil pembacaan sensor IMU masih memiliki fluktuasi sinyal acak atau *noise*. Untuk mendapatkan data yang lebih halus, sistem ini menerapkan metode penyaringan *Simple Moving Average* (SMA). Metode ini beroperasi dengan cara menghitung nilai rata-rata dari sejumlah rentang sampel data terakhir yang ditentukan secara konstan.

Proses penyaringan data ini dieksekusi pada PC untuk mengurangi beban kerja mikrokontroler ESP32. Jika $x[i]$ mewakili data *input* dari sensor pada waktu ke- i , dan M mewakili jumlah sampel yang digunakan untuk perataan, maka perhitungan nilai keluaran $y[i]$ dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i-j] \tag{3}$$

Keterangan:

$y[i]$=	Nilai keluaran data sensor terfilter
x=	Nilai masukan mentah data sensor saat ini.
M =	Jumlah data sampel terakhir
i =	Indeks waktu data saat ini
j =	Indeks mundur ke belakang

Berdasarkan persamaan (3), tahapan pemfilteran ini bekerja dengan meredam lonjakan angka sesaat akibat gangguan mekanis dari luar, sehingga menghasilkan tren data kemiringan dan percepatan linear yang lebih stabil sebelum diteruskan sebagai nilai masukan untuk proses komputasi logika *fuzzy*.

I. Logika *Fuzzy* Mamdani

Logika *fuzzy* digunakan untuk menangani ketidakpastian kondisi alam melalui pemetaan angka parameter fisik ke dalam rentang derajat keanggotaan. Guna mengurangi beban kerja mikrokontroler, seluruh komputasi dieksekusi terpusat oleh PC menggunakan metode inferensi Mamdani melalui tiga tahapan. Tahap pertama (fuzzifikasi) mengubah nilai ukur curah hujan, sudut kemiringan, dan percepatan linear menjadi himpunan *fuzzy*. Tahap kedua mengevaluasi 75 kombinasi aturan dasar (*rule base*) menggunakan fungsi logika minimum (MIN). Tahap terakhir (defuzzifikasi) memetakan kembali area himpunan keluaran menjadi satu nilai persentase menggunakan metode *Center of Area* (COA). Metode ini menghitung titik pusat luasan dari aturan yang aktif untuk merumuskan klasifikasi status kerawanan akhir secara terukur.

J. Data Logger

Data logger merupakan sistem komputasi yang berfungsi untuk merekam dan mendokumentasikan riwayat pembacaan sensor dari lapangan secara otomatis. Pada sistem ini, fungsi perekaman direalisasikan sepenuhnya pada PC untuk mengamankan jejak historis dari lokasi pengamatan tanpa membebani kapasitas memori mikrokontroler. Seluruh paket informasi yang tiba di *Sink* secara berkelanjutan diekstrak oleh program Python dan dicatat ke dalam basis data berformat *Comma Separated Values* (CSV). Variabel mentah yang direkam mencakup stempel waktu (*timestamp*), koordinat spasial, intensitas hujan, sudut kemiringan, percepatan linear, beserta tingkat kekuatan sinyal LoRa. Arsip

pencatatan elektronik ini selanjutnya menjadi landasan data riwayat (*historical data*) yang menunjang analisis komputasi pada pemetaan digital.

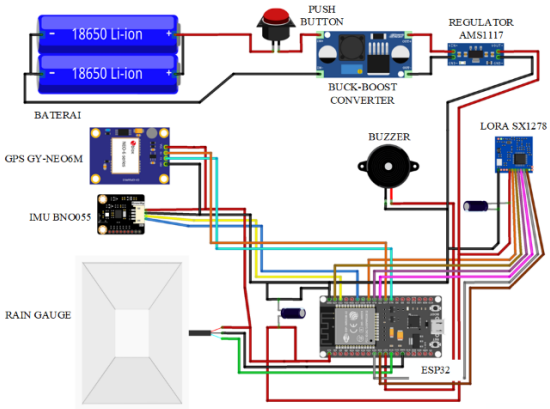
III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Rancangan Sistem

Pada bagian ini menjelaskan tentang gambaran keseluruhan sistem yang meliputi dua arsitektur utama meliputi *Node* Sensor dan *Node Sink.*

1) Rancangan Node Sensor

Node dirancang sebagai instrument yang mengakuisisi data secara langsung langsung di lokasi pengamatan. Parameter yang diamati mencakup sudut kemiringan, percepatan linear, dan intensitas curah hujan, data koordinat dan ketinggian. Seluruh data yang dihimpun dikirimkan secara *wireless* menuju *Sink* melalui modul LoRa. *Node* dilengkapi dengan *Buzzer* sebagai alarm suara untuk memberikan peringatan secara lokal. Rangkaian sistem *Node* ditunjukkan pada Gambar 1.



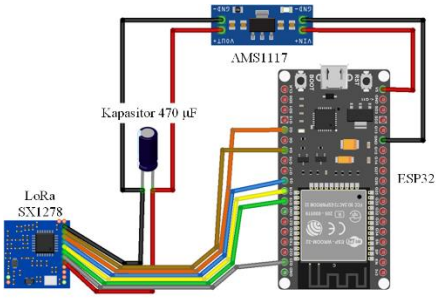
Gambar 1. Rangkaian Sistem Node Sensor

Berdasarkan Gambar 1, rangkaian sistem *Node* tersusun atas komponen utama sebagai berikut:

- Mikrokontroler ESP32: Sebagai pusat kendali seluruh sistem *Node* Sensor
- *Inertial Measurement Unit* (IMU) BNO055: Mengukur sudut kemiringan lereng dan percepatan linear pergeseran tanah.
- Sensor Curah Hujan (*Rain Gauge*): Menghitung curah hujan di dalam satuan milimeter (mm).
- GPS GY-NEO6M: Menentukan titik koordinat serta ketinggian titik pengamatan.
- Modul LoRa SX1278: Perangkat transmisi data secara *wireless* menuju perangkat penerima (*Node Sink*).
- *Buzzer*: Sebagai aktuator yang memberikan peringatan suara.
- Unit Catu Daya: Dua baterai Li-Ion 18650 yang dirangkai paralll serta komponen penstabil tegangan *Buck-Boost* Converter dan Regulator AMS1117 untuk menghasilkan tegangan keluaran 3.3 V.

2) Rancangan Node Sink

Node Sink berperan menerima data dan meneruskannya ke komputer sebagai pengolah data. Perangkat ini menangkap data *wireless* yang dipancarkan oleh *Node Sensor*, kemudian meneruskannya ke PC melalui kabel USB serial untuk disimpan dan diproses lebih lanjut. Rangkaian sistem *Sink* ditunjukkan pada Gambar 2.



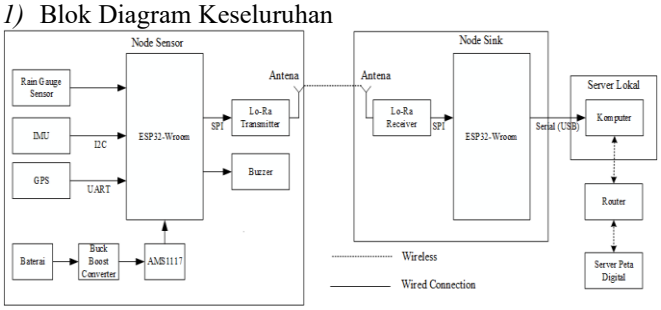
Gambar 2 Rangkaian Sistem Node Sink

Berdasarkan Gambar 2, rangkaian sistem *Sink* tersusun atas komponen utama sebagai berikut:

- Mikrokontroler ESP32: Sebagai pusat Kendali, menerima data dari modul LoRa dan mengalirkannya ke PC melalui komunikasi serial USB.
- Modul LoRa SX1278: Menangkap sinyal data *wireless* yang dikirimkan oleh *Node*.
- Rangkaian Penstabil Daya: Meregulasi tegangan 5 V dari computer menjadi 3,3 V.

B. Blok Diagam

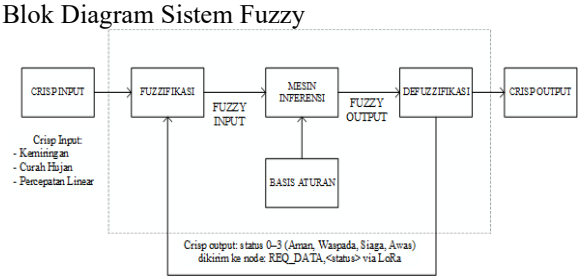
1) Blok Diagram Keseluruhan



Gambar 3. Diagram Blok Keseluruhan

Berdasarkan Gambar 3, sistem terbagi menjadi tiga blok utama yang saling terhubung, meliputi *Node*, *Sink*, dan PC sebagai server lokal. Pada unit *Node*, mikrokontroler ESP32 mengumpulkan data dari sensor curah hujan, sensor IMU, dan modul GPS. Data tersebut dipancarkan secara *wireless* melalui modul LoRa. Di sisi penerima, unit *Sink* menangkap transmisi dan mengalirkannya ke PC melalui kabel USB serial. PC memproses data menggunakan filter *Moving Average* (MA) dan logika *fuzzy*, lalu menampilkan hasil keluaran Fuzzy sebagai status tingkatan resiko serta titik koordinat pada peta digital berbasis web.

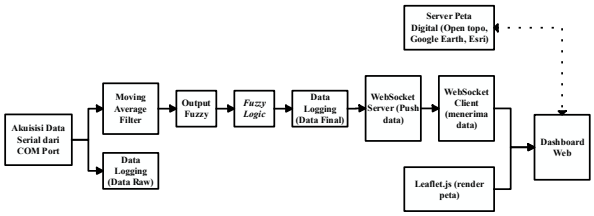
2) Blok Diagram Sistem Fuzzy



Gambar 4. Blok Diagram Sistem Fuzzy

Berdasarkan Gambar 4, proses komputasi logika fuzzy diawali dari penerimaan tiga parameter masukan (*crisp input*), yaitu kemiringan, curah hujan, dan percepatan linear. Tahap fuzzifikasi kemudian merubah data numerik tersebut menjadi derajat keanggotaan (*fuzzy input*). Kemudian, mesin inferensi mengevaluasi nilai keanggotaan berdasarkan aturan logika pada basis aturan untuk menghasilkan kesimpulan (*fuzzy output*). Pada tahap akhir, proses defuzzifikasi mengubah keluaran tersebut menjadi nilai tegas (*crisp output*) yang menghasilkan klasifikasi status risiko dari rentang 0 hingga 3, meliputi Aman (0), Waspada (1), Siaga (2), dan Awas (3). Status terebut kemudian dikirimkan kembali ke *Node* melalui modul LoRa untuk mengendalikan respons alarm *buzzer*.

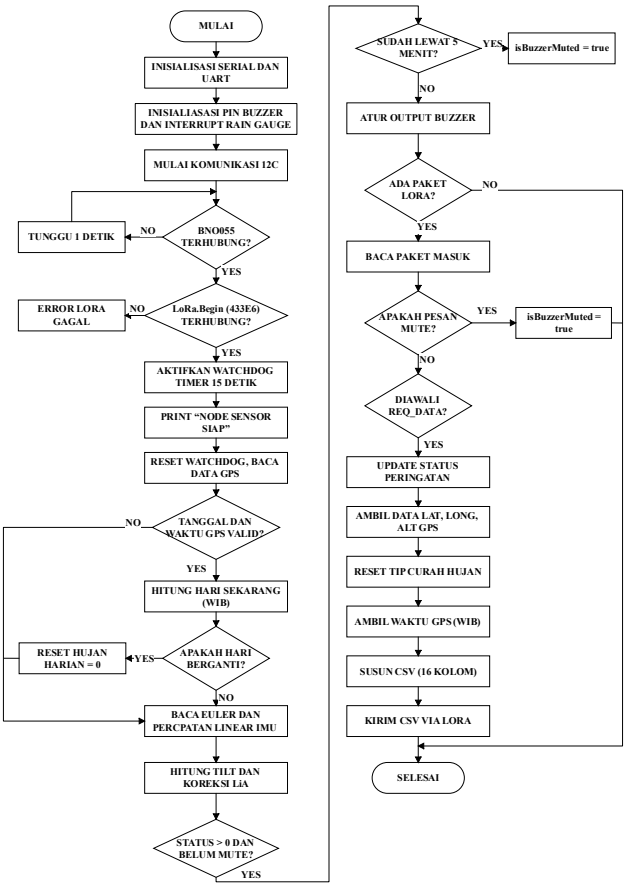
3) Blok Diagram Pengolahan Data



Gambar 5. Diagram Blok Pengolahan Data

Berdasarkan Gambar 5, alur pengolahan data pada PC diawali dari penerimaan data serial yang dialirkan oleh *Sink*. Program Python kemudian membagi data tersebut ke dalam dua jalur proses. Jalur pertama langsung menyimpan data mentah ke dalam berkas CSV sebagai data mentah. Jalur kedua memproses data sensor IMU melalui filter *Moving Average* untuk menghilangkan noise pembacaan sensor. Data IMU yang melalui proses *filter* beserta data curah hujan kemudian dievaluasi menggunakan logika *fuzzy* Mamdani untuk menghasilkan status kerawanan. Seluruh hasil evaluasi akhir dan data koordinat GPS dicatat ke dalam berkas data final, lalu diteruskan menuju *WebSocket Server*. Informasi status tersebut kemudian ditampilkan pada antarmuka peta digital menggunakan pustaka *Leaflet.js*, di mana warna lingkaran radius (*heatmap*) di sekitar penanda lokasi berganti mengikuti tingkat kerawanan yang terdeteksi.

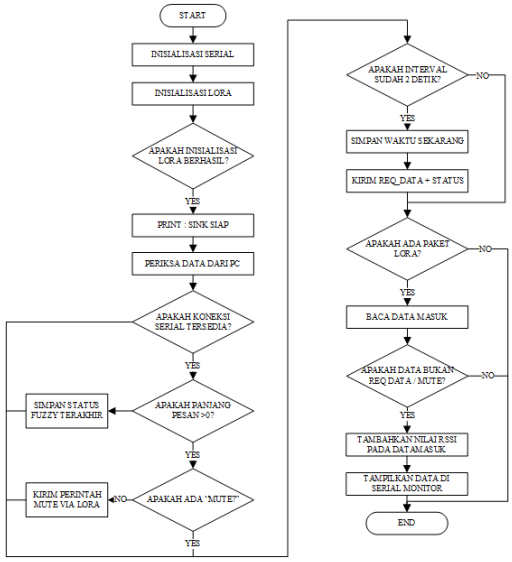
4) Flowchart Node Sensor



Gambar 6. Flowchart Node Sensor

Berdasarkan Flowchart pada Gambar 6, program *Node* diawali dengan inisialisasi komunikasi serial, UART dan pin serta pengaktifan *Watchdog Timer* 15 detik untuk mencegah kegagalan sistem. Program membaca data GPS untuk sinkronisasi ke waktu lokal dan mereset pembacaan hujan harian saat hari berganti. Selanjutnya, data kemiringan dan percepatan linear dari sensor IMU dihitung untuk memperoleh nilai kemiringan total dan resultan percepatan pergeseran tanah. Program lalu mengevaluasi kondisi alarm *buzzer*, termasuk durasi bunyi maksimal selama tiga menit. Proses diakhiri dengan memeriksa paket LoRa yang masuk dari *Sink*. Proses ditutup dengan pengecekan data dari *Sink*. Ketika perintah permintaan data (REQ_DATA) masuk, *Node* merangkum data ke dalam baris CSV dan mengirimkannya kembali ke *Sink*.

5) Flowchart Node Sink



Gambar 7. Flowchart Node Sink

Berdasarkan Gambar 7, program pada unit *Sink* diawali dengan inisialisasi komunikasi serial USB dan modul LoRa. Kemudian, perangkat memeriksa perintah dari PC, ketika terdapat perintah penonaktifan suara (*mute*) atau pembaruan kode status *fuzzy* (0–3), informasi tersebut disimpan sebagai status terakhir. Setiap jeda waktu dua detik, *Sink* memancarkan paket permintaan data (REQ_DATA,<status>) menuju *Node* melalui modul LoRa. Ketika data diterima, data tersebut digabungkan dengan RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), lalu dikirimkan ke PC melalui kabel USB serial untuk diproses lebih lanjut.

C. Perancangan Perangkat Keras

1) Konfigurasi GPIO pada *node* sensor

Tabel 1. Konfgurasi GPIO pada Node Sensor

Komponen	Pin Modul	GPIO
Rain Gauge	Signal Output	14
LoRa SX1278	NSS (CS)	5
LoRa SX1278	SCK	18
LoRa SX1278	MISO	19
LoRa SX1278	MOSI	23
LoRa SX1278	DIO0	2
LoRa SX1278	RST	4
GPS	RX	16
GPS	TX	17
IMU	SDA	21
IMU	SCL	22
Buzzer	Signal/PWM	13

Berdasarkan GPIO pada Tabel 1, ESP32 pada *Node* terhubung ke modul LoRa melalui jalur komunikasi SPI dan Sensor IMU BNO055 melalui komunikasi I2C, sedangkan modul GPS menggunakan jalur komunikasi UART khusus (GPIO 16 dan 17). Sensor curah hujan menggunakan *pin interrupt* pada GPIO 14 untuk menghitung setiap jungkitan (*tipping*) secara langsung, dan *buzzer* dikendalikan melalui sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) pada GPIO 13.

2) Konfigurasi GPIO Node Sink

Tabel 2. Konfigurasi GPIO pada Node Sink

Komponen	Pin Modul	GPIO
LoRa SX1278	NSS (CS)	5
LoRa SX1278	SCK	18
LoRa SX1278	MISO	19
LoRa SX1278	MOSI	23
LoRa SX1278	DIO0	2
LoRa SX1278	RST	4

Berdasarkan Tabel 2, ESP32 terhubung ke modul LoRa menggunakan jalur bus SPI pada GPIO 5, 18, 19, dan 23. Untuk penerimaan data, pin interupsi (DIO0) dialihkan ke GPIO 26 dan pin *reset* (RST) diarahkan ke GPIO 14 untuk mendeteksi paket masuk yang dikirimkan oleh *Node*.

D. Perancangan Perangkat Lunak

Bagian ini menjabarkan perancangan perangkat lunak yang mencakup pengolahan data mentah pada PC, penyaringan data, proses inferensi dengan logika *fuzzy*, dan visualisasi pada antarmuka peta digital.

1) Pemrosesan Data

Pemrosesan dan komputasi data dijalankan pada PC menggunakan program Python yang bertujuan mengurangi beban kerja mikrokontroler. Proses data diawali dengan pembacaan paket kiriman dari *Sink* melalui komunikasi serial USB. Program mengekstrak baris data dan menyimpannya ke dalam berkas CSV sebagai data mentah.

2) Penyaringan Data dengan *Moving Average* Filter

Proses penyaringan data IMU dengan *Moving Average* dijalankan dengan menghitung rata-rata dari lima data pembacaan sebelumnya. Setiap kali data baru dari sensor IMU diterima, nilai sudut kemiringan dan percepatan linear dimasukkan ke dalam daftar penyimpanan data sementara. Program kemudian menghitung nilai rata-rata dari lima data terakhir tersebut. Ketika terdapat data baru, data paling lama akan digantikan secara berurutan. Nilai rata-rata hasil penyaringan ini yang selanjutnya diteruskan sebagai nilai masukan untuk proses inferensi logika *fuzzy*.

3) Proses Inferensi Fuzzy

Perancangan logika *fuzzy* Mamdani bertujuan sebagai sistem pendukung keputusan untuk menentukan status kerawanan secara mandiri. Prosesnya diawali dengan memasukkan tiga variabel data sensor, yaitu curah hujan (lima kelas), sudut kemiringan (lima kelas), dan percepatan linear (tiga kelas). Seluruh parameter tersebut kemudian dievaluasi melalui *Rule Base* 75 aturan dengan logika IF-THEN. Kemudian, metode *Centroid* digunakan untuk menghasilkan nilai tegas yang diklasifikasikan ke dalam empat status: Aman (0), Waspada (1), Siaga (2), dan Awas (3). Kode status keputusan ini pada kemudian dikirimkan kembali ke *Node* melalui modul LoRa bersamaan dengan paket permintaan data (REQ_DATA,<status>) untuk mengatur respons bunyi alarm *buzzer* di lokasi pengamatan.

4) Integrasi Peta Digital berbasis Web

Perancangan antarmuka peta digital bertujuan untuk menampilkan informasi spasial secara dinamis mengenai tingkat kerawanan di lokasi pengamatan, menggantikan metode pemetaan konvensional yang bersifat statis. Proses ini memanfaatkan pustaka *Leaflet.js* dengan latar belakang peta kontur, serta jalur komunikasi *WebSocket* agar pembaruan data dapat diterima langsung tanpa memuat ulang (*reload*) halaman web. Pada tampilan peta, data koordinat dari GPS digunakan sebagai titik penanda (*marker*) yang dikelilingi oleh lingkaran radius (*heatmap*). Warna lingkaran radius tersebut dapat berganti menyesuaikan status keputusan *fuzzy*, yaitu hijau untuk kondisi Aman, kuning untuk Waspada, oranye untuk Siaga, dan merah untuk Awas. Selain peta spasial digital, halaman web juga menampilkan grafik yang memperlihatkan riwayat perubahan data sensor.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem

1) Implementasi Perangkat Keras



Gambar 8. Implementasi sistem deteksi: (a) unit Node (kiri) dan (b) unit Sink (kanan)

Berdasarkan Gambar 8, Sistem perangkat terbagi menjadi dua unit. Pada Gambar 8(a) di sisi kiri, unit *Node* Ketika proses pengambilan data dipasang pada penyangga di lokasi pengamatan dengan Kotak berbahan PVC yang memuat ESP32, GPS, LoRa dan sistem catu daya yang meliputi baterai, *Buck-Boost Converter* dan Regulator AMS1117. Sensor IMU BNO055 ditempatkan secara terpisah di luar kotak utama dan dipasang di atas papan akrilik sebagai penampang agar lebih sensitif terhadap perubahan sudut kemiringan serta percepatan linear tanah. Begitu pula dengan sensor curah hujan yang terpasang diluar kotak utama untuk curag hujan yang masuk.

Pada Gambar 8(b) (sisi kanan), unit *Sink* dirakit dalam wadah terpisah yang memuat mikrokontroler ESP32, modul LoRa SX1278, dan antena penerima. Perangkat ini terhubung langsung ke PC melalui kabel USB serial untuk mentransmisikan data mentah yang diterima secara *wireless*.

2) Implementasi Gateway dan Web Server lokal pada PC

Selain unit *Node* dan *Sink*, perangkat PC berperan sebagai *gateway* sekaligus *web server* lokal yang menjadi bertugas mengolah data. Pemusatan komputasi pada PC bertujuan untuk mengurangi beban kerja mikrokontroler ESP32 di lapangan. Terhubung secara fisik dengan unit *Sink* melalui kabel USB serial, PC menjalankan program Python untuk mengeksekusi empat fungsi utama:

- Penyaringan Data: Meredam fluktuasi pada data pembacaan sensor IMU menggunakan metode *Moving Average*.
- Mesin Inferensi *Fuzzy*: Menghitung kombinasi tiga variabel masukan (kemiringan, curah hujan, dan percepatan linear) untuk menentukan status risiko pergerakan tanah.
- Pencatatan Data (*Data Logger*): Menyimpan seluruh riwayat pembacaan data sensor beserta status keputusan ke dalam berkas CSV secara lokal.
- *Web Server* Lokal: Mendistribusikan data yang telah melalui pemrosesan sebelumnya ke tampilan antarmuka peta digital agar status di lokasi pengamatan dapat diakses melalui *browser*/

B. Pengujian IMU

1) Pengujian Gyroscope

Pengujian komponen Giroskop IMU untuk mengukur sudut kemiringan dilakukan dengan meletakkan sensor IMU di atas papan akrilik yang diubah sudutnya dari 0° hingga 90° dengan interval 10°. Proses pembacaan sudut kemiringan total (*tilt*) sensor dibandingkan dengan Giroskop bawaan *smartphone*, kemudian Selisih penyimpangan kedua instrumen tersebut dirubah menjadi persentase error relatif menggunakan persamaan (4) dibawah.

$$Error = \left|\frac{Nilai\ Sensor - Referensi}{Referensi}\right| \times 100\% \qquad (4)$$

Untuk menetahui hasil pengujian kemiringan dapat dilihat pada pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kemiringan

Referensi (°)	*Pitch* (°)	*Roll* (°)	*Tilt* (°)	*Error* (%)
0	0,19	0,56	0,59	0,0
10	1,44	10,25	10,35	3,5
20	2,75	20,31	20,50	2,5
30	1,62	30,25	30,29	1,0
40	-5,81	40,06	40,48	1,2
50	-1,19	50,88	50,89	1,8
60	-4,56	60,56	60,73	1,2
70	-5,50	70,00	70,22	0,3
80	10,44	79,44	80,12	0,2
90	0,31	89,56	89,56	0,5
Rata-Rata				1,22

Berdasarkan Tabel 3, pembacaan sudut kemiringan menunjukkan hasil yang sangat mendekati instrumen pembanding pada seluruh rentang pengujian. Selisih pembacaan sudut tertinggi tercatat sebesar 0,89° pada sudut referensi 50°, sedangkan persentase error tertinggi tercatat pada sudut 10° sebesar 3,5%. Selisih sudut tertinggi tersebut membuktikan bahwa pembacaan sensor masih berada di dalam rentang toleransi pabrikan sensor BNO055, yakni antara 0,5° hingga 1,0°, dengan rata-rata persentase error keseluruhan berada pada angka 1,22%.

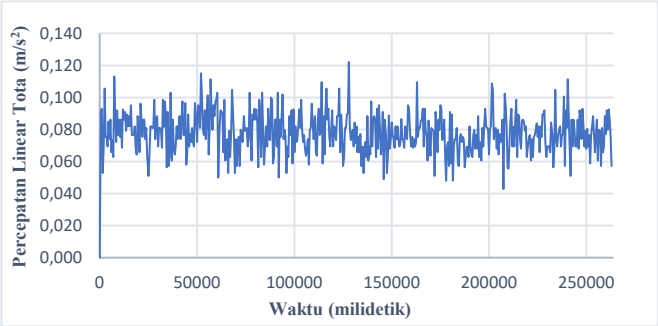
2) Pengujian Accelerometer

Pengujian komponen akselerometer IMU dilakukan dalam kondisi diam mutlak tanpa atau. Pengujian kondisi diam ini dipilih dengan mempertimbangkan keterbatasan instrumen pembanding untuk mengukur percepatan linear secara dinamis di lapangan, sehingga kondisi diam dijadikan sebagai acuan dasar di mana nilai resultan percepatan linear seharusnya berada pada angka 0 m/s². Pengujian dilakukan dengan mengambil 527 sampel data statis untuk mengidentifikasi adanya pergeseran titik nol (*drift*) pada pembacaan sumbu X, Y, Z, dan resultan totalnya.

Untuk melihat rekap seluruh sampel pengujian, diperlihatkan pada Tabel 4 Serta grafik percepatan linear total pada gambar 9.

Tabel 4. Hasil Pengujian Statis Akselerometer

LiA	Min (m/s^2)	Max (m/s^2)	Rata-rata (m/s^2)	
X	0,0000	0,0686	0,0342	0,03
Y	0,0098	0,0883	0,0500	0,05
Z	0,0000	0,0686	0,0460	0,05
Total	0,0427	0,1221	0,0780	0,08



Gambar 9. Grafik percepatan linear total kondisi diam

Berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 9, grafik pembacaan sensor saat kondisi diam terlihat mengambang dan tidak menunjukkan nilai 0 m/s², dengan nilai rata-rata mencapai 0,0780 m/s² yang dibulatkan menjadi 0,08 m/s². Nilai ini telah melampaui batas kelas "Normal" pada sistem *fuzzy* (0–0,02 m/s²), sehingga berpotensi menimbulkan indikasi pergerakan palsu saat kondisi diam.

Untuk mengatasi hal tersebut, diterapkan dua tahapan koreksi:

1. *Mean Centering*: Mengurangkan nilai rata-rata sampel saat diam (0,08 m/s²) pada setiap data pembacaan sensor untuk menggeser titik acuan kembali ke angka nol menggunakan Persamaan (5):

$$L_c = L - \bar{L} \quad (5)$$

Keterangan:

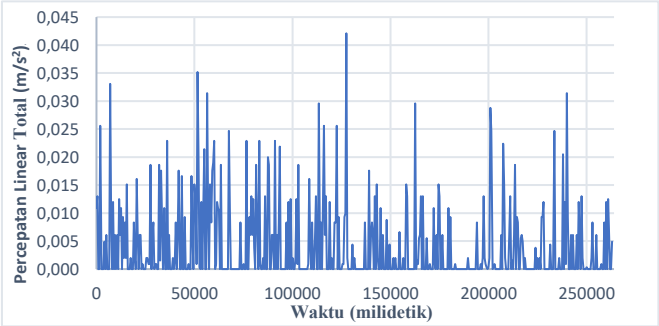
L_c = nilai percepatan setelah mean centering
L = nilai percepatan hasil pembacaan sensor
$\bar{L}$ = nilai rata-rata LiA seluruh sampel

2. *Zero Adjustment*: setelah melalui tahap mean centering, sebagian data akan menghasilkan nilai negatif. Hal ini terjadi ketika data memiliki nilai lebih rendah dari rata-ratanya (< 0,8 m/s^2). Karena percepatan pergeseran tanah tidak mungkin bernilai negatif, maka seluruh hasil perhitungan yang bernilai di bawah nol dijadikan 0.

Untuk mengetahui hasil data percepatan linear setelah melalui dua tahapan sebelumnya, diperlihatkan pada Tabel 5 dan Grafik 10.

Tabel 5. Hasil Pengujian Akselerometer Setelah Koreksi

LiA	Min (m/s^2)	Max (m/s^2)	Rata-rata (m/s^2)	
X	0,0000	0,0386	0,0063	0,006
Y	0,0000	0,0383	0,0046	0,005
Z	0,0000	0,0383	0,0040	0,004
Total	0,0000	0,0421	0,0041	0,004



Gambar 10. Grafik percepatan linear total setelah koreksi

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 10, nilai minimum pada seluruh sumbu menyentuh 0,0000 m/s², yang memperlihatkan bahwa metode *Zero Adjustment* menghilangkan nilai negatif sehingga grafik data menyentuh garis dasar saat kondisi diam. Nilai rata-rata percepatan linear total mengalami penurunan dari sebelumnya 0,0780 m/s² menjadi 0,0041 m/s² yang dibulatkan menjadi 0,004 m/s².Rata-rata ini telah berada di dalam batas ambang kelas "Normal" pada sistem *fuzzy*.

Meskipun nilai rata-rata telah mendekati garis dasar nol, Gambar 10 memperlihatkan masih adanya fluktuasi sesaat (*spike*) dengan nilai maksimum mencapai 0,0421 m/s². yang selanjutnya disaring oleh algoritma *Moving Average* pada PC. Penerapan metode *Mean Centering* dan *Zero Adjustment* ini kemudian difungsikan sebagai tahapan kalibrasi secara *software* pada mikrokontroler ESP32. Nilai rata-rata kondisi diam 0,08 m/s² kemudian digunakan dalam program mikrokontroler sebagai konstanta untuk menjaga kestabilan pembacaan data di lokasi pengamatan.

C. Pengujian Sensor Curah Hujan

1) Kalibrasi Sensor Curah Hujan

Tahapan pertama yang dilakukan pada pengujian Sensor Curah hujan adalah kalibrasi, tahapan ini bertujuan untuk menentukan nilai curah hujan dengan satuan milimeter (mm) per tip atau setiap kali berjungkit.

Sebelum melakukan kalibrasi, dilakukan pengukuran fisik untuk mengukur jari-jari corong yang berbentuk lingkaran, dengan menggunakan rumus luas lingkaran, sesuai dengan persamaan (6).

$$Luas\ Lingkaran = \pi r^2 \quad (6)$$

Keterangan :

π = 3,14
r = Jari-jari lingkaran

Kemudian Dilakukan pengukuran secara manual menggunakan jangka sorong seperti pada gambar 11.



Gambar 11. Pengukuran Jari-Jari Corong Penampang

Berdasarkan Gambar 11, hasil pengukuran menggunakan jangka sorong digital menunjukkan nilai jari-jari corong penampang sebesar 36,0 mm (3,6 cm), nilai tersebut kemudian dimasukkan dalam Persamaan (6), sehingga diperoleh luas penampang corong sebesar 40,69 cm²

Kemudian, tahap pengujian dilanjutkan menggunakan metode penetesan (*dripping*). Pengujian dilakukan dengan menakar air bervolume 120 ml pada gelas ukur, memindahkannya ke dalam botol penetes, dan langsung mengujikannya ke corong sensor. Proses ini diulang sebanyak lima kali hingga mencapai volume air total sebesar 600 ml. Hasil akumulasi dari pengujian penetesan air tersebut ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian dengan 600 ml air

parameter	nilai	satuan
volume uji total	600,00	ml
jumlah tip	383	-

Berdasarkan Tabel 6, pengujian dengan volume total 600 mL menghasilkan 383 kali jungkitan (*tip*). Kemudian, dilakukan pengukuran untuk menentukan nilai volume per tip yang dihitung menggunakan Persamaan (7):

$$Volume_{tip} = \frac{Volume\ Uji}{Jumlah\ Tip} = \frac{600}{383} = 1{,}567\ ml \quad (7)$$

Berdasarkan Persamaan (7), perhitungan untuk menentukan V_{tip} dilakukan dengan membagi volume uji sebanyak 600 ml .degan jumlah tip yang tercatat, sehingga didapatkan hasil volume setiap kali jungkit sebesar 1,567 ml per tip.

Kemudian, nilai volume per tip tersebut dirubah ke dalam satuan tinggi curah hujan (mm) dengan membaginya terhadap luas penampang corong menggunakan Persamaan (8):

$$Curah\ Hujan\ Per\ tip = \frac{Volume\ per\ Tip}{Luas\ Penampang} = \frac{1.567}{40.69} = 0.038\ cm = 0.38\ mm \quad (8)$$

Berdasarkan Persamaan (8) diperoleh nilai curah hujan per tip sebesar 0,38 mm. Nilai tersebut kemudian digunakan sebagai ketetapan dalam program mikrokontroller.

2) Uji Akurasi dan Linearitas Sensor Curah Hujan

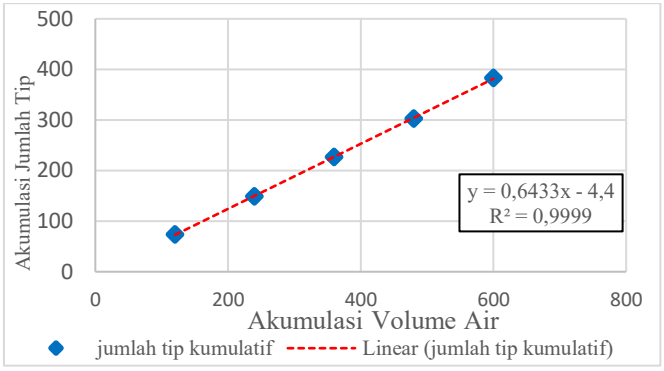
Setelah nilai konstanta kalibrasi 0,38 mm per tip diketahui, selanjutnya dilakukan proses pengujian akurasi dan linearitas yang dilakukan melalui analisis terhadap data lima kali pengulangan penetesan air bervolume 120 ml yang didpatkan dari tahap pengujian sebelumnya. Berdasarkan data tersebut, hasil perhitungan nilai *error* antara volume air yang terukur oleh sensor dibandingkan dengan volume air pada gelas ukur sebagai acuan referensi ditunjukkan pada Tabel X.

Tabel 7. Pengujian Akurasi Pembacaan Sensor Curah Hujan

No	Tip ke	tipping bucket	gelas ukur	Selisih	Error (%)
		mm	ml	ml	
1	74	28,12	115,88	120	4,12	3,43%
2	75	28,50	117,45	120	2,55	2,13%
3	78	29,64	122,15	120	-2,15	1,79%
4	76	28,88	119,02	120	0,98	0,82%
5	80	30,40	125,28	120	-5,28	4,40%
Jumlah		145,54	599,78	600	-	-
Rata-Rata		29,11	119,96	120	-	2,51%

Berdasarkan Tabel 7, proses pengujian dengan volume 120 ml dengan lima kali penuangan menghasilkan pembacaan volume total sebesar 599,78 ml dari referensi volume total 600 ml, dengan nilai rata-rata per pengujian sebesar 119,96 ml. persentase Error pembacaan terendah tercatat pada pengujian ke-4 sebesar 0,82%, sedangkan Error tertinggi berada pada pengujian ke-5 sebesar 4,40%. Secara keseluruhan, pengujian ini mencatatkan nilai error rata-rata sebesar 2,51%.

Untuk mengevaluasi konsistensi respon sensor terhadap penambahan volume air, data akumulasi jumlah jungkitan (*tip*) pada setiap pengulangan dipetakan ke dalam kurva regresi linear yang ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik hubungan regresi linear antara akumulasi volume air dan jumlah tip

Berdasarkan visualisasi grafik regresi linear pada gambar 12, persebaran titik data pengujian membentuk pola garis lurus yang diwakili oleh persamaan regresi linear $y = 0{,}6433x - 4{,}4$, Dimana nilai koefisien determinasi (R^2) yang tercatat mencapai 0,9999. Nilai R^2 yang mendekati 1 ini

membuktikan secara terukur bahwa pembacaan sensor curah hujan berbanding lurus dengan volume air yang diberikan, Hasil nilai tersebut mengonfirmasi bahwa respons pembacaan instrumen bersifat linier dan berbanding lurus dengan setiap penambahan volume air yang masuk.

D. Pengujian Modul GPS GY-NEO6M

Pengujian modul GPS GY-NEO6M dilakukan secara mandiri (*standalone*), di mana mikrokontroler ESP32 hanya terhubung ke GPS saja. Pengujian dilaksanakan pada kondisi ruang terbuka di Desa Tunjungtirto, Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang.

Tahap awal pengujian diawali dengan proses penangkapan sinyal antara modul GPS dan satelit navigasi. Terhubungnya modul GPS dengan satelit dapat ditandai secara visual oleh menyalanya lampu LED indikator pada papan modul, yang menandakan bahwa perangkat telah memasuki mode *FIX* dan data koordinat posisi telah terkunci, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Kondisi Fix Modul GPS

Berdasarkan Gambar 13, setelah memasuki mode *FIX*, kemudian pengujian dan pengambilan data dilakukan dengan merekam sebanyak 1.424 sampel data, dengan 1.405 sampel valid. Rangkuman hasil pengujian parameter operasional modul GPS tersebut disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Modul GPS NEO-6M

Parameter	Nilai Minimum	Nilai Maksimum	Rata-Rata
Time to First Fix	-	-	2 detik
Jumlah Satelit Terhubung	5 satelit	10 satelit	8,6 satelit
HDOP	0,78	6,77	0,96
Lintang	-7,910336°	-7,910138°	-7,910221°
Bujur	112,636749°	112,637177°	112,637009°
Ketinggian	489,2 m	539,0 m	517,35 m

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 8, modul GPS mencatatkan waktu penguncian sinyal awal (TTFF) selama 2 detik dengan jumlah satelit rata-rata sebanyak 8,6 satelit. Nilai HDOP rata-rata tercatat sebesar 0,96, yang berada di dalam kategori "Ideal" (HDOP < 1,0). Sebaran kualitas nilai HDOP dari keseluruhan sampel disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Distribusi Kategori HDOP

Rentang Nilai	Jumlah Sampel	Persentase
HDOP < 1,0	1.116	79,4%
1,0 ≤ HDOP < 2,0	272	19,4%
2,0 ≤ HDOP < 5,0	12	0,9%
HDOP ≥ 5,0	3	0,2%

Berdasarkan Tabel 9, data sebanyak 79,4% berada pada kategori Ideal dan hanya 0,2% yang berada pada kategori Buruk. Selama pengujian, pergeseran koordinat maksimum tercatat sebesar 0,000198° pada garis lintang dan 0,000428° pada garis bujur. Selisih pergeseran koordinat ini merupakan karakteristik fluktuasi posisi tipikal dari modul GPS tanpa sistem koreksi diferensial (DGPS).

E. Pengujian Komunikasi LoRa

Pengujian komunikasi LoRa SX1278 pada frekuensi 433 MHz dilakukan untuk mengevaluasi kemampuannya dalam proses transmisi data secara *wireless* pada jarak dan kondisi tutupan lahan yang bervariasi, pengujian dilaksanakan di lingkungan Kampus II Institut Teknologi Nasional Malang. Pengujian dilakukan pada lima titik jarak pengamatan, yaitu 0 m, 50 m, 100 m, 150 m, dan 200 m dari stasiun pengirim (*Node*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Titik pengujian LoRa

Berdasarkan Gambar 14, pengujian yang dilakukan pada jarak 0 hingga 150 m berada dalam kondisi ruang terbuka tanpa halangan pandang (*Line of Sight* / LoS), sedangkan pada jarak 200 m kondisi komunikasi sudah terhalang oleh vegetasi pepohonan dan bangunan gedung (*Non-Line of Sight* / NLoS). Pengujian dilakukan dengan mengirimkan sebanyak 10 paket data untuk mengevaluasi persentase *success rate* paket yang diterima dan nilai kekuatan sinyal (*Received Signal Strength Indicator* / RSSI). Rangkuman hasil pengujian komunikasi LoRa disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Rangkuman Pengujian Jarak Komunikasi LoRa

Jarak (m)	Kondisi Lingkungan	Paket Dikirim	Paket Diterima	*Success Rate* (%)	RSSI Rata-Rata (dBm)
0	LoS	10	10	100	-17,00
50	LoS	10	10	100	-79,10
100	LoS	10	9	90	-79,44
150	LoS	10	6	60	-80,67
200	NLoS	10	4	40	-89,50

Berdasarkan Tabel 10, pada kondisi LoS transmisi data mempertahankan *success rate* di atas 90% hingga jarak 100 meter dengan nilai RSSI yang stabil di kisaran -79 dBm. Penurunan drastis terjadi pada jarak 200 meter dalam kondisi NLoS, di mana *success rate* turun menjadi 40% dan rata-rata nilai RSSI melemah hingga -89,50 dBm rimbunan pohon dan struktur bangunan gedung. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa seiring bertambahnya jarak, kualitas sinyal mengalami penurunan yang ditandai oleh melemahnya nilai RSSI dan berkurangnya persentase *success rate* paket data yang diterima oleh *Sink*.

F. Analisis Pengujian Moving Average

Bagian ini memaparkan Analisa terhadap penerapan algoritma *Moving Average* (MA) dengan menggunakan lima sampel data sebelumnya yang dijalankan pada PC, analisis

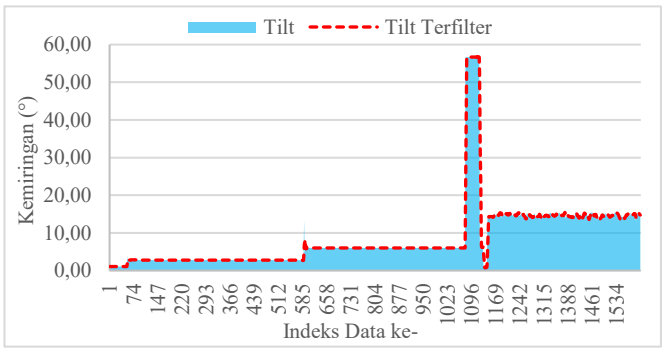
bertujuan untuk memperhalus fluktuasi acak dan meredam lonjakan sesaat (*spike*) pada data sensor IMU sebelum diolah oleh logika *fuzzy*. Evaluasi kinerja filter dilakukan menggunakan 1.606 sampel data dinamis yang merekam perubahan posisi sensor secara acak.

1) Analisis Moving Average pada Kemiringan

Pengujian dilakukan dengan mengubah sudut penampang sensor secara acak untuk mensimulasikan perubahan kemiringan permukaan lahan. Perbandingan data pembacaan sudut kemiringan sebelum dan sesudah difilter menggunakan filter MA disajikan pada Tabel 11, dengan bentuk sebaran kurva keseluruhannya ditunjukkan pada Gambar 15.

Tabel 11. Perbandingan Data Kemiringan (1606 sampel)

Kondisi Data Kemiringan	Max (°)	Min (°)	Rata-rata (°)
Sebelum Terfilter	56,68	0,57	8,62
Setelah Terfilter	56,68	0,76	8,60



Gambar 15. Grafik perbandingan keseluruhan data percepatan linear sebelum dan sesudah filter MA (1.606 sampel)

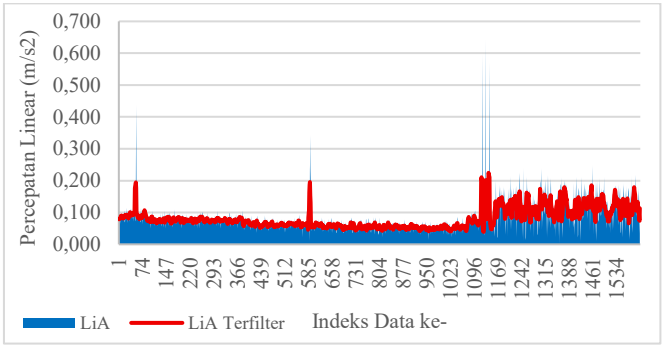
Berdasarkan Tabel 11 dan Gambar 15, seluruh pergerakan data ditampilkan menggunakan kombinasi grafik area berwarna biru (data mentah) dan garis putus-putus merah (hasil filter MA). Garis putus-putus merah terlihat menempel dan mengikuti batas tepi kurva data mentah tanpa perubahan bentuk yang signifikan. Nilai puncak kemiringan tetap di angka 56,68° tanpa terpotong oleh filter, sementara nilai rata-rata keseluruhan konstan di angka 8,60° dari sebelumnya 8,62°. Kenaikan kecil pada nilai minimum dari 0,57° menjadi 0,76° merupakan hasil perataan lima sampel data sebelumnya.

2) Pengujian Moving Average pada Percepatan Linear

Pengujian percepatan linear dilakukan untuk mengevaluasi respon filter terhadap gaya inersia ketika sensor digerakkan. Perbandingan parameter percepatan linear sebelum dan sesudah disaring menggunakan filter MA disajikan pada Tabel 12, dengan bentuk sebaran kurva keseluruhannya ditunjukkan pada Gambar 16.

Tabel 12. Perbandingan data percepatan Linear (1606 Sampel)

Kondisi Data Percepatan	Max (m/s²)	Min (m/s²)	Rata-rata (m/s²)
Sebelum Terfilter	0,6386	0,0000	0,0814
Setelah Terfilter	0,2245	0,0390	0,0814



Gambar 16. Grafik Perbandingan Keseluruhan Data Percepatan Linear Sebelum dan Sesudah Filter MA

Berdasarkan Tabel 12 dan Gambar 16, nilai minimum yang terbaca sebelum difilter MA menunjukkan angka 0,0000 m/s², sementara nilai percepatan maksimum berada di angka 0,6386 m/s². Setelah difilter MA, lonjakan nilai maksimum tersebut mengalami penurunan sebesar 0,4141 m/s² menjadi 0,2245 m/s² atau turun sekitar 64,8%, yang terlihat dari teredamnya puncak grafik area berwarna biru oleh garis merah. Sementara itu, nilai rata-rata keseluruhan tetap konstan di angka 0,0814 m/s², sedangkan nilai minimum mengalami kenaikan dari 0,0000 m/s² menjadi 0,0390 m/s² akibat perhitungan rata-rata dari lima sampel data sebelumnya. Pemotongan lonjakan ekstrem ini mengonfirmasi bahwa filter MA berfungsi meredam sentakan mekanis sesaat guna mencegah pemicuan peringatan palsu pada sistem logika *fuzzy*.

G. Implementasi Logika Fuzzy Mamdani

1) Fuzzification dan Nilai Linguistik

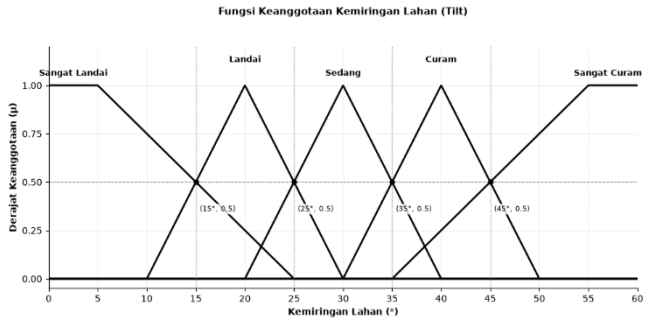
Penetapan batasan himpunan keanggotaan mengacu pada standar BMKG untuk curah hujan [2], klasifikasi Anbalagan (1992) untuk kemiringan lahan [24], serta batasan percepatan linear oleh Widodo et al. [25]. Rincian kelas dan rentang nilai linguistik untuk ketiga variabel input disajikan pada Tabel 13.

Tabel 13. Nilai Linguistik Variabel Input Sistem Fuzzy

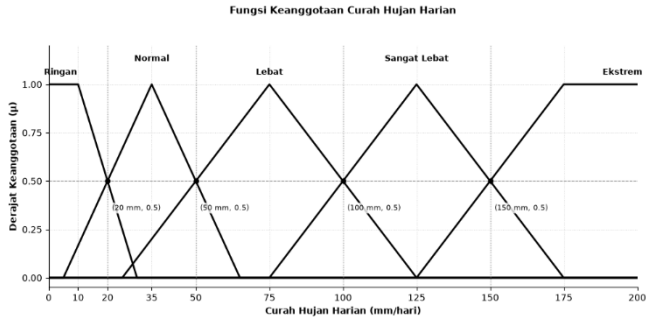
Variabel	Rentang Nilai	Kelas Linguistik
Curah Hujan Harian	0 – 20 mm/hari	Ringan (R1)
	20 – 50 mm/hari	Normal (R2)
	50 – 100 mm/hari	Lebat (R3)
	100 – 150 mm/hari	Sangat Lebat (R4)
	> 150 mm/hari	Ekstrem (R5)
Kemiringan Lahan (*Tilt*)	0 – 15°	Sangat Landai (T1)
	15 – 25°	Landai (T2)
	25 – 35°	Sedang (T3)
	35 – 45°	Curam (T4)
	> 45°	Sangat Curam (T5)
Percepatan Linear	0 – 0,02 m/s²	Normal (L1)
	0,02 – 0,10 m/s²	Sedang (L2)
	> 0,10 m/s²	Tinggi (L3)

Berdasarkan rentang pada Tabel 13, fungsi keanggotaan dibentuk menggunakan kombinasi kurva trapesium dan segitiga dengan titik perpotongan derajat keanggotaan (μ) pada nilai 0,5 antarhimpunan untuk menjaga kesinambungan transisi nilai. Representasi grafis fungsi keanggotaan kemiringan lahan ditunjukkan pada Gambar 17, curah hujan

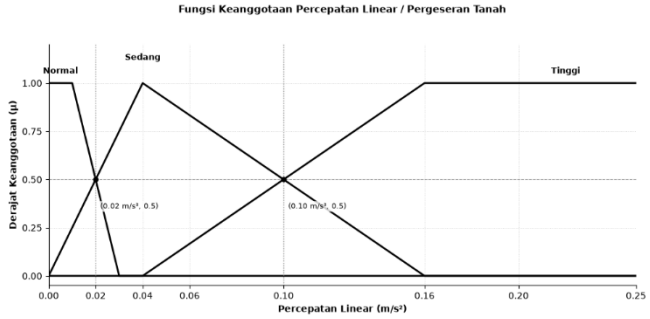
harian pada Gambar 18, dan percepatan linear pada Gambar 19.



Gambar 17. Kurva fungsi keanggotaan kemiringan lahan



Gambar 18. Kurva fungsi keanggotaan curah hujan harian



Gambar 19. Kurva fungsi keanggotaan percepatan linear

2) Evaluasi Rule Base

Sistem menerapkan *rule base* yang dibangun dari kombinasi 5 kelas curah hujan (R), 5 kelas kemiringan (T), dan 3 kelas percepatan linear (L), menghasilkan total 75 aturan penalaran logika IF-THEN. Karena percepatan linear bertindak sebagai validator utama, seluruh matriks keputusan dipisahkan berdasarkan kelas percepatan linear, sebagaimana disajikan pada Tabel 14, Tabel 15, dan Tabel 16.

Tabel 14. Rule Base Dengan Percepatan Linear Normal

R \ T	T1	T2	T3	T4	T5
R1	AMAN	AMAN	AMAN	AMAN	WASPADA
R2	AMAN	AMAN	AMAN	WASPADA	WASPADA
R3	AMAN	AMAN	WASPADA	WASPADA	SIAGA
R4	AMAN	WASPADA	WASPADA	SIAGA	SIAGA
R5	WASPADA	WASPADA	SIAGA	SIAGA	AWAS

Tabel 15. Rule Base Dengan Percepatan Linear Sedang

R \ T	T1	T2	T3	T4	T5
R1	AMAN	AMAN	WASPADA	WASPADA	SIAGA
R2	AMAN	WASPADA	WASPADA	SIAGA	SIAGA
R3	WASPADA	WASPADA	SIAGA	SIAGA	AWAS
R4	WASPADA	SIAGA	SIAGA	AWAS	AWAS
R5	SIAGA	SIAGA	AWAS	AWAS	AWAS

Tabel 16. Rule Base Dengan Percepatan Linear Tinggi

R \ T	T1	T2	T3	T4	T5
R1	AWAS	AWAS	AWAS	AWAS	AWAS
R2	AWAS	AWAS	AWAS	AWAS	AWAS
R3	AWAS	AWAS	AWAS	AWAS	AWAS
R4	AWAS	AWAS	AWAS	AWAS	AWAS
R5	AWAS	AWAS	AWAS	AWAS	AWAS

3) Defuzzification dan Validasi Skenario

tahap *defuzzification* menggunakan metode *Centroid* untuk mengubah luasan himpunan menjadi nilai skalar *crisp output* pada rentang 0 hingga 100. Nilai keluaran ini dipetakan ke dalam empat status: AMAN ($0 \leq x \leq 25$), WASPADA ($25 < x \leq 55$), SIAGA ($55 < x \leq 85$), dan AWAS ($x > 85$).

Pengujian validasi sistem dilakukan melalui metode *Black Box* menggunakan empat skenario kombinasi masukan yang mewakili variasi kondisi fisik di lapangan. Hasil pengujian skenario disajikan pada Tabel 17.

Tabel 17. Skenario Pengujian Validasi Logika Fuzzy

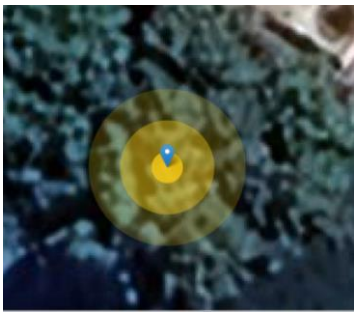
Skenario	R (mm)	T (°)	L (m/s²)	Skor Output	Status
1	0	10	0,01	12,4	AMAN
2	80	30	0,01	38,7	WASPADA
3	160	40	0,05	71,2	SIAGA
4	10	20	0,20	91,5	AWAS

Berdasarkan Tabel 17, sistem menghasilkan keputusan yang konsisten mengikuti dinamika fisis pergerakan tanah. Pada Skenario 1 dengan seluruh parameter berada di kelas terendah, dihasilkan skor 12,4 (status AMAN). Pada Skenario 2, meskipun curah hujan tergolong lebat ($R = 80$ mm) dan kemiringan berada pada kelas sedang ($T = 30°$), status keputusan berada pada level WASPADA (skor 38,7) karena percepatan linear tetap berada pada kondisi normal ($0{,}01$ m/s^2).

Sebaliknya, pada Skenario 4, meskipun curah hujan tercatat ringan ($R = 10$ mm) dan lereng tergolong landai ($T = 20°$), lonjakan percepatan linear ke angka $0{,}20$ m/s^2 (kelas Tinggi) mendorong skor *output* ke angka 91,5 (status AWAS). Kondisi ini mengonfirmasi bahwa variabel percepatan linear sebagai validator utama memberikan kontribusi bobot yang dominan terhadap penetapan status bahaya pada sistem.

H. Implementasi Peta Digital

Tahap akhir dari realisasi sistem adalah implementasi antarmuka peta digital berbasis web untuk menampilkan informasi spasial potensi longsor di titik penempatan sensor secara dinamis. Antarmuka ini dikembangkan menggunakan library *Leaflet.js* dengan memanfaatkan data koordinat geografis dari modul GPS pada *Node* untuk memproyeksikan titik penanda (*marker*) di atas peta dasar kontur. Seluruh data hasil komputasi PC dialirkan menuju peramban web menggunakan protokol *WebSocket*, sehingga pembaruan data dan status dapat ditampilkan secara berkesinambungan tanpa memerlukan proses pemuatan ulang (*reload*) halaman. Tampilan antarmuka peta digital ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 20. Visualiasi Heatmap Circle yang menampilkan warna kuning (WASPADA)

Berdasarkan Gambar 20, titik penanda lokasi pengamatan dikelilingi lingkaran radius (*heatmap circle*) yang warnanya berganti secara dinamis mengikuti status keputusan *fuzzy*: hijau untuk kondisi Aman, kuning untuk Waspada, oranye untuk Siaga, dan merah untuk Awas. Memilih penanda lokasi akan memunculkan jendela informasi (*popup*) berisi telemetri sudut kemiringan, curah hujan, percepatan linear, skor risiko, dan stempel waktu, yang dilengkapi grafik riwayat fluktuasi skor. Integrasi keseluruhan sistem ini membuktikan keterpaduan antara penyaringan filter *Moving Average*, inferensi logika *fuzzy* dengan percepatan linear sebagai validator utama penekan peringatan palsu, serta visualisasi spasial dinamis berbasis *WebGIS* yang menggantikan pemetaan konvensional statis.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka diperoleh Kesimpulan sebagai berikut:

1. Pembacaan sudut kemiringan lahan menggunakan sensor *Gyroscope* pada rentang pengujian 0° hingga 90° dengan perbandingan referensi gyroscope pada telepon seluler, didapatkan error relatif rata-rata sebesar 1,22%.
2. Proses *Mean Centering* dan *Zero Adjustment* pada saat pengujian percepatan secara statis mampu menurunkan percepatan semu sebesar 0,08 m/s² yang terdeteksi rata-rata menjadi 0,004 m/s².
3. pengujian akurasi sensor curah hujan mencatatkan persentase *error* volume rata-rata sebesar 2,51%, serta grafik yang kurvanya berbanding lurus terhadap penambahan volume air.
4. Pengujian modul GPS didapatkan data HDOP <1 sebanyak 79,4% dari data keseluruhan yang mengindikasikan Tingkat presisi yang ideal.
5. Pengujian Komunikasi modul LoRa SX1278 mencatatkan penurunan kekuatan sinyal seiring bertambahnya jarak, *success rate* 100% pada jarak <50 meter yang terus menurun hingga 40% pada jarak 200 meter.
6. Implementasi algoritma *Moving Average* dengan jumlah 5 sampel historis mereduksi lonjakan data ekstrem (*spike*).

Saran

1. Agar bisa lebih berdaya guna maka perlu dikembangkan *mechanical* platform yang bisa mendeteksi area yang lebih luas.
2. Tampilan agar bisa mendukung EWS maka perlu dikembangkan peta digital yang bisa diakses melalui HP dan perangkat elektronik lainnya.
3. Perlu dipertimbangkan sensor-sensor yang bisa mendukung deteksi tanah longsor.

PERNYATAAN

Pernyataan Penggunaan Kecerdasan Artifisial

Dalam proses penyusunan artikel ini, penulis menggunakan Gemini AI yang diterapkan secara terbatas, dalam aspek program untuk membantu dalam perbaikan dalam Error, Kegagalan atau *Debugging* pada program. untuk aspek krusial yang meliputi alur kerja program, penulisan dan tata Bahasa penulis menentukan secara mandiri dibawah pengarahan dan pengawasan dosen pembimbing.

Kontribusi Penulis

Penulis bertanggung jawab atas seluruh tahapan penelitian, meliputi perumusan masalah, metodologi, perancangan serta implementasi seluruh alat terkait penelitian ini, pengumpulan data, pengolahan data, analisis dan hingga hasil, hingga penyusunan dan penyuntingan artikel.

Pendanaan

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan dari pihak eksternal.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan yang berkaitan dengan penelitian dan publikasi artikel ini.

VI. DAFTAR PUSTAKA

[1] L.A. Tasiyah, R. Sutriono, and I.P. Silawibawa, “Journal of Soil Quality and Management,” *Journal of Soil Quality and Management*, vol. 3, no. 1, pp. 67–72, Mar. 2024, doi: 10.29303/jsqm.v3i1.169.

[2] K. dan G. (BMKG) Badan Meteorologi, “CATATAN IKLIM DAN KUALITAS UDARA INDONESIA 2024,” 2024. Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: https://iklim.bmkg.go.id/bmkgadmin/storage/buletin/Catatan%20Iklim%20dan%20Kualitas%20Udara%202024%20BMKG.pdf

[3] R. Agusman, N. Hanca Hayana, and D. D. Stiano, “Pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk pemetaan tingkat rawan longsor menggunakan metode

skoring dan overlay di Kabupaten Serang, Banten," *Jurnal Sains Geografi*, vol. 1, no. 2, 2023, doi: 10.21009/jsg.v1i2.54950.

[4] A. Setyawan, J. E. Suseno, R. D. Winesthi, and S. A. Otaviana, "Peringatan Dini Tanah Longsor Berdasarkan Kelembaban Tanah Secara Jarak Jauh Menggunakan Sensor FC-28 dan Node MCU," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 18, no. 2, pp. 242–246, Aug. 2020, doi: 10.14710/jil.18.2.242-246.

[5] P. Nika Fitriani, K. Dwi Lestari, and H. Dika Pratama, "RANCANG BANGUN PROTOTIPE DETEKSI DINI TANAH LONGSOR BERBASIS DOUBLE SENSOR," *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, vol. 8, no. 2, pp. 50–58, 2019, doi: https://doi.org/10.26740/ifi.v8n2.p%25p.

[6] Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), "Data Bencana Indonesia 2024," Jakarta, 2024. Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: https://bnpb.go.id/storage/app/media/Buletin%20Info%20Bencana/Buku%20Data%20Bencana%202024/20250613_Buku%20Data%202024.pdf

[7] K. Ardi Widodo and B. Romadhon Parada Dian Palevi, "Analisis Kinerja Jaringan LoRa pada Sistem Mitigasi Tanah Longsor di Wilayah Malang Raya," *SISTEMASI : Jurnal Sistem Informasi*, vol. 13, no. 2, pp. 447–457, Feb. 2024, doi: 10.32520/stmsi.v13i2.3896.

[8] P. Giri, K. Ng, and W. Phillips, "Wireless Sensor Network System for Landslide Monitoring and Warning," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 4, pp. 1210–1220, Apr. 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2861999.

[9] P. Giri, K. Ng, and W. Phillips, "Monitoring Soil Slide-Flow Using Wireless Sensor Network-Inertial Measurement Unit System," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 40, no. 1, pp. 367–381, Jan. 2022, doi: 10.1007/s10706-021-01905-w.

[10] P. Giri, K. Ng, and W. Phillips, "Laboratory simulation to understand translational soil slides and establish movement criteria using wireless IMU sensors," *Landslides*, vol. 15, no. 12, pp. 2437–2447, Dec. 2018, doi: 10.1007/s10346-018-1055-4.

[11] A. Ghio, S. Escalante, and J. Tarrillo, "Analysis of Moving Average Filter for IMU Measurements on an 8-bit Microcontroller," in *Proceedings of the 2018 IEEE 25th International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing, INTERCON 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2018. doi: 10.1109/INTERCON.2018.8526391.

[12] A. Bhawiyuga, "Data Collision Avoidance based on TDMA in LoRa Wireless Sensor Networks," 2024. [Online]. Available: www.jitecs.ub.ac.id

[13] T. Ngo *et al.*, "TDMA-Based LoRa IoT Architecture with FreeRTOS for Real-Time Multi-Node Bridge Structural Health Monitoring," *Sensors*, vol. 26, no. 14, p. 4381, Jul. 2026, doi: 10.3390/s26144381.

[14] Y. A. Pratama, M. Ardita, and K. A. Widodo, "Perancangan Sistem Komunikasi Lora untuk Deteksi Dini Tanah Longsor," *Seminar Nasional 2022 METAVERSE: Peluang Dan Tantangan Pendidikan Tinggi Di Era Industri 5.0*, vol. 6, no. 3, pp. 699–705, Jul. 2022, doi: 10.36040/seniati.v6i3.5004.

[15] R. M. Dinata, A. Ariman, and M. I. Yamin, "SISTEM DETEKSI GEMPA BERBASIS IOT DENGAN VISUALISASI REAL-TIME DAN NOTIFIKASI CERDAS," *INTI Nusa Mandiri*, vol. 19, no. 2, pp. 288–294, Feb. 2025, doi: 10.33480/inti.v19i2.6394.

[16] B. Ahmed *et al.*, "Developing a dynamic web-GIS based landslide early warning system for the Chittagong metropolitan area, Bangladesh," *ISPRS Int. J. Geoinf.*, vol. 7, no. 12, Dec. 2018, doi: 10.3390/ijgi7120485.

[17] M. Daud, F. M. Ugliotti, and A. Osello, "Comprehensive Analysis of the Use of Web-GIS for Natural Hazard Management: A Systematic Review," May 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su16104238.

[18] G. Maniatis, "On the use of IMU (inertial measurement unit) sensors in geomorphology," *Earth Surf. Process. Landf.*, vol. 46, no. 11, pp. 2136–2140, Sep. 2021, doi: 10.1002/esp.5197.

[19] C. Jing, G. Huang, Q. Zhang, X. Li, Z. Bai, and Y. Du, "GNSS/Accelerometer Adaptive Coupled Landslide Deformation Monitoring Technology," *Remote Sens. (Basel).*, vol. 14, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/rs14153537.

[20] P. Thavitchasri, D. Maneetham, and P. N. Crisnapati, "Intelligent Surface Recognition for Autonomous Tractors Using Ensemble Learning with BNO055 IMU Sensor Data," *Agriculture (Switzerland)*, vol. 14, no. 9, Sep. 2024, doi: 10.3390/agriculture14091557.

[21] M. Kok, J. D. Hol, and T. B. Schön, "Using inertial sensors for position and orientation estimation," 2017, *Now Publishers Inc*. doi: 10.1561/2000000094.

[22] O. F. Al-Thuwaynee *et al.*, "DEWS: A QGIS tool pack for the automatic selection of reference rain gauges for landslide-triggering rainfall thresholds," *Environmental Modelling and Software*, vol. 162, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.envsoft.2023.105657.

[23] R. Krüger, P. Karrasch, and A. Eltner, "Calibrating low-cost rain gauge sensors for their applications in Internet of Things (IoT) infrastructures to densify environmental monitoring networks," *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 163–176, Jun. 2024, doi: 10.5194/gi-13-163-2024.

[24] R. Anbalagan, "Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain," *Eng. Geol.*, vol. 32, pp. 269–277, Jan. 1992.

[25] A. W. Widodo, M. Susanto, and F. A. Setyawan, "Landslide Monitoring and Warning System Based on Wireless Sensor Network," *ELKHA : Jurnal Teknik Elektro*, vol. 16, no. 2, pp. 116–122, Oct. 2024.