



Pengembangan purwarupa sistem peringatan dini longsor berbasis *Internet of Things* (IoT)

Asep Andang^{1*}, Eka Wahyu Hidayat², Andhy Romdani³, Prama Permana⁴, Andre Taufik Firdaus⁵, Miftahul Huda Pratama⁶, Elpan Ahmad Rifansyah⁷

^{1,5,6,7}Jurusan Teknik Elektro, Universitas Siliwangi

²Jurusan Informatika, Universitas Siliwangi

³Jurusan Teknik Sipil, Universitas Siliwangi

⁴Jurusan Manajemen, Universitas Siliwangi

Jl. Siliwangi No. 24 Tasikmalaya, Jawa Barat, Indonesia

^{1*}andhangs@unsil.ac.id, ²ekawahyu@unsil.ac.id, ³andhyromdani@unsil.ac.id, ⁴pramapermana@unsil.ac.id,

⁵andretaufikfirdaus@gmail.com, ⁶miftahulhudapratama11@gmail.com, ⁷elfanahmadr@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia yang terletak di sepanjang cincin api Pasifik, menghadapi risiko yang signifikan dari aktivitas gunung berapi dan seismik. Isu *megathrust* di Indonesia telah menimbulkan kekhawatiran karena periode ketidakaktifan seismik yang lama, yang dikenal sebagai *seismic gap*, yang berpotensi menimbulkan gempa bumi dan tsunami yang besar. Mitigasi bencana tanah longsor menjadi sangat penting, mengingat frekuensi dan dampak tanah longsor yang semakin meningkat. Pengembangan dan implementasi sistem peringatan dini (EWS) berbasis *node* sensor gerakan tanah merupakan langkah penting dalam mengurangi risiko longsor. *Node* sensor ini mendeteksi perubahan kemiringan tanah dengan menggunakan sensor GY-91 MPU9250+BMP280 10DOF 9-axis yang merupakan gabungan *single chip* MPU-9250 dengan 3 *axis gyro*, 3 *axis accelerometer*, suhu, kelembaban tanah, dan percepatan secara real-time, sehingga memungkinkan prediksi dan peringatan dini yang akurat. Dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) data dari *node* sensor ini dikirim ke *gateway* yang akan terhubung ke *server*. Data di *server* ini kemudian dapat diakses dimana pun. Selain memberikan peringatan dini, alat ini juga memberikan gambaran parameter kondisi lapangan secara *real time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor kelembaban tanah memiliki akurasi yang baik dengan galat maksimum 3,85% pada rentang 20-55% kelembaban. Akselerometer efektif mendeteksi perubahan kemiringan 30, 45, 60, dan 75 derajat. *Gyroscope* mengukur kecepatan sudut dalam rad/s pada 3 sumbu. Sistem juga berhasil mengirimkan data ke *server* dan menampilkannya secara *real-time* melalui *website*.

Kata kunci: pergeseran tanah, IoT, *node* sensor, akselerometer, *gateway*

ABSTRACT

Indonesia, located along the Pacific ring of fire, faces significant risks from volcanic and seismic activity. The *megathrust* issue in Indonesia has raised concerns due to prolonged seismic inactivity, known as a *seismic gap*, which has the potential to trigger large earthquakes and tsunamis. Landslide disaster mitigation is crucial, given the increasing frequency and impact of landslides. The development and implementation of an early warning system (EWS) based on ground movement sensor nodes are essential steps in reducing landslide risks. These sensor nodes detect changes in land inclination using the GY-91 MPU9250+BMP280 10DOF 9-axis, which integrates an MPU-9250 single-chip with a 3-axis Gyro, 3-axis Accelerometer, temperature, soil moisture, and acceleration in real-time, enabling accurate predictions and early warnings. With IoT technology, data from these sensor nodes are transmitted to a gateway connected to a server, where the data can be accessed from anywhere. In addition to providing early warnings, this system also offers real-time field condition parameters. Test results show that the soil moisture sensor has good accuracy, with a maximum error of 3.85% within a 20-55% moisture range. The accelerometer effectively detects inclination changes of 30, 45, 60, and 75 degrees. The gyroscope measures angular velocity in rad/s along three axes. The system successfully transmits data to the server and displays it in real-time via a website.

Keywords: landslide, IoT, sensor node, accelerometer, gateway

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang terletak di sepanjang cincin api Pasifik (*ring of fire*) [1], yang dikenal sebagai salah satu wilayah dengan konsentrasi gunung berapi aktif tertinggi di dunia. Dengan lebih dari 130 gunung berapi yang tercatat aktif, Indonesia menghadapi risiko tinggi terhadap aktivitas vulkanik dan seismik [2]. Letusan gunung berapi seperti Merapi, Sinabung, dan Anak Krakatau sering terjadi dan memiliki dampak signifikan terhadap masyarakat, ekonomi, serta lingkungan sekitar [3]. Cincin api Pasifik, yang melingkupi sebagian besar wilayah Samudra Pasifik termasuk Indonesia, merupakan zona subduksi di mana lempeng tektonik bertemu dan salah satu lempeng menyelam di bawah lempeng lainnya. Proses ini menyebabkan tekanan dan deformasi batuan yang memicu aktivitas vulkanik dan gempa bumi [4]. Para ahli geologi mencatat bahwa zona subduksi di sepanjang lempeng tektonik yang melintasi Indonesia, khususnya di daerah Sumatra dan Jawa, telah mengalami ketidakaktifan selama beberapa abad. Kondisi ini menimbulkan kekhawatiran bahwa energi yang terkumpul di zona subduksi ini bisa dilepaskan dalam bentuk gempa bumi besar atau *megathrust*, yang berpotensi memicu tsunami besar di wilayah pesisir [5].

Mitigasi bencana pergerakan tanah menjadi krusial mengingat meningkatnya frekuensi dan dampak longsor di berbagai wilayah di Indonesia. Salah satu langkah penting adalah sosialisasi kepada masyarakat yang tinggal di daerah rawan longsor. Edukasi tentang tanda-tanda awal pergerakan tanah, tindakan yang harus dilakukan saat terjadi longsor, serta pentingnya menjaga lingkungan sekitar agar tidak memperburuk risiko, dapat menyelamatkan banyak nyawa [6]. Penelitian oleh Hasrul [7] dan Hidayat [8] menunjukkan bahwa program edukasi dan partisipasi masyarakat dalam mitigasi bencana secara signifikan mengurangi risiko korban jiwa saat terjadi bencana. Di samping sosialisasi, pengembangan dan implementasi sistem peringatan dini (*early warning system/EWS*) mengenai pergerakan tanah juga sangat penting. Teknologi ini mampu mendeteksi perubahan kecil pada kemiringan atau pergerakan tanah, memberikan peringatan kepada masyarakat sebelum bencana terjadi. Studi oleh Rachmawardani menemukan bahwa sistem peringatan dini yang dikombinasikan dengan pemantauan *real-time* dan analisis data berbasis *machine learning* dapat meningkatkan keakuratan prediksi dan waktu respons terhadap bencana banjir dan tanah longsor [9]–[11]. Pembuatan EWS berbasis node sensor pergerakan tanah merupakan langkah penting dalam mitigasi risiko bencana longsor. Node sensor ini terdiri dari alat yang dapat mendeteksi perubahan kemiringan tanah, kelembaban tanah, serta percepatan gerakan tanah secara *real-time*. Data yang dikumpulkan dari node sensor kemudian dikirim ke pusat pemantauan untuk dianalisis, memungkinkan prediksi yang lebih akurat dan peringatan dini sebelum terjadi longsor. Penelitian oleh Liu [12] menunjukkan bahwa penggunaan jaringan sensor yang tersebar di berbagai titik rawan longsor dapat meningkatkan sensitivitas dan keandalan sistem peringatan dini, mengurangi risiko bencana secara signifikan. Menurut Ashwini [13] penggunaan sensor berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk memantau kondisi tanah secara kontinu mampu memberikan peringatan dini yang lebih cepat dan akurat, sehingga memungkinkan evakuasi dan langkah mitigasi lebih dini. Selain itu, integrasi antara node sensor dengan teknologi komunikasi modern memungkinkan penyebaran informasi yang cepat dan efisien kepada masyarakat dan pihak berwenang, mengoptimalkan respons terhadap ancaman longsor [14].

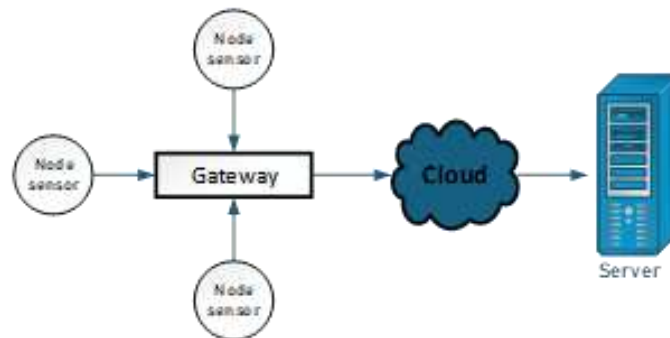
Berbagai pengembangan sensor deteksi pergeseran tanah juga telah dilakukan, diantaranya Priyadi [15] mendesain sistem deteksi longsor dengan menggunakan akselerometer ADXL335 untuk pergeseran sumbu XYZ dan piezoelektrik untuk getaran. Terdapat 3 status siaga yang diterapkan yaitu aman, waspada dan siaga yang dikirim melalui SMS. Perancangan alat deteksi gempa dengan menggunakan ADXL335 juga dilakukan oleh Ardhi [16] dengan menggunakan pembanding sensor akselerometer pada smartphone. Sensor ADXL juga digunakan oleh Sunardi [17] dengan seri 345 dikombinasikan dengan LVDT untuk mendeteksi longsor dan pergerakan tanah. Meskipun LVDT jarang digunakan tetapi pada penelitian ini kombinasi LVDT dan rheostat menghasilkan pengukuran yang cukup baik. Penelitian ini juga menggunakan radio telemetry untuk mengirimkan data dari sensor. Rosa [18] menggunakan nodemcu ESP8266 dengan sensor MPU6050 untuk mendeteksi tanah longsor. Adapun proses pengiriman data dilakukan dengan jaringan wifi menggunakan layanan cloud sehingga aplikasi bisa dibuka di smartphone. Suryana [19] melakukan pengembangan pemantauan pergerakan tanah dengan sensor yang digunakan adalah BMP180 untuk pergerakan vertikal dan MPU6050 untuk kemiringan tanah dimana data ini kemudian dikirim lewat aplikasi telegram. Penggunaan MPU 6050 ini juga dilakukan oleh Mujahid [20] yang dilengkapi dengan sensor kelembaban tanah dan dikirimkan ke Antares kemudian diolah untuk disebar ke masyarakat. Sistem pemantauan tanah longsor dengan

MPU 6050 dilakukan oleh Budiman [21] dengan tambahan adanya prediksi longsor berdasarkan laju adsorpsi air pada tanah menggunakan kelembaban, kemiringan dan suhu. Dwiantara [22] menggunakan akselerometer tipe MMA 7361L dengan komunikasi wireless antara sensor dengan penampil yaitu laptop menggunakan nRF24L01.

Kebutuhan sensor yang terpadu bukan hanya *gyroscope* tetapi juga dibutuhkan sensor kelembaban tanah, sensor suhu tanah dan posisi sensor yang akan menghasilkan data akurat dengan parameter-parameter yang lebih bervariasi. Dibutuhkan komunikasi data yang tidak terputus, dengan jarak yang jauh dan dapat diandalkan. Dan bentuk dari node sensor sendiri yang harus kecil, tidak terhambat akibat pergeseran tanah dan tahan terhadap benturan. Pada penelitian ini akan dibangun sistem deteksi pergeseran tanah menggunakan kombinasi sensor suhu, kelembaban, pergeseran tanah dan GPS dalam node sensor, data akan dikirim ke *gateway* yang terhubung ke *web server* melalui jaringan LTE.

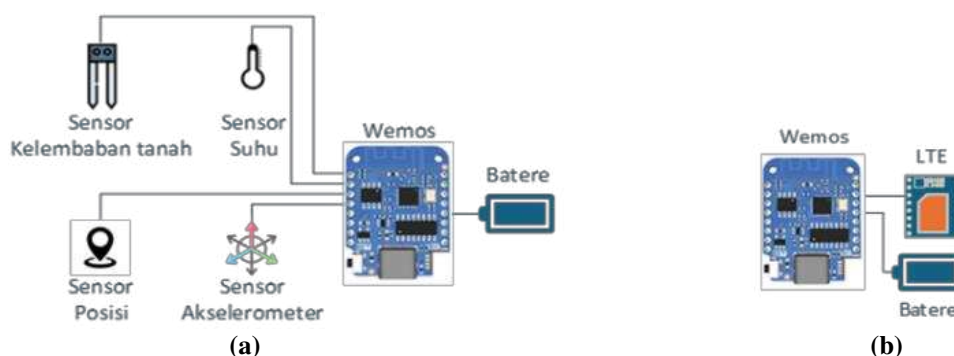
2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini dibangun node sensor yang terdiri dari beberapa sensor parameter pergeseran tanah yaitu sensor suhu, kelembaban tanah, sensor pergerakan dan deteksi lokasi dengan GPS adapun untuk komunikasi data dengan menggunakan Bluetooth. Node sensor akan terhubung dengan gateway menggunakan jaringan Bluetooth dengan identifikasi unik untuk masing-masing node sensor. Data dari masing-masing node sensor tersebut kemudian dikirimkan ke web server untuk diolah dan ditampilkan melalui jaringan LTE dimana blok diagram dari sistem dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok diagram alat deteksi pergerakan tanah

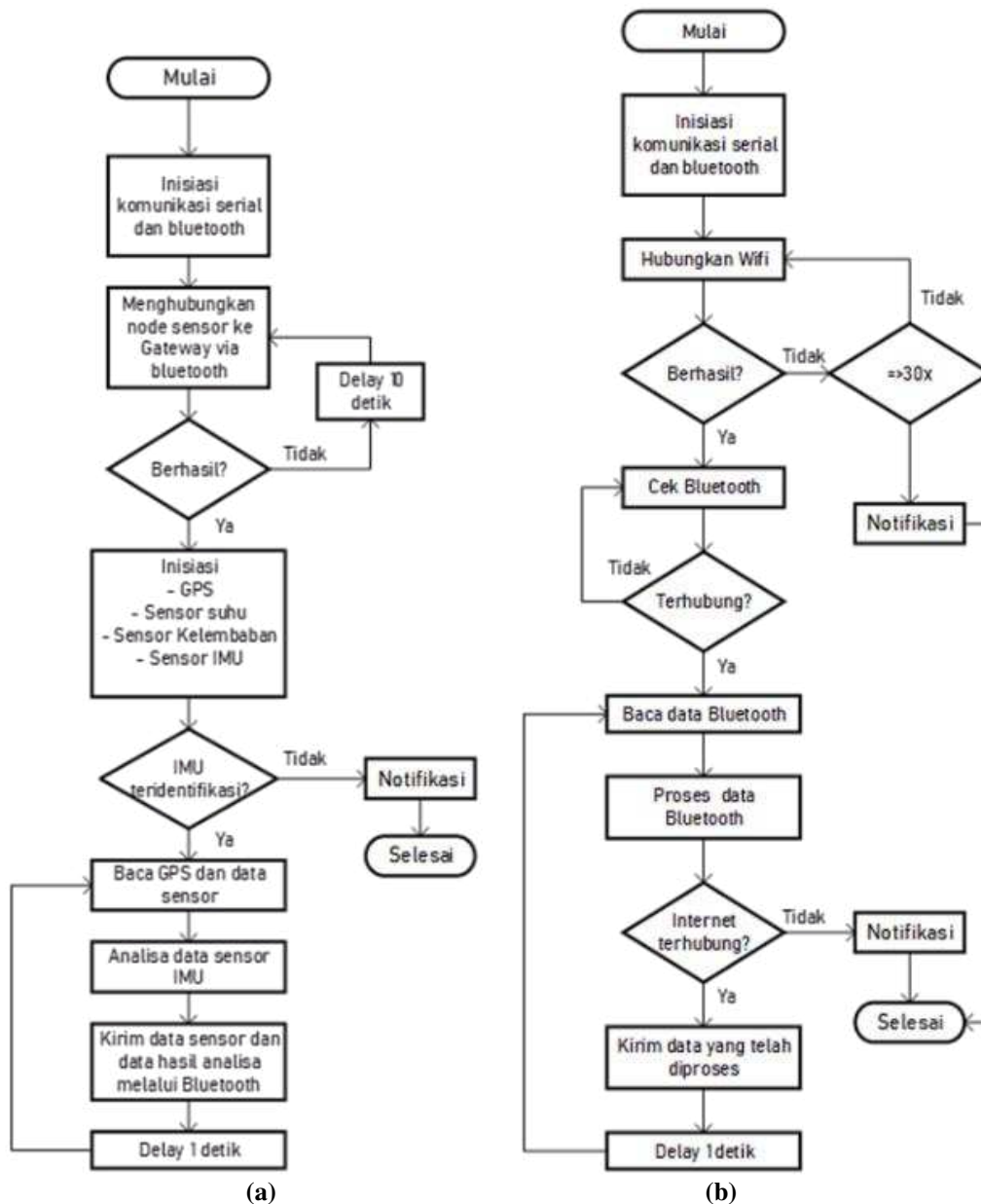
Node sensor ini dilengkapi dengan berbagai sensor seperti yang tergambar pada Gambar 2(a) terdapat empat sensor yang terhubung dengan Wemos dan dengan menggunakan catu daya baterai. Sedangkan untuk gateway dapat dilihat pada Gambar 2(b).



Gambar 2. Modul (a) node sensor (b) gateway

Proses pengambilan data pada node sensor digambarkan dalam flowchart Gambar 3(a). Pertama adalah inisiasi komunikasi serial dan bluetooth, kemudian bluetooth mencoba terhubung dengan gateway bila berhasil maka akan menginisiasi semua sensor yang berada pada node sensor, bila tidak berhasil maka proses akan diulang dengan sebelumnya ada delay 10 detik. Setelah semua sensor terinisiasi dan IMU teridentifikasi, bila IMU tidak teridentifikasi maka dicetak notifikasi kondisi IMU dan program terhenti. Tetapi bila IMU teridentifikasi maka dilanjutkan dengan pembacaan GPS dan

data sensor. Selanjutnya dilakukan proses pengolahan data dari sensor dan GPS dengan membuat *string* yang berisi suhu, kelembaban tanah, data GPS, akselerasi, dan data orientasi. Setelah itu data *string* dikirim melalui Bluetooth menuju *gateway* dilanjutkan dengan delay 1 detik dan kembali ke awal loop untuk pembacaan parameter baru, program berjalan hingga perangkat dimatikan.

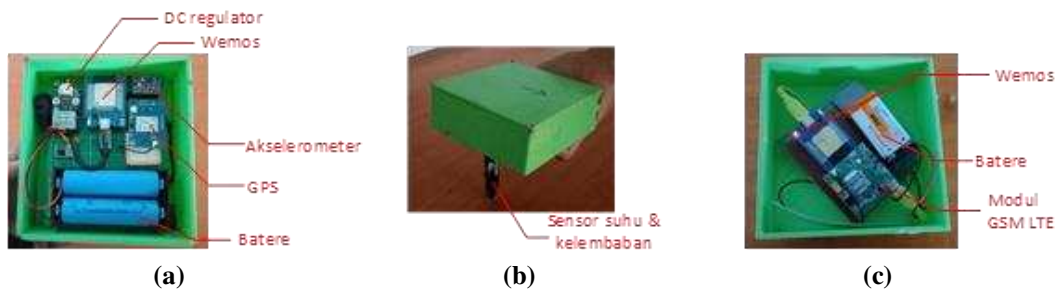


Gambar 3. Flowchart (a) node sensor (b) gateway

Adapun proses yang terjadi pada gateway seperti tergambar dalam Gambar 3(b) pertama setelah dinyalakan terjadi inisiasi komunikasi serial dan bluetooth. Setelah itu terhubung ke WiFi bila gagal terhubung dilakukan rekoneksi sebanyak 30 kali, bila masih gagal maka dicetak notifikasi “gagal terhubung WiFi” dan program berhenti. Bila wifi terhubung maka kemudian akan ditampilkan alamat IP. Selanjutnya dilakukan pengecekan bluetooth apakah tersambung atau tidak, bila tidak maka akan kembali ke loop awal, jika terhubung maka selanjutnya pembacaan data yang diterima lewat Bluetooth. Setelah itu dilakukan proses penerimaan dengan pemecahan data berdasarkan koma dan format menjadi URL data. Setelah dilakukan pemrosesan data maka selanjutnya data dikirim ke server dengan sebelumnya dilakukan pengecekan apakah internet terhubung atau tidak, jika tidak terhubung maka akan ada notifikasi “WiFi tidak terhubung. Gagal mengirim data” dan jika berhasil maka data akan dikirimkan kemudian eksekusi ditunda 1 detik setelah itu kembali ke loop awal dan mengulangi proses.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem deteksi pergeseran tanah diatas diuji dengan menggunakan rangkaian seperti pada Gambar 4(a) untuk tampilan atas yang terdiri dari MCU berupa Wemos D1 mini V4, Soil moisture DFROBOT, sensor suhu DS18B20, baterai 3,7 volt, dc regulator adjustable, GY-91 MPU9250 + BMP280 10DOF 9-axis Accelero Gyro Compass Pressure yang merupakan gabungan Single chip MPU-9250 dengan 3 axis Gyro, 3 axis Accelerometer, kompas digital dan BMP280 yang merupakan sensor tekanan barometrik yang telah mengalami peningkatan. Sementara untuk sensor suhu dan kelembaban dapat dilihat pada Gambar 4(b) Sementara untuk gateway lebih sederhana hanya MCU yaitu wemos D1 Mini, kemudian modul GSM LTE dan baterai. Adapun foto gateway dapat dilihat pada Gambar 4(c).



Gambar 4. Node sensor dan gateway (a) node sensor tampilan atas (b) node sensor tampilan depan (c) gateway

3.1 Pengujian Kelembaban Tanah

Pengujian dilakukan dengan menggunakan sampel tanah kering seberat 1 kg. Tanah yang digunakan telah dikeringkan di dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam untuk memastikan tidak ada kelembaban yang tersisa. Pengukuran berat dilakukan dengan timbangan digital. Pengujian dilakukan dengan menambahkan air secara bertahap ke dalam sampel tanah kering dengan target kelembaban awal 20%. Setelah itu, penambahan air dilakukan setiap 5% hingga mencapai kelembaban 55%. Perhitungan penambahan air dilakukan berdasarkan rumus berikut:

$$\text{Berat air (ml)} = \frac{\text{TargetKelembaban (\%)} \times \text{Berat Tanah Kering (gr)}}{100} \quad (1)$$

Sebagai contoh untuk mencapai kelembaban awal 20% maka berat tanah 1000 gram harus ditambahkan air selama 200 ml.



Gambar 5 (a) Proses penambahan air (b) pengukuran kelembaban tanah (c) pengukuran berat tanah W_b (kelembaban tanah sebelum di oven) (d) pengukuran berat tanah kering W_k setelah di oven

Gambar 5(a) menunjukkan skema proses penambahan air untuk mencapai target kelembaban yang diinginkan. Proses ini dilakukan secara berulang untuk mencapai target kelembaban tanah dari 20% - 55%. Gambar 5(b), menunjukkan proses pengukuran kelembaban tanah dengan sensor kelembaban tanah. Pengambilan data ini dilakukan secara berulang sebagai perbandingan untuk mengukur akurasi sensor. Pada Gambar 5(c), menunjukkan pengukuran sampel berat tanah sebelum di oven, pengambilan data ini dilakukan secara berulang dan bertahap dengan penambahan air setiap 50 ml air untuk mencapai target kelembaban dari 20%-55%. Data ini akan dilakukan perhitungan kelembaban yang dibandingkan dengan tanah kering setelah di oven.

Kemudian dilakukan perhitungan pengujian kelembaban tanah dengan skema Sampel tanah yang masih basah ditimbang untuk mendapatkan berat tanah basah (W_b). Pengukuran ini dilakukan dengan timbangan digital, sampel tanah kemudian ditempatkan dalam oven pada suhu 100°C selama 24 jam

untuk memastikan bahwa semua air yang terkandung dalam tanah menguap, sehingga hanya material padat yang tersisa. Setelah pengeringan selesai, sampel tanah dikeluarkan dari oven, didinginkan dalam desikator untuk mencegah penyerapan kelembaban dari udara, dan kemudian ditimbang kembali untuk mendapatkan berat tanah kering (W_k).

Kelembaban tanah dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{Kelembaban Tanah (\%)} = \frac{W_b - W_k}{W_k} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

W_b = Berat tanah sebelum di oven (tanah basah)

W_k = Berat tanah setelah di oven (tanah kering)

Gambar 7(d), menunjukkan pengukuran berat tanah kering setelah di oven. Pengambilan data ini dilakukan secara berulang dan sebagai pembandingan dengan tanah basah untuk mendapatkan kelembaban tanah.

Setiap sampel tanah diuji dengan prosedur yang sama, dan hasil berat tanah basah serta tanah kering dicatat. Perbedaan berat antara tanah basah dan tanah kering menunjukkan jumlah air yang awalnya ada dalam sampel, yang kemudian digunakan untuk menghitung persentase kelembaban tanah.

Tabel 1. Pengujian kelembaban

| No. | Posisi Tanah | Wb | Wk | Rh Perhitungan (%) | Rh Sensor (%) | Galat |
|-----|------------------------------|------|------|--------------------|---------------|--------|
| 1. | Tanah dengan Rh 0% | 62,8 | 62,1 | 1,13 | 1,13% | 1,13% |
| 2. | Tambahkan air 200ml → Rh 20% | 47,5 | 41,3 | 15,01 | 19,0 | 3,99% |
| 3. | Tambahkan air 50ml → Rh 25% | 59,2 | 46,6 | 27,04 | 26,0 | 1,04% |
| 4. | Tambahkan air 50ml → Rh 30% | 59,6 | 47,8 | 24,69 | 29,0 | 4,31% |
| 5. | Tambahkan air 50ml → Rh 35% | 70,3 | 54,7 | 28,52 | 34,0 | 5,48% |
| 6. | Tambahkan air 50ml → Rh 40% | 64,3 | 49,0 | 31,22 | 43,0 | 11,78% |
| 7. | Tambahkan air 50ml → Rh 45% | 71,3 | 53,2 | 34,02 | 47,0 | 12,98% |
| 8. | Tambahkan air 50ml → Rh 50% | 53,3 | 36,7 | 45,23 | 51,0 | 5,77% |
| 9. | Tambahkan air 50ml → Rh 55% | 69,8 | 46,9 | 48,83 | 58,0 | 9,17% |

Tabel 1 menyajikan hasil pengujian kelembaban tanah dengan membandingkan data yang diperoleh dari sensor dengan hasil pengujian melalui metode pengeringan di oven. Kelembaban tanah yang diukur oleh sensor dibandingkan dengan hasil perhitungan kelembaban setelah pengeringan untuk mengevaluasi akurasi pengukuran. Selain itu, tabel tersebut juga menampilkan galat atau error yang muncul sebagai hasil perbandingan antara kedua metode, yang memberikan gambaran tentang seberapa dekat hasil sensor dengan metode standar.

3.2 Pengujian Accelerometer

Pada penelitian ini pengujian Accelerometer dalam sumbu X, Y, dan Z menggunakan sensor GY-91. Sensor ini dihubungkan ke mikrokontroler melalui komunikasi I2C, dengan alamat perangkat 0x68. Akselerometer digunakan untuk mengukur percepatan pada sumbu X, Y, dan Z di berbagai sudut kemiringan (30°, 45°, 60°, dan 75°) sebelum dan sesudah kondisi perlakuan. Urainnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Pengujian menunjukkan bahwa akselerometer efektif dalam mendeteksi perubahan kemiringan tanah yang dapat mengindikasikan potensi longsor. Variasi signifikan dalam nilai akselerasi pada sumbu X, Y, dan Z setelah perlakuan menunjukkan bahwa sensor ini sensitif terhadap perubahan kondisi tanah, yang penting untuk deteksi dini longsor.

Tabel 2. Pengujian accelerometer

| No. | Proses | Sudut 30° | | | Sudut 45° | | | Sudut 60° | | | Sudut 75° | | |
|-----|---------|-----------|------|------|-----------|-------|-------|-----------|-------|--------|-----------|-------|-------|
| | | Ax | Ay | Az | Ax | Ay | Az | Ax | Ay | Az | Ax | Ay | Az |
| 1. | Sebelum | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 1,19 | 0,32 | 9,75 | 2,49 | 2 | 9,29 | 1,67 | 1,68 | 9,64 |
| | Sesudah | 0,83 | 2,11 | 9,53 | -7,25 | 0,75 | -6,78 | -3,72 | -6,25 | -6,76 | -0,41 | 9,73 | -1 |
| 2. | Sebelum | 1,09 | 1,43 | 9,65 | 1 | 1,47 | 9,68 | 1,57 | 1,07 | 9,67 | 4,16 | 3,32 | 8,69 |
| | Sesudah | 1,1 | 1,42 | 9,63 | -7,25 | 0,45 | -6,78 | -8,88 | -4,22 | 1,6 | -0,28 | 9,71 | -1,14 |
| 3. | Sebelum | 1,54 | 1,02 | 9,63 | 2,29 | 3,42 | 8,9 | 1,55 | 1,05 | 9,7 | -0,06 | -2,34 | 9,82 |
| | Sesudah | 1,53 | 1,02 | 9,62 | -5,02 | -1,28 | -8,53 | -4,22 | -2,2 | -13,99 | -0,29 | 9,69 | -1,19 |
| 4. | Sebelum | 1,02 | 1,34 | 9,67 | 1,17 | 0,29 | 9,66 | 2,27 | 0,67 | 9,5 | -0,51 | -1,99 | 9,63 |
| | Sesudah | 1,04 | 1,34 | 9,65 | -2,38 | 3,63 | -6,09 | -5,02 | 5,4 | -6,57 | -0,41 | 9,72 | -1,03 |
| 5. | Sebelum | 0,85 | 0,81 | 9,73 | 1,01 | 1,07 | 9,71 | 0,37 | 1,2 | 10,01 | 0,62 | -0,1 | 9,82 |
| | Sesudah | 0,84 | 0,8 | 9,75 | -8,12 | -3,78 | -4,39 | -5,02 | 5,44 | -6,53 | -0,19 | 11,31 | -2,2 |

3.3 Pengujian Gyroscope

Gyroscope pada sensor MPU9250 adalah komponen yang berfungsi untuk mengukur kecepatan sudut, yaitu laju perubahan orientasi suatu objek, dalam satuan radian per detik (rad/s). Pengukuran ini dilakukan pada tiga sumbu utama X, Y, dan Z yang memungkinkan sensor untuk mendeteksi seberapa cepat objek berputar di sekitar masing-masing sumbu tersebut.

Kecepatan sudut yang diukur dalam rad/s memberikan informasi yang sangat penting dalam berbagai aplikasi, seperti navigasi, stabilisasi, dan kontrol gerak. Dengan mengetahui laju rotasi objek, sistem yang menggunakan MPU9250 dapat merespons dengan cepat untuk menjaga orientasi yang diinginkan atau untuk mengontrol gerakan dengan presisi tinggi.

Program untuk kalibrasi Gyroscope sensor Gy-91, data, program dimulai dengan inisialisasi library kemudian mendefinisikan IMU sensor Gy-91. Kemudian sensor Gyroscope dilakukan kalibrasi sehingga mencapai kalibrasi dan data dikirimkan secara BLE.

Tabel 3. Data percobaan gyroscope

| No. | Proses | Sudut 30 | | | Sudut 45 | | | Sudut 60 | | | Sudut 75 | | |
|-----|---------|----------|-------|------|----------|-------|-------|----------|------|-------|----------|-------|-------|
| | | Gx | Gy | Gz | Gx | Gy | Gz | Gx | Gy | Gz | Gx | Gy | Gz |
| 1. | Sebelum | -0,02 | -0,06 | 1,27 | -0,01 | -0,02 | 0 | 0,64 | 2,55 | 0,52 | -0,02 | 0 | -0,04 |
| | Sesudah | -0,02 | -0,06 | 1,44 | -1,49 | 3,87 | -1,12 | -0,79 | 0,65 | 0,64 | 0 | 0 | 0,01 |
| 2. | Sebelum | -0,02 | -0,06 | 1,6 | -0,01 | -0,02 | 0 | 0 | 0,05 | -0,01 | 0 | 0 | 0,01 |
| | Sesudah | -0,02 | -0,06 | 1,77 | -0,01 | -0,02 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0 | 0,01 |
| 3. | Sebelum | -0,02 | -0,06 | 1,93 | -0,01 | -0,02 | 0 | 0,02 | 0,04 | 0,19 | 0,01 | 0 | 0,01 |
| | Sesudah | -0,02 | -0,07 | 2,08 | -0,01 | 0,03 | -0,01 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0,01 |
| 4. | Sebelum | -0,02 | -0,06 | 2,23 | -0,01 | -0,02 | 0 | 0 | 0,05 | -0,01 | -0,01 | -0,04 | 0,05 |
| | Sesudah | -0,02 | -0,06 | 2,38 | -0,15 | 0,33 | -0,28 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0,01 |
| 5. | Sebelum | -0,02 | -0,06 | 2,52 | -0,02 | -0,11 | 0,01 | 0 | 0,05 | -0,01 | 0,01 | -0,02 | 0,01 |
| | Sesudah | -0,02 | -0,06 | 2,67 | -0,01 | 0,02 | -0,01 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0,01 |

Tabel 3 menyajikan hasil pengujian dari sensor gyroscope Gy-91, dengan data yang diukur dalam satuan radian per detik (rad/s). Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kecepatan sudut pada sumbu X, Y, dan Z dari sensor gyroscope. Data ini memberikan informasi tentang laju rotasi tanah untuk mendeteksi pergerakan tanah longsor.

3.4 Derajat roll, pitch, yaw

Derajat roll, pitch, dan yaw dapat digunakan untuk menganalisis pergerakan tanah longsor. Roll digunakan untuk mengukur kemiringan tanah pada sumbu horizontal dari kiri ke kanan. Pada tanah longsor, roll dapat menunjukkan seberapa miring atau terbalik tanah pada area longsor.

Pitch digunakan untuk mengukur kemiringan tanah pada sumbu horizontal dari depan ke belakang. Pada tanah longsor, pitch dapat menunjukkan perubahan kemiringan tanah yang menyebabkan tanah bergeser ke atas atau ke bawah. Perubahan pitch yang tajam dapat mengindikasikan area tanah yang bergerak atau merosot. Yaw digunakan untuk mengukur rotasi tanah pada sumbu vertikal. Pada tanah longsor, yaw dapat menunjukkan perputaran atau pergeseran horizontal tanah, seperti ketika tanah bergerak menyamping atau berputar.

Dengan memantau roll, pitch, dan yaw, kita dapat menganalisis dinamika pergerakan tanah longsor, mengidentifikasi perubahan orientasi, dan mengevaluasi risiko serta dampak dari pergeseran tanah.

Program ini membaca data dari sensor IMU untuk menghitung sudut roll, pitch, dan yaw. Pitch dan roll dihitung dari data akselerometer, sedangkan yaw diperbarui menggunakan data gyroscope. Hasil perhitungan tersebut difilter menggunakan teknik sensor fusion untuk meningkatkan akurasi. Data roll, pitch, dan yaw (dalam derajat) digabungkan menjadi satu string dan dikirimkan melalui Bluetooth setiap detik.

Tabel 4. Pengujian kemiringan derajat terhadap sumbu X (Roll), Y (Pitch), Z (Yaw)

| N o. | Proses | Sudut 30 | | | Sudut 45 | | | Sudut 60 | | | Sudut 75 | | |
|------|---------|----------|------|-------|----------|--------|-------|----------|--------|-------|----------|--------|-------|
| | | Pitch | Roll | Yaw | Pitch | Roll | Yaw | Pitch | Roll | Yaw | Pitch | Roll | Yaw |
| 1. | Sebelum | -0,3 | 0,54 | -0,44 | 1,38 | -1,86 | 0,01 | 2,61 | -4,98 | 0,01 | -0,2 | 0,23 | -0,02 |
| | Sesudah | -0,39 | 0,51 | -0,43 | 1,99 | 1,36 | -0,62 | 3,82 | -5,61 | 1,45 | 0,42 | -82,73 | 3,35 |
| 2. | Sebelum | -0,48 | 0,47 | -1,46 | 1,48 | -1,99 | 0,01 | 0,09 | -0,18 | -0,01 | -0,38 | 0,46 | -0,02 |
| | Sesudah | -0,56 | 0,43 | -1,46 | 2,22 | 4,68 | -0,62 | 3,75 | -7,15 | 1,46 | 0,38 | -83,18 | 3,99 |
| 3. | Sebelum | -0,65 | 0,39 | 0,46 | 1,57 | -2,11 | 0,01 | -0,36 | -0,01 | -0,8 | -0,74 | 0,91 | 0 |
| | Sesudah | -0,73 | 0,36 | 0,46 | 5,19 | 40,76 | -2,73 | 3,68 | -8,67 | 1,46 | 0,37 | -83,22 | 4,16 |
| 4. | Sebelum | -0,81 | 0,32 | -2,36 | 1,67 | -2,23 | 0,02 | 0,28 | -0,53 | -0,02 | 1,21 | -1,93 | 0,49 |
| | Sesudah | -0,88 | 0,28 | -2,36 | 5,35 | -10,53 | -1,77 | 3,61 | -10,16 | 1,47 | 0,37 | -83,22 | 4,17 |
| 5. | Sebelum | -0,96 | 0,25 | -0,87 | 1,88 | -5,36 | 0,24 | 0,37 | -0,7 | -0,02 | 1,4 | -2,05 | 0,5 |
| | Sesudah | -1,04 | 0,21 | -0,86 | 4,99 | 36,19 | -2,72 | 3,61 | -10,16 | 1,47 | 0,37 | -83,28 | 28,7 |

Tabel 4 merupakan hasil pengujian kemiringan derajat terhadap sumbu x (Roll), terhadap sumbu y (Pitch) dan terhadap sumbu z (Yaw). Roll (Sumbu X): Roll mengukur kemiringan tanah pada sumbu longitudinal yang membentang dari depan ke belakang. Data roll menunjukkan perubahan horizontal kemiringan tanah, yang penting untuk mendeteksi pergeseran lateral atau perubahan kemiringan yang dapat mempengaruhi kestabilan tanah. Pitch mengukur kemiringan tanah pada sumbu lateral yang membentang dari kiri ke kanan. Data pitch mengindikasikan perubahan vertikal pada tanah, yang berguna untuk mendeteksi perubahan kemiringan tanah ke atas atau ke bawah. Yaw mengukur rotasi tanah pada sumbu vertikal. Data yaw mencerminkan perputaran horizontal tanah, yang relevan untuk mengidentifikasi pergeseran atau rotasi tanah yang tidak diinginkan. Perubahan yaw yang tajam dapat menandakan pergeseran lateral atau rotasi tanah yang dapat berkontribusi pada terjadinya tanah longsor.

Tabel 5. Pengujian konektivitas

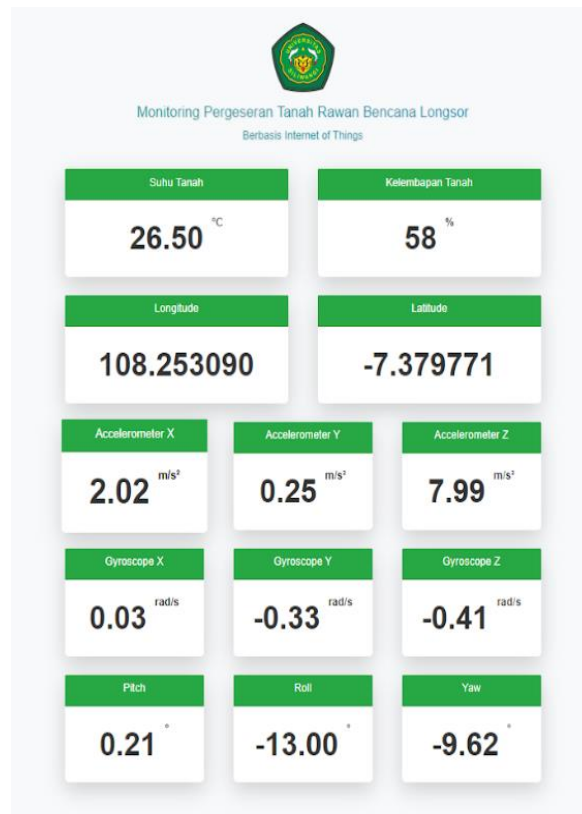
| Jarak(m) | Suhu | Ax | Ay | Az | Gx | Gy | Gz | Pitch | Roll | Yaw | Keterangan |
|----------|-------|------|------|------|----|----|------|-------|-------|-------|---------------|
| 1 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 2 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 3 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 4 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 5 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 6 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 7 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 8 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 9 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 10 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 11 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 12 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 13 | 28,69 | 0,85 | 2,11 | 9,55 | 0 | 0 | 0,03 | 8,5 | -3,83 | -0,44 | Terbaca |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Tidak Terbaca |

3.5 Pengujian Konektivitas

Pengujian ini untuk menguji pengiriman data dari Node ke Gateway menggunakan bluetooth dengan jarak 1 sampai 14 meter. Pada pengujian ini pada jarak 1 sampai 13 meter terbaca namun pada jarak 14 meter tidak terbaca. Hal ini dapat dibaca pada Tabel 5.

3.6 Laporan Website

Pada Gambar 6, merupakan tampilan website monitoring pergeseran tanah rawan bencana longsor. data yang dikirimkan dari node dikirim ke server kemudian data tersebut ditampilkan oleh website.



Gambar 6. Tampilan website

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem peringatan dini berbasis IoT untuk mendeteksi pergerakan tanah yang menggunakan kombinasi sensor GY-91 MPU9250 + BMP280 10DOF 9-axis Accelero Gyro Compass Pressure. Sensor ini mampu mendeteksi perubahan kemiringan tanah, suhu, kelembaban tanah, dan percepatan secara *real-time*. Data dari sensor dikirim ke gateway melalui Bluetooth dengan jangkauan hingga 13 meter, kemudian diteruskan ke *server* menggunakan jaringan LTE. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor kelembaban tanah memiliki akurasi yang baik dengan galat maksimum 3,85% pada rentang 20-55% kelembaban. Akselerometer efektif mendeteksi perubahan kemiringan pada sudut 30°, 45°, 60°, dan 75°. Gyroscope mengukur kecepatan sudut dalam rad/s pada 3 sumbu. Sistem ini berhasil mengirimkan data ke server dan menampilkannya secara *real-time* melalui *website*. Pengembangan lebih lanjut dari penelitian ini termasuk pembangunan *database* untuk memprediksi pergerakan tanah dan kemampuan tanah dalam menyerap air berdasarkan kelembaban dan suhu tanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan Kepada LPPM Universitas Siliwangi lewat Skim PPKap telah memberikan hibah penelitian tahun 2024 sehingga penelitian ini dapat terwujud.

REFERENSI

- [1] P. Ahluriza and U. Harmoko, "Analisis Pemanfaatan Tidak Langsung Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 2, no. 1, pp. 53–59, Mar. 2021, doi: 10.14710/jebt.2021.11075.
- [2] D. Y. Liliana, "Pengembangan Aplikasi Pendeteksi Potensi Bencana Gunung Berapi Menggunakan Pengklasifikasi Bayesian," *MULTINETICS*, vol. 1, no. 1, p. 15, May 2015, doi: 10.32722/multinetics.Vol1.No.1.2015.pp.15-18.
- [3] S. Haeriah, A. L. Nugraha, and B. Sudarsono, "ANALISIS KERENTANAN PADA WILAYAH PERMUKIMAN AKIBAT BENCANA ERUPSI GUNUNG MERAPI (STUDI KASUS : KABUPATEN SLEMAN) Siti," *J. Geod. Undip*, vol. 4, no. April, pp. 86–94, 2018.

- [4] P. PRIYOTAMTAMA Wiryono, *Merawat bumi, rumah kita bersama*. Sanata Dharma University Press, 2021.
- [5] W. Erlangga, "KARAKTERISTIK DAN PARAMETER SUBDUKSI SUMBER GEMPA PULAU JAWA," *Teknisia*, vol. XXV, no. 2, pp. 30–40, Oct. 2020, doi: 10.20885/teknisia.vol25.iss2.art4.
- [6] Z. Muksin, A. Rahim, A. Hermansyah, A. A. Samudra, and E. Satsipi, "Mitigasi Bencana Gempa Bumi di Cianjur," *JIIP - J. Ilm. Ilmu Pendidik.*, vol. 6, no. 4, pp. 2486–2490, 2023, doi: 10.54371/jiip.v6i4.1847.
- [7] H. Hadi, S. Agustina, and A. Subhani, "Penguatan Kesiapsiagaan Stakeholder dalam Pengurangan Risiko Bencana Alam Gempabumi," *Geodika J. Kaji. Ilmu dan Pendidik. Geogr.*, vol. 3, no. 1, p. 30, Jul. 2019, doi: 10.29408/geodika.v3i1.1476.
- [8] M. Hidayat, A. H. Assegaf, and R. S. Fauzan, "TRANSFORMASI PEMBERDAYAAN MASYARAKAT MELALUI EDUKASI MITIGASI BENCANA GEMPA BUMI PADA ANAK USIA DINI DI CIANJUR JAWA BARAT," *Sebatik*, vol. 27, no. 1, pp. 451–457, Jun. 2023, doi: 10.46984/sebatik.v27i1.1379.
- [9] A. RACHMAWARDANI, S. K. WIJAYA, P. PRAWITO, and A. SOPAHELWAKAN, "Prediksi Banjir menggunakan ANFIS-PCA sebagai Peringatan Dini Bencana Banjir," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 12, no. 2, p. 335, Apr. 2024, doi: 10.26760/elkomika.v12i2.335.
- [10] A. Rachmawardani, S. K. Wijaya, and A. Shopaheluwakan, "SISTEM PERINGATAN DINI BANJIR BERBASIS MACHINE LEARNING: STUDI LITERATUR," *METHOMIKA J. Manaj. Inform. dan Komputerisasi Akunt.*, vol. 6, no. 6, pp. 188–198, Oct. 2022, doi: 10.46880/jmika.Vol6No2.pp188-198.
- [11] E. P. Tenda, A. V. Lengkong, and K. F. Pinontoan, "Sistem Peringatan Dini Banjir Berbasis IoT dan Twitter," *CogITO Smart J.*, vol. 7, no. 1, pp. 26–39, Jun. 2021, doi: 10.31154/cogito.v7i1.284.26-39.
- [12] Y. Liu, H. Hazarika, M. Murai, and Y. Kochi, "An IoT-based sustainable early warning system for rainfall induced landslides," in *Smart Geotechnics for Smart Societies*, London: CRC Press, 2023, pp. 1141–1144. doi: 10.1201/9781003299127-161.
- [13] A. Ashwini, Sriram, and S. Sangeetha, "IoT-Based Smart Sensors," 2024, pp. 202–223. doi: 10.4018/979-8-3693-2280-2.ch010.
- [14] V. G. Menon, S. Verma, S. Kaur, and P. S. Sehdev, "Internet of Things-Based Optimized Routing and Big Data Gathering System for Landslide Detection," *Big Data*, vol. 9, no. 4, pp. 289–302, Aug. 2021, doi: 10.1089/big.2020.0279.
- [15] I. PRIYADI, F. HADI, Y. S. PRANATA, and M. R. RAZALI, "Rancangan dan Implementasi Sistem Deteksi Longsor Berbasis SMS dan Progressive Web Apps," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 10, no. 1, p. 243, Jan. 2022, doi: 10.26760/elkomika.v10i1.243.
- [16] C. K. Ardhi, A. Muhammad, S. T. Murti, R. Nugraha, and S. Pd, "Perancangan Alat Pendeteksi Gempa Menggunakan Sensor Accelerometer Dan Sensor Getar (Design of Earthquake Sensor System Using Accelerometer and Vibrace Sensor)," *e-Proceeding Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 4019–4027, 2018.
- [17] S. Sunardi, T. Arifianto, A. L. Hartisa, A. Darmawan, and W. A. Wirawan, "Perancangan Sistem Peringatan Longsor dan Deteksi Pergeseran Tanah Menggunakan Metode Telemetry," *J. Penelit. Transp. Darat*, vol. 22, no. 2, pp. 123–130, Feb. 2021, doi: 10.25104/jptd.v22i2.1618.
- [18] R. M. UTAMA, I. SUCAHYO, and M. YANTIDEWI, "RANCANG BANGUN ALAT DETEKSI TANAH LONGSOR BERBASIS IOT DENGAN NODEMCU ESP8266 DAN MPU6050," *JIIF (Jurnal Ilmu dan Inov. Fis.)*, vol. 06, no. 02, pp. 137–146, 2022.
- [19] N. N. Surayana and Timur Dali Purwanto, "Sistem Pemantauan Pergerakan Dan Kemiringan Tanah Sebagai Peringatan Dini Terhadap Tanah Longsor Berbasis Iot," *J. Tekno*, vol. 20, no. 2, pp. 107–116, 2023, [Online]. Available: <https://journal.binadarma.ac.id/index.php/jurnaltekn/article/view/2680%0Ahttps://journal.binadarma.ac.id/index.php/jurnaltekn/article/download/2680/1335>
- [20] Syahdan Mujahid, B. Irawan, and C. Setianingsih, "Perancangan Prototipe Sistem Peringatan Dini Tanah Longsor Berbasis Internet of Things," *Proceeding Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 1651–1657, 2020.
- [21] F. Budiman, E. Susanto, D. Perdana, H. Mukhtar, Y. A. Pamungkas, and Y. Y. Kevin, "Landslide monitoring system based on water adsorption rate utilizing humidity, accelerometer, and temperature sensors," *J. Teknol. dan Sist. Komput.*, vol. 8, no. 4, pp. 255–262, 2020, doi: 10.14710/jtsiskom.2020.13591.
- [22] A. Dwiantara and I. M. B. S. S. Ch, "SIMULASI PENDETEKSIAN TANAH LONGSOR MENGGUNAKAN SENSOR AKSELEROMETER TIPE MMA 7361 L," *dielektrika*, vol. 3, no. 2, pp. 105–112, 2016.