

RANCANG BANGUN LANDSLIDE EARLY WARNING SYSTEM (LEWS) BERBASIS WIRELESS SENSOR NETWORK MENGGUNAKAN ESP32 DAN LORAWAN

Bayu Satrio¹, Agustina Rachmawardani¹, Agustya Adi Martha², Dwi Indra Prasetyo¹

¹Program Studi Instrumentasi MKG Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jalan Meteorologi Nomor 5, Tanah Tinggi, Kota Tangerang, Banten, 15119 Indonesia

²Badan Riset dan Inovasi, Bogor 16911, Indonesia

Email: strbayu1404@gmail.com

Abstrak

Tanah longsor merupakan bencana geologis yang berdampak signifikan terhadap keselamatan manusia dan infrastruktur, sehingga diperlukan sistem peringatan dini yang andal. Penelitian ini mengembangkan prototipe Landslide Early Warning System (LEWS) berbasis Wireless Sensor Network (WSN) untuk memantau parameter tanah secara *real-time* menggunakan tiga node sensor. Masing-masing node dilengkapi dengan sensor akselerometer MPU9250 dan sensor kelembapan tanah kapasitif. Komunikasi antar node dan base station menggunakan protokol LoRaWAN, sementara pengiriman data ke server dilakukan melalui WiFi dengan protokol MQTT. Data ditampilkan melalui antarmuka web berbasis Laravel dan dikirim sebagai notifikasi ke Telegram. Pengujian dilakukan melalui dua simulasi. Pertama, uji komunikasi LoRa menunjukkan jangkauan hingga 100 meter dengan nilai RSSI antara -46 dBm hingga -74 dBm. Kedua, simulasi deteksi longsor menunjukkan lonjakan Peak Ground Acceleration (PGA) mencapai 0.4 – 0.5 g secara serempak di ketiga node, sebelum kembali ke nilai normal < 0.1 g. Pengamatan kelembapan tanah menunjukkan kestabilan data antara 45% – 55% . Hasil membuktikan bahwa sistem WSN-LEWS mampu melakukan pemantauan dan transmisi data secara andal, serta memberikan deteksi dini terhadap indikasi longsor melalui perubahan percepatan dan kelembapan tanah.

Kata-kata kunci: LEWS, WSN, LoRaWAN, MPU9250, Internet of Things (IoT).

Abstract

Landslides are geological disasters with significant impacts on human safety and infrastructure, requiring a reliable early warning system. This study develops a prototype of a Web-Based Landslide Early Warning System (LEWS) using a Wireless Sensor Network (WSN) to monitor soil parameters in real time. The system consists of three sensor nodes, each equipped with an MPU9250 accelerometer and a capacitive soil moisture sensor. Node-to-base station communication utilizes the LoRaWAN protocol, while data transmission to the server is performed via Wi-Fi using the MQTT protocol. Data are displayed through a Laravel-based web interface and sent as alerts via Telegram. The system was tested through two simulations. First, a LoRa communication test showed coverage up to 100 meters with RSSI values ranging from -46 dBm to -74 dBm. Second, a landslide simulation showed a simultaneous spike in Peak Ground Acceleration (PGA) reaching 0.4 – 0.5 g across all three nodes before returning to a normal level below 0.1 g. Soil moisture monitoring showed stable readings between 45% – 55% . The results demonstrate that the WSN-LEWS is capable of reliable data monitoring and transmission, and can provide early detection of landslide indicators through acceleration and soil moisture changes.

Keywords: LEWS, WSN, LoRaWAN, MPU9250, Internet of Things (IoT).

PENDAHULUAN

Tanah longsor merupakan bencana alam yang sering terjadi di Indonesia dan menimbulkan dampak serius terhadap kehidupan masyarakat, infrastruktur, serta lingkungan. Tingginya curah hujan, kondisi geologis, dan topografi pegunungan menjadi faktor utama yang memperbesar risiko tanah longsor, terutama di wilayah Jawa dan Sumatera [1], [2]. Data BNPB mencatat sebanyak 933 kejadian tanah longsor terjadi di Indonesia sepanjang tahun 2024, yang sebagian besar dipicu oleh curah hujan ekstrem, aktivitas seismik, dan perubahan penggunaan lahan.

Untuk mengurangi risiko dan dampak bencana ini, sistem peringatan dini menjadi solusi penting. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) berperan penting dalam penyediaan informasi meteorologi dan geofisika untuk mendukung sistem mitigasi bencana tanah longsor. Namun, sistem yang ada saat ini masih menghadapi tantangan dari sisi cakupan wilayah, kecepatan data, dan ketepatan deteksi gejala awal.

Kemajuan teknologi memungkinkan pengembangan sistem monitoring berbasis Wireless Sensor Network (WSN), yang memungkinkan pengumpulan data secara real-time dari berbagai lokasi dengan efisiensi tinggi [3], [4]. Penerapan WSN dalam sistem pemantauan banjir dapat meningkatkan efektivitas deteksi dini melalui pengiriman data berkala ke server serta pemberian notifikasi visual saat ambang batas bahaya terlampaui [5]. Teknologi LoRa mendukung komunikasi jarak jauh antar node sensor dengan konsumsi daya rendah [4], sementara konektivitas WiFi digunakan untuk mengirim data ke server berbasis web secara langsung [6].

Sensor seperti MPU9250, yang menggabungkan akselerometer, giroskop, dan magnetometer, dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan gerakan tanah yang menjadi indikator awal terjadinya longsor [7], [8]. Selain itu, sensor kelembapan tanah mendukung deteksi akumulasi air sebagai pemicu utama longsor.

Penerapan sistem *early warning* sangat krusial untuk mengurangi risiko dan dampak bencana. Sistem ini harus mampu menyediakan informasi yang cepat, akurat, dan mudah diakses oleh masyarakat terdampak. Teknologi berbasis penginderaan jauh telah banyak digunakan dalam sistem peringatan dini bencana hidrometeorologis karena mampu memberikan data spasial yang luas dan aktual dengan biaya rendah [9].

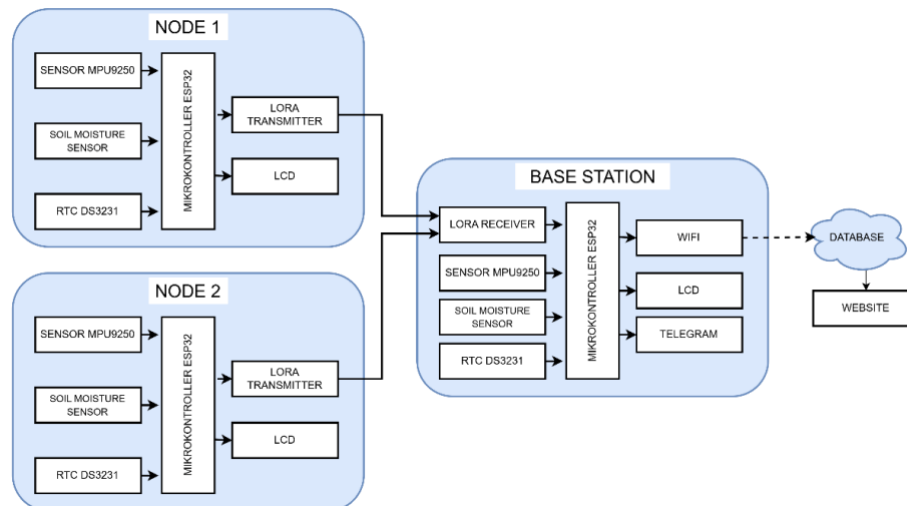
Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem pemantauan tanah longsor berbasis web menggunakan WSN, dengan dua node pengamatan dan satu base station. Komunikasi antar node dilakukan melalui LoRa, sementara pengiriman data ke server dilakukan melalui WiFi. Data ditampilkan secara *real-time* di website, dan sistem dilengkapi notifikasi peringatan melalui Telegram. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah menyediakan solusi monitoring yang efisien dan dapat diterapkan di wilayah rawan longsor secara luas.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dalam merancang dan membangun prototipe sistem Wireless Sensor Network Landslide Early Warning System (WSN-LEWS) berbasis web. Sistem terdiri atas tiga bagian utama: node sensor, node pusat (base station), dan antarmuka web.

Arsitektur Sistem

Sistem WSN-LEWS terdiri dari beberapa node pengamatan yang masing-masing dilengkapi sensor MPU9250 untuk memantau percepatan tanah dan sensor kelembapan tanah kapasitif. Setiap node menggunakan mikrokontroler ESP32 dan modul komunikasi LoRa (RFM95) untuk mengirimkan data ke Base Station. Base station bertugas menerima data dari semua node pengamatan dan mengirimkannya ke server melalui koneksi WiFi. Arsitektur sistem ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Blok Diagram Sistem

Perangkat Keras

Komponen utama sistem meliputi:

- ESP32 Lora merupakan mikrokontroler utama dengan konektivitas WiFi dan dukungan komunikasi LoRa.
- MPU9250 adalah sensor inersia 9-sumbu yang digunakan untuk membaca nilai akselerasi sumbu X, Y, dan Z.
- Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2 adalah sensor kelembapan tanah non-korosif untuk mendeteksi kadar air.
- Modul LoRa RFM95 (915 MHz) digunakan untuk komunikasi jarak jauh antar node.
- LCD 20x4 sebagai tampilan lokal nilai sensor pada node.

Alur Sistem

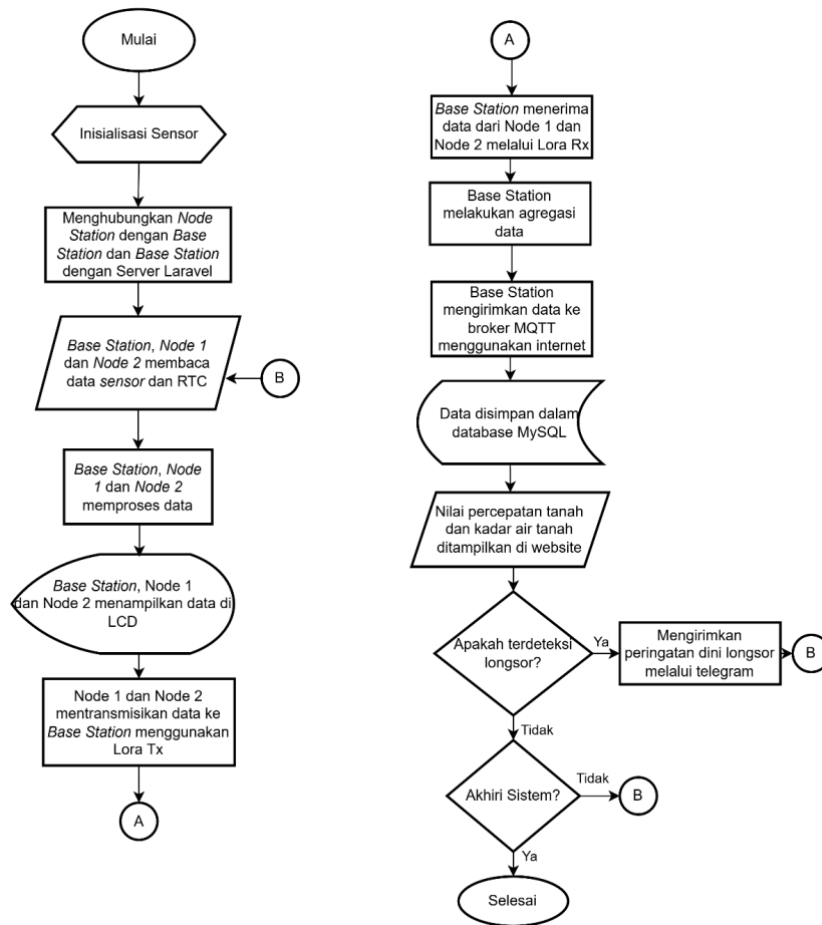
Alur kerja sistem prototipe WSN-LEWS digambarkan pada diagram alir pada Gambar 2.2 Proses dimulai dengan inialisasi seluruh sensor pada node sensor. Setelah proses inialisasi selesai, masing-masing node melakukan sinkronisasi waktu dengan base station menggunakan modul RTC agar waktu pembacaan data seragam.

Selanjutnya, node sensor mulai membaca data percepatan tanah dari sensor MPU9250 dan kadar kelembapan tanah dari sensor soil moisture kapasitif. Data ini kemudian dikirim secara berkala dari setiap node ke base station melalui komunikasi LoRa.

Base station bertugas mengumpulkan dan mengagregasi data dari seluruh node. Data yang telah dikumpulkan diolah dan dikemas dalam format JSON, lalu dikirimkan ke server web menggunakan protokol mqtt melalui koneksi WiFi.

Setelah diterima oleh server, data disimpan ke dalam database MySQL. Antarmuka web yang dikembangkan dengan framework Laravel kemudian mengambil dan menampilkan data tersebut secara *real-time* serta dalam bentuk grafik historis. Sistem juga melakukan evaluasi terhadap data percepatan dan kelembapan tanah berdasarkan ambang batas yang telah ditentukan untuk menentukan status kondisi tanah (Aman, Siaga, atau Bahaya).

Apabila kondisi Siaga dan Bahaya terdeteksi sistem akan mengirimkan notifikasi peringatan dini melalui media seperti Telegram. Setelah itu, sistem akan melakukan pengecekan apakah proses monitoring masih perlu dilanjutkan atau dihentikan sesuai dengan pengaturan waktu pemantauan.



Gambar 2. 2 Diagram Alir Sistem

HASIL DAN PEMBAHASAN

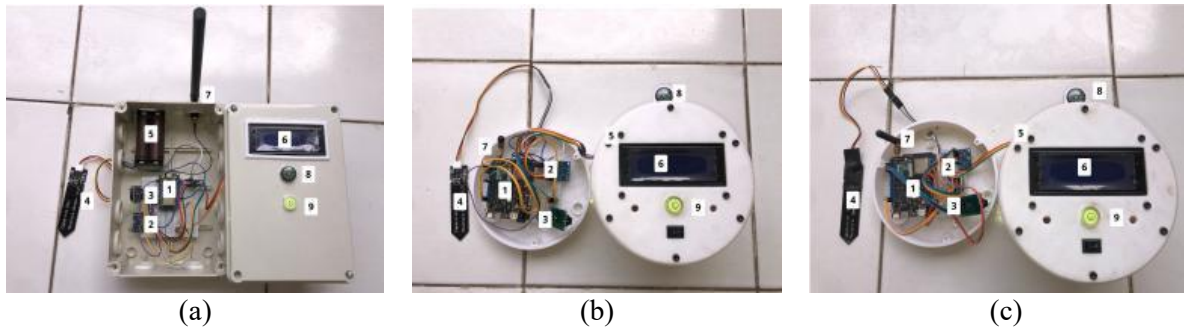
Penelitian ini menghasilkan seperangkat sistem peringatan dini tanah longsor. Kemudian sistem akan diuji melalui dua simulasi utama untuk mengevaluasi kinerja prototipe dari sisi komunikasi, akuisisi data sensor, pengolahan data, hingga visualisasi data. Berikut ini adalah hasil dan pembahasan dari masing-masing pengujian.

Hasil Rancang Bangun Alat

Sistem WSN-LEWS terdiri atas tiga unit perangkat keras, yaitu dua Node Sensor dan satu Base Station.



Gambar 3. 1 Keseluruhan sistem WSN-LEWS



Gambar 3. 2 Komponen Alat Sistem WSN-LEWS (a) Komponen Base Station, (b) Komponen Node 1, (c) Komponen Node 2

Komponen utama Base Station dan Node Sensor:

1. Mikrokontroler ESP32 Lora
2. Sensor MPU9250
3. RTC DS3231
4. Soil Moisture Sensor
5. Baterai
6. LCD
7. Antena
8. Compas
9. Water Levelling

Pengujian Komunikasi LoRa

Pengujian ini dilakukan untuk mengukur performa komunikasi antar node sensor dan base station menggunakan protokol LoRa (Long Range). Pengujian dilakukan di area terbuka dengan kondisi lingkungan minim gangguan sinyal.



Gambar 2. 3 Pengujian Lora

Jarak antara node dan base station divariasikan dari 20 hingga 100 meter. Setiap pengujian dilakukan sebanyak 20 kali pengiriman data untuk mengukur kekuatan sinyal (RSSI) Node 1 dan Node 2.

Table 1 Pengujian Pengiriman LoRa

Jarak (Meter)	RSSI Node 1 (dBm)	RSSI Node 2 (dBm)
20	- 46	- 46
40	-53	-52
60	- 62	- 63
80	- 67	- 66
100	-74	-74

Tabel di atas menunjukkan nilai Received Signal Strength Indicator (RSSI) dari dua node LoRa (Node 1 dan Node 2) yang diukur pada berbagai jarak: 20 m hingga 100 m. RSSI adalah indikator kekuatan sinyal yang diterima oleh perangkat penerima, diukur dalam satuan desibel-miliwatt (dBm), di mana nilai yang lebih negatif menunjukkan sinyal yang lebih lemah.

Pada jarak 20 meter, kedua node menerima sinyal dengan kekuatan yang sangat baik sebesar -46 dBm. Seiring bertambahnya jarak, nilai RSSI menurun secara bertahap, menandakan adanya pelemahan sinyal. Pada 40 meter, kekuatan sinyal turun ke sekitar -52 hingga -53 dBm, dan pada 60 meter turun lebih lanjut ke -62 dBm untuk Node 1 dan -63 dBm untuk Node 2. Pada 80 meter, nilai RSSI masih berada pada kisaran yang cukup untuk komunikasi yang stabil, yakni sekitar -66 hingga -67 dBm. Terakhir, pada jarak 100 meter, kekuatan sinyal mencapai -74 dBm untuk kedua node, yang masih dalam kisaran dapat diterima untuk komunikasi LoRa, meskipun mendekati ambang batas sinyal yang lemah.

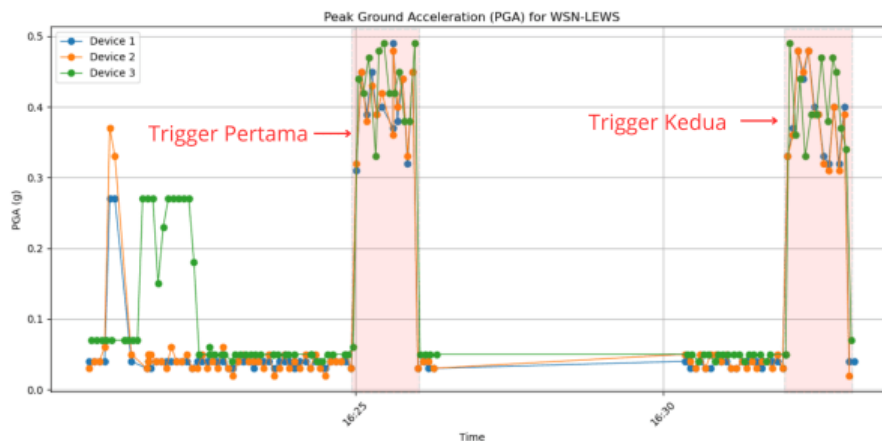
Secara keseluruhan komunikasi LoRa antar node masih berjalan dengan baik hingga jarak 100 meter di lingkungan uji, dengan tren penurunan RSSI yang konsisten seiring meningkatnya jarak. Hal ini mencerminkan karakteristik umum LoRa yang mampu menjaga kestabilan komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya rendah.

Simulasi Deteksi Longsor

Simulasi ini dilakukan dengan membuat gundukan tanah sebagai media pengamatan. Sensor MPU9250 dan soil moisture sensor ditanamkan pada bagian permukaan dan dalam gundukan. Tanah diatur dalam kondisi lembap kemudian dilakukan menggerakkan tanah secara manual untuk meniru efek pergeseran tanah. Kemudian masing-masing device akan melakukan pembacaan setiap 5 detik. Data percepatan tanah dan kadar air tanah akan ditampilkan pada dashboard web dan disimpan ke database.

**Gambar 3. 3 Simulasi deteksi tanah longsor dengan memberikan trigger**

Analisis Data Sensor



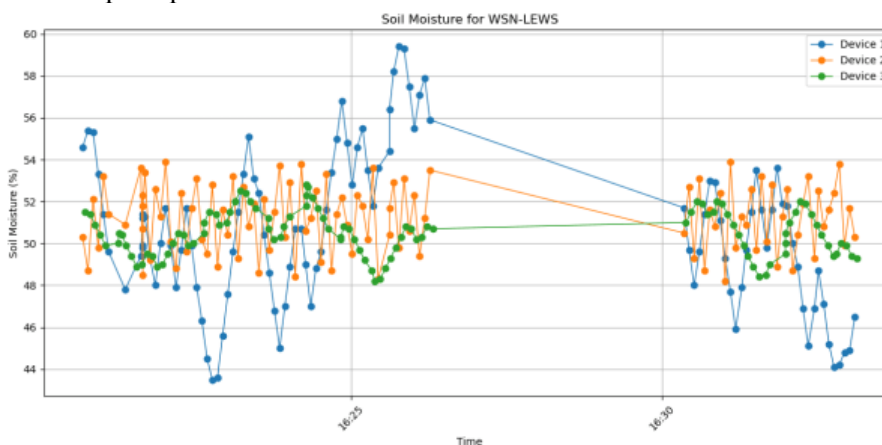
Gambar 3. 4 Grafik Peak Ground Acceleration (PGA) WSN-LEWS

Gambar 3.4 menunjukkan hasil pemantauan Peak Ground Acceleration (PGA) dari tiga perangkat sensor (Device 1, Device 2, dan Device 3) yang digunakan dalam sistem WSN-LEWS. Pengujian dilakukan dengan dua kali pemberian simulasi getaran atau trigger, yang masing-masing terjadi pada pukul 16:25 dan 16:32. Tujuan simulasi ini adalah untuk menguji respons sistem dalam mendeteksi pergerakan tanah yang dapat mengindikasikan potensi longsor.

Pada trigger pertama pukul 16:25, seluruh perangkat menunjukkan lonjakan nilai PGA secara signifikan hingga menyentuh nilai mendekati 0.5 g, yang berada di atas ambang batas kategori Siaga hingga Bahaya. Lonjakan ini menunjukkan bahwa sistem sensor berhasil mendeteksi adanya getaran secara serempak dan cepat dari ketiga node. Respon yang terekam memiliki pola serupa antara ketiga perangkat, yang mengindikasikan sinkronisasi antar node sensor berjalan dengan baik.

Setelah trigger pertama, nilai PGA dari ketiga perangkat kembali ke nilai normal atau baseline, yang berada di bawah 0.1 g, menandakan tidak adanya pergerakan signifikan. Selanjutnya, trigger kedua dilakukan pada pukul 16:32, dan kembali menghasilkan lonjakan nilai PGA pada ketiga perangkat. Respon sensor kembali konsisten, dengan pola kenaikan dan penurunan yang serupa seperti pada trigger pertama. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kejadian berulang dan menyajikan data secara *real-time* tanpa keterlambatan deteksi.

Kedua area berarsir merah dalam grafik menandai durasi respons sensor terhadap masing-masing simulasi trigger. Keberhasilan sistem dalam merespons kedua kejadian ini menegaskan bahwa perangkat WSN-LEWS telah berfungsi sesuai desain sebagai sistem pemantauan dan deteksi dini tanah longsor berbasis percepatan tanah.



Gambar 3. 5 Grafik Soil Moisture WSN-LEWS

Gambar 3.5 menunjukkan grafik hasil pengukuran kelembapan tanah (% soil moisture) dari tiga perangkat sensor (Device 1, Device 2, dan Device 3) pada sistem WSN-LEWS. Pengukuran dilakukan dalam kondisi uji di mana tanah dibuat lembap secara merata untuk mengevaluasi respons sensor terhadap perubahan kadar air tanah.

Secara umum, data menunjukkan bahwa ketiga perangkat mampu merekam fluktuasi kadar air tanah secara *real-time* dengan nilai yang relatif stabil dalam rentang 45% hingga 55%. Device 2 dan Device 3 menunjukkan pola pengukuran yang lebih stabil dan konsisten dengan sedikit variasi, sedangkan Device 1 memperlihatkan fluktuasi yang lebih tinggi. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan kedalaman penempatan sensor, heterogenitas tanah di sekitar sensor, atau perbedaan kalibrasi sensor.

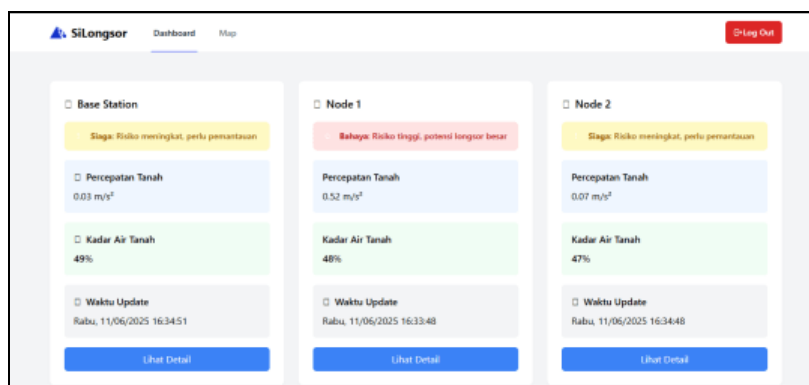
Teramati bahwa setelah pukul 16:25, terjadi sedikit peningkatan kadar air terutama pada Device 1 dan Device 2, yang kemungkinan disebabkan oleh efek kelembapan buatan yang mulai meresap ke area pengukuran. Namun, tidak ada lonjakan ekstrem yang menunjukkan kejenuhan tanah. Ini menunjukkan bahwa sistem sensor mampu menangkap perubahan kelembapan secara bertahap, sesuai dengan kondisi alami peresapan air ke dalam tanah.

Device 3 menunjukkan nilai kelembapan yang lebih konstan, yang mengindikasikan bahwa area sensor tersebut lebih stabil secara kondisi tanah atau tidak mengalami perubahan kelembapan signifikan selama periode pengamatan.

Dari grafik ini dapat disimpulkan bahwa sistem WSN-LEWS telah bekerja dengan baik dalam mengamati kelembapan tanah pada tiga titik pengamatan yang berbeda. Kemampuan untuk menangkap fluktuasi kelembapan secara presisi penting sebagai indikator pendukung dalam sistem peringatan dini tanah longsor, mengingat peningkatan kadar air dalam tanah merupakan salah satu faktor pemicu utama pergerakan massa tanah.

Tampilan Website dan Telegram

Sistem yang dirancang telah berhasil mengintegrasikan pembacaan data sensor, pemrosesan logika peringatan, serta pengiriman informasi peringatan secara *real-time* melalui dua kanal utama, yaitu dashboard berbasis web dan layanan pesan instan Telegram. Gambar 3.6 dan 3.7 menunjukkan keberhasilan sistem dalam menampilkan serta menyampaikan informasi kondisi tanah secara komprehensif.

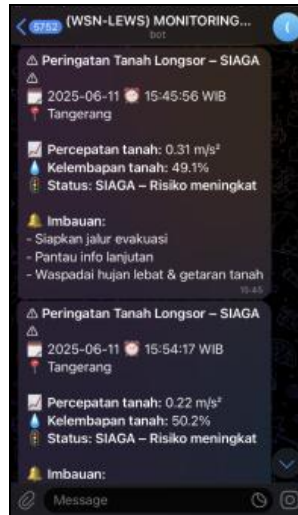


Gambar 3. 6 Tampilan dashboard Telegram

Pada Gambar 3.6 ditunjukkan antarmuka pengguna dari dashboard web yang memuat informasi dari tiga titik pengamatan, yakni Base Station, Node 1, dan Node 2. Setiap panel informasi menyajikan data yang meliputi:

- Nilai percepatan tanah (m/s²) sebagai indikator pergerakan tanah,
- Kelembapan tanah (%) sebagai indikator kondisi kadar air di dalam tanah,
- Status peringatan yang dikategorikan dalam tiga tingkat: Aman, Siaga, dan Bahaya, serta
- Informasi waktu pembaruan data terakhir.

Sebagai contoh, Node 1 pada saat pengujian menunjukkan nilai percepatan tanah sebesar 0.52 m/s^2 dan kelembapan tanah sebesar 60%, sehingga sistem secara otomatis memberikan status peringatan Bahaya dengan keterangan “Risiko tinggi, potensi longsor besar”. Hal ini menunjukkan bahwa logika penentuan status peringatan berdasarkan ambang batas parameter bekerja sesuai dengan yang dirancang.



Gambar 3. 7 Tampilan Telegram

Gambar 3.7 menunjukkan keluaran sistem berupa notifikasi otomatis yang dikirim melalui platform Telegram. Pesan tersebut berisi informasi lokasi, waktu, nilai percepatan tanah, kelembapan tanah, serta status peringatan yang disampaikan secara ringkas dan sistematis. Selain itu, sistem juga menambahkan bagian imbauan kepada *user*.

pada pengujian tanggal 11 Juni 2025 pukul 15:45 WIB, sistem mengirimkan notifikasi peringatan SIAGA dengan parameter percepatan 0.31 m/s^2 dan kelembapan tanah 49.1%. Pesan peringatan kedua dikirim satu menit kemudian dengan parameter berbeda, menunjukkan bahwa sistem mampu memperbarui informasi dan mengirimkan peringatan secara respon-dinamis terhadap perubahan kondisi sensor.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan prototipe sistem peringatan dini tanah longsor berbasis jaringan sensor nirkabel (WSN-LEWS) dengan fitur pemantauan berbasis web dan notifikasi *real-time* melalui Telegram. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan komunikasi antar node menggunakan protokol LoRa dengan jangkauan efektif hingga 100 meter dan nilai RSSI yang masih dalam batas dapat diterima. Simulasi deteksi longsor menunjukkan respons sensor yang konsisten terhadap pergerakan tanah dengan nilai percepatan mencapai 0.5 g . Selain itu, sistem juga mampu memantau perubahan kadar air tanah dengan akurasi yang cukup baik pada tiga titik pengamatan. Integrasi data ke dalam website dan pengiriman notifikasi ke Telegram berjalan sesuai dengan desain sistem. Dengan demikian, prototipe WSN-LEWS ini menunjukkan kinerja yang andal dalam memantau parameter-parameter tanah dan memberikan peringatan dini secara tepat waktu.

REFERENSI

- [1] A. Deristani, Mujiyo, and A. Hidayat, "Analysis of landslide susceptibility in Tirtomoyo Watershed, Central Java, Indonesia," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1180, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1180/1/012039.
- [2] R. Emberson, D. Kirschbaum, and T. Stanley, "Global connections between El Nino and landslide impacts," *Nat. Commun.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-22398-4.
- [3] S. Jeong, J. Ko, and J. Kim, "The effectiveness of a wireless sensor network system for landslide monitoring," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 8073–8086, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960570.
- [4] W. Yi, "Application of Wireless Sensors and Their Networks in Monitoring Landslides," *Acad. J. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 145–147, 2023, doi: 10.54097/ajst.v4i2.4192.
- [5] A. Rachmawardani, R. H. Virgianto, D. Prabowo, A. Widiatmoko, M. F. Rasya, and K. M. Ash-shiddiqi, "Wireless Sensor Network (WSN) of a flood monitoring system based on the Internet of Things (IoT)," vol. 01004, 2023.
- [6] G. Quoc-Anh, N. Dinh-Chinh, T. Duc-Nghia, T. Duc-Tan, K. T. Nguyen, and K. Sandrasegaran, "Wireless technology for monitoring site-specific landslide in Vietnam," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 6, pp. 4448–4455, 2018, doi: 10.11591/ijece.v8i6.pp4448-4455.
- [7] Q. A. Gian, D. T. Tran, D. C. Nguyen, V. H. Nhu, and D. Tien Bui, "Design and implementation of site-specific rainfall-induced landslide early warning and monitoring system: a case study at Nam Dan landslide (Vietnam)," *Geomatics, Nat. Hazards Risk*, vol. 8, no. 2, pp. 1978–1996, 2017, doi: 10.1080/19475705.2017.1401561.
- [8] M. V. Ramesh, "Design, development, and deployment of a wireless sensor network for detection of landslides," *Ad Hoc Networks*, vol. 13, no. PART A, pp. 2–18, 2014, doi: 10.1016/j.adhoc.2012.09.002.
- [9] A. Rachmawardani *et al.*, "State of the Art of Remote Sensing in Flood Early Warning System: Review Article," 2022, pp. 108–117.