Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 15, No. 6, November 2026, hal. 585 – 595
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.15.6.585-595.2026

Open Access

Pengembangan Sistem Monitoring dan Peringatan Dini Tanah Longsor Berbasis Multisensor Wireless Sensor Network Menggunakan LoRa

Nisya Lutfiana, Yolanda Erlian A.P, Melany Febrina , Mahardika Yoga Darmawan, Eko Satria*
Department of Physics, Faculty of Science, Institut Teknologi Sumatera, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 17 Juli 2026
Direvisi: 9 September 2026
Diterima: 16 November 2026

Kata kunci:
LoRa
Multisensory
sistem monitoring
tanah longsor
wireless sensor network

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem monitoring dan peringatan dini tanah longsor berbasis multisensor Wireless Sensor Network (WSN) menggunakan komunikasi LoRa. Sistem yang dikembangkan berupa prototipe yang mengintegrasikan sensor ultrasonik HC-SR04 dan sensor inframerah untuk mendeteksi pergeseran tanah, sensor accelerometer MPU-6050 untuk mengukur kemiringan tanah, serta sensor soil moisture untuk memantau kelembaban tanah. Data dari node sensor dikirimkan ke gateway menggunakan modul LoRa SX1278 dan ditampilkan pada website monitoring secara waktu nyata, serta dilengkapi dengan notifikasi melalui aplikasi Telegram. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memonitor perubahan pergeseran, kemiringan, dan kelembaban tanah secara bersamaan. Pada pengujian laboratorium, kemiringan maksimum yang terdeteksi mencapai 52,04° dengan kelembaban 100% dan menghasilkan pergeseran tanah sebesar 25,82 mm, sedangkan kemiringan minimum sebesar 13,02° dengan kelembaban 96% menghasilkan pergeseran sebesar 14,70 mm. Pengujian komunikasi LoRa menunjukkan bahwa jarak pengiriman data mempengaruhi waktu tunda, nilai RSSI, dan kehilangan paket data, dengan delay pengiriman rata-rata sekitar 16 detik. Sistem ini dapat digunakan sebagai alat bantu pemantauan kondisi tanah pada skala prototipe. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai alat bantu monitoring kondisi tanah dan indikasi awal potensi terjadinya tanah longsor pada skala prototipe. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut menuju implementasi pada kondisi lapangan yang sebenarnya.

Keywords:
Landslide
LoRa
monitoring system
multisensor
wireless sensor network

Penulis Korespondensi:
Eko Satria
Email: eko.satria@fi.itera.ac.id

This study aims to develop a landslide monitoring and early warning system based on a multisensor Wireless Sensor Network (WSN) using LoRa communication. The proposed system integrates an HC-SR04 ultrasonic sensor and an infrared sensor to detect ground displacement, an MPU-6050 accelerometer to measure ground inclination, and a soil moisture sensor to monitor soil moisture levels. Data collected by the sensor node are transmitted to a gateway through an SX1278 LoRa module and displayed on a web-based monitoring platform in real time. The system also incorporates Telegram notifications to provide alerts. Experimental results demonstrate that the system can simultaneously monitor changes in ground displacement, inclination, and soil moisture. Laboratory tests showed that the maximum recorded inclination of 52.04°, at a soil moisture level of 100%, corresponded to a ground displacement of 25.82 mm, while the minimum inclination of 13.02°, at a soil moisture level of 96%, corresponded to a displacement of 14.70 mm. LoRa communication tests indicated that transmission distance affected communication delay, received signal strength indicator (RSSI), and packet loss, with an average transmission delay of approximately 16 seconds. Overall, the developed prototype demonstrates the potential to support soil condition monitoring and provide early indications of landslide hazards. Further development and field validation are required to evaluate its performance under actual environmental conditions.

Copyright © 2026 Author(s)

I. PENDAHULUAN

Tanah longsor merupakan fenomena geologi yang dipengaruhi oleh kondisi topografi, sifat mekanik tanah, serta faktor lingkungan seperti curah hujan. Peristiwa ini dapat menimbulkan korban jiwa dan kerusakan infrastruktur, terutama pada wilayah berlereng yang dihuni masyarakat (Petley, 2012). Penelitian lapangan menunjukkan bahwa perubahan kelembaban tanah dan proses infiltrasi air berkaitan dengan perkembangan deformasi lereng, sehingga pemantauan parameter fisis secara berkelanjutan diperlukan untuk mendukung mitigasi bencana (Chen et al., 2024; Guo et al., 2024).

Kemiringan lereng dan kondisi air dalam tanah merupakan dua parameter penting dalam proses ketidakstabilan lereng. Pengujian model tanah tak jenuh menunjukkan bahwa intensitas infiltrasi dan kelembaban awal memengaruhi perubahan kondisi lereng (Yang & Huang, 2023). Penelitian lapangan Li et al. (2024) juga memperlihatkan keterkaitan antara curah hujan, tekanan air pori, dan pergeseran permukaan lereng. Selain itu, Yang et al. (2025) menemukan bahwa respons deformasi terhadap infiltrasi dapat berbeda pada berbagai sudut kemiringan. Temuan tersebut mendukung penggunaan beberapa parameter pengukuran secara bersamaan, bukan hanya satu indikator.

Perkembangan sistem peringatan dini tanah longsor telah mengarah pada pemantauan kondisi lereng menggunakan sensor yang terintegrasi dengan jaringan komunikasi. Intrieri et al. (2012) menunjukkan penerapan sistem peringatan dini berbasis pemantauan deformasi lereng. Selanjutnya, Liu et al. (2023) mengembangkan sistem peringatan berbiaya relatif rendah dengan pemantauan kelembaban, tekanan air pori, dan sudut kemiringan. Chaulya et al. (2024) serta Gupta & Satyam (2024) menunjukkan pemanfaatan data sensor secara berkelanjutan untuk mendukung analisis kondisi lereng. Di Indonesia, Widodo et al. (2024) mengembangkan sistem pemantauan tanah longsor berbasis WSN pada wilayah rawan longsor di Lampung.

Meskipun demikian, penerapan sistem monitoring di daerah terpencil masih menghadapi kendala dalam pengiriman data dan keberlanjutan pengoperasian perangkat. Teknologi LoRa menjadi salah satu alternatif komunikasi nirkabel karena mendukung transmisi data berdaya rendah pada jarak yang relatif jauh (Augustin et al., 2016; Raza et al., 2017). (Wang et al. (2022) melaporkan pengembangan arsitektur monitoring tanah longsor berbasis LoRa, sedangkan Muladi et al. (2024) mengevaluasi pengaruh konfigurasi komunikasi terhadap kinerja pengiriman data pada sistem peringatan dini. Penelitian Poetra et al. (2024), Hasani et al. (2024), dan Satrio et al. (2026) juga memperlihatkan penerapan sensor dan komunikasi LoRa pada prototipe pemantauan serta peringatan bencana.

Berdasarkan perkembangan tersebut, penelitian ini berfokus pada pengembangan prototipe monitoring dan peringatan dini tanah longsor berbasis multisensor Wireless Sensor Network (WSN) menggunakan komunikasi LoRa SX1278. Sistem mengintegrasikan pembacaan pergeseran tanah, sudut kemiringan, dan kelembaban tanah dengan penyimpanan data dan visualisasi pada website serta notifikasi melalui Telegram. Selain menguji kinerja pengukuran sensor dan respons pergeseran pada skala laboratorium, penelitian ini mengevaluasi waktu tunda, RSSI, dan packet loss pada variasi jarak transmisi. Pengujian dilakukan sebagai tahap awal sebelum sistem diterapkan pada kondisi lapangan yang sebenarnya.

II. METODE

2.1 Perancangan dan Prinsip Kerja Sistem

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental melalui pengembangan prototipe sistem monitoring dan peringatan dini tanah longsor berbasis multisensor WSN menggunakan komunikasi LoRa. Sistem dirancang untuk memantau tiga parameter utama, yaitu pergeseran tanah, kemiringan tanah, dan kelembaban tanah. Secara umum, sistem terdiri atas node sensor, gateway, dan server monitoring berbasis web. Pendekatan penggabungan beberapa sensor pada sistem peringatan dini juga digunakan oleh Liu et al. (2023) dan Widodo et al. (2024).

Node sensor menggunakan mikrokontroler Arduino Leonardo yang diintegrasikan dengan sensor ultrasonik HC-SR04 dan sensor inframerah untuk mendeteksi perubahan jarak sebagai indikator pergeseran tanah, sensor accelerometer MPU-6050 untuk mengukur sudut kemiringan, serta sensor soil moisture untuk memantau kelembaban tanah. Data hasil pengukuran dibaca dan diolah oleh mikrokontroler, kemudian dikirimkan ke gateway menggunakan modul komunikasi LoRa SX1278 (Ra-

02). Pemanfaatan sensor jarak, kemiringan, dan kelembaban pada sistem serupa telah dilaporkan oleh Hasan et al. (2024) dan Poetra et al. (2024).

Gateway menggunakan NodeMCU yang terhubung dengan modul LoRa sebagai penerima data dan meneruskannya ke server melalui jaringan Wi-Fi. Data yang diterima disimpan dalam basis data MySQL dan ditampilkan melalui website monitoring dalam bentuk data numerik, grafik, serta status kondisi tanah. Sistem juga dilengkapi dengan mekanisme evaluasi parameter berdasarkan kriteria peringatan yang telah ditetapkan. Apabila parameter pengukuran memenuhi kriteria tersebut, sistem akan mengirimkan notifikasi melalui aplikasi Telegram. Proses pembacaan dan pengiriman data dilakukan secara periodik sehingga perubahan kondisi tanah dapat dipantau secara berkelanjutan. Diagram alir sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1. Arsitektur pengiriman data dari node ke gateway dan platform monitoring juga diterapkan pada penelitian Wang et al. (2022) dan Muladi et al. (2024).

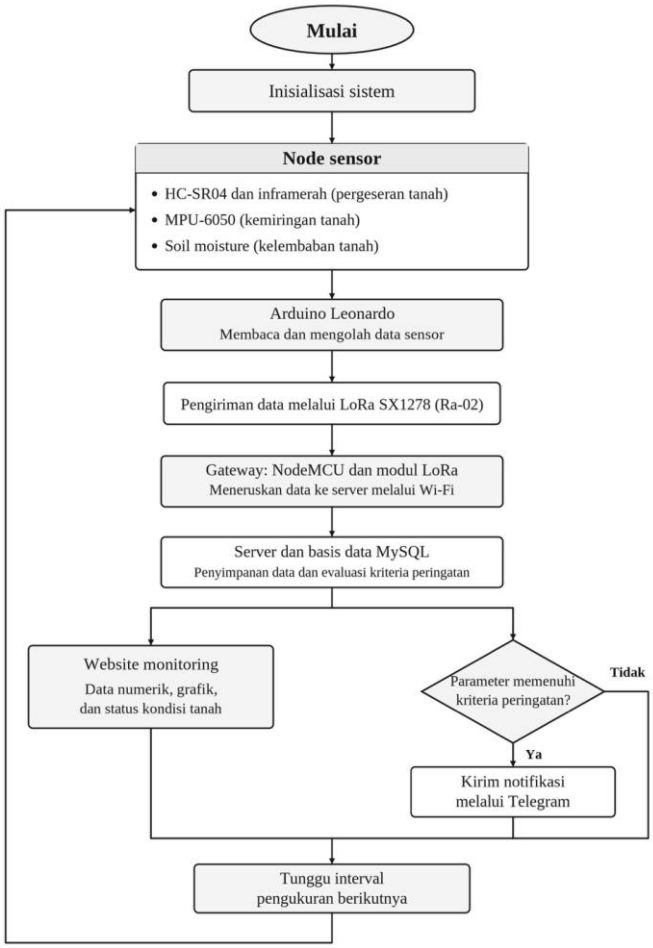
2.2 Prosedur Pengujian dan Analisis Data

Pengujian sistem dilakukan pada skala prototipe dalam lingkungan laboratorium. Tahap awal pengujian dilakukan melalui kalibrasi masing-masing sensor dengan membandingkan hasil pembacaan terhadap alat ukur acuan. Sensor ultrasonik HC-SR04 dan sensor inframerah dibandingkan dengan pengukuran menggunakan penggaris, sensor accelerometer MPU-6050 dibandingkan dengan pengukuran sudut menggunakan perangkat ponsel, sedangkan sensor soil moisture dibandingkan dengan soil tester. Hasil pengukuran digunakan untuk menentukan nilai kesalahan masing-masing sensor. Pengujian laboratorium pada model lereng juga digunakan untuk memeriksa respons perangkat pemantauan sebelum penerapan lapangan (Kumar & Chandar, 2023).

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan memvariasikan sudut kemiringan dan kelembaban tanah untuk mengamati perubahan pergeseran serta kecepatan pergeseran tanah. Variasi kemiringan dilakukan dengan mengubah sudut lereng secara bertahap, sedangkan variasi kelembaban diperoleh melalui penambahan air pada media tanah. Perubahan jarak pergeseran dicatat terhadap waktu untuk memperoleh kecepatan pergeseran tanah pada kondisi pengujian yang berbeda. Hubungan antara sudut kemiringan dan kecepatan pergeseran dianalisis menggunakan regresi polinomial orde dua sebagai pendekatan empiris pada data pengujian. Pengaruh variasi kelembaban dan waktu dianalisis berdasarkan kecenderungan data hasil pengukuran.

Kinerja komunikasi WSN berbasis LoRa dievaluasi dengan memvariasikan jarak antara node sensor dan gateway pada 5, 10, 25, 50, dan 75 m. Parameter yang diamati meliputi waktu tunda pengiriman data (delay), Received Signal Strength Indicator (RSSI), dan packet loss. Pemilihan parameter tersebut sejalan dengan evaluasi kinerja komunikasi pada sistem berbasis LoRa yang dilakukan oleh Muladi et al. (2024). Selain itu, dilakukan pengujian integrasi sistem untuk mengamati kemampuan pengiriman data ke website monitoring dan notifikasi melalui Telegram. Seluruh hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dan kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja sistem pada skala prototipe.

Kesalahan pengukuran dievaluasi menggunakan nilai rata-rata kesalahan absolut (*Mean Absolute Error*/MAE) yang diperoleh dari selisih absolut antara hasil pembacaan sensor dan nilai alat ukur acuan.



Gambar 1 Diagram alir sistem monitoring dan peringatan dini tanah longsor berbasis multisensor WSN menggunakan komunikasi LoRa.

III. HASIL DAN DISKUSI

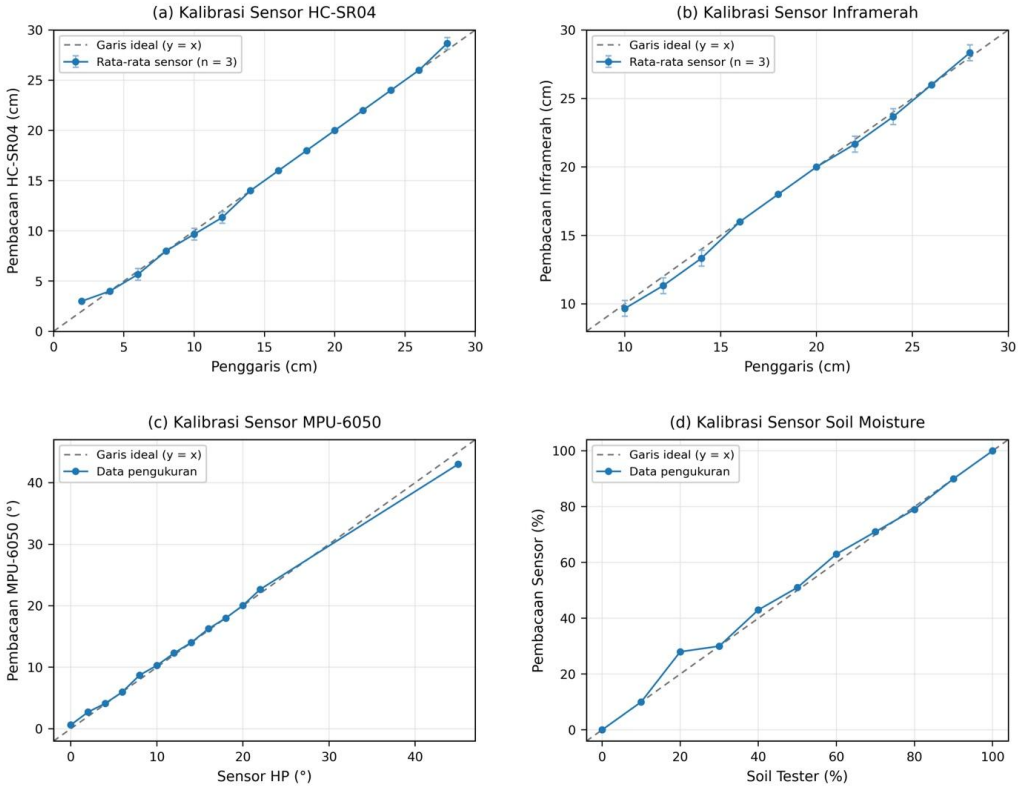
3.1 Implementasi Sistem Monitoring Multisensor

Berdasarkan arsitektur sistem dan alur kerja yang ditunjukkan pada Gambar 1, sistem monitoring dan peringatan dini tanah longsor berbasis multisensor WSN berhasil diimplementasikan pada skala prototipe. Sistem terdiri atas *node* sensor yang mengakuisisi data pergeseran tanah, kemiringan lereng, dan kelembaban tanah, *gateway* berbasis komunikasi LoRa, serta server monitoring berbasis *web* sebagai media visualisasi data dan pengiriman notifikasi.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa *node* sensor mampu mengirimkan data secara periodik ke *gateway* menggunakan modul LoRa, dan data tersebut dapat diteruskan ke *server* serta ditampilkan pada *website* monitoring secara waktu nyata relatif sesuai interval pengiriman data. Integrasi antara perangkat keras, komunikasi nirkabel, dan perangkat lunak berjalan sesuai dengan perancangan sistem.

3.2 Hasil Kalibrasi Sensor

Kalibrasi dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian pembacaan masing-masing sensor terhadap alat ukur acuan sebelum digunakan dalam pengujian sistem. Hasil kalibrasi sensor ultrasonik HC-SR04, inframerah, accelerometer MPU-6050, dan soil moisture ditunjukkan pada Gambar 2(a–d).



Gambar 2 Hasil kalibrasi sensor (a) ultrasonik HC-SR04, (b) inframerah, (c) accelerometer MPU-6050, dan (d) soil moisture terhadap alat ukur acuan.

Pada Gambar 2(a), sensor ultrasonik HC-SR04 menunjukkan pembacaan yang secara umum mendekati nilai acuan pada rentang pengukuran 2–28 cm. Penyimpangan terbesar terjadi pada jarak acuan 2 cm, dengan pembacaan sensor sebesar 3 cm. Pada jarak lainnya, hasil pengukuran relatif mengikuti garis ideal. Pola serupa terlihat pada sensor inframerah pada Gambar 2(b), dengan pembacaan yang mendekati nilai acuan dalam rentang 10–28 cm. Meskipun terdapat beberapa penyimpangan, kedua sensor menunjukkan respons terhadap perubahan jarak yang sesuai dengan kecenderungan nilai acuan.

Hasil kalibrasi sensor MPU-6050 pada Gambar 2(c) menunjukkan bahwa sudut kemiringan yang terukur secara umum mengikuti perubahan sudut pada alat ukur acuan. Pada sudut acuan 0°, sensor menunjukkan pembacaan sebesar 0,62°, sedangkan pada sudut acuan 45° diperoleh pembacaan sebesar 43°. Perbedaan ini menunjukkan adanya penyimpangan pengukuran, meskipun secara keseluruhan sensor mampu mengikuti perubahan sudut kemiringan pada rentang yang diuji.

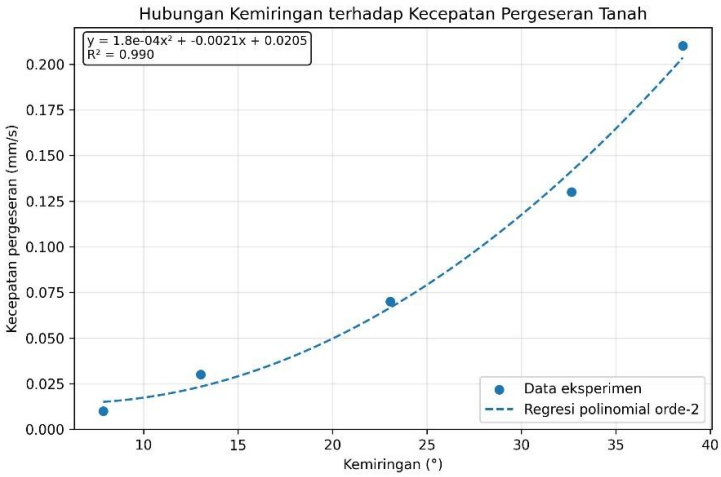
Sementara itu, Gambar 2(d) menunjukkan hasil kalibrasi sensor kelembaban tanah terhadap soil tester. Pembacaan sensor secara umum meningkat mengikuti nilai kelembaban acuan. Penyimpangan terbesar terjadi pada kelembaban acuan 20%, dengan pembacaan sensor sebesar 28%. Perbedaan ini dapat berkaitan dengan karakteristik respons sensor serta kondisi media tanah saat pengukuran. Meskipun demikian, sensor masih menunjukkan kecenderungan peningkatan pembacaan yang sesuai dengan perubahan kelembaban pada rentang pengujian.

Berdasarkan perbandingan nilai pembacaan dengan alat ukur acuan, diperoleh rata-rata kesalahan absolut masing-masing sebesar 0,21 cm untuk HC-SR04, 0,27 cm untuk sensor inframerah, 0,44° untuk MPU-6050, dan 1,55 poin persentase untuk sensor kelembaban tanah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keempat sensor dapat merespons perubahan parameter yang dipantau, meskipun masih terdapat penyimpangan pada beberapa titik pengukuran. Oleh karena itu, hasil kalibrasi ini digunakan sebagai dasar evaluasi kemampuan pengukuran sensor dalam sistem monitoring tanah longsor pada skala prototipe.

3.3 Pengaruh Kemiringan terhadap Kecepatan Pergeseran Tanah

Hasil pengujian variasi kemiringan terhadap kecepatan pergeseran tanah ditunjukkan pada Gambar 3. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan sudut kemiringan lereng dari 7,86° hingga

38,55°. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan menyebabkan peningkatan kecepatan pergeseran tanah dari 0,01 mm/s hingga 0,21 mm/s.



Gambar 3 Hubungan sudut kemiringan lereng terhadap kecepatan pergeseran tanah dengan pendekatan regresi polinomial orde dua secara empiris.

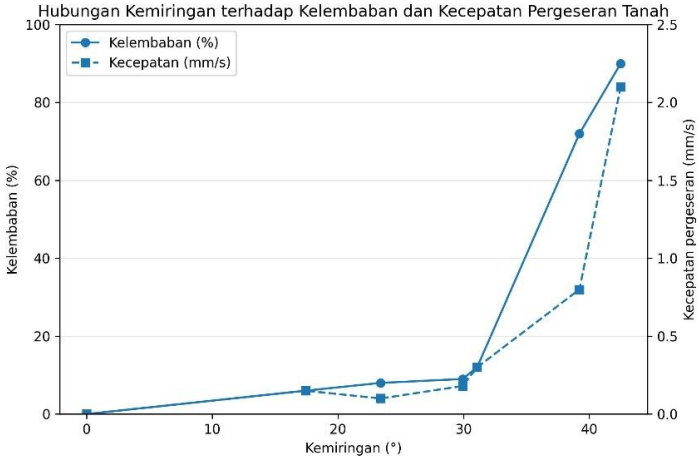
Hubungan kedua parameter didekati menggunakan regresi polinomial orde dua dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,947. Model tersebut digunakan sebagai pendekatan empiris untuk menggambarkan kecenderungan nonlinier data pada rentang pengujian, bukan untuk menyatakan bahwa kecepatan pergeseran tanah secara umum memiliki ketergantungan kuadratik terhadap sudut kemiringan.

Secara fisis, peningkatan kemiringan lereng memperbesar komponen gaya gravitasi yang bekerja sejajar bidang lereng sehingga meningkatkan kecenderungan material tanah untuk bergerak. Namun, pergerakan tanah juga dipengaruhi oleh gaya gesek, karakteristik material, dan kondisi kelembaban tanah. Wu et al. (2023) menunjukkan bahwa perubahan sudut kemiringan memengaruhi karakteristik pergerakan massa tanah pada pengujian laboratorium. Hasil serupa dilaporkan oleh Jan et al. (2025), yang menunjukkan peningkatan kecepatan gerakan material granular seiring bertambahnya kemiringan saluran. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa kemiringan lereng berperan dalam perubahan kecepatan pergeseran tanah, sedangkan model regresi yang digunakan terbatas pada kondisi pengujian prototipe.

3.4 Pengaruh Kelembaban terhadap Kecepatan Pergeseran Tanah

Hasil pengujian variasi kelembaban dan kemiringan terhadap kecepatan pergeseran tanah ditunjukkan pada Gambar 4. Pada pengujian ini, kelembaban tanah ditingkatkan secara bertahap melalui penambahan air, sementara sudut kemiringan divariasikan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada variasi kelembaban tanah hingga 89% diperoleh kecepatan pergeseran hingga 1,99 mm/s, terutama pada kondisi kemiringan lereng yang curam (>35°). Peningkatan kadar air pada tanah tak jenuh dapat mengurangi isapan matrik dan, pada kondisi tertentu, meningkatkan tekanan air pori sehingga tahanan geser tanah berkurang. Mekanisme tersebut telah ditunjukkan dalam penelitian infiltrasi dan pergerakan lereng oleh Yang dan Huang (2023), Li et al. (2024), serta Chen et al. (2024). Karena kemiringan dan kelembaban divariasikan dalam pengujian ini, hasilnya menunjukkan kecenderungan pergerakan yang lebih cepat pada kombinasi kondisi tersebut, bukan pengaruh tunggal salah satu parameter. Berdasarkan parameter yang diterapkan pada sistem, kondisi tersebut diklasifikasikan sebagai kondisi bahaya, dan sistem berhasil mengirimkan notifikasi peringatan dini kepada pengguna.



Gambar 4 Hubungan kemiringan lereng terhadap kelembaban tanah dan kecepatan pergeseran tanah.

3.5 Variasi Waktu terhadap Pergeseran Tanah

Hasil pengujian hubungan waktu terhadap pergeseran tanah pada berbagai sudut kemiringan ditunjukkan pada Gambar 5. Secara umum, pergeseran tanah meningkat seiring bertambahnya waktu pengamatan, tetapi dengan laju yang berbeda pada setiap kondisi kemiringan. Pada sudut 52,04°, pergeseran terjadi relatif cepat dalam waktu pengamatan yang singkat, sedangkan pada sudut 13,02° pergeseran berlangsung lebih lambat. Sementara itu, pada sudut 32,65° terlihat peningkatan pergeseran yang cukup tajam hingga mencapai sekitar 80 mm. Perbedaan ini menunjukkan bahwa perubahan posisi tanah terhadap waktu tidak memiliki pola yang sama pada seluruh kondisi pengujian.

Secara fisis, perbedaan laju pergeseran tersebut berkaitan dengan keseimbangan antara gaya gravitasi yang bekerja sejajar bidang lereng dan gaya penahan gerakan tanah. Peningkatan sudut kemiringan dapat memperbesar gaya penggerak, sedangkan kondisi kelembaban turut memengaruhi tahanan geser tanah. Proses pergeseran dapat berlangsung secara bertahap ketika kondisi gaya penggerak dan tahanan tanah berubah selama pengujian. Yang et al. (2025) melaporkan bahwa perkembangan deformasi lereng dipengaruhi oleh kemiringan, infiltrasi, dan waktu, sedangkan Guo et al. (2024) mendeskripsikan perkembangan deformasi bertahap pada kasus longsor yang dipicu hujan.

Pada Gambar 5, pergeseran akhir pada sudut 32,65° lebih besar dibandingkan beberapa sudut yang lebih curam. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya pergeseran tidak hanya ditentukan oleh kemiringan lereng. Perbedaan kondisi pengujian, termasuk kelembaban dan karakteristik media tanah, dapat turut memengaruhi respons pergeseran (Yang et al., 2025). Selain itu, durasi pengamatan setiap variasi sudut tidak sama sehingga perbandingan pergeseran akhir perlu dilakukan secara hati-hati. Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan kemampuan sistem dalam merekam perkembangan pergeseran tanah terhadap waktu pada beberapa kondisi kemiringan, sebagai salah satu parameter monitoring pada skala prototipe.

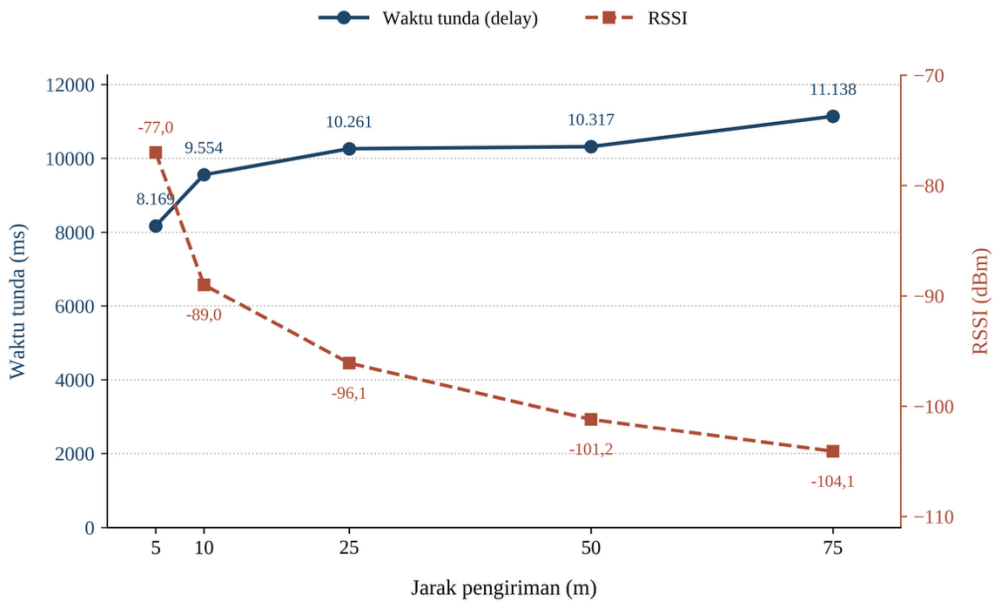


Gambar 5 Perubahan pergeseran tanah terhadap waktu pada berbagai sudut kemiringan lereng.

3.6 Kinerja Komunikasi Wireless Sensor Network Berbasis LoRa

Evaluasi kinerja komunikasi dilakukan dengan mengukur waktu tunda (delay), *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), dan packet loss pada variasi jarak antara node sensor dan gateway. Hasil pengujian hubungan jarak pengiriman terhadap waktu tunda dan RSSI ditunjukkan pada Gambar 6. Waktu tunda pengiriman meningkat dari 8.169 ms pada jarak 5 m menjadi 11.138 ms pada jarak 75 m. Sebaliknya, nilai RSSI menurun dari −77,0 dBm menjadi −104,1 dBm seiring bertambahnya jarak pengiriman. Kecenderungan ini menunjukkan peningkatan waktu tunda dan penurunan kekuatan sinyal pada kondisi pengujian yang lebih jauh. Pengaruh kondisi transmisi terhadap kualitas pengiriman data LoRa juga dibahas oleh Wang et al. (2022) dan Muladi et al. (2024).

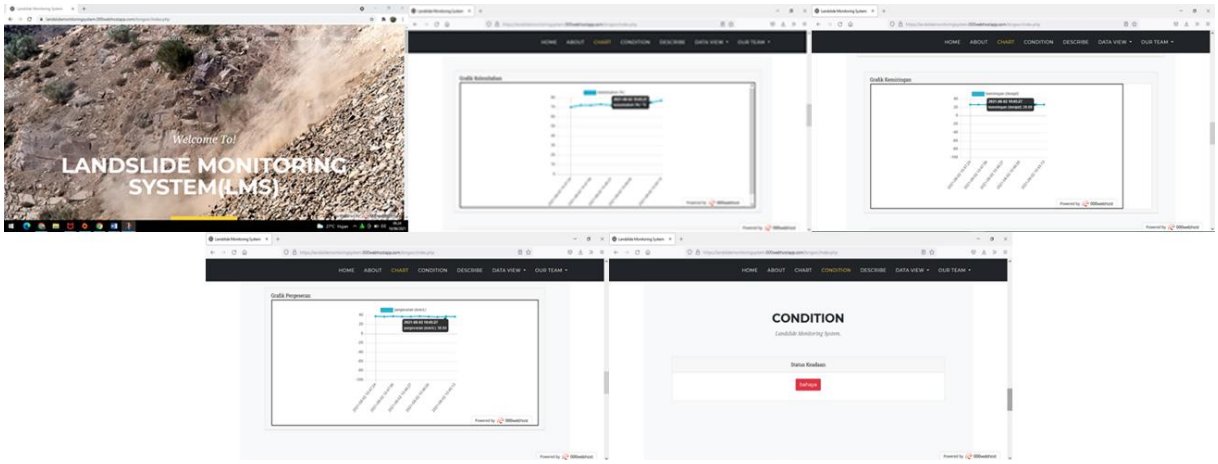
Pengujian packet loss menunjukkan bahwa pada jarak 5, 10, 25, dan 50 m tidak terjadi kehilangan paket data. Sementara itu, pada jarak 75 m diperoleh packet loss sebesar 10%. Kondisi ini menunjukkan penurunan keberhasilan penerimaan paket pada jarak pengujian terjauh. Kehilangan paket dapat berkaitan dengan pelemahan sinyal serta kondisi lingkungan dan konfigurasi komunikasi, sebagaimana dipertimbangkan dalam evaluasi LoRa oleh Muladi et al. (2024). Secara keseluruhan, sistem masih dapat mengirimkan data pada seluruh variasi jarak pengujian, tetapi pada jarak 75 m sebagian paket tidak berhasil diterima. Hasil ini menunjukkan bahwa keandalan penerimaan perlu diperhatikan untuk penerapan pada jarak lebih jauh.



Gambar 6 Hubungan jarak pengiriman data terhadap waktu tunda (delay) dan Received Signal Strength Indicator (RSSI) pada komunikasi LoRa.

3.7 Integrasi Sistem Monitoring dan Tampilan Website

Sebagai bukti integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak, sistem monitoring berbasis web digunakan untuk menampilkan data hasil pengukuran sensor secara terpusat. Tampilan website ditunjukkan pada Gambar 7, yang memperlihatkan data numerik, grafik pemantauan, serta status kondisi tanah. Pendekatan visualisasi dan penyampaian status bahaya menggunakan sistem pemantauan jarak jauh juga dilaporkan oleh Liu et al. (2023), Chaulya et al. (2024), dan Satrio et al. (2026).



Gambar 7 Tampilan *website* monitoring sistem LMS yang menampilkan data sensor, grafik pemantauan, dan status kondisi tanah secara waktu nyata relatif.

Website monitoring memungkinkan pengguna memantau kondisi tanah dari beberapa node sensor secara bersamaan, sedangkan notifikasi otomatis melalui Telegram dikirimkan ketika parameter kemiringan, kelembaban, dan kecepatan pergeseran memenuhi kriteria yang diterapkan pada prototipe. Sistem ini berfungsi sebagai sarana pemantauan dan pemberian indikasi awal perubahan kondisi tanah pada skala laboratorium. Penerapan sistem peringatan serupa berbasis jaringan sensor juga dilaporkan oleh Widodo et al. (2024) dan Satrio et al. (2026).

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan prototipe sistem monitoring dan peringatan dini tanah longsor berbasis multisensor *Wireless Sensor Network* (WSN) menggunakan komunikasi LoRa. Sistem mampu mengintegrasikan pengukuran pergeseran tanah, kemiringan lereng, dan kelembaban tanah serta menampilkan hasil pemantauan melalui website dan notifikasi Telegram. Hasil kalibrasi menunjukkan nilai rata-rata kesalahan absolut masing-masing sebesar 0,21 cm untuk HC-SR04, 0,27 cm untuk sensor inframerah, 0,44° untuk MPU-6050, dan 1,55 poin persentase untuk sensor kelembaban tanah. Pengujian laboratorium menunjukkan bahwa peningkatan kemiringan dan kelembaban tanah cenderung diikuti peningkatan kecepatan pergeseran, dengan hubungan kemiringan dan kecepatan pergeseran yang didekati menggunakan regresi polinomial orde dua secara empiris ($R^2 = 0{,}947$). Pengujian komunikasi LoRa menunjukkan penurunan nilai RSSI dan peningkatan waktu tunda seiring bertambahnya jarak pengiriman, dengan *packet loss* sebesar 10% pada jarak 75 m. Secara keseluruhan, sistem berpotensi digunakan untuk pemantauan kondisi tanah pada skala prototipe, tetapi masih memerlukan pengujian lapangan dan evaluasi ambang batas peringatan sebelum diterapkan pada kondisi sebenarnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Fisika, Fakultas Sains, Institut Teknologi Sumatera (ITERA), atas dukungan fasilitas dan bantuan teknis selama pelaksanaan penelitian.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GEERATIF DAN TEKNOLOGI BERBASIS AI

Selama proses penyusunan manuskrip ini, penulis menggunakan ChatGPT untuk penyuntingan bahasa. Penulis telah meninjau dan memverifikasi keluaran yang dihasilkan serta bertanggung jawab penuh atas isi dan integritas publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466. https://doi.org/10.3390/s16091466

Chaulya, S. K., Mishra, P. K., Kumar, N., Kumar, V., & Rawani, V. K. (2024). Landslide monitoring and prediction system using geosensors and wireless sensor network. *Discover Geoscience*, 2, 6. https://doi.org/10.1007/s44288-024-00007-3

Chen, G., Bian, S., Ma, J., Meng, X., Shi, W., Wu, J., Zhang, Y., & Li, Y. (2024). Field experiment on the spatiotemporal evolution of soil moisture in a rainfall-induced loess landslide: Implications for early warning. *Journal of Hydrology*, 630, 130777. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130777

Guo, J., Meng, F., & Guo, J. (2024). Gradual failure of a rainfall-induced creep-type landslide and an application of improved integrated monitoring system: A case study. *Sensors*, 24(22), 7409. https://doi.org/10.3390/s24227409

Gupta, K., & Satyam, N. (2024). Integrating real-time sensor data for improved hydrogeotechnical modelling in landslide early warning in Western Himalaya. *Engineering Geology*, 338, 107630. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107630

Hasan, M. F., Sonalitha, E., & Romadhon, R. H. (2024). Monitoring early warning system (EWS) pada bencana banjir dan tanah longsor berbasis LoRa (Long Range) RA-02. *JE-UNISLA*, 9(2), 144–158. https://doi.org/10.30736/je-unisla.v9i2.1258

Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., & Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 147–148, 124–136. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.017

Jan, C. D., Nguyen, L. T., & Dey, L. (2025). Effects of grain size distribution on the movement and deposition of granular materials flowing down an inclined channel. *Journal of Mechanics*, 41, 157–172. https://doi.org/10.1093/jom/ufaf012

Kumar, M. S., & Chandar, K. R. (2023). Development of an alert system in slope monitoring using wireless sensor networks and cloud computing technique – a laboratory experimentation. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 14(2), 205–221. https://doi.org/10.1504/IJMME.2023.133652

Li, Z., Zhao, J., Lv, S., Liu, L., & Zhang, C. (2024). Investigations of the effect of artificial rainfall on the pore water pressure and slope surface displacement of loess slopes. *International Journal of Geomechanics*, 24(5). https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-9242

Liu, Y., Hazarika, H., Kanaya, H., Takiguchi, O., & Rohit, D. (2023). Landslide prediction based on low-cost and sustainable early warning systems with IoT. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(5), 177. https://doi.org/10.1007/s10064-023-03137-z

Muladi, Amarda, S. Y., Mahamad, A. K., Prasetyo, S. D., & Harsito, C. (2024). LoRaWAN and IoT-based landslide early warning system. *Acadlore Transactions on Geosciences*, 3(2), 106–122. https://doi.org/10.56578/atg030205

Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10), 927–930. https://doi.org/10.1130/G33217.1

Poetra, A. G. E., Wagyana, A., & Febrian, M. R. (2024). Rancang bangun perangkat keras sistem pemantau potensi tanah longsor dengan wireless sensor network berbasis LoRa. *Spektral*, 5(2), 252–260. https://doi.org/10.32722/spektral.v5i2.7130

Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855–873. https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320

Satrio, B., Rachmawardani, A., Martha, A. A., & Prasetyo, D. I. (2026). Rancang bangun landslide early warning system (LEWS) berbasis wireless sensor network menggunakan ESP32 dan LoRaWAN. *Joint Prosiding IPS dan Seminar Nasional Fisika*, 14(1). https://doi.org/10.21009/03.1401.FA10

Wang, C., Guo, W., Yang, K., Wang, X., & Meng, Q. (2022). Real-time monitoring system of landslide based on LoRa architecture. *Frontiers in Earth Science*, 10, 899509. https://doi.org/10.3389/feart.2022.899509

Widodo, A. W., Susanto, M., & Setyawan, F. A. (2024). Landslide monitoring and warning system based on wireless sensor network. *ELKHA*, 16(2), 116–122. https://doi.org/10.26418/elkha.v16i2.83489

Wu, Y. B., Duan, Z., Peng, J. B., Zhang, Q., & Pähtz, T. (2023). Influence of slope angle on deposit morphology and propagation of laboratory landslides. *Scientific Reports*, 13, 9452. https://doi.org/10.1038/s41598-023-36554-x

Yang, S.-R., & Huang, L.-J. (2023). Infiltration and failure behavior of an unsaturated soil slope under artificial rainfall model experiments. *Water*, 15(8), 1599. https://doi.org/10.3390/w15081599

Yang, Y., Jia, Y., Su, S., Liu, W., Hu, A., Dong, Y., Lv, Y., & Qi, J. (2025). Analysis of the response mechanism of slopes with different inclinations under rainfall infiltration. *Engineering Reports*, 7(3), e70085. https://doi.org/10.1002/eng2.70085