

Analisis Kinerja Jaringan LoRa pada Sistem Mitigasi Tanah Longsor di Wilayah Malang Raya

LoRa Network Performance Analysis on Landslide Monitor for Landslide Disaster Mitigation in the Greater Malang Area

¹Kartiko Ardi Widodo*, ²Bima Romadhon Parada Dian Palevi

^{1,2}Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang
Jl. Raya Karanglo KM. 2, Tasikmadu, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65153, Indonesia
*e-mail: tiko_ta@lecturer.itn.ac.id

(received: 20 Januari 2024, revised: 25 Januari 2024, accepted: 02 Februari 2024)

Abstrak

Wilayah Malang Raya, terdiri dari Kota Malang, Kota Batu, dan Kabupaten Malang, memiliki potensi tanah longsor yang tinggi, dipengaruhi oleh topografi yang bervariasi. Studi ini mengevaluasi potensi bencana tanah longsor dan upaya mitigasi di wilayah ini. Data dari Badan Pusat Statistik (BPS) mencatat jumlah kejadian tanah longsor, dan Pemerintah Jawa Timur telah membentuk Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) untuk manajemen risiko. Tim peneliti dari Institut Teknologi Nasional Malang mengembangkan Landslide Monitor (LSdM), sebuah Wireless Sensor Network (WSN) menggunakan teknologi Long Range (LoRa). Fokus utama adalah pada Quality of Service (QoS) jaringan LoRa. Hasil pengujian menunjukkan kemampuan LSdM dalam kondisi Line of Sight (LoS) dan Non Line of Sight (NLoS), dengan analisis frekuensi LoRa menyoroti perbedaan dalam tingkat kehilangan paket. LSdM diharapkan dapat meningkatkan manajemen risiko bencana tanah longsor di Malang Raya.

Kata kunci: EWS, LoRa, QoS, Tanah Longsor, WSN.

Abstract

The Greater Malang region, consisting of Malang City, Batu City and Malang Regency, has a high potential for landslides, influenced by varying topography. This study shows the potential for landslides and mitigation efforts in this region. Data from the Central Statistics Agency (BPS) records the number of landslide incidents, and the East Java Government has formed a Regional Disaster Management Agency (BPBD) for risk management. A research team from the National Institute of Technology Malang developed Landslide Monitor (LSdM), a Wireless Sensor Network (WSN) using Long Range (LoRa) technology. The main focus is on Quality of Service (QoS) of LoRa networks. Test results demonstrate LSdM's capabilities in Line of Sight (LoS) and Non Line of Sight (NLoS) conditions, with LoRa frequency analysis highlighting differences in packet loss rates. LSdM is expected to improve landslide disaster risk management in Greater Malang.

Keywords: EWS, Landslide, LoRa, QoS, WSN.

1 Pendahuluan

Wilayah Malang Raya meliputi dua kota dan satu kabupaten, yaitu Kota Malang, Kota Batu, dan Kabupaten Malang. Wilayah ini membentang dari koordinat 112°17' hingga 112°57' Bujur Timur dan 7°44' hingga 8°26' Lintang Selatan, dengan luas wilayah mencapai 3.882 km². Potensi tanah longsor di wilayah ini dipengaruhi oleh topografi yang bervariasi, termasuk pegunungan, perbukitan, dan dataran rendah. Lereng yang curam di daerah pegunungan dan perbukitan meningkatkan risiko tanah longsor. Faktor lain yang meningkatkan kemungkinan risiko meliputi intensitas hujan yang tinggi, jenis tanah seperti lempung atau pasir vulkanik, deforestasi, malfungsi penggunaan lahan, dan praktik pertanian yang tidak berkelanjutan seperti pemberian pupuk berlebihan dan pengelolaan sampah organik yang kurang efektif [1].

Data dari Badan Pusat Statistik (BPS) mencatat jumlah kejadian tanah longsor di wilayah Malang Raya, Provinsi Jawa Timur, Indonesia. Pada tahun 2018, terdapat 17 kejadian dari total 99 kejadian di Jawa Timur. Kemudian, pada tahun 2020, tercatat 12 kejadian dari total 73 kejadian, sedangkan data tahun 2022 mencatat 9 kejadian dari total 56 kejadian [<https://jatim.bps.go.id>]. Untuk mengatasi potensi bencana tanah longsor di Malang Raya, Pemerintah Jawa Timur telah membentuk Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) sesuai dengan regulasi Pemerintah Indonesia melalui Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang penanggulangan bencana. Regulasi ini mengubah paradigma penanggulangan bencana dari tanggap darurat menjadi manajemen risiko, sehingga memunculkan usaha pencegahan dan pengelolaan risiko yang lebih efektif [2].

Selain upaya BPBD dalam mengatasi potensi bencana tanah longsor di Malang Raya, tim peneliti dari Institut Teknologi Nasional Malang (ITN Malang) merespon dengan mengembangkan sebuah sistem peringatan dini (EWS) yang diberi nama sebagai Landslide Monitor (LSdM). LSdM merupakan sebuah Wireless Sensor Network (WSN) yang terdiri dari sejumlah besar Sensor Node yang bekerja berdasarkan prinsip pengukuran Inersia. Sistem ini mendeteksi pergerakan, getaran, dan perubahan kemiringan lereng dengan menggunakan Sensor Node yang terhubung secara nirkabel ke Gateway (Sink Node).

Dalam paper ini, fokus utama kami adalah membahas Quality of Services (QoS) pada jaringan nirkabel Long Range (LoRa), yang diterapkan pada aplikasi WSN untuk EWS tanah longsor. Diskusi dalam makalah ini difokuskan pada evaluasi kualitas layanan dan kecepatan transfer data dalam konteks jaringan radio LoRa. Pengujian kami mencakup analisis jumlah paket yang hilang, dengan fokus pada persentase kegagalan berdasarkan interval pengiriman paket. Selain itu, kami melakukan analisis mendalam terkait pengaruh penggunaan kanal frekuensi terhadap kecepatan dan kehandalan transmisi data.

2 Tinjauan Literatur

Komunikasi data, dalam konteks sistem pemantauan dan peringatan dini merupakan elemen krusial yang memberikan fondasi bagi deteksi dini dan respons yang cepat terhadap potensi ancaman atau bahaya. Dengan memungkinkan pemantauan terus-menerus, system telekomunikasi yang handal, dan analisis data yang mendalam, sistem ini mampu menyediakan informasi kritis untuk mendukung pengambilan keputusan yang responsif dan efektif dalam menghadapi risiko yang mungkin terjadi. [<https://bpbd.madiunkota.go.id/pentingnya-komunikasi-pada-pengelolaan-bencana/>][3]. Tetapi pada kenyataannya, seringkali sistem mitigasi bencana yang berkaitan dengan sektor perlindungan masyarakat, merupakan mata rantai yang lemah dalam hal telekomunikasi [4][5]. Ketidak tersedianya layanan karena faktor kurangnya permintaan pasar, menyebabkan jaringan pada daerah rawan bencana menjadi buruk. Komunikasi data antara Sensor Node dan Sink Node tidak memungkinkan jika menggunakan protokol komunikasi berbasis jaringan seluler [6]. Oleh karena itu, solusi yang lebih tepat adalah mengadopsi teknologi WSN.

Selama lebih dari satu dekade, teknologi WSN telah digunakan dalam pemantauan bencana alam. Bencana ini dapat dipantau dengan cermat melalui pemasangan berbagai jenis sensor. WSN memiliki beberapa keunggulan, di antaranya adalah: (1) biaya yang terjangkau [7][8][9][10], (2) respons yang cepat [11], dan (3) fleksibilitas yang baik. Salah satu protokol komunikasi yang dapat diimplementasikan dalam WSN adalah protokol LoRa. Protokol LoRa memiliki cakupan jarak yang luas dan kemampuan penetrasi sinyal yang baik, sehingga sangat cocok digunakan untuk daerah-daerah yang sulit dijangkau oleh jaringan seluler [12][13][14][15]. Dengan memanfaatkan teknologi LoRa, setiap Sensor Node dapat mengirimkan data dengan andal ke Sink Node, bahkan jika berada di wilayah blank spot. Pemanfaatan teknologi ini mampu mengoptimalkan kecepatan pengiriman data. Oleh karena itu, sangat penting untuk mempertimbangkan lokasi penempatan Sink Node dan Sensor Node guna memastikan aksesibilitas yang konsisten terhadap jangkauan sinyal.

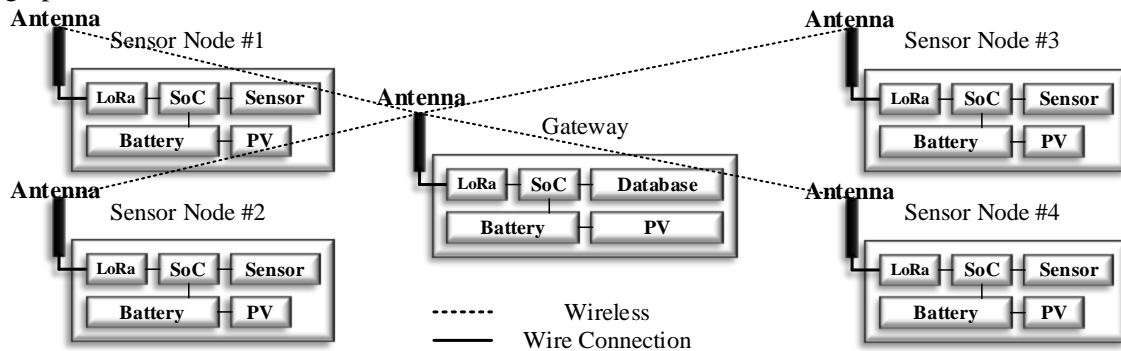
3 Metode Penelitian

Dalam metodologi penelitian ini, terdapat tiga bagian utama. Bagian pertama melibatkan rancangan jaringan LoRa yang diusulkan, ini memberikan penjelasan komprehensif terkait rancangan keseluruhan jaringan LoRa yang diusulkan di lokasi pengujian. Sementara itu, bagian kedua membahas perancangan Sensor Node yang menggambarkan diagram blok dari masing-masing Sensor

Node. Bagian ketiga menjelaskan desain gateway LoRa yang menggunakan prosesor Extensa Dual Core [16].

1) Lokasi Penelitian:

Pada lokasi pengujian, peneliti memasang empat unit Sensor Node dan satu unit Sink Node. Node-node ini terhubung menggunakan topologi jaringan bintang (Gambar 1) untuk menjamin kehandalan sistem komunikasi. Topologi ini dipilih karena memiliki keunggulan dalam kemudahan identifikasi dan penanganan masalah, serta fleksibilitas dalam menambah atau mengganti perangkat tanpa memengaruhi node-node lainnya. Sink Node ditempatkan pada posisi yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan Sensor Node. Penempatan ini dilakukan dengan tujuan untuk memastikan akses yang optimal dalam transmisi data.

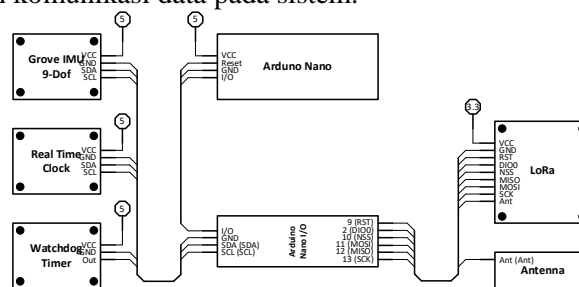


Gambar 1 Topologi Jaringan Star

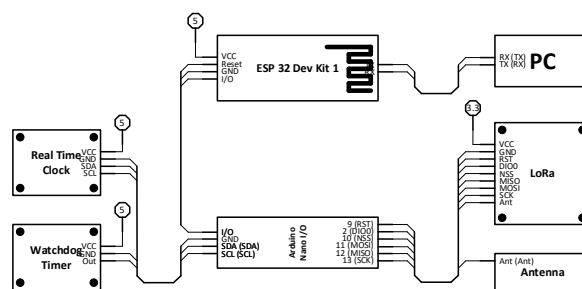
2) Desain Perangkat Keras:

Secara detail, perangkat keras dari LSdM terlihat pada Gambar 2 dan Gambar 3, di mana sistem ini terbagi menjadi dua komponen utama. Bagian pertama, Sensor Node, dibangun menggunakan mikrokontroler 8 bit ATMEGA 328P [17] yang dilengkapi dengan sensor pengukur inersia tipe 9 Dof IMU dari produsen Grove [18][19][20]. Bagian kedua adalah Sink Node, yang dibangun menggunakan mikroprosesor Xtensa LX6 32-bit. Penggunaan mikroprosesor 32-bit pada Sink Node dilakukan untuk memaksimalkan kinerjanya sebagai Gateway. Sink Node juga dilengkapi dengan database yang tertanam pada komputer desktop yang dihubungkan secara serial USB untuk merekam data dari hasil pengukuran sensor yang dikirimkan oleh Sensor Node.

Setiap Node pada LSdM dilengkapi dengan modul Real Time Clock (RTC) yang memungkinkan pengiriman data pada detik waktu nyata, sehingga mengurangi kesalahan pengiriman data akibat tabrakan transmisi dengan node lainnya. Node juga dilengkapi dengan modul komunikasi radio LoRa tipe SX1278 RA-02 dari produsen AI Thinker yang beroperasi pada frekuensi 433 MHz yang dapat dituning ulang hingga frekuensi 525 MHz, serta dilengkapi sebuah antena omni-directional dengan gain 3dBi dan impedansi 50 Ohm. Setiap Node juga ditenagai oleh sumber daya yang diperoleh dari panel surya dan sebuah baterai, bertujuan untuk memastikan kontinuitas energi listrik guna mendukung kelangsungan komunikasi data pada sistem.



Gambar 2 Wiring Diagram Sensor Node



Gambar 3 Wiring Diagram Sink Node

3) Desain Perangkat Lunak:

Dalam perancangan perangkat lunak, baik pada Sensor Node maupun Sink Node, digunakan bahasa pemrograman C++ yang diimplementasikan melalui perangkat lunak Arduino IDE. Untuk menyatukan beberapa perangkat pendukung seperti LoRa, RTC, dan Sensor IMU, diterapkan perpustakaan standar yang disediakan oleh Arduino IDE. Selain itu, guna memantau tampilan pada gateway, digunakan serial monitor bawaan dari Arduino IDE.

4 Persiapan Pengujian dan Hasil Pengujian

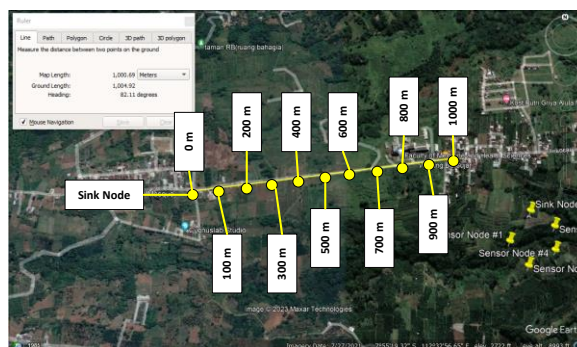
Lokasi uji LSdM terletak di Dusun Precet, Kelurahan Sumbersekar, Kecamatan Dau, Kabupaten Malang, Jawa Timur, Indonesia. Sebagai langkah prainstansi di area pengujian, tahapan awal melibatkan pelaksanaan eksperimen sistem LSdM pada lokasi Test Bed (yang selanjutnya disebut sebagai Test Bed). Selama proses pengujian Test Bed, LSdM diuji dalam kondisi Line of Sight (LoS) dan Non Line of Sight (NLoS). Pengujian di Test Bed bertujuan untuk mengukur gain antenna dan Signal to Noise Ratio (SNR) berdasarkan jarak antara Sink Node dan Sensor Node. Eksperimen ini menggunakan satu Sink Node dan satu Sensor Node. Setelah hasil pengujian Test Bed dianggap memuaskan, tahap implementasi LSdM dimulai di area uji sebenarnya (yang selanjutnya disebut sebagai tahap Implementasi), dengan melibatkan empat Sensor Node dan satu Sink Node pada pengujian selanjutnya. Dalam bagian ini, akan dibahas dua aspek terpisah, yakni Test Bed dan Eksperimen, dimana rangkaian eksperimen ini mempertimbangkan parameter eksperimental secara rinci sesuai dengan Tabel 1, dengan merujuk pada spesifikasi datasheet.

Tabel 1 Parameter Pengujian

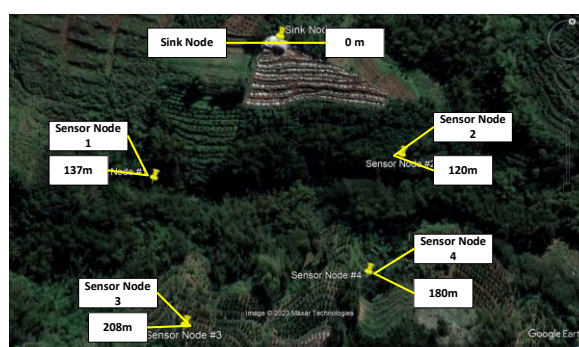
Parameter	Nilai
<i>Sensor Node-Gateway frequency</i>	433.1-525.0MHz
<i>LoRa wireless communication distance LoS</i>	0 – 1000 meters
<i>LoRa wireless communication distance NLoS</i>	0 – 208 meters
<i>Sensor Node ext. antenna gain</i>	3dBi
<i>Sensor Node transmit power</i>	+20dBm
<i>Sensor Node receiver sensitivity</i>	0dBm
<i>Sink Node ext. antenna gain</i>	3dBi
<i>Gateway receiver sensitivity</i>	-139dBm
<i>Gateway transmit power</i>	0dBm
<i>Elevation of the Sensor Node and Sink Node Antenna Above Ground Level</i>	2 meter

A. Test Bed

Dalam tahap pengujian kami membandingkan kinerja jaringan komunikasi LoRa menggunakan metode Line of Sight (LoS) dan Non Line of Sight (NLoS). Pada metode LoS, kami mengevaluasi jangkauan maksimal hingga 1000 meter antara Node dan Sink, sementara pada pengaturan NLoS, kami meneliti pengaruh vegetasi dan topografi dengan jangkauan maksimum 208 meter. Lokasi titik pengujian dalam tahap ini ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4 Pengaturan Luar Ruang Eksperimental dari Jaringan Lora yang Diusulkan pada Area LoS



Gambar 5 Pengaturan Luar Ruang Eksperimental dari Jaringan Lora yang Diusulkan pada Area NLoS

1) LoS Setup :

Tahap awal dari pengujian Test Bed mencakup persiapan lokasi dan peralatan LSdM di area uji. Saat menguji Jaringan LoRa dalam lingkungan Test Bed, jarak eksperimental antara Sensor Node dan Sink Node dalam kondisi LoS dapat mencapai hingga 1000 meter. Pengujian ini dilakukan di badan jalan di sekitar lokasi rencana pemasangan, sebagaimana terlihat pada Detail peta lokasi pengujian Test Bed di Gambar 4. Eksperimen Test Bed melibatkan Sink Node yang ditempatkan secara statis dan Sensor Node yang bersifat mobile, memungkinkan pergeseran pada setiap interval 100 meter. Sink Node diletakkan pada ketinggian 2 meter di atas permukaan tanah, sementara Sensor Node mobile ditempatkan pada seorang pejalan kaki dengan posisi antena sekitar 2 meter dari permukaan tanah. Sensor Node kemudian diarahkan untuk bergerak dari titik awal, yang berada dekat Sink Node, hingga mencapai titik akhir yang berjarak 1000 meter. Detail hasil pengujian Test Bed pada area LoS dapat dilihat pada Tabel 2.

2) NLoS Setup :

Pada pengujian Non Line of Sight (NLoS), jarak maksimum pengujian mencapai 208 meter. Pengujian dilakukan di titik lokasi penempatan sensor di area uji sebenarnya, dan peta rinci lokasi pengujian Test Bed dapat ditemukan pada Gambar 5. Gambar 6 mencerminkan kondisi lokasi uji NLoS, di mana vegetasi tumbuh dengan rimbun dan kontur tanah membentuk lereng curam dengan elevasi sekitar 80 meter. Pada tahap ini, Sink Node ditempatkan pada ketinggian 2585 meter di atas permukaan laut (MDPL) dan berada 2 meter di atas permukaan tanah. Rincian hasil pengujian Test Bed pada area Line of Sight (LoS) dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 6 Kondisi Vegetasi pada Lokasi Uji

3) Test Bed Result :

Dalam pengujian LSdM di lokasi Test Bed, telah dilakukan evaluasi menyeluruh terhadap berbagai aspek kinerja sistem. Pada kondisi Line of Sight (LoS) dengan jarak 1000 meter, hasil pengujian menunjukkan bahwa komunikasi data antara Sensor Node dan Sink Node berlangsung optimal, memberikan ketersediaan data terbaik dalam pandangan langsung. Pada kondisi ini, nilai RSSI mencapai -101 dBm dan Signal to Noise Ratio (SNR) sebesar 5.25. Sementara itu, dalam pengujian Non Line of Sight (NLoS) dengan jarak Sensor Node terjauh 208 meter, sistem berhasil mengatasi tantangan vegetasi rimbun dan kontur tanah yang membentuk lereng curam. Pada kondisi ini, nilai RSSI mencapai -95 dBm dan SNR sebesar 10.00. Detail hasil pengujian komunikasi antara Sensor Node dan Sink Node pada masing-masing Test Bed dapat ditemukan dalam Tabel 2 dan Tabel 3, memberikan gambaran komprehensif tentang performa sistem dalam menghadapi variasi kondisi lingkungan.

Tabel 2 Hasil Pengujian LoS

Node	Properties				
	Coordinates (Long / Lat)	Distance (m)	Elevation (MASL)	RSSI (dBm)	Signal to Noise Ratio (Avg)
Sink #1	7°55'23.7"S/112°32'24.4"E	-	3016	-	-
	7°55'23.3"S/112°32'26.7"E	0	2993	-55	9.75
	7°55'22.6"S/112°32'30.5"E	100	2971	-87	8.25
	7°55'22.4"S/112°32'33.2"E	200	2951	-92	5.50
	7°55'21.9"S/112°32'36.9"E	300	2929	-92	5.25
	7°55'21.5"S/112°32'40.2"E	400	2914	-94	5.25
	7°55'21.3"S/112°32'42.6"E	500	2882	-94	6.75
	7°55'20.8"S/112°32'46.2"E	600	2860	-96	7.00
	7°55'20.3"S/112°32'49.3"E	700	2846	-98	4.00
	7°55'19.6"S/112°32'53.3"E	800	2826	-98	4.00
7°55'19.1"S/112°32'58.3"E	900	2800	-99	4.25	
7°55'23.7"S/112°32'24.4"E	1000	2741	-101	5.25	

Tabel 3 Hasil Pengujian NLoS

Node	Properties				
	Coordinates (Long / Lat)	Distance (m)	Elevation (MASL)	RSSI (dBm)	Signal to Noise Ratio (Avg)
Sink	7°55'26.56"S/112°33'5.91"E	-	2585	-	-
#1	7°55'30.36"S/112°33'3.49"E	137	2473	-92	9.25
#2	7°55'28.47"S/112°33'9.40"E	120	2475	-94	9.00
#3	7°55'33.39"S/112°33'5.23"E	208	2584	-95	9.75
#4	7°55'31.47"S/112°33'9.20"E	180	2483	-95	10.00

B. Implementasi

Penerapan LSdM melalui fase Implementasi merupakan langkah krusial dalam pengujian sistem. Implementasi ini mengacu pada parameter uji NLoS sesuai Tabel 1 dan Tabel 3, serta penempatan titik sensor sesuai dengan Gambar 5. Pada tahap ini, empat Sensor Node dan satu Sink Node digunakan dengan model topologi jaringan star, di mana kontinuitas pengiriman data dan kehilangan paket dianalisis secara rinci dengan mempertimbangkan lima band frekuensi berbeda. Hasil pengujian pada fase Implementasi, terdokumentasi dalam Tabel 5, menggambarkan kinerja transmisi data pada masing-masing Sensor Node serta tingkat keberhasilan pada berbagai band frekuensi yang digunakan.

1) Persiapan Penerapan:

Tahap Implementasi adalah langkah lanjutan dalam pengujian sistem LSdM. Pengujian ini mengacu pada parameter uji Test Bed NLoS yang terdokumentasi pada Tabel 1 dan Tabel 3, dengan penempatan titik sensor yang terinci sesuai dengan Gambar 5. Dalam fase ini, empat Sensor Node dan satu Sink Node digunakan dalam pengujian. Sensor Node tidak dipasang pada pejalan kaki, melainkan ditempatkan secara statis di lokasi uji dengan sistem lengkap sesuai dengan diagram skematik pada Gambar 2 dan 3. Model topologi jaringan star diadopsi sesuai dengan gambaran pada Gambar 1. Dalam fase ini, dilakukan pengujian kontinuitas pengiriman data dengan memerhatikan jumlah paket yang hilang berdasarkan band frekuensi yang digunakan. Sistem diuji menggunakan lima band frekuensi berbeda, dan kemudian dilanjutkan dengan analisis terhadap jumlah paket yang hilang. Setiap band frekuensi diuji selama 24 jam dengan pengiriman data setiap 1 menit. Pengujian berlangsung selama 5 hari atau 120 jam. Perubahan band frekuensi pada LoRa dilakukan secara otomatis setiap pukul 12 malam, dimulai dari hari pertama dengan frekuensi 433.1 MHz, hari kedua dengan 434 MHz, hari ketiga dengan 435 MHz, hari keempat dengan 436 MHz, hingga hari kelima dengan frekuensi 437 MHz. Karena empat Sensor Node digunakan dalam pengujian, setiap Node menjalani penjadwalan antrian pengiriman dengan jarak pengiriman antar Node selama 15 detik. Rincian urutan pengiriman data dalam satuan waktu dapat ditemukan pada Tabel 4.

Tabel 4 Penjadwalan Pengiriman dan Kanal Frekuensi

Freq	Time (Second)				
	Sink	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4
433.1	-	+0	+15	+30	+45
434.0	-	+0	+15	+30	+45
435.0	-	+0	+15	+30	+45
436.0	-	+0	+15	+30	+45
437.0	-	+0	+15	+30	+45

2) Hasil Penerapan:

Hasil pengujian pada fase Implementasi tergambar dalam Tabel 5, yang memperlihatkan persentase kehilangan paket pada masing-masing Sensor Node. Dalam eksperimen ini, data pengukuran dikirimkan dari empat Sensor Node menuju Sink Node (Gambar 7) dengan interval satu menit, sesuai dengan penjadwalan waktu yang terperinci dalam Tabel 4. Setiap paket yang dikirim oleh Sensor Node mencakup informasi mengenai data pengukuran sensor serta ID Node unik, memudahkan proses identifikasi asal paket. Agar mempermudah analisis dan perhitungan jumlah paket yang hilang, Sensor Node mencatat secara internal setiap paket yang dikirimkannya. Pencatatan internal ini berfungsi untuk merekam aktivitas transmisi paket data selama periode pengujian. Setelah 120 jam pengujian, peneliti menghimpun data dari Sensor Node dan Gateway. Informasi tentang jumlah paket yang dikirim oleh Sensor Node diambil dari perangkat datalogger yang tertanam di setiap Sensor Node. Data ini kemudian dianalisis dengan membandingkannya dengan jumlah paket yang berhasil diterima oleh Gateway. Data pengiriman paket terdokumentasi dalam Tabel 5 pada kolom "Terkirim," menunjukkan bahwa setiap Sensor Node mengirimkan jumlah paket yang serupa, yakni sebanyak 1440 paket dalam rentang waktu 24 jam.

Dalam analisis Subkolom "average failure frequency," dapat disimpulkan bahwa rata-rata kehilangan paket pada kelima band frekuensi yang digunakan mengindikasikan bahwa frekuensi pada band 433.1 menunjukkan tingkat kehilangan paket yang paling rendah, dengan persentase kegagalan sebesar 6.64% dan tingkat keberhasilan transmisi data mencapai 93.36%. Sensor Node#4 mencatat tingkat kehilangan paket tertinggi pada frekuensi 433.1, mencapai 9.78%, sementara Sensor Node 3 memiliki tingkat kehilangan paket terendah dengan 4.06%. Sebaliknya, frekuensi pada band 437.0 menunjukkan jumlah kehilangan paket yang paling besar, dengan persentase kegagalan sebesar 13.04% dan tingkat keberhasilan transmisi data mencapai 86.96%. Sensor Node#2 mencatat tingkat kehilangan paket tertinggi pada frekuensi 437.0, mencapai 22.71%, sementara Sensor Node 4 mencatat tingkat kehilangan paket terendah dengan 3.01%.



Gambar 7 LSdM Sensor Node

Tabel 5 Hasil Pengujian Transmisi Data

Freq	Node	Sent	Result	
			Loss (%)	Success (%)
433.1	#1	1440	6.67%	93.33%
	#2	1440	6.06%	93.94%
	#3	1440	4.06%	95.94%
	#4	1440	9.78%	90.22%
434.0	#1	1440	8.94%	91.06%
	#2	1440	4.64%	95.36%
	#3	1440	10.64%	89.36%
	#4	1440	2.50%	97.50%
435.0	#1	1440	14.94%	85.06%
	#2	1440	21.29%	78.71%
	#3	1440	7.60%	92.40%
	#4	1440	7.40%	92.60%
436.0	#1	1440	20.04%	79.96%
	#2	1440	2.74%	97.26%
	#3	1440	14.11%	85.89%
	#4	1440	13.53%	86.47%
437.0	#1	1440	20.92%	79.08%
	#2	1440	22.71%	77.29%
	#3	1440	5.53%	94.47%
	#4	1440	3.01%	96.99%
average failure frequency 433.1			6.64%	93.36%
average failure frequency 434.0			6.68%	93.32%
average failure frequency 435.0			12.81%	87.19%
average failure frequency 436.0			12.61%	87.40%
average failure frequency 437.0			13.04%	86.96%

C. Hasil Diskusi

Hasil pengujian sistem Landslide Monitor (LSdM) di lokasi uji Test Bed menghasilkan data yang signifikan terkait dengan kinerja dan kehandalan sistem. Pengujian dilakukan dalam kondisi Line of Sight (LoS) dan Non Line of Sight (NLoS) untuk menguji respons sistem terhadap variasi lingkungan. Pada kondisi LoS dengan jarak 1000 meter, hasil pengujian menunjukkan bahwa komunikasi data antara Sensor Node dan Sink Node berlangsung optimal. Dengan nilai RSSI mencapai -101 dBm dan Signal to Noise Ratio (SNR) sebesar 5.25, sistem mampu memberikan ketersediaan data terbaik dalam pandangan langsung. Sementara itu, dalam kondisi NLoS dengan jarak Sensor Node terjauh 208 meter, sistem mampu mengatasi tantangan vegetasi rimbun dan kontur tanah yang membentuk lereng curam. Pada kondisi ini, nilai RSSI mencapai -95 dBm dan SNR sebesar 10.00. Selanjutnya, pada fase implementasi di area uji sebenarnya, LSdM melibatkan empat Sensor Node dan satu Sink Node. Hasil pengujian kontinuitas pengiriman data menunjukkan bahwa setiap Sensor Node mampu mengirimkan jumlah paket yang serupa, yaitu sebanyak 1440 paket dalam rentang waktu 24 jam. Meskipun demikian, analisis lebih lanjut terhadap pengujian frekuensi LoRa menunjukkan perbedaan dalam tingkat kehilangan paket pada lima band frekuensi yang digunakan. Pada frekuensi 433.1 MHz, sistem menunjukkan tingkat kehilangan paket terendah sebesar 6.64%, sementara pada frekuensi 437.0 MHz, tingkat kehilangan paket mencapai 13.04%. Perbandingan antara Sensor Node juga menunjukkan variasi, dengan Sensor Node#3 memiliki tingkat kehilangan paket terendah pada frekuensi 433.1 MHz (4.06%) dan Sensor Node#2 mencatat tingkat tertinggi pada frekuensi 437.0 MHz (22.71%). Secara keseluruhan, hasil pengujian menyuguhkan gambaran positif terkait kemampuan LSdM dalam mengatasi tantangan lingkungan, terutama dalam kondisi NLoS,

dan menegaskan bahwa pemilihan frekuensi LoRa yang optimal adalah faktor krusial dalam memastikan keberhasilan transmisi data.

5 Kesimpulan

Berdasarkan analisis mendalam terhadap wilayah Malang Raya, ditemukan bahwa potensi tanah longsor di kawasan ini signifikan dan dipengaruhi oleh topografi yang heterogen, melibatkan elemen pegunungan, perbukitan, dan dataran rendah. Faktor-faktor pemicu tanah longsor, seperti lereng curam, intensitas hujan tinggi, jenis tanah, deforestasi, malfungsi penggunaan lahan, dan praktik pertanian yang tidak berkelanjutan, turut memperbesar risiko bencana tersebut. Data statistik menunjukkan kecenderungan penurunan jumlah kejadian tanah longsor di Malang Raya dari tahun 2018 hingga 2022, yang mungkin mencerminkan implementasi upaya mitigasi yang telah diadopsi. Dalam kerangka manajemen risiko bencana, Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Jawa Timur memegang peran sentral, merespons dengan mengubah paradigma penanggulangan dari respons darurat menjadi manajemen risiko. Seiring dengan hal tersebut, tim peneliti dari Institut Teknologi Nasional Malang mengembangkan Landslide Monitor (LSdM) sebagai Wireless Sensor Network (WSN) dengan menggunakan teknologi Long Range (LoRa), menawarkan solusi inovatif untuk deteksi dini dan pemantauan tanah longsor. Fokus utama pada evaluasi Quality of Service (QoS) dalam jaringan nirkabel LoRa menunjukkan bahwa sistem LSdM dapat memberikan peringatan dini yang cepat dan handal. Analisis hasil pengujian frekuensi LoRa memperlihatkan perbedaan kinerja yang signifikan, menegaskan pentingnya pemilihan frekuensi yang optimal untuk memastikan keberhasilan transmisi data. Dengan demikian, implementasi LSdM dengan teknologi LoRa diharapkan dapat memberikan kontribusi substantif dalam perbaikan manajemen risiko bencana tanah longsor di Wilayah Malang Raya.

Ucapan Terima Kasih

Dengan penuh rasa terima kasih, penulis ingin mengucapkan apresiasi yang tulus kepada Institut Teknologi Nasional Malang (ITN Malang) atas dukungan dan fasilitas yang telah diberikan dalam pengembangan dan penyelesaian jurnal ini. Kontribusi ITN Malang sebagai lembaga pendidikan dan riset telah menjadi pilar penting dalam kemajuan penelitian ini. Tidak lupa, penghargaan setinggi langit juga kami tujukan kepada pengelola jurnal yang telah membuka pintu bagi publikasi karya ini. Dukungan, bimbingan, dan profesionalisme yang diberikan oleh tim pengelola jurnal sangat berarti dalam memfasilitasi penyebaran hasil penelitian ini ke masyarakat ilmiah. Semua ini tidak terlepas dari kerja keras dan komitmen penuh dari para pengelola jurnal yang telah memastikan kelancaran proses editorial. Ucapan terima kasih kami sampaikan karena telah menjembatani penulis untuk berbagi pengetahuan dan temuan melalui publikasi ini. Semoga kerja sama ini dapat terus berlanjut dan menghasilkan kontribusi positif dalam peningkatan pengetahuan dan pemahaman di bidang ini. Terima kasih atas dedikasi dan dukungan penuh dari ITN Malang dan pengelola jurnal dalam mewujudkan penyelesaian jurnal ini.

Referensi

- [1] S. A. Ali *et al.*, “GIS-based landslide susceptibility modeling: A comparison between fuzzy multi-criteria and machine learning algorithms,” *Geoscience Frontiers*, vol. 12, no. 2, pp. 857–876, 2021, doi: 10.1016/j.gsf.2020.09.004.
- [2] “Badan Penanggulangan Bencana Daerah Pemerintah Kabupaten Malang Tahun 2016,” 2021.
- [3] R. Latiefatul Millah, R. J. Hakim, A. H. Fajrian, and L. Kamelia, “ID: 15 DISTORY.ID: Strategi Mitigasi Bencana Alam Terpadu dengan Early Warning System Berbasis IoT (Internet of Things) DISTORY.ID: Integrated Natural Disaster Mitigation Strategy with Early Warning System Design Based on IoT (Internet of Things),” no. November, pp. 48–64, 2022.
- [4] J. F. B. D. Fonseca *et al.*, “‘Last Mile’ Challenges To in Situ Volcanic Data Transmission,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 13, no. 12, pp. 3419–3428, 2013, doi: 10.5194/nhess-13-3419-2013.
- [5] T. F. Fathani and D. Legono, “TXT-tool 2.062-1.2 A monitoring and early warning system for debris flows in rivers on volcanoes,” *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive*
<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

- Teaching Tools: Volume 1: Fundamentals, Mapping and Monitoring*, pp. 479–490, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-57774-6_36.
- [6] T. Yang, W. Xiang, and L. Ye, “A distributed agents qos routing algorithm to transmit electrical power measuring information in last mile access wireless sensor Networks,” *Int J Distrib Sens Netw*, vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/525801.
- [7] R. Z. Cantabrana, A. G. Higuera, J. B. R. De Guzmán, and J. De Las Morenas De La Flor, “Low-cost wireless system for measuring energy efficiency in industry,” *Proceedings of 2013 European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies, Smart SysTech 2013*, vol. 9, pp. 5–9, 2013.
- [8] M. Chehaitly, M. Tabaa, F. Monteiro, A. Dandache, and A. Hamie, “A low-cost design of transceiver based on DWPT for WSN,” *Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM*, vol. 2016-March, no. 1, pp. 43–46, 2016, doi: 10.1109/ICM.2015.7437983.
- [9] S. Karthik, K. Yokesh, Y. M. Jagadeesh, and R. K. Sathindran, “Smart autonomous self powered wireless sensor networks based low-cost landslide detection system,” *IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2015*, pp. 1–4, 2015, doi: 10.1109/ICCPCT.2015.7159265.
- [10] P. Vishnu, S. Radershan, C. S. Lewangamage, and M. T. R. Jayasinghe, “Synchronized Sensing and Network Scalability of Low-Cost Wireless Sensor Networks for Monitoring Civil Infrastructures,” *MERCon 2020 - 6th International Multidisciplinary Moratuwa Engineering Research Conference, Proceedings*, pp. 337–342, 2020, doi: 10.1109/MERCon50084.2020.9185210.
- [11] S. L. Bansod and S. Honale, “Fast Response Enhanced Multi-queue packet Scheduler scheme for Wireless Sensor Network,” *International Journal of Computer Trends and Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 127–133, 2015, doi: 10.14445/22312803/ijctt-v25p125.
- [12] W. San-Um, P. Lekbunyasin, M. Kodyoo, W. Wongsuwan, J. Makfak, and J. Kerdsri, “A long-range low-power wireless sensor network based on U-LoRa technology for tactical troops tracking systems,” *Proceedings - ACDT 2017: 3rd Asian Conference on Defence Technology: Advance Research Collaboration on Defence Technology*, pp. 32–35, 2017, doi: 10.1109/ACDT.2017.7886152.
- [13] A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadinia, and N. Strachan, “Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks,” *Proceedings of IEEE Sensors*, vol. 1, pp. 6–8, 2017, doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808712.
- [14] J. S. Gopinath, A. Elsdén Christober, K. L. Ravindrananth, and K. Malathi, “LoRa WAN Communication using Wireless Sensor Network,” *International Conference on Edge Computing and Applications, ICECAA 2022 - Proceedings*, no. Icecaa, pp. 406–412, 2022, doi: 10.1109/ICECAA55415.2022.9936293.
- [15] D. I. Sacaleanu, I. P. Manciu, and L. A. Perisoara, “Performance analysis of LoRa technology in wireless sensor networks,” *2019 10th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, NTMS 2019 - Proceedings and Workshop*, pp. 0–4, 2019, doi: 10.1109/NTMS.2019.8763774.
- [16] Espressif, “ESP32 Series Datasheet 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth ® + Bluetooth LE SoC Including,” p. 70, 2023, [Online]. Available: www.espressif.com
- [17] AVR Studio®, “ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash DATASHEET,” *Atmel*, pp. 1–294, 2016, [Online]. Available: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [18] Y. Liu *et al.*, “Design and Deployment of an IoT-based Landslide Early Warning System,” *Proceedings of the 2022 International Conference and Utility Exhibition on Energy, Environment and Climate Change, ICUE 2022*, no. October, pp. 1–7, 2022, doi: 10.1109/ICUE55325.2022.10113491.
- [19] G. Imu, T. Grove, and I. M. U. Inertial, “Grove - IMU 9DOF(lcm20600+AK09918)”.
- [20] Seeed Development Limited, “Grove - IMU 9DOF v2.0,” 2016, [Online]. Available: https://seeedoc.github.io/Grove-IMU_9DOF_v2.0/