

Rancangan Konseptual Sistem Diseminasi Peringatan Dini Bencana Berbasis Iot LoRa Untuk Wilayah Blank Spot

Khairul*, Tri Wiyono, Andika Dwi Aryo H, Ahmad Syaukani, Muhammad Zikri Ramadhan

Pascasarjana, Magister Teknologi Informasi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan, Indonesia

Email: ^{1,*}khairul@dosen.pancabudi.ac.id, ²tri82.wiyono@gmail.com, ³andhika.basisgb@gmail.com,

⁴kaniharahap@gmail.com, ⁵muhammadzikriramadhan7@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: khairul@dosen.pancabudi.ac.id*

Submitted: 08/07/2026; Accepted: 11/08/2026; Published: 30/09/2026

Abstrak— Wilayah *blank spot* menghadapi kendala dalam menerima peringatan dini karena tidak dapat mengandalkan internet atau jaringan seluler. Penelitian ini bertujuan menghasilkan *proof of concept* sistem diseminasi peringatan dini berbasis LoRa sebagai kanal *last-mile* dari sumber resmi menuju perangkat penerima masyarakat. Metode yang digunakan adalah *Design Science Research*, yang mencakup identifikasi masalah, perumusan tujuan solusi, perancangan artefak, demonstrasi konseptual, evaluasi teoretis, dan komunikasi hasil. Artefak yang dihasilkan meliputi arsitektur konseptual, aliran pesan *end-to-end*, pemetaan aktor dan mode kegagalan, serta kerangka evaluasi berdasarkan jangkauan, waktu pengiriman, kapasitas pesan, keandalan transmisi, dan efisiensi daya. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa kapasitas pesan memenuhi kebutuhan dasar apabila informasi disederhanakan, sedangkan jangkauan, waktu pengiriman, dan keandalan memenuhi secara bersyarat karena dipengaruhi topografi, vegetasi, interferensi, posisi antenna, ukuran *payload*, dan retransmisi. Efisiensi daya belum terverifikasi karena belum dilakukan pengujian perangkat. LoRa tidak menggantikan seluruh jaringan komunikasi kebencanaan, tetapi melengkapi distribusi pada sisi *last-mile* dan tetap bergantung pada konektivitas hulu, sumber data resmi, listrik, serta tata kelola pemerintah daerah. Karena belum mencakup implementasi perangkat dan uji lapangan, hasil penelitian merupakan kelayakan konseptual yang perlu divalidasi melalui pengembangan prototipe dan pengujian teknis-operasional.

Kata Kunci: diseminasi peringatan dini; LoRa; *last-mile warning*; *blank spot*; *proof of concept*

Abstract— Blank spot areas face significant challenges in receiving early warnings because they cannot rely on internet or cellular services. This study aims to develop a *proof of concept* for a LoRa-based early warning dissemination system that operates as a *last-mile* channel from official sources to community receiver devices. The study applies *Design Science Research*, covering problem identification, definition of solution objectives, artifact design, conceptual demonstration, theoretical evaluation, and communication of results. The resulting artifacts include a conceptual architecture, an *end-to-end* message flow, a mapping of actors and failure modes, and an evaluation framework based on communication range, delivery time, message capacity, transmission reliability, and energy efficiency. The evaluation indicates that message capacity meets basic system requirements when information is simplified, while range, delivery time, and reliability are conditionally feasible because they depend on topography, vegetation, interference, antenna position, payload size, and retransmission. Energy efficiency remains unverified because no physical device testing has been conducted. LoRa does not replace the entire disaster communication network; it complements *last-mile* delivery and remains dependent on upstream connectivity, official data sources, power availability, and local government governance. Since this study does not include device implementation or field testing, its findings represent conceptual feasibility that must be validated through prototype development and technical-operational testing

Keywords : early warning dissemination; LoRa; *last-mile warning*; *blank spot*; *proof of concept*

1. PENDAHULUAN

Indonesia menghadapi risiko tinggi bencana *hidrometeorologi*, dengan kejadian terkait iklim mendominasi berbagai bencana yang tercatat dalam beberapa tahun terakhir [1]-[2]. Banjir, tanah longsor, dan kekeringan terus menjadi ancaman di sejumlah wilayah rentan [2]-[3]. Perubahan iklim meningkatkan frekuensi dan intensitas kejadian tersebut, sedangkan keterbatasan literasi kebencanaan masyarakat dapat menghambat respon mitigasi [2]-[4].

Sistem peringatan dini berfungsi sebagai komponen kunci untuk melindungi masyarakat, dan efektivitasnya bergantung pada pemanfaatan teknologi komunikasi untuk menyampaikan informasi yang tepat waktu dan dapat ditindaklanjuti [1]. Pemerintah Indonesia telah mengembangkan sistem terpusat seperti *Multi-Hazard Early Warning System* (MHEWS) dan dashboard pencegahan bencana yang mengintegrasikan data dari BMKG dan BNPB [4]-[5]. Namun, pemanfaatan efektif sistem tingkat nasional ini di tingkat lokal masih menjadi tantangan, terutama di wilayah dengan infrastruktur komunikasi terbatas [6].

Tantangan penyampaian peringatan membesar di wilayah terpencil karena infrastruktur komunikasi konvensional sering mengalami kegagalan saat keadaan darurat, menyebabkan keterlambatan peringatan dan meningkatnya korban [7]. LoRa hadir sebagai teknologi *LPWAN* yang menggunakan teknik *spread spectrum* untuk mencapai jangkauan jauh dengan konsumsi daya rendah, cocok untuk mengirim paket data kecil [8]-[9]. Teknologi

ini diakui sebagai pilihan utama untuk mengirim data dengan jumlah kecil pada jarak jauh dan menyediakan konektivitas di area di mana infrastruktur *internet* tidak tersedia [10].

Bukti performa *LoRa* menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh konfigurasi perangkat, topologi, ukuran pesan, dan lingkungan pengujian. Perbedaan tersebut mendasari penggunaan evaluasi komparatif-kualitatif dalam penelitian ini. Simulasi arsitektur *multi-hop* *LoRa* menunjukkan kemampuan menyebarkan peringatan ke seluruh *node* dalam area *urban* 30 km dalam waktu 2.4 detik [11]. Sistem ini mencapai *packet delivery* 96% dengan latensi 1.9 detik menggunakan protokol *LEACH multi-hop* pada jaringan *mesh LoRa* [7]. Evaluasi sistem tanggap darurat berbasis *LPWAN* di lingkungan kampus melaporkan keandalan hingga 98% [10].

Literatur yang tersedia sebagian besar berfokus pada pengembangan sensor, pemantauan lokal, *dashboard*, atau *prototipe* perangkat keras untuk deteksi bencana, bukan pada mekanisme distribusi informasi resmi ke masyarakat di wilayah *blank spot* [12]. Arsitektur sistem peringatan dini berbasis IoT yang ada umumnya menggabungkan sensor lingkungan dengan *transceiver LoRa* untuk mendeteksi bencana dan mengirim data ke stasiun pemantauan terpusat [13]. Integrasi eksplisit peran pemerintah daerah sebagai pengelola validasi, penyederhanaan, dan distribusi pesan belum banyak dibahas dalam arsitektur sistem berbasis *LoRa* [14].

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan: (1) menghasilkan arsitektur konseptual yang menghubungkan sumber data resmi, konektivitas hulu, *server* pemerintah daerah, *gateway LoRa*, dan perangkat penerima masyarakat; (2) menyusun skenario aliran pesan dari penerimaan dan validasi data hingga penyampaian peringatan pada wilayah *blank spot*; dan (3) menilai kelayakan konseptual *LoRa* sebagai kanal *last-mile warning* berdasarkan jangkauan komunikasi, waktu pengiriman, kapasitas pesan, keandalan transmisi, dan efisiensi daya.

Kontribusi penelitian berupa *proof of concept* yang mengintegrasikan aspek teknis, keamanan pesan, tata kelola pemerintah daerah, *mode* kegagalan, dan respons masyarakat sebagai dasar pengembangan *prototipe*. *Novelty* penelitian ini terletak pada pergeseran fokus dari literatur terdahulu, yang umumnya memposisikan *LoRa* sebagai penghubung sensor, *node* pemantauan, atau *prototipe* deteksi bencana lokal, menuju integrasi *LoRa* sebagai kanal diseminasi *last-mile* yang menghubungkan sumber peringatan resmi BMKG dengan perangkat penerima masyarakat melalui satu kerangka arsitektur, tata kelola pengesahan pesan, keamanan, jalur eskalasi, dan kerangka evaluasi kelayakan yang disajikan secara terpadu; kombinasi elemen tersebut belum ditemukan disajikan secara bersamaan pada penelitian sejenis yang ditinjau.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Design Science Research* (DSR) untuk menghasilkan artefak konseptual berupa model sistem, arsitektur, skenario aliran pesan, dan kerangka evaluasi kelayakan sistem diseminasi peringatan dini berbasis *IoT LoRa*. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada perancangan solusi terhadap keterbatasan distribusi informasi peringatan dini kepada masyarakat di wilayah *blank spot*, bukan pada pengukuran performa perangkat secara langsung. Tahapan penelitian mengacu pada kerangka DSR yang meliputi identifikasi masalah dan motivasi, penetapan tujuan solusi, perancangan dan pengembangan artefak, demonstrasi, evaluasi, serta komunikasi hasil.

Demonstrasi artefak dilakukan melalui skenario operasional konseptual yang menggambarkan aliran informasi dari sumber resmi hingga diterima oleh masyarakat. Evaluasi dilakukan secara teoretis dengan membandingkan kebutuhan sistem terhadap karakteristik dan hasil pengujian *LoRa* yang dilaporkan dalam literatur. Oleh karena itu, hasil penelitian tidak dinyatakan sebagai performa teknis aktual, melainkan sebagai penilaian kelayakan konseptual dan persyaratan desain yang perlu divalidasi melalui pengembangan *prototipe* dan pengujian lapangan.

2.1 Prosedur Kajian Literatur

Penelusuran literatur dilakukan secara terarah terhadap publikasi yang membahas *LoRa/LoRaWAN* untuk peringatan dini dan komunikasi darurat pada wilayah berkonektivitas rendah atau *blank spot*. Kata kunci yang digunakan meliputi “*LoRa disaster warning*”, “*LoRa emergency communication*”, “*IoT early warning system*”, “*last-mile early warning*”, “*LoRa transmission range*”, “*LoRa packet delivery ratio*”, “*LoRa power consumption*”, “sistem peringatan dini berbasis *LoRa*”, dan komunikasi bencana wilayah *blank spot*. Berdasarkan korpus hasil penelitian, sebanyak 19 publikasi unik yang terbit pada rentang 2020-2026 dipilih dan dianalisis penuh karena sesuai dengan fokus komunikasi *LoRa* berdaya rendah, pemantauan berbasis sensor, dan diseminasi peringatan pada area terpencil [15]-[16]-[17].

Kriteria inklusi meliputi publikasi yang membahas *LoRa*, *LoRaWAN*, atau komunikasi berdaya rendah untuk peringatan dini, komunikasi darurat, atau wilayah berkonektivitas rendah; menjelaskan objek, arsitektur, topologi, skenario, atau lingkungan pengujian; serta melaporkan sedikitnya satu parameter evaluasi seperti jangkauan komunikasi, waktu pengiriman, kapasitas atau ukuran pesan, tingkat keberhasilan pengiriman, *RSSI/SNR*, atau konsumsi daya [15]-[17]-[18]. Kriteria eksklusi meliputi publikasi yang tidak berkaitan dengan komunikasi peringatan dini, tidak menjelaskan konteks implementasi atau metode evaluasi, merupakan duplikasi, atau tidak menyediakan parameter teknis yang dapat dibandingkan. Dari setiap publikasi, diekstraksi informasi mengenai objek penelitian, sumber data, arsitektur dan topologi jaringan, jenis sensor dan platform *mikrokontroler*,

jumlah *gateway* dan *node*, kondisi *line-of-sight* atau *non-line-of-sight*, konfigurasi perangkat, ukuran *payload*, jangkauan komunikasi, waktu pengiriman, tingkat keberhasilan transmisi, konsumsi daya, hasil utama, keterbatasan, dan relevansinya terhadap rancangan konseptual yang diusulkan [19]-[20]-[21].

2.2 Identifikasi Kebutuhan Sistem

Identifikasi kebutuhan dilakukan untuk menentukan fungsi, batasan, dan persyaratan yang harus dipenuhi oleh sistem. Kebutuhan diturunkan dari karakteristik wilayah *blank spot*, sifat pesan peringatan dini, peran pemerintah daerah, serta keterbatasan komunikasi LoRa.

Kebutuhan fungsional meliputi penerimaan informasi dari sumber resmi, verifikasi sumber dan waktu penerbitan, penentuan wilayah sasaran, penyederhanaan pesan, pengesahan oleh pihak berwenang, pengiriman melalui *gateway LoRa*, penyajian peringatan pada perangkat penerima, pencatatan *audit log*, retransmisi, dan eskalasi manual ketika proses otomatis gagal. Kebutuhan nonfungsional meliputi keamanan dan integritas pesan, ketahanan terhadap kegagalan daya, efisiensi energi, kemudahan pemeliharaan, kesesuaian dengan keterbatasan *payload*, aksesibilitas *visual-audio*, penggunaan bahasa yang mudah dipahami, serta kepatuhan terhadap regulasi telekomunikasi.

Keluaran tahap ini adalah daftar kebutuhan fungsional, kebutuhan nonfungsional, aktor, batasan, asumsi, dan kriteria awal evaluasi sistem.

2.3 Model Konseptual Sistem

Model sistem direpresentasikan sebagai aliran fungsional berikut :

$$D \rightarrow V \rightarrow P \rightarrow C \rightarrow R \quad (1)$$

Dengan :

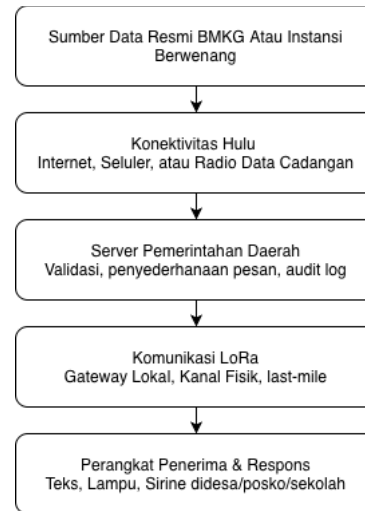
- D , data peringatan resmi dari BMKG atau lembaga berwenang
- V , verifikasi sumber, waktu penerbitan, dan pengesahan pesan
- P , penyederhanaan pesan dan penentuan wilayah sasaran
- C , distribusi pesan melalui komunikasi LoRa
- R , penerimaan dan penyajian peringatan kepada masyarakat

Persamaan (1) bukan model matematis dan tidak menghasilkan nilai *numerik* atau prediksi. Representasi tersebut menunjukkan hubungan sekuensial bahwa data resmi harus melalui proses verifikasi, pengesahan, pengolahan, dan penentuan wilayah sasaran sebelum didistribusikan melalui *LoRa*. Keluaran model berupa urutan pemrosesan pesan, keterkaitan antar komponen, pembagian tanggung jawab aktor, identifikasi ketergantungan, kebutuhan keamanan, titik kegagalan, dan mekanisme mitigasi. Model mengasumsikan bahwa data resmi tersedia, server pemerintah daerah memiliki konektivitas utama atau cadangan, instansi berwenang memiliki otoritas validasi, perangkat penerima berada dalam cakupan *gateway*, pesan berukuran kecil dan terstruktur, serta tersedia sumber daya utama atau cadangan. *Model* belum memperhitungkan performa aktual antena, variasi propagasi radio, interferensi kanal, kepadatan *node*, dan kondisi geografis secara empiris.

2.4 Arsitektur Sistem yang Diusulkan

Arsitektur sistem menggunakan pola komunikasi *point-to-multipoint*, dengan satu atau lebih *gateway LoRa* yang mendistribusikan pesan kepada sejumlah perangkat penerima tetap. *LoRa* diposisikan sebagai kanal komunikasi fisik pada sisi *last-mile*; pemilihan protokol jaringan, termasuk penggunaan *LoRaWAN*, mekanisme *uplink-downlink*, dan manajemen perangkat, ditetapkan pada tahap pengembangan prototipe.

Arsitektur dibagi menjadi lima lapisan. Lapisan pertama adalah sumber data resmi yang terdiri atas BMKG atau lembaga pemerintah. Lapisan kedua adalah konektivitas hulu yang menghubungkan sumber data dengan server pemerintah daerah melalui koneksi utama atau jalur cadangan. Lapisan ketiga adalah pengolahan dan tata kelola pada server pemerintah daerah atau kecamatan, meliputi autentikasi sumber, verifikasi *timestamp*, penentuan wilayah sasaran, penyederhanaan pesan, pengesahan, dan pencatatan *audit log*. Lapisan keempat adalah komunikasi *LoRa* yang mendistribusikan pesan menggunakan pola *broadcast point-to-multipoint*. Lapisan kelima adalah perangkat penerima dan respons masyarakat yang dapat berupa layar teks, lampu indikator, sirene, atau notifikasi audio di kantor desa, posko, sekolah, tempat ibadah, dan lokasi strategis lainnya.



Gambar 1. Arsitektur konseptual sistem diseminasi peringatan dini 5 lapisan

Pesan minimum memuat identitas sumber, jenis ancaman, tingkat peringatan, wilayah terdampak, waktu penerbitan, waktu kedaluwarsa, dan tindakan yang disarankan. Untuk menjaga keamanan dan integritas, pesan secara konseptual dilengkapi nomor urut, *timestamp*, kode autentikasi, dan pemeriksaan integritas. Pada *mode* satu arah, keandalan ditingkatkan melalui retransmisi; pada pengembangan dua arah, perangkat penerima dapat mengirimkan konfirmasi penerimaan.

Diagram arsitektur memperlihatkan arah aliran data, koneksi utama dan cadangan, *server*, proses verifikasi dan pengesahan, *audit log*, *gateway*, perangkat penerima, sumber daya utama dan cadangan, aktor penanggung jawab, serta titik kegagalan pada koneksi hulu, *server*, *gateway*, kanal *LoRa*, dan perangkat penerima.

2.5 Format dan Aliran Pesan Peringatan

Struktur konseptual pesan dirumuskan sebagai:

$$M = \{ID, SRC, HAZ, LVL, LOC, TS, EXP, ACT, SEQ, AUTH\} \quad (2)$$

dengan *ID* sebagai identitas pesan, *SRC* sumber resmi, *HAZ* jenis ancaman, *LVL* tingkat peringatan, *LOC* wilayah sasaran, *TS* waktu penerbitan, *EXP* waktu kedaluwarsa, *ACT* tindakan yang disarankan, *SEQ* nomor urut pesan, dan *AUTH* kode autentikasi serta integritas. Struktur ini merupakan model data konseptual, bukan format paket final. Ukuran elemen, algoritma autentikasi, metode enkripsi, dan batas *payload* ditentukan pada tahap implementasi.

Aliran pesan meliputi: (1) sumber resmi menerbitkan peringatan; (2) server menerima data melalui kanal resmi; (3) sistem memverifikasi sumber dan *timestamp*; (4) operator atau BMKG mengesahkan pesan; (5) sistem menentukan wilayah sasaran; (6) pesan disederhanakan; (7) pesan dilengkapi nomor urut, waktu kedaluwarsa, dan autentikasi; (8) *gateway* mengirimkan pesan; (9) perangkat penerima memeriksa integritas dan masa berlaku; (10) perangkat menampilkan peringatan; (11) sistem mencatat pengiriman; dan (12) retransmisi dilakukan apabila diperlukan. Skenario tersebut menjadi bentuk demonstrasi konseptual artefak DSR.

2.6 Kerangka Evaluasi Kelayakan Konseptual

Kelayakan sistem dinilai menggunakan lima kriteria :

$$K_c = \{R, T, M, S, E\} \quad (3)$$

dengan *R* sebagai jangkauan komunikasi, *T* waktu pengiriman, *M* kapasitas pesan, *S* keandalan pengiriman, dan *E* efisiensi daya. Notasi pada Persamaan (3) merupakan himpunan kriteria, bukan formula agregasi. Penelitian tidak menggunakan bobot, skor, atau ambang kuantitatif karena belum terdapat hasil pengukuran perangkat.

Tabel 1. Kerangka Evaluasi Kelayakan Konseptual

Kriteria	Indikator	Bukti yang dianalisis	Risiko desain
Jangkauan (<i>R</i>)	Kemampuan menjangkau perangkat sasaran	Jarak, topografi, vegetasi, posisi antena, LOS/NLOS	Area tidak terjangkau

<i>Waktu (T)</i>	Ketepatan waktu penyampaian pesan	Waktu transmisi, jumlah node, ukuran pesan, retransmisi	Keterlambatan peringatan
<i>Kapasitas (M)</i>	Kecukupan informasi minimum dalam paket	Ukuran <i>payload</i> , format pesan, jumlah atribut	Informasi terpotong
<i>Keandalan (S)</i>	Peluang pesan diterima dengan benar	<i>Packet delivery ratio</i> , interferensi, redundansi	Pesan gagal diterima
<i>Efisiensi daya (E)</i>	Ketahanan perangkat dengan daya terbatas	Konsumsi daya, baterai, panel surya, interval transmisi	Perangkat tidak aktif

Setiap kriteria diberi salah satu status berikut :

- Memenuhi, apabila kebutuhan konseptual didukung secara konsisten oleh literatur dan tidak memerlukan perubahan besar pada arsitektur.
- Memenuhi bersyarat, apabila kesesuaian memerlukan konfigurasi tertentu, penambahan *gateway* atau *relay*, retransmisi pengurangan *payload* atau sumber daya Cadangan
- Belum terverifikasi, apabila bukti literatur tidak memadai atau hanya dapat dipastikan melalui pengujian fisik.

Sistem dinyatakan layak secara konseptual apabila seluruh kebutuhan dasar dapat dipetakan dalam arsitektur dan tidak terdapat kriteria yang secara teoritis bertentangan dengan karakteristik *LoRa*. Status tersebut tidak menyatakan bahwa sistem telah mencapai performa empiris tertentu. Penetapan status mengacu pada nilai kuantitatif yang dilaporkan literatur untuk tiap kriteria pada Tabel 4 status Memenuhi ditetapkan apabila nilai yang dilaporkan memenuhi kebutuhan rancangan tanpa syarat konfigurasi tambahan, sebagaimana pada kriteria kapasitas pesan, status Memenuhi bersyarat ditetapkan apabila pemenuhan nilai tersebut bergantung pada konfigurasi tambahan seperti penambahan *gateway*, retransmisi, atau optimasi posisi antenna, sebagaimana pada kriteria jangkauan yang mengacu pada nilai acuan lebih dari 3 km, kriteria waktu pengiriman yang mengacu pada nilai acuan sekitar 2,4 detik pada cakupan hingga 30 km dengan arsitektur *multi-hop*, dan kriteria keandalan yang mengacu pada nilai acuan tingkat keberhasilan transmisi di atas 90% pada prototipe sistem peringatan longsor; dan status Belum terverifikasi ditetapkan apabila literatur tidak melaporkan nilai kuantitatif yang sebanding atau evaluasi hanya dimungkinkan melalui pengujian fisik langsung, sebagaimana pada kriteria efisiensi daya.

2.7 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disusun mengikuti prinsip DSR sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Tahapan Penelitian dan Keluarannya

No.	Tahap	Aktivitas Utama	Keluaran
1	Identifikasi masalah	Mengidentifikasi keterbatasan distribusi peringatan pada wilayah blank spot, aktor, dan kebutuhan awal.	Rumusan masalah dan kebutuhan awal.
2	Penetapan tujuan solusi	Menentukan target artefak berupa arsitektur, skenario aliran pesan, dan kriteria kelayakan.	Tujuan desain dan ruang lingkup.
3	Kajian literatur	Menelaah studi terkait dan mengekstraksi parameter teknis serta konteks pengujian.	Tabel sintesis dan bukti pendukung.
4	Perancangan artefak	Menyusun model, arsitektur, format pesan, tata kelola, keamanan, dan mitigasi kegagalan.	Diagram, model aliran, dan tabel komponen.
5	Demonstrasi konseptual	Menjalankan skenario dari sumber resmi sampai perangkat penerima pada kondisi normal dan gangguan.	Skenario operasional end-to-end.
6	Evaluasi teoretis	Membandingkan kebutuhan dengan kriteria (R), (T), (M), (S), dan (E).	Status memenuhi, memenuhi bersyarat, atau belum terverifikasi.
7	Komunikasi hasil	Menyajikan artefak, hasil evaluasi, keterbatasan, dan agenda validasi.	PoC sebagai dasar pengembangan prototipe.

2.8 Batasan Penelitian

Penelitian dibatasi pada tahap *proof of concept* konseptual. Penelitian belum mencakup implementasi *gateway* dan node fisik, simulasi propagasi radio, pengujian jangkauan, pengukuran waktu pengiriman, pengukuran *packet delivery ratio*, pengukuran konsumsi daya, pengujian ketahanan perangkat, pengujian keamanan, pengujian penerimaan masyarakat, maupun uji lapangan.

Rancangan mengasumsikan penggunaan topologi *point-to-multipoint*, perangkat penerima tetap, pesan singkat, dan sumber daya cadangan. Parameter frekuensi, *spreading factor*, *bandwidth*, *coding rate*, daya pancar, jenis dan tinggi antenna, ukuran *payload*, jumlah node, serta interval retransmisi belum ditetapkan sebagai

konfigurasi final. Parameter tersebut diperlakukan sebagai variabel desain yang harus ditentukan melalui simulasi, pengembangan prototipe, dan pengujian pada wilayah sasaran. Oleh karena itu, hasil penelitian tidak dapat digunakan untuk menyatakan jangkauan, kecepatan, keandalan, atau efisiensi daya aktual sistem.

2.9 Validasi dan Keterlacakan Analisis

Validitas konseptual dijaga melalui penggunaan sumber ilmiah dan standar teknis, penerapan kriteria inklusi dan eksklusi, ekstraksi parameter secara terstruktur, pemisahan antara hasil literatur dan asumsi desain, penyajian keterbatasan secara eksplisit, penggunaan skenario untuk menguji konsistensi rancangan, serta larangan mengklaim performa yang belum diuji. Setiap klaim teknis mengenai jangkauan, waktu pengiriman, kapasitas pesan, keberhasilan transmisi, dan konsumsi daya harus dikaitkan dengan sumber yang relevan dan disertai konteks pengujian. Keterlacakan artefak dijaga melalui rantai empat tahap yang eksplisit untuk setiap kriteria kelayakan: (1) kebutuhan rancangan diturunkan dari karakteristik wilayah blank spot dan sifat pesan peringatan; (2) setiap kebutuhan dipetakan ke bukti literatur kuantitatif yang relevan, sebagaimana disajikan pada kolom Bukti Literatur Tabel 4; (3) bukti tersebut dinilai terhadap kriteria keputusan eksplisit untuk menentukan status Memenuhi, Memenuhi bersyarat, atau Belum terverifikasi; dan (4) hasil penilaian ditelusuri balik ke komponen arsitektur yang bersangkutan pada Tabel 3, sehingga setiap elemen artefak dapat ditelusuri hingga ke sumber dan dasar keputusannya. Rantai keterlacakan ini berfungsi sebagai instrumen validasi artefak konseptual, menggantikan pengujian empiris yang belum dapat dilakukan pada tahap *proof of concept* ini.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan *proof of concept* berupa arsitektur konseptual, aliran pesan, pembagian peran, dan kerangka evaluasi sistem diseminasi peringatan dini berbasis *LoRa* untuk wilayah *blank spot*. Evaluasi dilakukan secara teoretis dengan membandingkan kebutuhan sistem terhadap karakteristik *LoRa* yang dilaporkan dalam literatur. Oleh karena itu, hasil yang disajikan merupakan penilaian kelayakan konseptual, bukan hasil pengujian perangkat, jangkauan aktual, latensi, tingkat keberhasilan transmisi, atau konsumsi daya di lapangan.

Sistem diposisikan sebagai kanal pelengkap pada tahap *last-mile warning*. Informasi tetap berasal dari BMKG atau instansi berwenang dan diterima oleh server pemerintah daerah melalui konektivitas hulu. *LoRa* digunakan hanya untuk mendistribusikan pesan dari *gateway* lokal menuju perangkat penerima masyarakat yang tidak dapat mengandalkan internet atau jaringan seluler.

3.1 Analisis Komponen Sistem

Arsitektur terdiri atas sumber data resmi, konektivitas hulu, server pemerintah daerah, *gateway LoRa*, perangkat penerima, dan aktor respons lokal. Setiap komponen memiliki input, output, penanggung jawab, ketergantungan, dan mode kegagalan yang berbeda.

Tabel 3 menunjukkan bahwa keberhasilan sistem tidak hanya ditentukan oleh komunikasi *LoRa*. Ketersediaan sumber resmi, konektivitas hulu, validasi pesan, daya perangkat, kejelasan antarmuka, dan kesiapan masyarakat merupakan bagian dari satu rantai operasional. Kegagalan pada salah satu komponen dapat menghentikan distribusi peringatan meskipun kanal *LoRa* berfungsi.

3.2 Tata Kelola Operasional dan Aliran Pesan

Otoritas penerbitan dan pengesahan peringatan tetap berada pada BMKG atau instansi pemerintah yang berwenang. Server kecamatan atau pemerintah daerah berfungsi sebagai simpul pengolah dan penerus, bukan sebagai sumber keputusan. Aliran pesan dimulai ketika informasi diterima melalui kanal resmi, kemudian diverifikasi berdasarkan identitas sumber, *timestamp*, wilayah, dan tingkat peringatan.

Pesan yang lolos verifikasi disederhanakan ke format yang memuat identitas pesan, jenis ancaman, tingkat peringatan, wilayah sasaran, waktu berlaku, tindakan yang disarankan, nomor urut, dan kode autentikasi. Setelah disahkan, pesan dikirim melalui *gateway* dan dicatat dalam *audit log*. Pencatatan mencakup sumber, waktu penerimaan, operator, isi pesan, wilayah sasaran, waktu pengiriman, dan status distribusi.

Apabila sistem mendeteksi data tidak konsisten, pesan tidak langsung disiarkan, tetapi diteruskan ke jalur eskalasi manual kepada petugas BMKG. Alarm palsu ditangani melalui penghentian distribusi, penerbitan pesan koreksi, pencatatan insiden, dan evaluasi penyebab. Ketika server utama gagal, operasi dialihkan ke server cadangan atau prosedur manual. Jika *gateway* gagal, distribusi dialihkan ke *gateway* lain, kanal komunikasi alternatif, atau penyampaian lokal melalui radio dan sirene. Pada perangkat satu arah, keandalan ditingkatkan melalui pengulangan transmisi dan nomor urut pesan. Pada pengembangan dua arah, perangkat dapat mengirimkan konfirmasi penerimaan. Kedua mode tersebut harus dibedakan karena memerlukan konfigurasi dan kebutuhan energi yang berbeda.

3.3 Posisi LoRa dalam Arsitektur

LoRa merupakan teknologi komunikasi pada lapisan fisik yang mengatur modulasi dan transmisi radio. *LoRaWAN* merupakan protokol jaringan yang mengatur autentikasi perangkat, pengalamatan, komunikasi dengan *network server*, dan pengelolaan pesan. Keduanya tidak diperlakukan sebagai istilah yang sama. Rancangan ini menggunakan *LoRa* dengan pola *point-to-multipoint* pada tahap konseptual. Satu *gateway* mengirimkan pesan singkat kepada beberapa perangkat penerima tetap. Model ini tidak menggunakan *mesh* dan belum menetapkan *LoRaWAN* sebagai protokol final. *Relay* atau *gateway* tambahan hanya diposisikan sebagai opsi mitigasi apabila kondisi geografis tidak memungkinkan komunikasi langsung. Pemilihan ini dilakukan agar arsitektur tetap sederhana dan sesuai untuk distribusi pesan pendek. Namun, konsekuensinya adalah keterbatasan konfirmasi penerimaan dan pengelolaan perangkat. Jika pada tahap prototipe dibutuhkan komunikasi dua arah, manajemen *node*, atau keamanan jaringan yang lebih terstruktur, penggunaan *LoRaWAN* dapat dipertimbangkan.

Tabel 3. Analisis Komponen Sistem

Komponen	Input	Proses dan Output	Penanggung Jawab	Ketergantungan	Mode Kegagalan dan Mitigasi
Sumber data resmi	Data cuaca, banjir, longsor, dan peringatan hidrometeorologi	Menghasilkan peringatan terverifikasi yang memuat jenis ancaman, wilayah, tingkat peringatan, waktu, dan tindakan yang disarankan	BMKG atau instansi berwenang	Sistem informasi dan kanal komunikasi resmi	Data terlambat atau tidak tersedia; dimitigasi melalui sumber cadangan dan eskalasi manual
Konektivitas hulu	Data dari lembaga resmi	Mengirimkan data ke server pemerintah daerah	Pemerintah daerah atau operator jaringan	Internet, jaringan pemerintah, atau koneksi cadangan	Koneksi terputus; dimitigasi melalui jalur seluler, radio data, atau prosedur manual
Server pemerintah daerah	Data resmi dan metadata pesan	Melakukan validasi sumber, pengesahan, penentuan wilayah, penyederhanaan pesan, dan pencatatan <i>audit log</i>	BMKG dan operator pemerintah daerah	Koneksi hulu, listrik, basis data, dan operator	Server atau listrik gagal; dimitigasi melalui UPS, server cadangan, dan prosedur eskalasi
Gateway LoRa	Pesan yang telah disahkan	Mentransmisikan pesan secara <i>point-to-multipoint</i> ke perangkat penerima	Unit teknis pemerintah daerah	Server, antena, frekuensi, dan catu daya	Gateway mati atau cakupan tidak memadai; dimitigasi dengan baterai, panel surya, gateway tambahan, dan retransmisi
Perangkat penerima	Paket LoRa	Memverifikasi pesan serta menampilkan peringatan melalui teks, lampu, atau sirene	Pemerintah desa atau pengelola lokasi	Cakupan LoRa, catu daya, dan kondisi perangkat	Perangkat tidak aktif atau pesan tidak dipahami; dimitigasi dengan daya cadangan, pemeliharaan, dan desain visual-audio

Masyarakat dan relawan	Pesan peringatan	Melakukan evakuasi, koordinasi, dan pelaporan	Pemerintah desa, relawan, dan masyarakat	Kejelasan pesan, SOP, dan latihan	Respons terlambat atau salah interpretasi; dimitigasi melalui bahasa lokal, simbol baku, sosialisasi, dan simulasi
------------------------	------------------	---	--	-----------------------------------	--

3.4 Analisis Kelayakan Konseptual

Kelayakan dievaluasi berdasarkan jangkauan, waktu pengiriman, kapasitas pesan, keandalan, dan efisiensi daya. Nilai dari penelitian terdahulu tidak digabungkan menjadi satu rata-rata karena setiap studi menggunakan konfigurasi, topologi, lingkungan, dan ukuran pesan yang berbeda.

Tabel 4. Evaluasi Kelayakan Konseptual LoRa

Kriteria	Bukti Literatur	Kebutuhan Rancangan	Kriteria Keputusan	Status
Jangkauan	Jangkauan lebih dari 3 km dilaporkan pada lingkungan pedesaan dan wilayah terdampak bencana [10].	Menjangkau titik penerima dalam satu wilayah pelayanan.	Memenuhi apabila cakupan dapat dicapai melalui satu gateway atau penambahan gateway, mengacu pada nilai jangkauan lebih dari 3 km yang dilaporkan pada Bukti Literatur.	Memenuhi bersyarat
Waktu pengiriman	Waktu pengiriman sekitar 2,4 detik pada cakupan 30 km dilaporkan menggunakan arsitektur <i>multi-hop</i> di lingkungan urban [11].	Pesan diterima dalam waktu yang masih relevan untuk tindakan awal.	Memenuhi apabila ukuran pesan, jumlah <i>hop</i> , dan retransmisi tidak menimbulkan keterlambatan berlebihan, mengacu pada nilai acuan sekitar 2,4 detik pada cakupan hingga 30 km dengan arsitektur <i>multi-hop</i> .	Memenuhi bersyarat
Kapasitas pesan	LoRa sesuai untuk pengiriman paket berukuran kecil; kapasitas efektif bergantung pada konfigurasi dan protokol yang digunakan.	Memuat jenis ancaman, wilayah, tingkat peringatan, waktu, dan tindakan yang disarankan.	Memenuhi apabila pesan disederhanakan dan tidak memuat data multimedia, sesuai karakteristik kapasitas paket kecil pada LoRa.	Memenuhi
Keandalan	Tingkat keberhasilan transmisi di atas 90% dilaporkan pada prototipe sistem peringatan longsor[20].	Pesan diterima secara konsisten oleh perangkat sasaran.	Memenuhi apabila didukung retransmisi, redundansi, dan penempatan gateway yang sesuai, mengacu pada nilai acuan tingkat keberhasilan transmisi di atas 90% pada prototipe sistem peringatan longsor.	Memenuhi bersyarat
Efisiensi daya	Literatur menunjukkan bahwa LoRa memiliki karakteristik berdaya rendah, tetapi nilai aktual dipengaruhi jenis perangkat dan interval transmisi [8].	Perangkat tetap aktif ketika listrik utama gagal.	Memenuhi apabila tersedia baterai atau panel surya serta mekanisme manajemen daya; belum terverifikasi karena literatur belum melaporkan nilai konsumsi daya yang sebanding untuk konfigurasi perangkat yang diusulkan dan hanya dapat dipastikan melalui pengujian fisik.	Belum terverifikasi

Status “memenuhi bersyarat” menunjukkan bahwa potensi kesesuaian LoRa bergantung pada topografi, posisi antenna, konfigurasi radio, ukuran *payload*, interferensi, dan ketersediaan daya. Nilai 3 km, 2,4 detik, dan

keberhasilan di atas 90% tidak diperlakukan sebagai performa sistem yang diusulkan, tetapi sebagai bukti awal bahwa komunikasi LoRa dapat mendukung kebutuhan serupa pada kondisi tertentu.

3.5 Skenario Kelayakan

Sensitivitas rancangan dianalisis melalui tiga skenario untuk menunjukkan pengaruh jarak, medan, vegetasi, interferensi, ukuran pesan, dan kegagalan daya

Tabel 5. Skenario kelayakan sistem

<i>Aspek</i>	<i>Optimistis</i>	<i>Moderat</i>	<i>Buruk</i>
<i>Jarak</i>	Pendek sampai menengah	Menengah dengan permukiman tersebar	Jauh dan terpisah hambatan
<i>Medan</i>	Terbuka dan relatif datar	Perbukitan ringan	Curam dan tertutup
<i>Vegetasi</i>	Rendah	Sedang	Lebat
<i>Interferensi</i>	Rendah	Sedang	Tinggi
<i>Payload</i>	Singkat dan terstruktur	Menengah dengan beberapa atribut tambahan	Terlalu panjang atau sering dikirim
<i>Daya</i>	Listrik stabil dengan baterai	Listrik tidak stabil dengan baterai terbatas	Listrik terputus dan daya cadangan gagal
<i>Implikasi</i>	Satu gateway berpotensi mencukupi	Membutuhkan optimasi antena, retransmisi, atau gateway tambahan	Memerlukan redundansi gateway, sumber daya cadangan, dan kanal alternatif
<i>Status</i>	Layak secara konseptual	Layak bersyarat	Belum layak tanpa mitigasi

Pada skenario optimistis, LoRa berpotensi digunakan tanpa perubahan arsitektur yang berarti. Pada skenario moderat, sistem memerlukan penyesuaian posisi antena, konfigurasi radio, retransmisi, atau penambahan gateway. Pada skenario buruk, LoRa tidak boleh menjadi satu-satunya kanal karena kegagalan daya, hambatan topografi, dan interferensi dapat menurunkan keandalan secara signifikan

3.6 Perbandingan Kanal Komunikasi

Perbandingan dilakukan berdasarkan ketergantungan infrastruktur, kapasitas pesan, arah komunikasi, kebutuhan daya, dan kesesuaian untuk wilayah *blank spot*.

Tabel 6. Perbandingan kanal komunikasi peringatan dini

<i>Kanal</i>	<i>Ketergantungan Infrastruktur</i>	<i>Kapasitas Informasi</i>	<i>Arah Komunikasi</i>	<i>Kebutuhan Daya</i>	<i>Peran pada Blank Spot</i>
<i>Internet atau aplikasi</i>	Internet dan perangkat pengguna	Tinggi	Dua arah	Sedang–tinggi	Rendah jika jaringan tidak tersedia
<i>SMS</i>	Jaringan seluler	Rendah–sedang	Umumnya dua arah	Rendah	Terbatas jika sinyal tidak stabil
<i>Radio siaran</i>	Pemancar dan radio penerima	Sedang	Satu arah	Rendah–sedang	Baik untuk informasi umum
<i>Radio dua arah</i>	Infrastruktur atau perangkat radio	Rendah–sedang	Dua arah	Sedang	Baik untuk koordinasi petugas
<i>LoRa</i>	Gateway lokal dan perangkat penerima	Rendah	Satu atau dua arah sesuai desain	Rendah	Baik untuk pesan singkat pada sisi <i>last-mile</i>
<i>Sirene lokal</i>	Perangkat lokal dan catu daya	Sangat rendah	Satu arah	Rendah	Baik sebagai tanda bahaya
<i>Satelit</i>	Terminal dan layanan satelit	Sedang–tinggi	Satu atau dua arah	Tinggi	Baik sebagai cadangan, tetapi lebih mahal

LoRa tidak menggantikan seluruh kanal komunikasi. Internet tetap dibutuhkan pada sisi hulu untuk memperoleh data resmi, sedangkan radio, sirene, dan komunikasi satelit dapat berperan sebagai cadangan. Arsitektur multi-kanal lebih aman dibandingkan ketergantungan pada satu teknologi.

3.7 Ketergantungan Hulu dan Skenario Kegagalan

Kemandirian LoRa hanya berlaku pada hubungan antara gateway dan perangkat penerima. Server tetap bergantung pada sumber data resmi, konektivitas hulu, listrik, dan operator. Jika internet tidak tersedia, data dapat diterima melalui jaringan seluler cadangan, radio data, atau prosedur manual dari BMKG. Jika sumber data resmi tidak tersedia, sistem tidak boleh menghasilkan peringatan sendiri tanpa otorisasi. Jika listrik server atau gateway terputus, operasi harus menggunakan UPS, baterai, atau panel surya. Jika gateway utama gagal, pesan dialihkan ke gateway cadangan atau kanal lain. Apabila seluruh jalur elektronik gagal, prosedur manual melalui radio petugas, kendaraan keliling, pengeras suara, dan sirene lokal menjadi lapisan terakhir. Pendekatan ini menempatkan LoRa sebagai bagian dari strategi redundansi, bukan sebagai satu satunya media komunikasi kebencanaan.

3.8 Kebutuhan Desain Perangkat Penerima

Perangkat penerima perlu dirancang untuk kondisi lingkungan yang tidak selalu stabil. Catu daya harus menyediakan baterai atau panel surya agar perangkat tetap aktif ketika listrik utama terputus. Pelindung perangkat harus tahan terhadap debu, hujan, kelembapan, dan perubahan suhu sesuai karakteristik lokasi pemasangan. Antarmuka peringatan perlu menggabungkan suara, lampu, dan teks agar dapat diakses oleh masyarakat dengan keterbatasan penglihatan atau pendengaran. Pesan harus menggunakan bahasa sederhana, simbol yang mudah dikenali, dan dapat disesuaikan dengan bahasa lokal. Informasi minimum mencakup jenis ancaman, wilayah, tingkat bahaya, waktu berlaku, dan tindakan yang harus dilakukan.

Kemudahan pemeliharaan perlu didukung oleh pemeriksaan baterai, pengujian sirene, pembersihan perangkat, pembaruan konfigurasi, dan pencatatan kerusakan. Sebelum diterapkan, perangkat harus melalui pengujian pengguna untuk menilai keterbacaan, tingkat suara, kemudahan pemahaman, dan kecepatan respons. Pemerintah desa dan BMKG juga perlu melaksanakan latihan berkala agar masyarakat memahami makna setiap peringatan dan prosedur evakuasi

3.9 Keamanan dan Integritas Pesan

Pesan yang dikirim melalui pola *broadcast* berisiko mengalami pemalsuan, intersepsi, atau serangan *replay*. Oleh karena itu, rancangan konseptual memerlukan autentikasi pesan, nomor urut, *timestamp*, waktu kedaluwarsa, dan pemeriksaan integritas. Pesan yang gagal diverifikasi atau telah kedaluwarsa tidak boleh ditampilkan oleh perangkat penerima.

Penggunaan enkripsi dan *message authentication code* perlu disesuaikan dengan keterbatasan *payload* dan kemampuan perangkat. Mekanisme keamanan tersebut belum diuji pada penelitian ini dan harus divalidasi pada tahap prototipe.

3.10 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu umumnya menempatkan LoRa sebagai penghubung sensor, node pemantauan, atau prototipe deteksi bencana. Rancangan ini memiliki fokus berbeda karena tidak membangun sistem deteksi lokal, tetapi menghubungkan informasi resmi BMKG dengan perangkat penerima masyarakat melalui server pemerintah daerah.

Kontribusi utama penelitian terletak pada integrasi arsitektur teknis, tata kelola pengesahan pesan, keamanan, jalur eskalasi, sumber daya cadangan, dan respons komunitas dalam satu *proof of concept*. Meskipun belum membuktikan performa empiris, model ini menghasilkan kebutuhan desain dan skenario operasional yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan prototipe dan pengujian lapangan.

3.11 Keterbatasan

Hasil penelitian masih terbatas pada evaluasi konseptual. Jangkauan, latensi, tingkat keberhasilan transmisi, kapasitas efektif, konsumsi daya, dan ketahanan perangkat belum diukur. Perbedaan lingkungan dan konfigurasi pada penelitian terdahulu juga menyebabkan nilai yang dilaporkan tidak dapat digeneralisasi langsung ke wilayah sasaran.

Validasi selanjutnya perlu mencakup pengembangan prototipe, pengujian LOS dan NLOS, simulasi cakupan, pengukuran *packet delivery ratio*, latensi, konsumsi daya, keamanan pesan, ketahanan perangkat, pengujian pengguna, serta latihan respons masyarakat. Dengan demikian, status kelayakan konseptual dapat ditingkatkan menjadi kelayakan teknis dan operasional.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan *proof of concept* berupa rancangan konseptual sistem diseminasi peringatan dini berbasis LoRa untuk mendukung penyampaian informasi pada wilayah *blank spot*. Rancangan mengintegrasikan sumber data resmi dari BMKG, konektivitas hulu, server pemerintah daerah, *gateway LoRa*, perangkat penerima

masyarakat, serta mekanisme respons lokal. Keluaran penelitian mencakup arsitektur sistem, aliran pesan *end-to-end*, pembagian peran dan tanggung jawab, identifikasi ketergantungan dan mode kegagalan, serta kerangka evaluasi kelayakan berdasarkan jangkauan, waktu pengiriman, kapasitas pesan, keandalan transmisi, dan efisiensi daya. Hasil evaluasi teoretis menunjukkan bahwa LoRa berpotensi digunakan sebagai kanal *last-mile warning* untuk mengirimkan pesan singkat kepada perangkat penerima yang tidak dapat mengandalkan internet atau jaringan seluler. Kapasitas pesan dinilai memenuhi kebutuhan dasar apabila informasi disederhanakan dan tidak memuat data multimedia. Sementara itu, jangkauan, waktu pengiriman, dan keandalan dinilai memenuhi secara bersyarat karena dipengaruhi oleh jarak, topografi, vegetasi, interferensi, posisi antenna, ukuran *payload*, dan kebutuhan retransmisi. Efisiensi daya belum dapat diverifikasi karena belum dilakukan pengukuran pada perangkat fisik. LoRa dalam rancangan ini tidak menggantikan seluruh jaringan komunikasi kebencanaan. Kemandiriannya terbatas pada sisi *last-mile*, sedangkan server tetap bergantung pada sumber data resmi, konektivitas hulu, listrik, dan operator. Oleh karena itu, sistem memerlukan jalur komunikasi dan cadangan, gateway tambahan pada kondisi tertentu, autentikasi dan integritas pesan, pencatatan audit, prosedur eskalasi, serta kanal alternatif apabila server atau gateway gagal. Penelitian ini belum mencakup implementasi perangkat, simulasi propagasi radio, pengujian lapangan, pengukuran latensi, *packet delivery ratio*, konsumsi daya, keamanan, dan penerimaan pengguna. Dengan demikian, hasil penelitian belum dapat digunakan untuk menyatakan performa aktual sistem. Tahap selanjutnya perlu diarahkan pada pengembangan prototipe, penetapan konfigurasi LoRa sesuai regulasi, pengujian pada kondisi *line-of-sight* dan *non-line-of-sight*, evaluasi ketahanan perangkat, pengujian aksesibilitas visual-audio, serta latihan respons masyarakat. Hasil pengujian tersebut diperlukan untuk meningkatkan status rancangan dari layak secara konseptual menjadi layak secara teknis dan operasional.

REFERENCES

- [1] I. G. Tejakusuma, E. H. Sittadewi, and R. Fitriani, "Hydrometeorological hazard detection and warning for risk reduction in West Java, Indonesia," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1192, no. 1, p. 012043, Jun. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1192/1/012043.
- [2] P. Aeni and M. Khoirul Anwar, "Hydrometeorological Disaster: Challenges and Mitigation in Indonesia," *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, vol. 5, no. 01, pp. 318–330, Jan. 2024, doi: 10.59141/jist.v5i01.888.
- [3] R. Humairah and A. Arliansyah, "Environmental disaster risk analysis using probabilistic models : a case study in Kepulauan Bangka Belitung Province," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1580, no. 1, p. 012049, Jan. 2026, doi: 10.1088/1755-1315/1580/1/012049.
- [4] J. Wiratmo and P. M. Siregar, "Empowerment of Future Frontline Indonesian Weather and Climate Information," *Jurnal Pengabdian Masyarakat Bangsa*, vol. 3, no. 8, pp. 4082–4088, Oct. 2025, doi: 10.59837/jpmba.v3i8.3220.
- [5] Perdinan *et al.*, "Initiative Collaboration Tool of Early Warning Systems for Early Action to Mitigate Flood Disaster Impacts in Indonesia," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1359, no. 1, p. 012035, Jun. 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1359/1/012035.
- [6] D. Roza Krisnandhi Kausar and Agustan, "Disaster Management in Tourism: Public-Private Collaboration and Early Warning Innovations in Bali and Yogyakarta," *Jurnal Kajian Bali (Journal of Bali Studies)*, vol. 15, no. 2, pp. 582–600, Aug. 2025, doi: 10.24843/JKB.2025.v15.i02.p06.
- [7] P. Kumar. G, A. A. Kamal. A, B. Ramanan. B, I. Ahamed. A, and Siddharth. M, "Simulated Disaster Warning System for Remote Areas using Multi-Hop LEACH Over LoRa Mesh Network," in *2026 4th International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems (ICICACS)*, IEEE, May 2026, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICICACS68679.2026.11578885.
- [8] V. Cheimaras *et al.*, "Emergency Communication System Based on Wireless LPWAN and SD-WAN Technologies: A Hybrid Approach," *Signals*, vol. 4, no. 2, pp. 315–336, Apr. 2023, doi: 10.3390/signals4020017.
- [9] U. Noreen, A. Bounceur, and L. Clavier, "A study of LoRa low power and wide area network technology," in *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, IEEE, May 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/ATSIP.2017.8075570.
- [10] H. Safi, A. I. Jehangiri, Z. Ahmad, M. A. Ala'anzy, O. I. Alramli, and A. Algarni, "Design and Evaluation of a Low-Power Wide-Area Network (LPWAN)-Based Emergency Response System for Individuals with Special Needs in Smart Buildings," *Sensors*, vol. 24, no. 11, p. 3433, May 2024, doi: 10.3390/s24113433.
- [11] V. Ranasinghe *et al.*, "Rapid and Resilient LoRa Leap: A Novel Multi-Hop Architecture for Decentralised Earthquake Early Warning Systems," *Sensors*, vol. 24, no. 18, p. 5960, Sep. 2024, doi: 10.3390/s24185960.
- [12] M. Esposito, L. Palma, A. Belli, L. Sabbatini, and P. Pierleoni, "Recent Advances in Internet of Things Solutions for Early Warning Systems: A Review," *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2124, Mar. 2022, doi: 10.3390/s22062124.
- [13] R. Sudha, Pavithra. S, Ramyaprabha. M, M. B, and Y. Yadav. R, "Adaptive AI-Lora Early-Warning System for Remote Disaster-Prone Areas," *International Journal of Engineering & Extended Technologies Research*, vol. 08, no. 02, Mar. 2026, doi: 10.15662/IJEETR.2026.0802093.
- [14] D. Roza Krisnandhi Kausar and Agustan, "Disaster Management in Tourism: Public-Private Collaboration and Early Warning Innovations in Bali and Yogyakarta," *Jurnal Kajian Bali (Journal of Bali Studies)*, vol. 15, no. 2, pp. 582–600, Aug. 2025, doi: 10.24843/JKB.2025.v15.i02.p06.
- [15] L. Sciuillo, A. Trotta, and M. Di Felice, "Design and performance evaluation of a LoRa-based mobile emergency management system (LOCATE)," *Ad Hoc Networks*, vol. 96, p. 101993, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.adhoc.2019.101993.
- [16] V. Ranasinghe *et al.*, "Rapid and Resilient LoRa Leap: A Novel Multi-Hop Architecture for Decentralised Earthquake Early Warning Systems," *Sensors*, vol. 24, no. 18, p. 5960, Sep. 2024, doi: 10.3390/s24185960.

- [17] D. Shahnawaz Syed, S. B. Hossain, A. Islam, T.-A.- Islam Jim, and S. R. Zishan, “Design and Feasibility Analysis of a LoRa Based Communication System for Disaster Management,” *AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE)*, vol. 23, no. 2, pp. 135–144, Aug. 2024, doi: 10.53799/ajse.v23i2.1055.
- [18] S. Shrestha, R. Raj, U. Paneru, and S. Karki, “Use of Wireless LoRa Technology in Flood Early Warning Systems,” *Proceedings of International Conference on Innovation in Computing, Science, Engineering and Technology*, vol. 2, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.65091/icitset.v2i1.9.
- [19] M. A. Riyadi, F. D. Darmawan, A. S. R. Prastika, G. Priyohutomo, A. Sofwan, and T. Prakoso, “Development of IoT-based Early Warning System for Weather Disaster using LoRA,” in *2025 12th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, IEEE, Sep. 2025, pp. 418–422. doi: 10.1109/EECSI67060.2025.11290398.
- [20] Ruliyanta, M. A. Al Izhar, and V. V. R. Repi, “A Preliminary Study on an IoT-Based Landslide Early Warning System Using LoRa Communication,” in *2025 12th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, IEEE, Sep. 2025, pp. 411–417. doi: 10.1109/EECSI67060.2025.11290139.
- [21] Mr. S. Murarkar, Dr. P. Tajane, and Prof. K. Sawarkar, “Low-Power LoRa-Based Disaster Alert System for Remote Areas,” *International Journal of Advanced Electrical and Electronics Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 50–55, Dec. 2025, doi: 10.65521/ijaeee.v14i2.1707.