

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada tahun 2023, Indonesia mengalami setidaknya 1.255 kejadian banjir yang mengakibatkan 76 orang meninggal dunia, 4.788 orang luka-luka, serta mempengaruhi lebih dari 3,87 juta jiwa. Sementara itu, kebakaran hutan dan lahan mencatatkan angka tertinggi dengan 2.051 kasus. Diikuti cuaca ekstrem dengan 1.255 kasus dan tanah longsor dengan 591 kasus yang mengakibatkan 132 korban jiwa. Bencana kekeringan juga memberikan dampak signifikan dengan 4,39 juta jiwa terdampak meskipun hanya tercatat 174 kasus (Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2024). Data ini menunjukkan keragaman jenis bencana yang mengancam Indonesia sekaligus besarnya populasi yang rentan terhadap dampak bencana. Pada tahun 2024, data menunjukkan pola yang semakin mengkhawatirkan dengan peningkatan dampak yang signifikan. Banjir masih menjadi bencana paling dominan dengan 1.420 kasus yang mengakibatkan 208 korban jiwa, 27 orang hilang, 10.920 luka-luka, serta mempengaruhi lebih dari 6,3 juta jiwa. Yang lebih memprihatinkan, meskipun jumlah kejadian tanah longsor menurun menjadi 207 kasus, namun dampak yang ditimbulkan justru lebih fatal dengan 213 korban jiwa dan 22 orang hilang. Bencana geologis seperti gempa bumi dan erupsi gunung api juga terus mengancam dengan dampak yang cukup serius, di mana erupsi gunung api mengakibatkan 45 korban jiwa dari 8 kejadian (Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2025). Data dua tahun berturut-turut ini mengonfirmasi bahwa Indonesia tidak hanya menghadapi frekuensi bencana yang tinggi, tetapi juga tingkat keparahan dampak yang cenderung meningkat khususnya dalam hal korban jiwa dan jumlah populasi yang terdampak.

Fenomena ini menggarisbawahi urgensi penanganan sistemik terhadap manajemen bencana di Indonesia. Khususnya dalam fase tanggap darurat ketika infrastruktur komunikasi konvensional seringkali menjadi korban pertama yang mengalami kerusakan atau kelebihan beban. Ketergantungan pada jaringan seluler dan listrik yang rentan menjadikan proses evakuasi dan koordinasi pertolongan

menjadi terhambat. Hal tersebut berpotensi meningkatkan jumlah korban jiwa, terutama pada daerah-daerah dengan akses yang terbatas. Pada daerah yang aksesnya masih sulit dan terpencil, sangat sulit untuk memberikan informasi kepada pihak yang berwenang apabila terjadinya bencana alam yang merusak akses jalan dan infrastruktur telekomunikasi. Data empiris yang menunjukkan tingginya jumlah populasi terdampak dan tingginya angka korban jiwa pada berbagai jenis bencana memperkuat argumen mengenai perlunya pengembangan sistem komunikasi darurat yang andal, mandiri, dan tidak bergantung pada infrastruktur yang rentan. Oleh karena itu, dengan adanya sistem komunikasi darurat yang andal dan mandiri dapat mempermudah evakuasi atau pertolongan pada situasi tanggap darurat (Rizal et al., 2025).

Upaya pengembangan sistem komunikasi darurat telah banyak dilakukan. Sejumlah penelitian terdahulu telah mengeksplorasi potensi teknologi LoRa sebagai solusi komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya rendah untuk manajemen bencana. LoRa sebagai protokol komunikasi yang beroperasi pada frekuensi bebas lisensi, tidak hanya mengatasi keterbatasan jangkauan tetapi juga memberikan ketahanan terhadap interferensi dan kemampuan penetrasi yang baik di lingkungan perkotaan maupun perdesaan, sehingga menjadikannya ideal untuk aplikasi tanggap darurat di berbagai kondisi geografis. Keunggulan ini disebabkan kompromi strategis LoRa, yaitu mengorbankan laju data tinggi demi jangkauan luas dan konsumsi daya minimal yang sangat vital untuk operasi jangka panjang pascabencana (Shahnowaz Syed et al., 2024).

Penelitian yang diusulkan oleh Shahnowaz Syed et al. (2024) dengan judul “*Design and Feasibility Analysis of a LoRa Based Communication System for Disaster Management*” yang menganalisis kelayakan sistem komunikasi berbasis *mesh* LoRa untuk manajemen bencana. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa jaringan *meshtastic* LoRa dapat beroperasi hingga 2 sampai 6 kali lipat jangkauan solusi lain dengan waktu operasional hingga lebih dari 28 jam per perangkat. Keunggulan ini sangat penting untuk operasi jangka panjang pascabencana. Namun, studi ini masih terbatas pada analisis teoretis dan simulasi, serta belum sepenuhnya mengintegrasikan fitur deteksi bahaya otomatis dan antarmuka

pengguna alternatif yang dirancang untuk korban. Studi terdahulu lainnya, seperti yang dilakukan oleh Hong (2022) dengan judul “*Disaster Resilient Mesh Network Using LoRa And NerveNet*” yang berfokus pada perancangan *Disaster Resilient Mesh Network* menggunakan LoRa dengan mengimplementasikan kerangka jaringan tangguh *NerveNet*. *NerveNet* dirancang untuk mendukung jaringan *mesh* yang mandiri di mana tautan *mesh* LoRa digunakan untuk transmisi data dengan *bandwidth* terbatas yang cocok untuk pembaruan darurat krusial dengan jangkauan hingga kilometer serta tautan *mesh* Wi-Fi untuk *bandwidth* yang lebih luas. Meskipun kerangka ini menyediakan ketahanan jaringan yang esensial, *NerveNet* LoRa mewarisi keterbatasan teknologi LoRa itu sendiri, yaitu laju data yang sangat rendah sekitar 1 kbps. Keterbatasan ini menghambat fungsionalitas di luar pesan teks sederhana dan transfer data bervolume tinggi pascabencana. Solusi ini tidak memprioritaskan integrasi sistem kesadaran lokasi yang tangguh pada perangkat untuk menjamin akurasi posisi di lingkungan Non-LoS serta tidak memiliki fitur deteksi bahaya otomatis berbasis sensor inersia yang dapat memicu *alarm* mandiri.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Chen et al. (2025) yang berjudul “*UAV Emergency Rescue System Based on Combined LoRa and NB-IoT Communication Technologies*” menggabungkan LoRa dengan NB-IoT dalam sistem penyelamatan UAV, namun integrasi NB-IoT ini justru menciptakan titik kegagalan kritis. NB-IoT sepenuhnya bergantung pada infrastruktur terestrial, seperti menara sinyal atau stasiun basis seluler (*Base Stations/BTS*) yang rentan rusak atau hancur akibat bencana alam. Dengan demikian, sistem hibrida ini tidak lebih tangguh daripada jaringan seluler tradisional karena kegagalan infrastruktur akan melumpuhkan seluruh sistem. Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh Matracia et al. (2022) yang berjudul “*Post-Disaster Communications: Enabling Technologies, Architectures, and Open Challenges*” membahas arsitektur komunikasi pascabencana secara visioner, mengusulkan kerangka kerja jaringan terintegrasi ruang udara darat SAGIN dan DTN dalam konteks jaringan 6G. Meskipun memberikan justifikasi teoretis yang kuat mengenai kebutuhan akan ketahanan, studi ini bersifat visioner dan belum implementatif di tingkat perangkat keras yang dapat digunakan langsung oleh korban di lapangan. Penelitian terdahulu ini juga

belum sepenuhnya mengintegrasikan fitur deteksi bahaya otomatis dan komunikasi antarmuka alternatif yang dirancang untuk korban.

Berdasarkan tinjauan terhadap penelitian terdahulu tersebut, teridentifikasi celah penelitian (*research gap*) di mana dibutuhkan sebuah sistem yang tidak hanya mengandalkan komunikasi LoRa tetapi juga terintegrasi penuh dengan kemampuan kesadaran lokasi dan komunikasi antarmuka alternatif untuk menciptakan solusi yang lebih tangguh dan adaptif. Identifikasi dan pemetaan wilayah rawan bencana juga menjadi langkah preventif yang krusial di mana perangkat ditempatkan di lokasi yang strategis, sehingga dapat meningkatkan efektivitas sistem (Hidayat et al., 2023). Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pengembangan sebuah sistem komunikasi darurat terintegrasi yang memadukan LoRa untuk komunikasi jarak jauh, GPS yang diperkuat dengan *dead reckoning* untuk kesadaran lokasi dan deteksi gerakan otomatis, serta BLE sebagai komunikasi antarmuka alternatif yang memanfaatkan *smartphone*. Integrasi modul GPS seperti pada u-blox NEO-M8L menjamin ketahanan data dengan menggabungkan GNSS dengan sensor inersia 3D seperti akselerometer dan giroskop. Fitur *dead reckoning* ini memungkinkan navigasi akurat berkelanjutan dan pembaruan posisi *real-time* bahkan ketika sinyal GNSS hilang di bawah puing atau di dalam bangunan yang rusak.

Integrasi akselerometer ini memungkinkan perangkat secara otomatis mendeteksi pergerakan tiba-tiba yang mengidentifikasi bahaya seperti terseret banjir atau tertimbun longsor dan mengirimkan *alarm* beserta koordinatnya tanpa intervensi manusia (Muladi et al., 2024). Penggunaan BLE juga menyediakan *gateway* lokal berdaya rendah yang menghubungkan perangkat dengan *Bluetooth* pada *smartphone* dalam pengiriman pesan untuk memastikan *usability* yang tinggi di samping ketahanan jaringan LoRa. Selain penggunaan BLE, penggunaan GPS pada *smartphone* juga tidak kalah pentingnya. GPS pada *smartphone* dapat dimanfaatkan untuk mengirimkan koordinat lokasi terkini ketika mengirimkan pesan bantuan. Pendekatan ini terbukti praktis berdasarkan penelitian yang dilakukan Nanda Nan Arif H et al. (2025), di mana di dalam penelitian tersebut mengembangkan sebuah aplikasi survei dengan validasi lokasi berbasis GPS *smartphone* yang dapat mencapai akurasi dengan toleransi 50 meter. Pendekatan

komunikasi multi-modal dengan mengombinasikan LoRa, GPS, dan BLE ini dirancang untuk menciptakan sistem yang lebih tangguh dan adaptif untuk mengatasi keterbatasan yang ada pada penelitian-penelitian sebelumnya. Dengan adanya sistem yang terintegrasi ini, diharapkan dapat memutus mata rantai kesenjangan komunikasi pada fase tanggap darurat. Penelitian ini juga berfokus pada perancangan protokol komunikasi yang efisien dan andal dalam pengiriman pesan untuk memastikan pesan darurat dapat sampai dengan cepat dan akurat.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang arsitektur sistem komunikasi darurat terintegrasi yang memanfaatkan teknologi LoRa, GPS, dan BLE untuk menjangkau daerah yang terdampak bencana alam?
2. Bagaimana implementasi protokol komunikasi dan format pesan yang efektif pada jaringan komunikasi berbasis LoRa?
3. Bagaimana performa sistem yang dikembangkan berdasarkan parameter-parameter teknis seperti PDR, latensi *end-to-end*, akurasi geolokasi, responsivitas deteksi gerakan otomatis, dan *usability* dalam kondisi simulasi bencana?

1.3 Tujuan Penelitian

Sejalan dengan rumusan masalah yang telah dipaparkan di atas, adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang dan merealisasikan prototipe sistem komunikasi darurat yang tangguh dan mandiri, yang mampu beroperasi tanpa ketergantungan pada infrastruktur telekomunikasi konvensional dengan mengintegrasikan teknologi LoRa, GPS, dan BLE.
2. Mengimplementasikan protokol komunikasi berbasis LoRa beserta format pesan kustom yang telah ditetapkan untuk memastikan pengiriman data darurat berupa jenis bencana, tingkat kerusakan, dan koordinat GPS dapat sampai ke pusat komando dengan andal berdasarkan kinerja perangkat.

3. Melakukan evaluasi performa sistem secara komprehensif melalui serangkaian pengujian yang mengukur keandalan komunikasi melalui PDR, latensi, akurasi sistem melalui presisi geolokasi GPS, sensitivitas deteksi gerakan, ketahanan sistem melalui uji coba dalam berbagai skenario lingkungan seperti area padat penduduk dan topografi kompleks melalui simulasi, serta *usability* dengan melibatkan pengguna potensial.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi secara praktis, teknologis, dan akademis. Adapun manfaat dari penelitian ini secara praktis yaitu:

1. Bagi masyarakat dan Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD), sistem ini menyediakan solusi komunikasi alternatif yang operasional selama *golden period* yaitu 72 jam pascabencana ketika infrastruktur komunikasi konvensional mengalami gangguan.
2. Membantu memperpendek waktu respons tim penyelamat melalui transmisi informasi darurat yang cepat dan akurat termasuk data koordinat GPS korban dan tingkat keparahan situasi.
3. Memberikan alternatif komunikasi yang efektif dari segi biaya, mudah digunakan, dan mudah diimplementasikan di daerah rawan bencana alam dengan infrastruktur yang terbatas.

Adapun manfaat dalam hal akademis dari penelitian ini di antaranya:

1. Memberikan kontribusi pada pengembangan teori jaringan komunikasi darurat dengan memadukan konsep LPWAN menggunakan LoRa, *location-based service* menggunakan GPS, dan *personal area network* menggunakan BLE dalam satu arsitektur terpadu.
2. Mengembangkan model protokol komunikasi khusus untuk skenario bencana yang memperhitungkan aspek keterbatasan *bandwidth*, konsumsi daya, dan kondisi *channel* yang tidak ideal.
3. Menyediakan *baseline* data empiris mengenai performa sistem LoRa untuk aplikasi komunikasi darurat dalam konteks bencana alam di Indonesia.

Adapun manfaat secara teknologis dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Menghasilkan purwarupa sistem komunikasi darurat dengan fitur unggulan deteksi gerakan otomatis dan komunikasi multi-antarmuka yang dapat dikembangkan lebih lanjut untuk aplikasi *smart city* dan *public safety*.
2. Mengembangkan algoritma penyaringan paket yang dapat diadopsi untuk aplikasi *mesh network* lainnya.
3. Menyediakan platform terbuka untuk pengembangan lebih lanjut seperti integrasi sensor tambahan seperti kualitas udara dan suhu, protokol keamanan yang ditingkatkan, atau optimasi pemanenan energi.

1.5 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Agar penelitian ini tetap fokus dan terukur, maka perlu ditetapkannya batasan-batasan sebagai berikut:

1. Sistem dirancang untuk memberikan informasi bencana alam yang sudah terjadi seperti gempa bumi, tanah longsor, banjir, dan kebakaran lahan/hutan dengan opsi empat tingkat dampak yang ditimbulkan.
2. Format pesan yang telah ditetapkan berupa: *help*, *acknowledgment*, *alarm*, *cancel help*, *location request*, *location response*, *heartbeat*, dan *missing beacon*.
3. Setiap daerah memiliki jalur komunikasi yang independen dengan *beacon network* masing-masing area. Tidak ada pembagian *beacon* antar daerah.
4. Deteksi gerakan otomatis terbatas pada deteksi perubahan koordinat GPS secara signifikan dalam interval waktu tertentu.
5. Komunikasi jarak jauh menggunakan modul LoRa LLCC68 E220-900T-22D pada frekuensi 906,125 MHz (*channel* 56) dengan parameter *address* 0x1234 dan *key* yang dikonfigurasi bernilai 0. *Baud rate* ditetapkan sebesar 9600 bps pada kedua sisi, baik pada mikrokontroler ESP32 maupun modul LoRa dan mode transmisi diatur pada mode normal.
6. Parameter *power* pada LoRa dikonfigurasi pada 22 dB dengan parameter *packet RSSI* yang dinonaktifkan. Parameter *parity* yang digunakan adalah 8N1 yang berarti 8-bit data, tidak ada paritas bit, dan 1-bit *stop*.
7. Parameter *air rate* yang digunakan pada nilai 2,4 Kbps. Parameter *packet size* yang digunakan pada nilai 32 Byte. Parameter *WoR cycle* yang digunakan pada nilai 500 ms.

8. Komunikasi jarak dekat menggunakan *Bluetooth* 4.0 BLE yang terdapat pada ESP32 dan *Bluetooth* pada *smartphone*.
9. Modul GPS yang digunakan adalah u-blox NEO-M8L dengan kemampuan deteksi gerakan.
10. Implementasi perangkat dilakukan dalam skala yang terbatas, yaitu perangkat terdiri dari 1 *field device*, 1 *beacon network*, dan 1 *headquarter device*. Ketiga perangkat tersebut memiliki fleksibilitas untuk dikonfigurasi ulang menjadi berbagai tipe perangkat dalam konteks pengujian. Sebagai contoh, konfigurasi dapat terdiri dari 2 *beacon network* dan 1 *headquarter device* atau terdiri dari 2 *field device* dan 1 *beacon network*. Konfigurasi dapat disesuaikan dengan kebutuhan selama pengujian.
11. Evaluasi performa LoRa dilakukan pada jarak maksimal 2 km antar perangkat. *Field device* dibatasi untuk menerima ACK dalam jangka waktu 60 detik. Untuk otomatis *restart* dan *cancel help* dibatasi dengan jangka waktu 5 menit di mana kedua-duanya terhitung ketika ACK berhasil atau tidak berhasil diterima.
12. Interval *heartbeat* pada *field device* dan *beacon network* memiliki jangka waktu 30 menit dengan toleransi 5 menit.
13. Aspek *security* terbatas pada *identifier-based authentication* tanpa adanya implementasi enkripsi *end-to-end*.
14. Analisis ketahanan perangkat keras terhadap kondisi ekstrem seperti tahan air (*waterproof*) dan tahan guncangan (*shockproof*) tidak termasuk dalam *scope* penelitian.
15. Studi regulasi frekuensi dan aspek legalitas operasi perangkat tidak dibahas mendalam.