

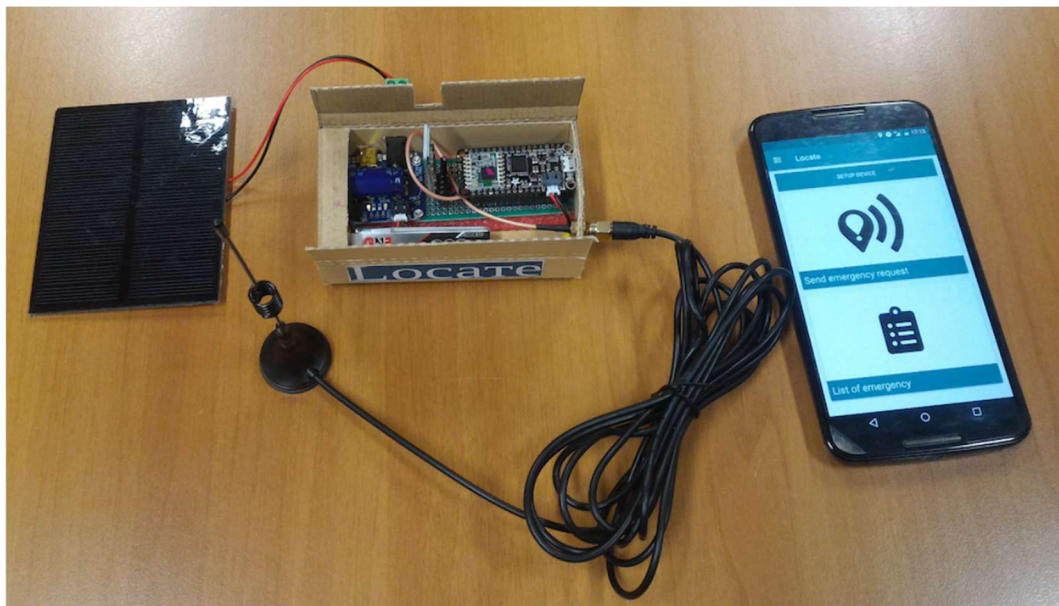
BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Keberhasilan penanganan bencana sangat dipengaruhi oleh keberadaan infrastruktur komunikasi yang dapat diandalkan. Sistem komunikasi berperan sebagai fondasi utama koordinasi antar tim penyelamat sekaligus jalur penting dalam menyebarkan informasi peringatan dini kepada masyarakat terdampak. Berbagai studi kasus menunjukkan bahwa kegagalan komunikasi, meskipun kecil, dapat menimbulkan konsekuensi serius. Misalnya, dalam insiden serangan di Manchester Arena, keterlambatan komunikasi antar lembaga menyebabkan tim pemadam kebakaran baru dapat merespons setelah dua jam [1]. Sayangnya, jaringan komunikasi umumnya rentan mengalami kerusakan fisik. Penelitian terdahulu mengungkapkan bahwa jika faktor ketahanan infrastruktur diabaikan, maka kerusakan pada saluran kabel bawah tanah dapat menimbulkan kesalahan signifikan dalam estimasi cakupan pemadaman jaringan seperti yang terjadi pada gempa Kumamoto, dimana jumlah gedung terdampak bervariasi antara 3 hingga 22 unit [2]. Kondisi ini menegaskan perlunya alternatif komunikasi yang tangguh dan independen agar sistem peringatan dini tetap dapat berfungsi meskipun infrastruktur utama terganggu.

Salah satu teknologi yang menawarkan solusi potensial adalah *Long Range (LoRa)*. *LoRa* mendukung komunikasi nirkabel berdaya rendah dengan jangkauan yang luas. Uji coba di area perkotaan padat membuktikan bahwa komunikasi *Ground-to-Ground (GtG)* antar perangkat *LoRa* mampu menjangkau hingga 500 meter, yakni sepuluh kali lebih jauh dibanding teknologi *Device-to-Device (D2D)* lain seperti *Wi-Fi Direct* [3]. Dengan demikian, *LoRa* sangat sesuai digunakan dalam situasi darurat ketika jaringan seluler terganggu dan relatif mahal. Lebih lanjut, mekanisme *Chirp Spread Spectrum (CSS)* yang menjadi dasar modulasi *LoRa* terbukti tahan terhadap efek *multipath* dan interferensi, kondisi yang umum terjadi di kawasan perkotaan. Hasil penelitian menegaskan bahwa *LoRa* hanya sensitif pada sinyal utama dan performanya tidak banyak terpengaruh oleh pantulan sinyal [4]. Gambar 1.1 menunjukkan contoh implementasi penelitian *LoRa*.



Gambar 1.1 Prototipe Perangkat Komunikasi Darurat “LOCATE” [3]

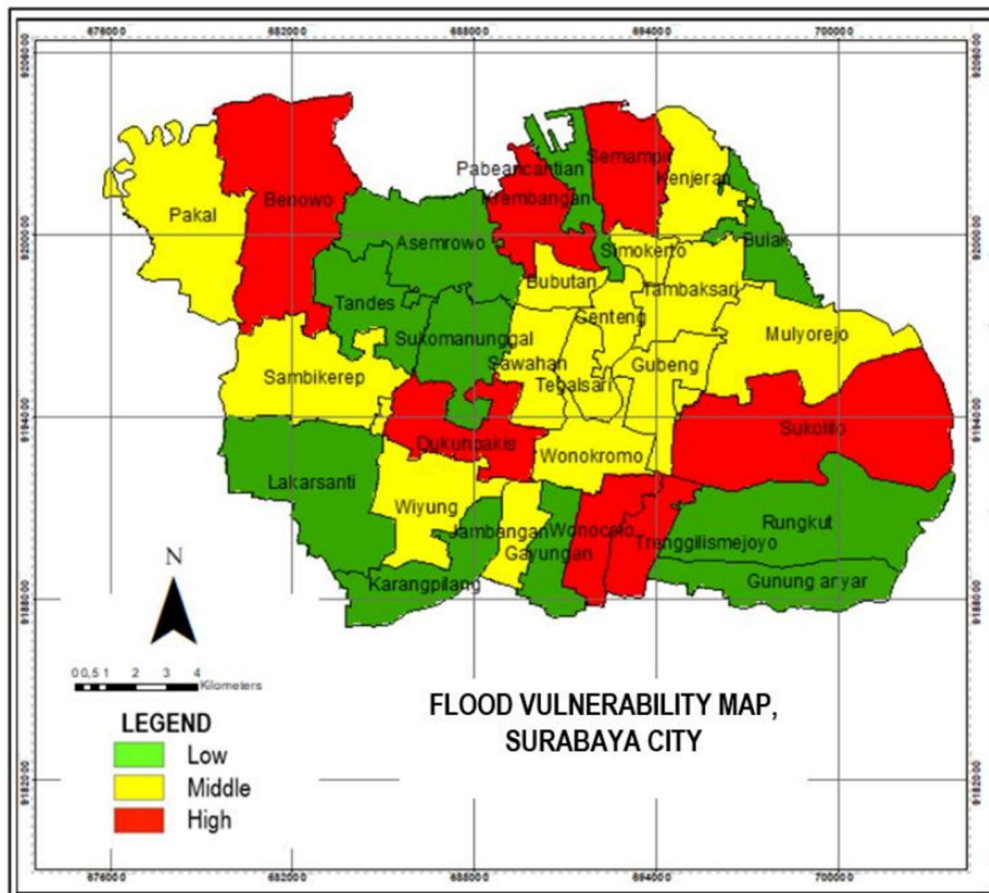
Walaupun unggul dalam hal jangkauan, penerapan *LoRa* tidak lepas dari masalah *intermittent connectivity* (koneksi yang terputus) akibat mobilitas *node*, hambatan fisik, maupun rendahnya kepadatan jaringan. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diperkenalkan arsitektur *Delay Tolerant Network (DTN)* yang memang dirancang untuk jaringan dengan latensi tinggi dan konektivitas tidak stabil [5]. Prinsip utama *DTN* adalah *Store-Carry-Forward*, yaitu *node* menyimpan pesan, membawanya selama bergerak, lalu meneruskannya ketika bertemu *node* lain [5]. Pendekatan ini terbukti meningkatkan peluang pesan terkirim. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa sistem berbasis *LoRa-DTN* dapat mencapai median tingkat keberhasilan pengiriman sekitar 80%, jauh lebih baik dibandingkan pendekatan mesh non-*DTN* [6].

Kombinasi antara jangkauan *LoRa* dan mekanisme *DTN* menghasilkan sistem komunikasi yang lebih andal. Penelitian yang mengevaluasi *LoRa-DTN* menunjukkan kemampuan dalam mengatasi latensi transmisi melalui strategi toleran penundaan [7]. Temuan pentingnya adalah bahwa pendekatan non-*DTN* pada skenario dasar mencatat tingkat kegagalan lebih dari 85%, sementara sistem yang dioptimalkan dengan *DTN* mampu mencapai tingkat keberhasilan hingga

100% [7]. Fakta ini memperkuat implementasi *LoRa-DTN* sebagai alternatif yang layak untuk membangun jaringan komunikasi darurat yang efisien, andal, serta dapat dikembangkan lebih luas.

Kota Surabaya sebagai ibu kota Provinsi Jawa Timur termasuk wilayah dengan kerentanan tinggi terhadap bencana hidrometeorologi. Berdasarkan pemetaan risiko suatu analisis penelitian tahun 2021, sekitar 77,4% kecamatan berada pada tingkat risiko sedang dan 6,5% berada pada tingkat risiko tinggi akibat kombinasi ancaman banjir, kekeringan, serta angin kencang [8]. Kondisi tersebut menekankan pentingnya sistem mitigasi yang efektif, dimana keandalan sistem peringatan dini menjadi salah satu komponen utama.

Di antara berbagai ancaman tersebut, banjir menjadi bencana yang paling dominan dan berdampak luas di Surabaya. Studi terkait tingkat kerentanan banjir di kota ini mengungkapkan bahwa ketinggian genangan air tercatat dapat mencapai 10 hingga 70 cm dengan durasi hingga 6 jam [9]. Analisis juga menunjukkan bahwa wilayah dengan kerentanan banjir yang tinggi mencakup wilayah seluas 96,13 km² dimana beberapa wilayah kecamatan dengan kategori risiko tinggi mencakup Benowo, Krembangan, Semampir, Dukuhpakis, Sukolilo, Wonocolo, dan Tenggilismejoyo [9]. Data ini memperkuat fakta bahwa banjir adalah ancaman potensial dimana sering terjadi lonjakan lalu lintas kendaraan dan jaringan, sehingga diperlukan sistem komunikasi *monitoring* data banjir sebagai langkah mitigasi. Gambar 1.2 menunjukkan pemetaan risiko banjir di Surabaya.



Gambar 1.2 Peta Tingkat Kerentanan Banjir di Kota Surabaya [9]

Selain faktor risiko bencana, kondisi geografis dan iklim tropis Surabaya juga menghadirkan tantangan teknis. Tingkat kelembapan dan temperatur udara yang tinggi dapat memengaruhi rambatan sinyal radio, yang mungkin berdampak menurunkan performa jangkauan dan keandalan *LoRa*. Penelitian terkait menunjukkan bahwa kelembapan yang tinggi dan suhu yang rendah dapat memperlemah kekuatan sinyal radio [10], juga dengan mahalnya infrastruktur komunikasi *IoT* berbasis seluler, 4G atau *WiFi* dibanding dengan solusi *LPWAN* [11]. Walaupun berbagai kajian teoretis maupun simulasi telah menunjukkan potensi besar dari jaringan *LoRa-DTN*, masih terdapat celah penelitian dalam hal implementasi dan evaluasi prototipe nyata di wilayah perkotaan tropis seperti Surabaya. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk merancang dan mengimplementasikan *Prototype* Sistem Komunikasi *Monitoring* Data Banjir

Berbasis *Delay Tolerant Network* dengan *Long Range* di Kota Surabaya guna menguji keandalannya dalam kondisi nyata yang spesifik bagi tantangan yang dihadapi kota Surabaya.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan *prototype* sistem komunikasi *monitoring* data banjir yang mengintegrasikan teknologi *Delay Tolerant Network (DTN)* dan *Long Range (LoRa)*?
2. Bagaimana performa *prototype* sistem komunikasi berbasis *Delay Tolerant Network (DTN)* dan *Long Range (LoRa)* pada skenario *monitoring* data banjir di perkotaan Surabaya?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dipaparkan, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan *prototype* sistem komunikasi *monitoring* data banjir yang mengintegrasikan teknologi *Long Range (LoRa)* dan *Delay Tolerant Network (DTN)*.
2. Mengevaluasi performa *prototype* sistem komunikasi berbasis *Long Range (LoRa)* dan *Delay Tolerant Network (DTN)* pada skenario *monitoring* data banjir di perkotaan Surabaya.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian yang dilakukan mempunyai manfaat untuk masyarakat, baik secara teoritis dan praktis sebagai berikut:

1. Manfaat Teoretis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang jaringan komputer, yang menyajikan model arsitektur integrasi teknologi *LoRa* dan prinsip *DTN*

yang dirancang khusus untuk sistem komunikasi *monitoring* data banjir di lingkungan perkotaan. Penelitian ini juga menyajikan analisis kinerja kuantitatif mengenai *Packet Delivery Ratio* dan *latency* dari jaringan *LoRa-DTN*, yang dapat digunakan sebagai referensi akademis dan landasan bagi penelitian sejenis di masa mendatang.

2. Manfaat Praktis

a) Bagi Peneliti

Penelitian ini dapat menambah wawasan dan pengalaman peneliti dalam merancang, mengimplementasikan, dan menganalisis prototipe jaringan berbasis *LoRa* dan *DTN* untuk sistem komunikasi *monitoring* data banjir. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi pijakan untuk pengembangan penelitian lanjutan terkait efisiensi energi, optimasi protokol *routing*, atau integrasi sistem.

b) Bagi Praktisi/Pemerintah

Menyediakan bukti konsep (*proof-of-concept*) dan data kinerja sebuah sistem komunikasi *monitoring* data banjir yang berbiaya rendah dan tidak bergantung pada infrastruktur utama. Data mengenai keandalan dan kecepatan pengiriman pesan dapat menjadi dasar pertimbangan bagi lembaga terkait untuk mengadopsi teknologi serupa guna meningkatkan ketangguhan sistem komunikasi untuk peringatan dini di Kota Surabaya.

c) Bagi Masyarakat/Komunitas

Secara jangka panjang, implementasi sistem yang terbukti andal dari penelitian ini dapat membantu lembaga terkait (seperti BPBD) menerima data *monitoring* banjir dari zona bencana secara andal, bahkan saat infrastruktur utama terganggu. Hal ini memungkinkan lembaga tersebut untuk mengeluarkan peringatan dini kepada masyarakat secara lebih efektif, sehingga memberikan waktu yang lebih cukup untuk melakukan pengaturan maupun evakuasi dengan lebih awal dan mengurangi risiko kerugian.

1.5. Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus dan dapat diselesaikan sesuai ruang lingkup yang telah ditetapkan, maka batasan masalah ditentukan sebagai berikut:

1. Cakupan Sistem
 - a) Penelitian hanya membahas prototipe sistem komunikasi berbasis *Long Range (LoRa)* yang diintegrasikan dengan *Delay Tolerant Network (DTN)* menggunakan mekanisme *Store-Carry-Forward*.
 - b) Prototipe difokuskan pada skenario sistem komunikasi *monitoring* data banjir di Kota Surabaya, tanpa mencakup pembuatan ataupun integrasi penuh dengan sistem peringatan banjir.
2. Lingkungan Uji
 - a) Eksperimen difokuskan pada area perkotaan Surabaya yang padat, yang merepresentasikan tantangan propagasi sinyal non-line-of-sight (NLoS), kelembapan tinggi, dan potensi interferensi sinyal [9], [10].
 - b) Skenario pengujian dibagi menjadi dua lokasi fisik yang berbeda sesuai tujuan pengujian:
 - 1) Skenario 1 (Optimasi *LoRa*) menggunakan rute jarak jauh 4,75 km dengan *relay* bergerak (*mobile relay*) untuk mensimulasikan pengiriman data dari Halte Taman Makam Pahlawan ke Posko BPBD Terpadu (PMI) melalui titik transit Halte Marmoyo.
 - 2) Skenario 2 (Uji Performa *DTN*) menggunakan rute jarak pendek 430 meter dengan *relay* tetap (*fixed relay*) di area Kedai Mocha, MAU Corner Coffee, FEB 2 UPNVJT, dan Fasilkom 1 UPNVJT.
 - c) Simulasi skenario bencana dilakukan dalam bentuk uji lapangan terbatas, bukan dalam kondisi bencana sebenarnya.
3. Perangkat dan Infrastruktur
 - a) Penelitian menggunakan 4 unit perangkat TTGO LoRa32 (ESP32 + SX1276) dengan peran masing-masing. Peran spesifik setiap *node* didefinisikan secara terpisah dalam bab selanjutnya.
 - b) Antena yang digunakan adalah antena standar 915 MHz dengan *gain* 3 dBi tanpa tambahan maupun modifikasi.

- c) Energi *node* bersumber dari baterai maupun langsung terhubung dengan laptop tergantung kebutuhan pengujian, sehingga tidak dibahas aspek manajemen energi jangka panjang.
4. Protokol dan Perangkat Lunak
- a) Stack *DTN* yang digunakan adalah dtn7zero (implementasi BPv7) berbasis MicroPython, dirancang khusus untuk diterapkan di *microcontroller*.
 - b) Fokus penelitian adalah pengiriman pesan berbasis *bundle*, sehingga tidak membahas optimasi *routing* tingkat lanjut, *data encryption*, maupun keamanan jaringan.
5. Pengujian dan Evaluasi Kinerja
- a) Pengujian untuk menjawab rumusan masalah kedua dibagi menjadi dua skenario yaitu Skenario 1 untuk optimasi parameter *LoRa* dan Skenario 2 untuk uji performa *DTN*.
 - b) Skenario 1 bertujuan untuk menemukan parameter teknis *LoRa* yang optimal berdasarkan justifikasi akademis untuk menguji pengaruh variasi parameter teknis terhadap performa komunikasi *LoRa*.
 - c) Parameter uji Skenario 1 menggunakan variasi parameter teknis *LoRa*, yaitu *Spreading Factor* 7, 9, dan 11 serta *Coding Rate* 4/5 dan 4/7.
 - d) Skenario 2 bertujuan untuk menguji performa *DTN* dengan parameter *LoRa* yang diamati dari Skenario 1.
 - e) Parameter uji Skenario 2 menggunakan variasi beban kerja, yaitu jumlah *bundle* 20, 30, dan 40 serta interval pembuatan *bundle* pada durasi 1 menit.
 - f) Metriks performa *DTN* yang diukur adalah *Packet Delivery Ratio (PDR)* dan *End-to-End Delay*.

1.6. Asumsi Penelitian

Dalam penelitian ini, adapun beberapa asumsi yang digunakan adalah yang tercantum sebagai berikut:

1. Kondisi Lingkungan

- a) Kondisi lingkungan pengujian (kelembapan, suhu, dan kepadatan bangunan di Surabaya) dianggap mewakili situasi nyata yang berpotensi terjadi pada saat bencana banjir.
 - b) Pola pergerakan dan penempatan *node fixed* dan *mobile* dalam kedua skenario pengujian dianggap dapat merepresentasikan pola pengumpulan dan penyampaian data (*data relay*) di kondisi lapangan.
2. Perangkat Keras dan Perangkat Lunak
- a) Perangkat TTGO LoRa32 dengan chip SX1276 diasumsikan berfungsi dengan baik selama eksperimen, tanpa ada kerusakan perangkat keras.
 - b) Stack dtn7zero yang digunakan di atas MicroPython diasumsikan berjalan stabil dan sesuai implementasi standar *BPv7*.
3. Konektivitas dan Protokol
- a) Mekanisme *Store-Carry-Forward* pada *DTN* diasumsikan berjalan sesuai spesifikasi sehingga pesan yang disimpan akan selalu dikirim ulang ketika *node* bertemu.
 - b) Tidak ada gangguan besar dari faktor eksternal (misalnya gangguan elektromagnetik parah) selain gangguan umum di lingkungan perkotaan.
4. Pengukuran dan Evaluasi
- a) Alat pencatatan sistem dianggap akurat dalam merekam waktu pengiriman dan penerimaan pesan, sehingga hasil perhitungan *Packet Delivery Ratio* dan *latency* dapat dijadikan acuan.
 - b) Variasi parameter *LoRa* (*Spreading Factor* dan *Coding Rate*) dianggap mewakili kondisi perkotaan tropis Surabaya.
5. Lingkup Penelitian
- a) Prototipe ini diasumsikan digunakan hanya untuk komunikasi peringatan dini, bukan untuk komunikasi multimedia atau transfer data berskala besar.
 - b) Implementasi dianggap sebagai *proof-of-concept* prototipe, sehingga aspek keamanan, enkripsi, dan skalabilitas jaringan belum diperhitungkan dalam penelitian ini.