



PRA-SKRIPSI

**Rancang Bangun Sistem Komunikasi
Alternatif Pada Lingkungan Off-Grid Berbasis
Multi-Hop dengan LoRa**

IQBAL AL-AYYUBI
NPM 22081010217

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Eng. Agussalim, MT.
Achmad Junaidi, S.Kom., M.Kom

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAWA TIMUR
FAKULTAS ILMU KOMPUTER
PROGRAM STUDI INFORMATIKA
SURABAYA
2025

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	2
DAFTAR GAMBAR.....	3
DAFTAR TABEL.....	5
BAB I	
PENDAHULUAN.....	6
1.1. Latar Belakang.....	6
1.2. Rumusan Masalah.....	9
1.3. Tujuan Penelitian.....	9
1.4. Manfaat Penelitian.....	9
1.5. Batasan Masalah.....	10
BAB II	
TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1. Teknologi Komunikasi Nirkabel.....	11
2.2. LoRa.....	12
2.3. Mikrokontroler ESP32.....	14
2.4. LILYGO TTGO LoRa32.....	16
2.5. Arsitektur Jaringan.....	17
2.5.1. Peer-to-Peer.....	17
2.5.2. Multi-hop.....	18
2.6. Meshtastic.....	19
2.7. Aplikasi Mobile.....	19
2.8. Penelitian Terdahulu.....	20
BAB III	
DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM.....	23
3.1. Jenis Penelitian.....	23
3.2. Waktu dan Tempat Penelitian.....	23
3.3. Subjek Penelitian.....	23
3.4. Strategi Penelitian.....	24
3.5. Tahapan Penelitian.....	24
3.5.1. Identifikasi Masalah.....	25
3.5.2. Pengumpulan Informasi.....	25
3.5.3. Perancangan.....	26
3.5.4. Implementasi.....	27
3.5.5. Kalibrasi.....	27
DAFTAR PUSTAKA.....	29

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 LoRa SX1276.....	13
Gambar 2.2 ESP32.....	14
Gambar 2.3 LILYGO LoRa32.....	16
Gambar 2.4 Peer-to-Peer LoRa.....	17
Gambar 2.5 Multi-hop LoRa.....	17
Gambar 3.1 Flowchart Rancangan Penelitian.....	23
Gambar 3.2 Desain Arsitektur Sistem.....	25
Gambar 3.3 Alur Konfigurasi Meshtastic.....	26

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Teknologi Komunikasi Nirkabel	10
Tabel 2.2 LoRa Spreading Factors	12

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada era digital saat ini, komunikasi menjadi salah satu kebutuhan mendasar manusia dalam kehidupan sehari-hari. Transformasi teknologi komunikasi telah mengubah pola interaksi masyarakat, mulai dari cara mereka berkomunikasi, mengakses informasi, dan berpartisipasi dalam ruang publik [1]. Perubahan ini didorong dengan adanya jaringan internet yang mampu menghubungkan individu dari berbagai belahan dunia, sehingga proses pertukaran informasi dapat berlangsung secara cepat dan efisien. Keberadaan jaringan internet dan telekomunikasi modern memungkinkan masyarakat untuk mengirim pesan, melakukan panggilan suara maupun video, serta berbagi data kapanpun dan dimanapun selama tersedia koneksi internet.

Meskipun demikian, infrastruktur utama seperti listrik dan jaringan komunikasi konvensional tidak selalu dapat diandalkan pada suatu wilayah, kondisi ini dikenal dengan *off grid*. Data APJII 2025 menunjukkan bahwa meskipun mayoritas penduduk telah terhubung ke internet, sekitar 19,34% populasi –lebih dari 55 juta jiwa– masih belum menikmati akses digital. Pada kondisi tertentu, jaringan seluler maupun internet dapat mengalami gangguan atau bahkan tidak tersedia sama sekali. Hal ini biasanya terjadi pada saat bencana alam seperti gempa bumi, tsunami, dan tanah longsor yang berpotensi merusak infrastruktur menara seluler maupun jaringan kabel. Selain faktor bencana, banyak wilayah di Indonesia yang secara geografis tergolong terpencil, seperti kawasan hutan, perkebunan, pegunungan, dan perairan laut, yang sebagian besar belum terjangkau jaringan komunikasi modern. Kondisi geografis yang kompleks serta keterbatasan infrastruktur ini menyebabkan akses komunikasi di daerah tersebut menjadi terhambat. Penelitian Herman et al dengan judul “Kesenjangan Akses Internet Dan Dampaknya Terhadap Kualitas Pendidikan Di Desa Tampelas Kecamatan Kamipang Kabupaten Katingan” [2] mengungkapkan bahwa terbatasnya akses internet di wilayah tersebut dipengaruhi oleh sejumlah faktor

seperti, minimnya infrastruktur digital, sulitnya akses transportasi, lokasi yang jauh dari jangkauan sinyal, kondisi sosial ekonomi yang rendah, serta keterbatasan kemampuan masyarakat dalam mengadopsi teknologi informasi.

Situasi tersebut menuntut adanya solusi alternatif yang dapat menyediakan layanan komunikasi secara mandiri tanpa bergantung pada infrastruktur jaringan internet. Salah satu pendekatan yang relevan adalah dengan membangun jaringan komunikasi lokal antar perangkat. Teknologi seperti Wi-Fi dan Bluetooth memang umum digunakan untuk komunikasi lokal, namun keduanya memiliki keterbatasan dalam hal jangkauan dan konsumsi daya. Wi-Fi membutuhkan infrastruktur seperti router dan memiliki konsumsi daya tinggi, sementara Bluetooth cocok untuk jarak pendek dan perangkat personal. Berbeda dari keduanya, LoRa (Long Range) merupakan teknologi komunikasi nirkabel dengan konsumsi daya yang rendah, penetrasi sinyal yang kuat dalam ruangan, serta cakupan area yang luas [3]. LoRa beroperasi pada pita frekuensi bebas lisensi seperti 433 MHz, 868 MHz, dan 915 MHz bergantung pada wilayah penggunaannya [4]. Sebagai teknologi nirkabel, LoRa mampu mengirim data hingga beberapa km dengan daya dan data rate yang rendah [5]. Karakteristik ini menjadikan LoRa banyak digunakan dalam berbagai implementasi Internet of Things (IoT) yang membutuhkan komunikasi jarak jauh dengan efisiensi energi tinggi.

Teknologi komunikasi pada LoRa memungkinkan pengguna untuk bertukar data secara langsung tanpa kendali terpusat atau dikenal dengan Peer-To-Peer (P2P). Dalam skema P2P, setiap perangkat dalam jaringan dapat mengirim dan menerima data secara langsung yang menciptakan komunikasi dua arah antar pengguna [6]. Namun, penerapan komunikasi LoRa secara P2P memiliki keterbatasan. Jangkauan komunikasi yang dihasilkan seringkali tidak optimal apabila terdapat node yang terlalu jauh. Untuk mengatasi hal tersebut, konsep komunikasi multi-hop dapat dijadikan sebagai sebuah solusi yang andal. Multi-hop memungkinkan pengiriman data dari satu node ke node tujuan melalui satu atau beberapa node perantara yang membuat jangkauannya lebih luas, serta meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang daya hidup baterai [7]. Dengan demikian, distribusi data tidak terbatas pada jangkauan satu perangkat, tetapi dapat diperluas secara bertingkat melalui perangkat lain yang saling terhubung.

Konsep ini berpotensi meningkatkan ketersediaan jangkauan komunikasi yang lebih luas di suatu wilayah khususnya wilayah tanpa infrastruktur jaringan modern.

Untuk mendukung implementasi komunikasi berbasis LoRa, diperlukan perangkat pengendali berupa mikrokontroler. Salah satunya yaitu ESP32, mikrokontroler ini memiliki konsumsi daya rendah, level integrasi yang tinggi, serta mendukung konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth untuk koneksi yang luas [8]. Agar integrasi modul LoRa dengan mikrokontroler lebih praktis, perangkat seperti LILYGO TTGO LoRa32 banyak digunakan. Perangkat ini sudah menggabungkan modul LoRa dengan ESP32, Wi-Fi, Bluetooth, dan layar OLED, sehingga memudahkan proses pengembangan sekaligus mengurangi kompleksitas perakitan. Keseluruhan perangkat keras yang telah terintegrasi akan dihubungkan melalui aplikasi mobile yang berfungsi sebagai antarmuka pengguna. Melalui aplikasi ini, pengguna dapat mengirim dan menerima pesan antar perangkat, meskipun tidak memiliki akses ke jaringan internet. Mekanisme komunikasi tersebut bekerja serupa dengan aplikasi pesan instan pada umumnya, sehingga pengguna tetap memperoleh pengalaman komunikasi yang familiar.

Menurut Höchst et al dalam penelitiannya yang berjudul “LoRa-based Device-to-Device Smartphone Communication for Crisis Scenarios” [9], menunjukkan bahwa LoRa dapat dimanfaatkan sebagai media komunikasi dalam kondisi darurat. Studi ini menjadi salah satu rujukan penting dalam pengembangan sistem yang diusulkan pada penelitian ini. Meskipun demikian, penerapannya sebagai media komunikasi pesan antar pengguna masih tergolong sedikit, terutama dalam konteks komunikasi multi-hop yang terintegrasi dengan aplikasi mobile. Sebagian besar studi sebelumnya lebih berfokus pada pengiriman data sensor atau monitoring lingkungan. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Blöchinger dan von Seck dengan judul “*Survey of Mesh Networking Messengers*” [10], membahas aplikasi komunikasi lokal seperti Bridgefy dan Briar yang umumnya memanfaatkan Bluetooth atau Wi-Fi mesh dimana masih memiliki keterbatasan jangkauan dan ketahanan daya. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan pendekatan baru dengan merancang sistem komunikasi pesan berbasis LoRa multi-hop yang dapat diakses melalui aplikasi mobile, sebagai

solusi alternatif untuk wilayah tanpa jaringan internet. Pendekatan ini diharapkan dapat menjawab kebutuhan komunikasi di daerah terpencil maupun situasi darurat dengan efisiensi daya dan jangkauan yang lebih luas.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi permasalahan pada latar belakang, maka diuraikan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem komunikasi pesan berbasis LoRa yang dapat beroperasi pada lingkungan tanpa jaringan internet (*off-grid*) ?
2. Bagaimana hasil performa sistem komunikasi pesan multi-hop berbasis LoRa, ditinjau dari *Packet Delivery Ratio* (PDR), *latency*, dan jangkauan komunikasi pada kondisi uji indoor maupun outdoor ?

1.3. Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah yang telah ditetapkan, maka adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem komunikasi pesan berbasis LoRa yang mampu beroperasi pada lingkungan *off-grid* menggunakan perangkat TTGO LoRa32 dengan firmware Meshtastic.
2. Menganalisis pengaruh konfigurasi parameter LoRa pada firmware Meshtastic terhadap performa komunikasi multi-hop.
3. Mengevaluasi kinerja sistem komunikasi pesan multi-hop berbasis LoRa berdasarkan parameter *Packet Delivery Ratio* (PDR), *latency*, dan jangkauan komunikasi melalui pengujian pada kondisi *indoor* maupun *outdoor*.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang ingin dicapai yaitu sebagai berikut:

1. Menyediakan solusi komunikasi yang dapat digunakan di daerah terpencil atau dalam kondisi darurat ketika jaringan seluler tidak tersedia.
2. Memberikan referensi teknis bagi pengembang sistem IoT dan komunikasi lokal yang hemat daya dan mudah diimplementasikan.
3. Memberikan keandalan untuk pengiriman pesan dengan jangkauan yang lebih luas

1.5. Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan terorganisir, maka adapun batasan masalah yang diberikan adalah sebagai berikut:

1. Sistem komunikasi yang dirancang hanya mendukung pengiriman pesan teks antar pengguna.
2. Perangkat keras yang digunakan sudah terintegrasi dengan ESP32 dan modul LoRa (TTGO LoRa32).
3. Sistem komunikasi beroperasi dalam jaringan lokal dengan konsep multi-hop tanpa infrastruktur jaringan internet atau seluler.
4. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tiga modul TTGO LoRa32 untuk merepresentasikan skenario komunikasi multi-hop antar perangkat.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Teknologi Komunikasi Nirkabel

Teknologi komunikasi nirkabel merupakan pondasi utama dalam pengembangan sistem komunikasi modern. Komunikasi nirkabel memungkinkan pertukaran data antar perangkat tanpa kabel fisik, menggunakan sinyal elektromagnetik sebagai media transmisi [11]. Protokol nirkabel telah berkembang dengan pesat dan melahirkan beberapa teknologi seperti Wi-Fi, Bluetooth, dan Lora yang masing-masing memiliki karakteristik dan kegunaan yang berbeda. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan mobilitas, efisiensi, dan fleksibilitas dalam pertukaran informasi, teknologi nirkabel telah menjadi tulang punggung berbagai sistem komunikasi, mulai dari jaringan internet, perangkat IoT, hingga sistem komunikasi darurat. Tabel 1 menjelaskan karakteristik dari beberapa protokol nirkabel.

Tabel 2.1 Perbandingan Teknologi Komunikasi Nirkabel [12]

Parameter	Wi-Fi	Bluetooth	LoRa
Standar	IEEE 802.11 a/c/b/d/g/n	IEEE 802.15.1	LoRaWAN R1.0
Pita Frekuensi	5–60 GHz	2.4 GHz	868/900 MHz
Kecepatan Data	1 Mb/s–6.75 Gb/s	1–24 Mb/s	0.3–50 Kb/s
Jangkauan Transmisi	20–100 m	8–10 m	<30 Km
Konsumsi Energi	Tinggi	Bluetooth: Sedang BLE: Sangat Rendah	Sangat Rendah
Biaya	Tinggi	Rendah	Tinggi

Protokol nirkabel seperti Wi-Fi biasanya digunakan untuk koneksi internet dengan kecepatan tinggi, tetapi membutuhkan infrastruktur seperti router dan konsumsi daya yang tinggi. Bluetooth baik digunakan untuk pengiriman data jarak pendek antar perangkat, sedangkan LoRa dirancang untuk komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya rendah. Adapun pada penelitian sebelumnya membuat sistem pengawasan dan pengontrol pintar berbasis IoT dengan memanfaatkan LoRa dan Wi-Fi yang dapat dikontrol dengan aplikasi android [13]. Di antara protokol komunikasi nirkabel sebelumnya, LoRa memiliki keunggulan dalam hal jangkauan dan efisiensi energi, sehingga cocok digunakan sebagai alat komunikasi untuk wilayah tanpa infrastruktur internet.

2.2. LoRa

LoRa merupakan teknologi komunikasi nirkabel berbasis spread spectrum yang dikembangkan dari teknologi chirp spread spectrum (CSS) [14]. Sebagai inti teknologinya, modulasi CSS memungkinkan transmisi sinyal jarak jauh secara andal bahkan dalam *signal-to-noise* (SNR) yang rendah [3]. Pendekatan CSS ini bekerja dengan mengirimkan satu bit data melalui setiap chirp yang membutuhkan bandwidth lebih besar dibandingkan modulasi konvensional, tetapi dapat memberikan ketahanan terhadap interferensi, efek Doppler, dan multipath fading sekaligus mendukung koneksi yang lebih stabil dan efisien dalam berbagai kondisi lingkungan [15].

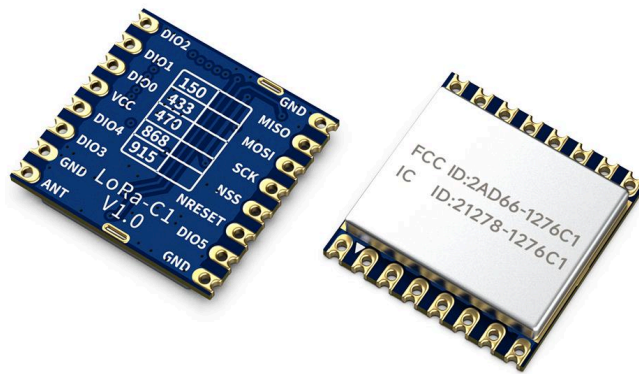
Secara teknis, LoRa memiliki fleksibilitas parameter yang memungkinkan penyesuaian terhadap kebutuhan aplikasi dan kondisi lingkungan, seperti penggunaan spreading factor (SF) antara SF7 hingga SF12 yang mempengaruhi jangkauan dan laju data, serta bandwidth tetap seperti 125 kHz atau 500 kHz yang menentukan sensitivitas dan kapasitas kanal [14]. Pemilihan SF juga berdampak pada durasi transmisi (*time on air*), di mana SF yang lebih tinggi memperpanjang waktu pengiriman, namun meningkatkan jangkauan dan sensitivitas. Selain itu, LoRa mendukung pengaturan coding rate sebagai mekanisme koreksi kesalahan, serta memiliki gain pemrosesan tinggi yang memungkinkan penerimaan sinyal dalam kondisi SNR negatif. Ortogonalitas antar SF memungkinkan banyak perangkat berkomunikasi secara bersamaan tanpa interferensi, sehingga mendukung efisiensi kanal dan

kapasitas jaringan yang tinggi.

Tabel 2.2 LoRa Spreading Factors [14]

Spreading Factor (For UL at 125 KHz)	Bit Rate	Range (Depends on Terrain)	Time on Air for an 11-byte payload
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

Modul LoRa telah mengalami perkembangan signifikan dengan berbagai varian yang disesuaikan untuk kebutuhan aplikasi dan frekuensi regional. Salah satu modul yang banyak digunakan adalah SX1276. Menurut Semtech dari datasheet nya, SX1276 merupakan modul transceiver yang mendukung rentang frekuensi 137 MHz hingga 1020 MHz dengan pilihan bandwidth 7.8 kHz hingga 500 kHz serta spreading factor antara SF6 hingga SF12. Modul ini mampu mencapai sensitivitas hingga -148 dBm dengan daya pancar maksimum +20 dBm, menghasilkan link budget sebesar 168 dB yang memungkinkan komunikasi jarak jauh tetap andal meskipun dalam kondisi sinyal lemah. Selain itu, SX1276 juga mendukung berbagai jenis modulasi (LoRa™, FSK, GFSK, MSK, GMSK, dan OOK), dilengkapi buffer paket hingga 256 byte dengan CRC, serta fitur channel activity detection (CAD) yang meningkatkan efisiensi penggunaan kanal. Konsumsi daya SX1276 relatif rendah, yaitu sekitar 10.3 mA pada mode penerimaan dan hanya 0.2 μ A pada mode sleep, sehingga sangat ideal untuk perangkat berbasis baterai seperti sistem komunikasi multi-hop berbasis LoRa.



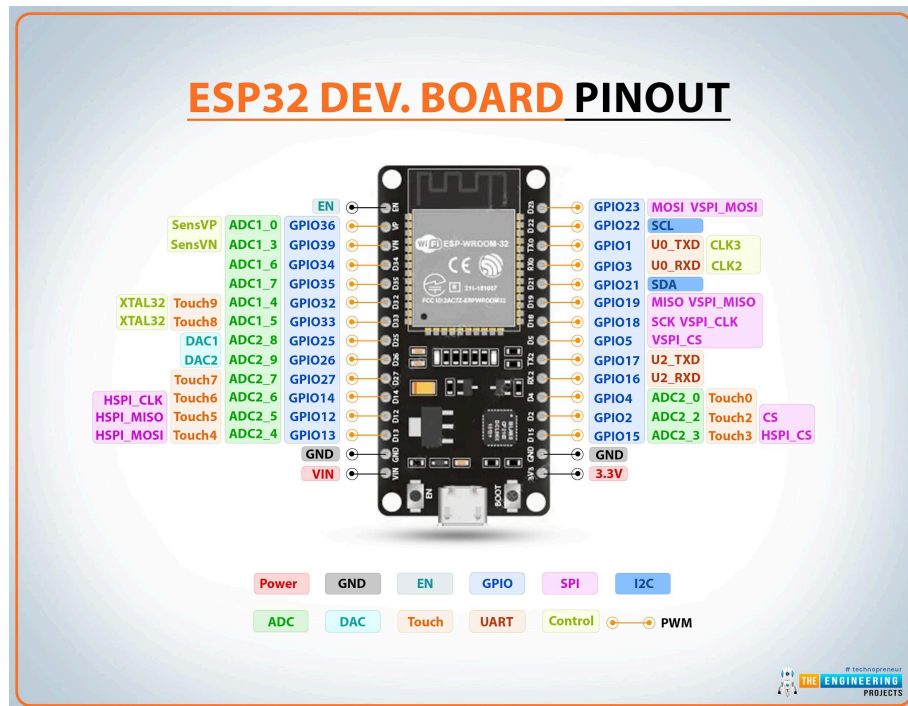
Gambar 2.1 LoRa SX1276

2.3. Mikrokontroler ESP32

ESP32 yang dikembangkan oleh Espressif Systems merupakan seri mikrokontroler berbiaya rendah dan hemat daya dengan dilengkapi Wi-Fi serta Bluetooth dalam satu sistem [16]. Mikrokontroler ini dikembangkan sebagai generasi lanjutan dari ESP8266 dengan peningkatan signifikan pada sisi performa dan konektivitas. ESP32 mampu mengendalikan berbagai sensor dan modul secara bersamaan berkat ketersediaan banyak pin input/output yang menjadikannya fleksibel untuk beragam aplikasi. Selain itu, integrasi Wi-Fi dan Bluetooth bawaan memudahkan pertukaran data secara nirkabel tanpa memerlukan modul tambahan.

Berdasarkan datasheet ESP32 oleh Espressif Systems, arsitektur ESP32 dirancang sebagai system-on-chip (SoC) yang mengintegrasikan prosesor, memori, modul komunikasi nirkabel, serta peripheral dalam satu chip. ESP32 menggunakan prosesor dual-core Xtensa® LX6 dengan kecepatan hingga 240 MHz, dilengkapi memori SRAM internal serta dukungan penyimpanan eksternal berbasis flash. Pada sisi komunikasi, ESP32 sudah terintegrasi dengan konektivitas Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n dan Bluetooth v4.2 (Classic dan BLE), yang memungkinkan pertukaran data nirkabel secara efisien. Selain itu, mikrokontroler ini memiliki berbagai antarmuka periferan seperti GPIO, SPI, I²C, I²S, UART, PWM, ADC, dan DAC, sehingga dapat mengendalikan sensor maupun aktuator secara langsung. ESP32 juga mendukung mekanisme manajemen daya dengan mode

light sleep dan deep sleep yang membuatnya hemat energi, sehingga ideal untuk perangkat berbasis baterai. Dengan rancangan arsitektur yang terintegrasi tersebut, ESP32 menjadi salah satu mikrokontroler yang fleksibel dan banyak digunakan dalam pengembangan aplikasi IoT maupun sistem komunikasi nirkabel.



Gambar 2.2 ESP32

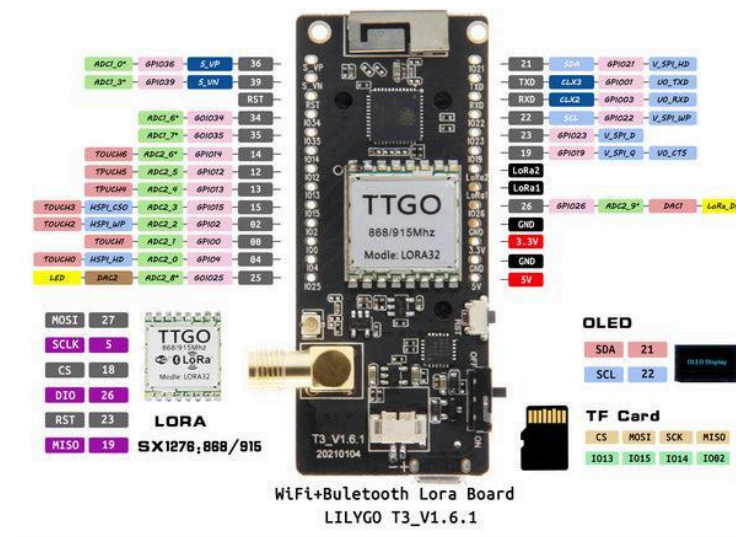
Sejumlah penelitian sebelumnya telah menunjukkan implementasi ESP32 dalam berbagai aplikasi IoT. Hercog et al [17] mengembangkan perangkat IoT berbasis ESP32 yang dapat digunakan dalam pendidikan teknik, di mana fleksibilitas antarmuka dan konektivitas nirkabel menjadi faktor utama keberhasilan implementasi. Penelitian lain oleh El-Khozondar et al [18] memanfaatkan ESP32 untuk sistem monitoring energi cerdas, yang menunjukkan keandalan ESP32 dalam mengolah data sensor dan mengirimkannya melalui konektivitas Wi-Fi dengan konsumsi daya rendah. Espinosa-Gavira et al. [19] juga melakukan evaluasi performa ESP32 dalam jaringan sensor, membuktikan bahwa arsitekturnya mampu mendukung komunikasi data secara efisien dalam skala besar. Berbagai studi tersebut menegaskan bahwa ESP32 bukan hanya hemat daya, tetapi juga tangguh dan

fleksibel dalam mendukung aplikasi IoT yang membutuhkan komunikasi nirkabel jarak jauh maupun integrasi dengan sensor dan aktuator. Penelitian Maie et al [20] membandingkan ESP32 dengan kompetitornya seperti ESP8266, CC3220, atau Xbee, dan mendapatkan bahwa ESP32 memberikan kombinasi keunggulan berupa prosesor dual-core berkecepatan tinggi, dukungan Wi-Fi dan Bluetooth sekaligus, serta jumlah GPIO dan peripheral yang lebih banyak, sehingga lebih adaptif untuk berbagai skenario IoT. Dengan karakteristik tersebut, ESP32 sangat relevan untuk digunakan dalam penelitian ini sebagai pengendali utama sistem komunikasi pesan berbasis LoRa multi-hop yang terhubung dengan aplikasi mobile.

2.4. LILYGO TTGO LoRa32

LILYGO TTGO LoRa32 merupakan sebuah papan pengembang terintegrasi berbasis ESP32. Dalam satu perangkat ini, modul telah dilengkapi dengan LoRa transceiver, layar OLED, Wi-Fi, Bluetooth, serta antarmuka yang lengkap. Sumber daya dari modul ini berasal dari port micro USB atau menggunakan baterai Li-Po, sehingga memberikan kemudahan, serta fleksibilitas.

Secara teknis, LILYGO TTGO LoRa32 merupakan modul yang dirancang untuk komunikasi jarak jauh secara nirkabel. Pertukaran data dilakukan menggunakan LoRa transceiver tipe SX1276/SX1278 melalui gelombang radio pada frekuensi 433/868/915 MHz. Pemantauan data dapat dilakukan secara langsung melalui layar OLED SSD1306 dengan ukuran 0.96 inci yang terintegrasi pada modul. Dari sisi konektivitas, TTGO LoRa32 menyediakan WiFi dan Bluetooth v4.2, sementara antarmuka input/output mencakup GPIO, I2C, SPI, UART, ADC, dan DAC. Papan ini juga mendukung pemasangan microSD sebagai media penyimpanan. Dari sisi suplai daya, terdapat port micro USB yang berfungsi dalam memprogram ESP32 dan juga menyuplai daya. Selain itu, terdapat konektor JST untuk baterai Li-Po sebagai sumber daya modul dan pengisiannya dapat melalui port micro USB.



Gambar 2.3 LILYGO LoRa32

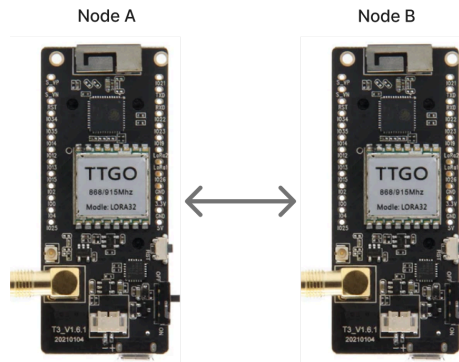
Beberapa penelitian terdahulu telah menggunakan TTGO LoRa32 sebagai alat komunikasi data. Penelitian oleh Azhar et al. [21] memanfaatkan TTGO LoRa32 SX1276 untuk sistem monitoring kesehatan, dengan hasil uji menunjukkan komunikasi dapat berlangsung stabil hingga jarak ± 1.300 meter di area luar ruangan. Implementasi pada bidang lain ditunjukkan oleh Chidolue dan Iqbal [22] dalam sistem monitoring pompa minyak tenaga surya, di mana TTGO LoRa32 berfungsi sebagai node pengirim dan penerima data secara real-time. Berdasarkan hasil studi-studi tersebut, TTGO LoRa32 terbukti relevan untuk digunakan dalam penelitian ini karena mampu mendukung perancangan sistem komunikasi pesan berbasis LoRa dengan jangkauan luas dan konsumsi daya yang efisien.

2.5. Arsitektur Jaringan

2.5.1. Peer-to-Peer

Peer-to-peer (P2P) adalah model komunikasi jaringan di mana setiap node dapat bertukar data secara langsung antar perangkat [23]. Jaringan komunikasi dapat terdistribusi tanpa ketergantungan pada server pusat. Pada komunikasi berbasis LoRa, P2P merujuk pada komunikasi langsung antar dua perangkat tanpa perantara gateway atau server. Setiap perangkat LoRa berfungsi sebagai transceiver, artinya dapat mengirim atau menerima data. Pengiriman data dipancarkan

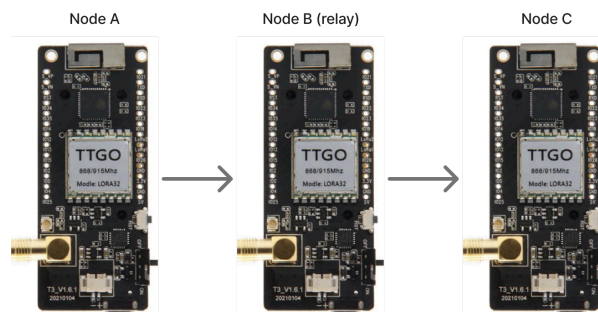
dalam bentuk gelombang radio pada frekuensi tertentu (433/868/915 MHz). Perangkat LoRa atau node yang berada dalam jangkauan dan menggunakan parameter komunikasi yang sama (frekuensi, spreading factor, bandwidth) dapat menerima pesan tersebut.



Gambar 2.4 Peer-to-Peer LoRa

2.5.2. Multi-hop

Multi-hop merupakan mekanisme komunikasi jaringan dimana sebuah pesan tidak hanya dapat dikirim ke sebuah node secara langsung, tetapi dapat diteruskan melalui satu atau beberapa node perantara. Dalam konsep Multi-hop, setiap node dapat berperan sebagai relay untuk meneruskan data ke node lain [24]. Pendekatan ini mirip dengan jaringan P2P, hanya saja terdapat beberapa node perantara yang dilewatkan dalam pengiriman data sebelum sampai ke penerima. Dengan cara ini, perangkat LoRa yang tidak berada dalam jangkauan secara langsung tetap dapat berkomunikasi. Konsep ini menjadikan jaringan komunikasi dapat diperluas dan lebih fleksibel, serta adaptif.



Gambar 2.5 Multi-hop LoRa

2.6. Meshtastic

Meshtastic merupakan sebuah proyek *open-source* yang mengembangkan firmware berbasis LoRa untuk membangun jaringan komunikasi desentralisasi tanpa bergantung pada infrastruktur internet. Firmware ini memungkinkan perangkat berbasis LoRa, seperti TTGO LoRa32, untuk berfungsi sebagai node dalam jaringan mesh yang mendukung komunikasi multi-hop. Sebagai aplikasi mesh LoRa yang terintegrasi, Meshtastic menggunakan mekanisme *broadcast* dan *repeat* untuk melakukan komunikasi antar node nya [25]. Untuk dapat terhubung ke jaringan mesh Meshtastic, smartphone yang merupakan aplikasi client dapat dihubungkan ke LoRa melalui Bluetooth [26].

Dikutip dari laman Meshtastic, proses komunikasi diawali dari aplikasi Meshtastic yang terhubung ke perangkat melalui Bluetooth, Wi-Fi/Ethernet, atau koneksi serial. Selanjutnya, pesan akan dipancarkan menggunakan radio LoRa. apabila tidak ada konfirmasi penerimaan dalam batas waktu tertentu, pesan tersebut akan dikirim ulang hingga tiga kali. Ketika sebuah radio menerima paket yang sudah pernah diterima sebelumnya, maka paket tersebut diabaikan. Namun, jika pesan belum diterima, perangkat akan meneruskannya dengan mengurangi nilai hop limit sebanyak satu. Apabila nilai hop limit mencapai nol, pesan tidak akan disiarkan ulang. Selain itu, Meshtastic memiliki fitur untuk menyimpan hingga 30 pesan dalam memori internal ketika tidak terhubung ke aplikasi dengan konsep FIFO (First In First Out) untuk menggantikan pesan lama dengan pesan baru.

2.7. Aplikasi Mobile

Aplikasi mobile merupakan perangkat lunak yang dirancang untuk berjalan pada smartphone dan tablet dengan sistem operasi android maupun iOS. Aplikasi mobile menyediakan antarmuka interaktif yang memudahkan pengguna dalam mengakses berbagai fungsi sistem, mulai dari komunikasi hingga pemantauan lokasi. Berbagai fitur bawaan perangkat dapat dimanfaatkan dan diintegrasikan dengan aplikasi mobile, seperti Bluetooth, Wi-Fi, GPS, maupun sensor internal. Dalam penelitian ini, aplikasi mobile

berperan sebagai antarmuka pengguna untuk memudahkan pengiriman pesan dan menjembatani perangkat untuk terhubung ke radio LoRa.

2.8. Penelitian Terdahulu

Penelitian ini dibuat berdasarkan rujukan beberapa penelitian terdahulu. Adapun penelitian tersebut dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Peneliti	Judul	Hasil
Raj Hakani et al. (2024) [27]	Enhancing Situational Awareness with LoRa Mesh Networks: Communication in Internet-Deprived Areas	<ul style="list-style-type: none"> - Komunikasi LoRa point-to-point mampu mencapai jarak efektif hingga ± 2 km di area urban dengan interferensi, menggunakan frekuensi 433 MHz dan modul LILYGO T-Beam (ESP32 + SX1276). - Kekuatan sinyal (RSSI) menunjukkan penurunan seiring bertambahnya jarak — dari sekitar -20 dBm (jarak dekat) hingga -120 dBm (jarak 2 km), namun tetap cukup kuat untuk mempertahankan komunikasi stabil. - Penerapan komunikasi multi-hop mesh dengan tiga node (A–B–C) memperluas jangkauan hingga 3 km tanpa penurunan performa signifikan.
Höchst J, et al. (2020) [9]	LoRa-based Device-to-Device Smartphone Communication for Crisis Scenarios	<ul style="list-style-type: none"> - Pengembangan firmware open-source bernama rf95modem untuk modul LoRa berbasis mikrokontroler (ESP32, Heltec, TTGO, dsb.) - Membangun aplikasi chat LoRa berbasis

		<p>smartphone (Android, iOS, PC) untuk komunikasi device-to-device tanpa infrastruktur</p> <ul style="list-style-type: none"> - Jarak komunikasi stabil tercapai hingga 1,09 km (kota, SF7) dan 2,89 km (kota, SF12). Sedangkan pada pedesaan, komunikasi stabil hingga 1,31 km (SF7) dan 1,64 km (SF12)
Triwidyastuti Y, et al. (2020) [28]	Multi-hop Communication between LoRa End Devices	<ul style="list-style-type: none"> - Pengembangan komunikasi multi-hop pada jaringan LoRa tanpa gateway - Node relay digunakan untuk meneruskan paket dari pengirim ke penerima. Routing sederhana dibuat berdasarkan panjang paket untuk menentukan jalur transmisi. - Hasil indoor, Packet Reception Ratio (PRR) meningkat hingga 2,47 kali dibanding komunikasi satu hop. - Hasil outdoor, multi-hop meningkatkan PRR dari 8,11% menjadi 96,63% dengan penambahan relay node - Konfigurasi delay optimum adalah 100 ms per hop untuk menghasilkan PRR tinggi dengan RTT terendah. - multi-hop efektif meningkatkan keberhasilan komunikasi LoRa, namun jumlah hop

		<p>berlebih bisa menurunkan performa karena trafik semakin padat.</p>
<p>D'sa R. J, et al (2024) [29]</p>	<p>LoRa-Powered IoT Messaging System for Internet-Free Communication</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pengembangan sistem komunikasi pengiriman pesan berbasis IoT menggunakan ESP32 dan LoRa RA-02 - Sistem menggunakan ESP32 sebagai access point yang mengelola layanan pesan dengan protokol WebSocket untuk komunikasi dua arah. - Uji coba menunjukkan sistem mampu menjaga komunikasi yang stabil di berbagai kondisi lingkungan dengan optimasi konsumsi daya (low-power algorithms) untuk memperpanjang usia baterai.
<p>Fadillah A.N, et al (2022) [30]</p>	<p>RANCANG BANGUN ALAT KOMUNIKASI ANTAR SMARTPHONE MELALUI JARINGAN NIRKABEL LORA MULTI-HOP</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Prototipe komunikasi antar smartphone tanpa internet dan jaringan seluler untuk daerah bencana. - LoRa mendukung komunikasi stabil hingga ± 250 meter, lebih jauh dengan penambahan node relay dan waktu pengiriman pesan meningkat seiring penambahan jarak. - Jarak stabil pengiriman bluetooth adalah 8 meter

BAB III

DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

3.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk ke dalam kategori penelitian implementatif dengan pendekatan *Research and Development* (R&D). Fokus utama penelitian adalah merancang dan membangun sebuah sistem komunikasi pesan berbasis LoRa dengan arsitektur multi-hop yang diintegrasikan ke dalam aplikasi mobile. Penelitian implementatif dipilih karena tujuan utamanya tidak hanya berorientasi pada analisis konsep, melainkan menghasilkan perangkat lunak dan perangkat keras yang dapat diuji secara langsung. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan tidak hanya bersifat konseptual, tetapi juga aplikatif sehingga solusi yang ditawarkan mampu memberikan kontribusi praktis dalam pemanfaatan teknologi LoRa sebagai komunikasi alternatif di wilayah tanpa jaringan internet.

3.2. Waktu dan Tempat Penelitian

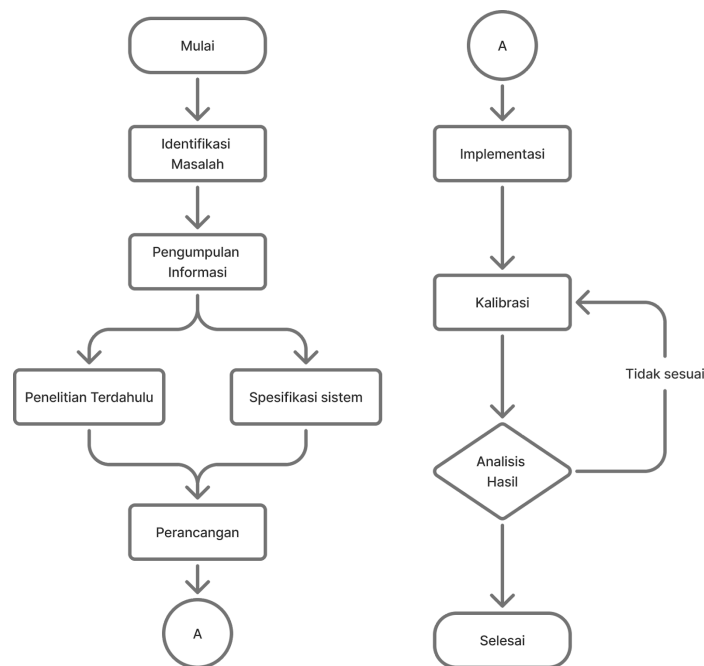
Penelitian dilakukan di dua tempat berbeda guna untuk mengetahui ketahanan sistem. Pada uji coba pertama akan dilakukan di sebuah jalan terbuka yang tepat nya di Jl. Raya Kedung Baruk. Kemudian untuk lokasi yang kedua akan dilakukan di dalam sebuah gedung bertingkat yaitu di Asrama Mahasiswa Nusantara Surabaya yang berada di Jalan Jemur Andayani no 1 Siwalankerto. Waktu yang dibutuhkan untuk dapat menyelesaikan penelitian ini kurang lebih sekitar sepuluh bulan.

3.3. Subjek Penelitian

Penelitian ini tidak melibatkan partisipan dari khalayak umum ataupun khusus, melainkan fokus pada perangkat lunak dan perangkat keras yang dikembangkan dalam penelitian. Perangkat keras yang digunakan adalah modul TTGO LoRa32 berbasis ESP32 dengan transceiver LoRa SX1276, smartphone Android sebagai perangkat pengguna, serta baterai Li-Po sebagai sumber daya. Perangkat lunak yang dikembangkan meliputi firmware LoRa pada ESP32 dan aplikasi mobile berbasis Android. Lingkungan uji meliputi area indoor dan outdoor untuk mengevaluasi performa sistem komunikasi multi-hop yang dibangun.

3.4. Strategi Penelitian

Strategi penelitian merupakan rencana menyeluruh yang mengarahkan peneliti dalam melaksanakan kegiatan penelitian. Dengan kata lain, strategi penelitian adalah kerangka konseptual yang menjelaskan bagaimana penelitian dilaksanakan secara sistematis agar tujuan penelitian dapat tercapai. Penelitian ini menggunakan metode riset dan pengembangan atau *Research and Development* (R&D) dengan metode Waterfall. Tujuan penelitian ini adalah membuat sebuah sistem komunikasi pesan berbasis LoRa dan arsitektur multi-hop tanpa akses internet. Pengembangan perangkat menggunakan modul TTGO LoRa32 yang telah terintegrasi dengan ESP32. Pengujian dilakukan bertahap dengan diikuti kalibrasi dan evaluasi setelahnya. Berikut ini alur rancangan penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini.



Gambar 3.1 Flowchart Rancangan Penelitian

3.5. Tahapan Penelitian

Berdasarkan gambar 3.1 yang menggambarkan keseluruhan alur penelitian, bagian ini menjelaskan langkah-langkah detail untuk setiap penelitian,

tahapannya. Proses penelitian dimulai dari identifikasi masalah hingga analisis hasil, dengan tahapan utama sebagai berikut.

3.5.1. Identifikasi Masalah

Tahap awal ini dilakukan untuk mengamati permasalahan nyata di lapangan, yaitu keterbatasan komunikasi di wilayah yang tidak memiliki akses jaringan internet. Beberapa penyebab keterbatasan tersebut antara lain infrastruktur yang rusak akibat bencana alam, lokasi yang sulit dijangkau sehingga menyulitkan instalasi jaringan, serta kondisi geografis seperti wilayah pegunungan atau kawasan hutan yang belum terlayani oleh jaringan seluler. Kondisi ini menyebabkan proses komunikasi antar individu maupun masyarakat menjadi sulit dilakukan. Oleh karena itu, permasalahan ini menjadi dasar untuk merumuskan sistem komunikasi alternatif berbasis LoRa tanpa akses internet.

3.5.2. Pengumpulan Informasi

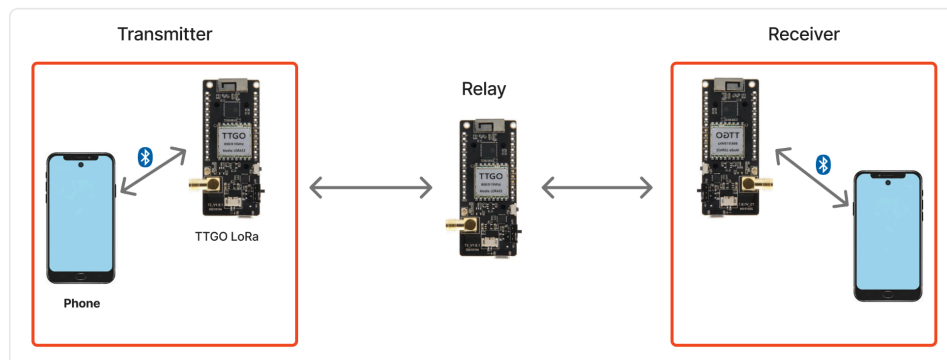
Proses pengumpulan informasi bertujuan untuk mengetahui dan memperoleh informasi terkait dengan permasalahan yang ada dan proses penyelesaian masalah tersebut. Pengumpulan informasi dilakukan melalui dua cara yaitu, penelitian terdahulu dan identifikasi kebutuhan sistem. Penelitian terdahulu menjadi rujukan awal dalam mengkaji efektivitas teknologi LoRa sebagai solusi komunikasi, dimana berbagai jurnal dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa LoRa telah digunakan secara luas dalam sistem pengiriman pesan.

Berbagai jurnal yang fokus dalam pengembangan alat komunikasi berbasis LoRa diperoleh informasi kebutuhan sistem. Informasi ini meliputi perangkat keras dan perangkat lunak apa saja yang dibutuhkan dalam pengembangan sistem, serta konfigurasi yang digunakan dalam pengujian. Untuk beberapa detail kebutuhan sistem, sumber informasi dapat ditemukan di beberapa situs resmi dan datasheet dari teknologi yang digunakan. Dalam penelitian ini, hardware dan software yang digunakan diantaranya, LILYGO LoRa32, Meshtastic, Arduino IDE, dan Smartphone. Selain itu, arsitektur jaringan yang dibangun dalam komunikasi ini berbasis multi-hop, dimana

pesan dapat dikirimkan ke sebuah node dengan melewati beberapa node yang ada.

3.5.3. Perancangan

Tahap perancangan dilakukan untuk menyusun arsitektur sistem yang akan dibangun, baik dari sisi perangkat keras maupun perangkat lunak. Tujuan perancangan ini adalah agar implementasi dapat dilakukan secara terarah dan lebih jelas, serta sesuai kebutuhan penelitian.



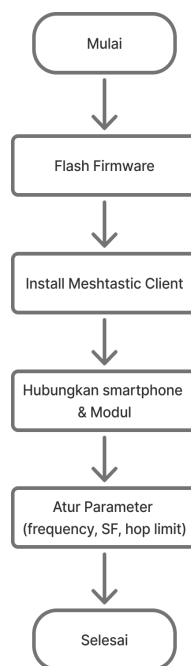
Gambar 3.2 Desain Arsitektur Sistem

Sistem komunikasi ini menggunakan modul TTGO LoRa yang telah terintegrasi dengan ESP32 sebagai mikrokontrolernya. Arsitektur sistem yang dirancang melibatkan tiga buah node untuk pengujian komunikasi multi-hop. Untuk node 1 dan node 3, TTGO LoRa dihubungkan ke smartphone melalui koneksi Bluetooth. Karena menggunakan modul LoRa transceiver, satu node dapat bertindak sebagai pengirim sekaligus penerima. Selain itu, masing-masing node juga dapat berperan sebagai relay untuk meneruskan pesan.

Secara sederhana, alur komunikasi sistem dimulai dari pengiriman pesan melalui smartphone pada node 1 ke modul LoRa. Pesan tersebut kemudian diteruskan melalui gelombang radio ke node 2 sebagai perantara sebelum akhirnya sampai pada node 3. Node 3 berperan sebagai penerima yang meneruskan pesan ke smartphone pengguna, sehingga isi pesan dapat ditampilkan dalam bentuk teks. Dengan demikian, sistem ini menerapkan konsep peer-to-peer yang diperluas dengan mekanisme multi-hop agar komunikasi tetap dapat berlangsung pada jarak yang lebih jauh.

3.5.4. Implementasi

Tahap implementasi merupakan realisasi dari rancangan arsitektur pada bagian sebelumnya. Pada bagian ini fokus utamanya untuk melakukan konfigurasi firmware Meshtastic pada modul TTGO LoRa32. Konfigurasi ini dilakukan agar perangkat dapat berfungsi sebagai node komunikasi multi-hop yang mampu mengirim, menerima, dan meneruskan pesan antar node. Untuk dapat saling terkoneksi dengan mudah, firmware Meshtastic diinstal pada modul TTGO LoRa32 dan aplikasi client Meshtastic juga akan diinstal pada smartphone sebagai antarmuka pengguna. Modul TTGO LoRa32 dikonfigurasi menggunakan Meshtastic Flasher untuk melakukan flashing. Seluruh konfigurasi Meshtastic dapat dilakukan di smartphone yang terhubung ke modul LoRa melalui Bluetooth.



Gambar 3.3 Alur Konfigurasi Meshtastic

3.5.5. Kalibrasi

Tahap kalibrasi dilakukan untuk menyesuaikan parameter komunikasi LoRa agar sistem dapat bekerja optimal sesuai kebutuhan penelitian. Kalibrasi dilakukan setelah implementasi selesai, dengan cara mengatur

parameter-parameter utama pada Meshtastic, kemudian melakukan uji coba awal untuk memastikan komunikasi antar node berjalan stabil. Berikut ini beberapa parameter utama yang akan dikalibrasi

- Frekuensi kerja (MHz): disesuaikan dengan regulasi frekuensi yang berlaku di wilayah pengujian.
- Spreading Factor (SF): dikalibrasi untuk menyeimbangkan jangkauan komunikasi dan kecepatan transmisi. Nilai SF yang tinggi meningkatkan jangkauan tetapi menurunkan data rate.
- Bandwidth (kHz): mempengaruhi kapasitas data dan sensitivitas penerimaan.
- Coding Rate (CR): tingkat redundansi data untuk mengatasi noise.

Proses kalibrasi dilakukan secara iteratif. Jika hasil pengujian awal menunjukkan performa komunikasi kurang memuaskan, seperti tingginya packet loss atau latensi yang berlebihan, maka parameter akan disesuaikan kembali hingga diperoleh hasil yang optimal. Dengan pendekatan ini, sistem dapat diuji dalam kondisi terbaik untuk skenario multi-hop.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. P. Haris, Y. I. N. Setiawan, R. Rendi, and N. K. Fajarwati, “Tren Terkini Dalam Ilmu Komunikasi Di Indonesia: Antara Transformasi Digital Dan Dinamika Budaya”.
- [2] M. Herman and A. S. Permadi, “Kesenjangan Akses Internet Dan Dampaknya Terhadap Kualitas Pendidikan Di Desa Tampelas Kecamatan Kamipang Kabupaten Katingan,” vol. 10, no. 2, 2025.
- [3] H. Tahaei, H. Ruan, P. Sun, Y. Dong, and Z. Fang, “An Overview of LoRa Localization Technologies,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 82, no. 2, pp. 1645–1680, 2025, doi: 10.32604/cmc.2024.059746.
- [4] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley, “A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, Sept. 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [5] J. M. Sole, R. P. Centelles, F. Freitag, and R. Meseguer, “Implementation of a LoRa Mesh Library,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 113158–113171, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3217215.
- [6] V. Novendra Sulu, D. T. H. Haryanto, A. Cipta Adinata, and S. Rabbani Kusuma, “Implementasi Komunikasi Peer-to-Peer dengan Mengembangkan Aplikasi Menggambar Kolaboratif,” *Informattech J. Ilm. Inform. Dan Komput.*, vol. 1, no. 2, Dec. 2024, doi: 10.69533/9nmyyx11.
- [7] I. P. Manalu, M. T. M. Sigiyo, A. A. P. Manik, N. G. A. Sitohang, and G. Pardede, “Multihop Data Transmission Using LoRa Technology”.
- [8] “ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC | Espressif Systems.” Accessed: Oct. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- [9] J. Höchst and L. Baumgärtner, “LoRa-based Device-to-Device Smartphone Communication for Crisis Scenarios,” 2020.
- [10] S. Blöchinger, “Survey of Mesh Networking Messengers,” 2021, doi: 10.2313/NET-2021-05-1_01.
- [11] C. Prakash, L. P. Singh, A. Gupta, and S. K. Lohan, “Advancements in smart farming: A comprehensive review of IoT, wireless communication, sensors, and hardware for agricultural automation,” *Sens. Actuators Phys.*, vol. 362, p. 114605, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114605>.

- [12] P. P. Ray, "A survey on Internet of Things architectures," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 30, no. 3, pp. 291–319, July 2018, doi: 10.1016/j.jksuci.2016.10.003.
- [13] Nur-A-Alam, M. Ahsan, Md. A. Based, J. Haider, and E. M. G. Rodrigues, "Smart Monitoring and Controlling of Appliances Using LoRa Based IoT System," *Designs*, vol. 5, no. 1, p. 17, Mar. 2021, doi: 10.3390/designs5010017.
- [14] "LoRa® and LoRaWAN®," Semtech Corporation, AN1200.86, Mar. 2024. Accessed: Sept. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.semtech.com>
- [15] M. Ayoub Kamal, M. M. Alam, A. A. B. Sajak, and M. Mohd Su'ud, "Requirements, Deployments, and Challenges of LoRa Technology: A Survey," *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2023, no. 1, p. 5183062, Jan. 2023, doi: 10.1155/2023/5183062.
- [16] R. Michon and D. Overholt, "A FAUST ARCHITECTURE FOR THE ESP32 MICROCONTROLLER".
- [17] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, "Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices," *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6739, July 2023, doi: 10.3390/s23156739.
- [18] H. J. El-Khozondar, "A smart energy monitoring system using ESP32 microcontroller," *Adv. Electr. Eng.*, 2024.
- [19] M. J. Espinosa-Gavira, A. Agüera-Pérez, J. C. Palomares-Salas, J. M. Sierra-Fernandez, P. Remigio-Carmona, and J. J. González de-la-Rosa, "Characterization and Performance Evaluation of ESP32 for Real-time Synchronized Sensor Networks," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 237, pp. 261–268, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.05.104.
- [20] A. Maier, A. Sharp, and Y. Vagapov, "Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things," in *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*, Wrexham: IEEE, Sept. 2017, pp. 143–148. doi: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.
- [21] M. I. Z. Azhar Muzafar, A. Mohd Ali, and S. Zulkifli, "A Study on LoRa SX1276 Performance in IoT Health Monitoring," *Wirel. Commun. Mob.*

- Comput.*, vol. 2022, no. 1, p. 6066354, Jan. 2022, doi: 10.1155/2022/6066354.
- [22] O. Chidolue and T. Iqbal, “Real-time monitoring and data acquisition using LoRa for a remote solar powered oil well,” *Int. J. Appl. Power Eng. IJAPE*, vol. 13, no. 1, p. 201, Mar. 2024, doi: 10.11591/ijape.v13.i1.pp201-212.
- [23] A. Mauthe and D. Hutchison, “Peer-to-Peer Computing: Systems, Concepts and Characteristics,” *PIK - Prax. Informationsverarbeitung Kommun.*, vol. 26, no. 2, pp. 60–64, June 2003, doi: 10.1515/PIKO.2003.60.
- [24] H. P. Tran, W.-S. Jung, D.-S. Yoo, and H. Oh, “Design and Implementation of a Multi-Hop Real-Time LoRa Protocol for Dynamic LoRa Networks,” *Sensors*, vol. 22, no. 9, p. 3518, May 2022, doi: 10.3390/s22093518.
- [25] J. Miquel, R. Pueyo Centelles, F. Freitag, R. Meseguer, and R. Baig, “Large and Reliable Messages Over Lora Mesh Networks,” 2024, *SSRN*. doi: 10.2139/ssrn.4963248.
- [26] J. M. Solé, R. P. Centelles, F. Freitag, R. Meseguer, and R. Baig, “Middleware for Distributed Applications in a LoRa Mesh Network,” vol. 24, no. 4.
- [27] R. Hakani, A. Mishra, N. Shah, and A. Rawat, “Enhancing Situational Awareness with LoRa Mesh Networks: Communication in Internet-Deprived Areas,” Oct. 28, 2024, *In Review*. doi: 10.21203/rs.3.rs-5314157/v1.
- [28] Y. Triwidyastuti, M. Musayyanah, F. Ernawati, and C. D. Affandi, “Multi-hop Communication between LoRa End Devices,” *Sci. J. Inform.*, vol. 7, no. 1, pp. 125–135, June 2020, doi: 10.15294/sji.v7i1.21855.
- [29] R. J. Dsa, Rashmitha, and B. Rao, “LoRa-Powered IoT Messaging System for Internet-Free Communication,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 1566–1570, Apr. 2024, doi: 10.22214/ijraset.2024.60126.
- [30] A. N. Fadillah, A. D. Almazazi, and I. M. Pardede, “RANCANG BANGUN ALAT KOMUNIKASI ANTAR SMARTPHONE MELALUI JARINGAN NIRKABEL LORA MULTI-HOP,” 2022.