

**OPTIMASI ROUTING BROADCAST MENGGUNAKAN GRAPH NEURAL
NETWORK PADA JARINGAN LORA MESH UNTUK KOMUNIKASI DARURAT
KAPAL NELAYAN**



MUCHAMMAD DIMAS MUFTI BASKARA

NIM. 2210511099

**FAKULTAS ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN" JAKARTA
JAKARTA
2026**

**OPTIMASI ROUTING BROADCAST MENGGUNAKAN GRAPH NEURAL
NETWORK PADA JARINGAN LORA MESH UNTUK KOMUNIKASI DARURAT
KAPAL NELAYAN**

MUCHAMMAD DIMAS MUFTI BASKARA

NIM. 2210511099

Skripsi

**Sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi di
Program Studi S1 Informatika**

**FAKULTAS ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL “VETERAN” JAKARTA
JAKARTA
2026**

ABSTRAK

Profesi nelayan memiliki risiko kecelakaan kerja yang tinggi dan membutuhkan infrastruktur komunikasi darurat yang andal. Teknologi LoRa Mesh berpotensi mengatasi keterbatasan jangkauan di lingkungan maritim, namun mekanisme penyiaran (*flooding*) konvensional seringkali menimbulkan *broadcast storm*, *overhead* transmisi yang tinggi, serta pemborosan konsumsi daya perangkat. Penelitian ini mengusulkan optimasi *routing broadcast* menjadi kebijakan *selective forwarding* menggunakan pemodelan *Graph Attention Network* (GAT) untuk memprediksi kelayakan transmisi *relay* pada tingkat jalur komunikasi (*edge-level task*). Simulasi jaringan maritim dieksekusi menggunakan simulator ns-3.41 secara deterministik, menghasilkan 2.241.402 rekaman transmisi *hop* yang digunakan untuk melatih model GAT berukuran 29.969 parameter dengan *F1-Score* sebesar 90,70%. Evaluasi performa dilakukan menggunakan pendekatan *off-policy* pada 1.023 kejadian darurat (SOS) dan divalidasi secara statistik melalui uji non-parametrik *Wilcoxon Signed-Rank* serta metrik Probabilitas Keunggulan (PS_{dep}). Hasil pengujian menunjukkan bahwa kebijakan GAT mampu meningkatkan keandalan pengiriman paket (*Packet Delivery Ratio*/PDR) dari 85,00% menjadi 89,20%. Selain itu, model GAT terbukti sangat efisien secara mutlak (PS_{dep} 100%) dengan mereduksi *overhead* transmisi hingga 4,8% dan menghemat konsumsi energi baterai sebesar 33,8%, dengan catatan latensi *end-to-end* menjadi *trade-off* dengan peningkatan sebesar 1,3% atau sekitar 30,1 ms. Dampak dari efisiensi ini semakin mengamankan status kepatuhan jaringan terhadap regulasi *duty cycle* AS923 dengan menekan rata-rata waktu mengudara (*airtime*) menjadi 0,89% (berada di bawah batas maksimal 1%). Penerapan *deep learning* berbasis graf pada jaringan LoRa Mesh maritim terbukti memberikan optimasi pertukaran (*trade-off*) yang menguntungkan antara efisiensi dan keandalan sistem keselamatan di lingkungan maritim.

Kata Kunci: Komunikasi Darurat, LoRa Mesh, *Selective Forwarding*, *Graph Attention Network*, *Packet Delivery Ratio*.

ABSTRACT

The fishing profession carries a high risk of occupational accidents and requires a reliable emergency communication infrastructure. LoRa Mesh technology has the potential to overcome range limitations in maritime environments; however, conventional broadcasting (flooding) mechanisms often lead to broadcast storms, high transmission overhead, and excessive device power consumption. This study proposes the optimization of broadcast routing into a selective forwarding policy using Graph Attention Network (GAT) modeling to predict relay transmission viability at the edge-level task. Maritime network simulations were deterministically executed using the ns-3.41 simulator, generating 1,602,864 hop transmission records utilized to train a 29,969-parameter GAT model, achieving an F1-Score of 90,70%. Performance evaluation was conducted using an off-policy approach on 1,023 emergency (SOS) events and statistically validated through the non-parametric Wilcoxon Signed-Rank test alongside the Probability of Superiority (PS_{dep}) metric. The test results indicate that the GAT policy successfully increased the Packet Delivery Ratio (PDR) reliability from 85,00% to 89,20%. Furthermore, the GAT model proved to be efficient (PS_{dep} 100%) by reducing transmission overhead by 4,8% and saving battery energy consumption by 33,8%, with a noted trade-off in end-to-end latency, which experienced an increase of 1,3% or approximately 30,1 ms. The impact of this efficiency further secures the network's compliance status with the AS923 duty cycle regulation by suppressing the average airtime to 0.89% (well below the 1% maximum limit). The application of graph-based deep learning in maritime LoRa Mesh networks is proven to provide a highly beneficial trade-off optimization between efficiency and the reliability of safety systems at maritime environment.

Keywords: Emergency Communication, LoRa Mesh, Selective Forwarding, Graph Attention Network, Packet Delivery Ratio.

PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “OPTIMASI ROUTING BROADCAST MENGGUNAKAN GRAPH NEURAL NETWORK PADA JARINGAN LORA MESH UNTUK KOMUNIKASI DARURAT KAPAL NELAYAN” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta.

Jakarta, 24 Juli 2026



Muchammad Dimas Mufti Baskara

NIM. 2210511099

PERNYATAAN ORISINALITAS

PERNYATAAN ORISINALITAS

Tugas akhir ini adalah hasil karya sendiri dan semua sumber yang dikutip maupun yang dirujuk telah saya nyatakan benar.

Nama : Muchammad Dimas Mufti Baskara
NIM : 2210511099
Tanggal : 24 Juli 2026
Judul Skripsi : **OPTIMASI ROUTING BROADCAST MENGGUNAKAN GRAPH NEURAL NETWORK PADA JARINGAN LORA MESH UNTUK KOMUNIKASI DARURAT KAPAL NELAYAN**

Bilamana pada kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan saya ini, maka saya bersedia dituntut dan diproses sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Jakarta, 24 Juli 2026

Yang menyatakan,



Muchammad Dimas Mufti Baskara

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademik Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muchammad Dimas Mufti Baskara
NIM : 2210511099
Fakultas : Ilmu Komputer
Program Studi : S-1 Informatika

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan karya ilmiah saya kepada Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif (*Non-Exclusive Royalty Free Right*) untuk publikasi dengan judul:

OPTIMASI ROUTING BROADCAST MENGGUNAKAN GRAPH NEURAL NETWORK PADA JARINGAN LORA MESH UNTUK KOMUNIKASI DARURAT KAPAL NELAYAN

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti ini, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta berhak menyimpan, mengalih media atau memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasi artikel ilmiah selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Dengan pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Dibuat di : Jakarta
Pada Tanggal : 24 Juli 2026

Yang menyatakan,



Muchammad Dimas Mufti Baskara

LEMBAR PERSETUJUAN

LEMBAR PERSETUJUAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muchammad Dimas Mufti Baskara

NIM : 2210511099

Program Studi : Informatika Program Sarjana/~~Sistem Informasi Program Sarjana/Sains~~

~~Data Program Sarjana/Sistem Informasi Program Diploma~~ (*Coret yang tidak perlu)

Jenis Tugas Akhir : Skripsi /~~Proyek / Artikel Publikasi~~ (*Coret yang tidak perlu)

Judul Tugas Akhir :

OPTIMASI ROUTING BROADCAST MENGGUNAKAN GRAPH NEURAL NETWORK
PADA JARINGAN LORA MESH UNTUK KOMUNIKASI DARURAT KAPAL NELAYAN

Dinyatakan telah memenuhi syarat dan menyetujui untuk mengikuti sidang Tugas Akhir.

Jakarta, 30 April 2026

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I



Dr. Indra Permana Solihin, S.Kom., M.Kom.
NIDN. 0309088301

Dosen Pembimbing II



Hamonangan Kinantan Prabu, S.T., M.T.
NIDN. 0002088502

Mengetahui,

Koordinator Program Studi,



Ditandatangani secara digital oleh:
Ridwan Raafi'udin

Verifikasi di design.upnvj.ac.id

Dr. Ridwan Raafi'udin, S.Kom, M.Kom.
NIDN. 002058804

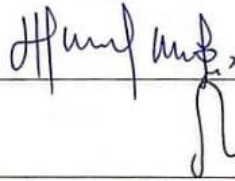
LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

Judul : Optimasi Routing Broadcast Menggunakan Graph Neural
Network pada Jaringan LoRa Mesh untuk Komunikasi Darurat
Kapal Nelayan
Nama : Muchammad Dimas Mufti Baskara
NIM : 2210511099
Program Studi : S1 Informatika

Disetujui oleh:

Penguji 1:
Dr. Ridwan Raafi'udin, S.Kom., M.Kom.



Penguji 2:
Nurhuda Maulana, S.T., M.T.



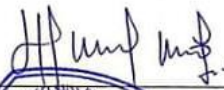
Pembimbing 1:
Dr. Indra Permana Solihin, S.Kom., M.Kom.

Pembimbing 2:
Hamonangan Kinantan Prabu, M.T.



Diketahui oleh:

Koordinator Program Studi:
Dr. Ridwan Raafi'udin, S.Kom., M.Kom.
NIP. 198805022021211001



Dekan Fakultas Ilmu Komputer:
Prof. Dr. Ir. Supriyanto, M.Sc., IPM.
NIP. 197605082003121002




Tanggal Ujian Tugas Akhir:
29 Juni 2026

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Kuasa, atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Optimasi *Routing Broadcast* Menggunakan *Graph Neural Network* Pada Jaringan *LoRa Mesh* untuk Komunikasi Darurat Kapal Nelayan” dengan baik. Penelitian skripsi yang dilaksanakan telah berjalan sesuai dengan jadwal dan dapat dinyatakan sebagai salah satu syarat wajib kelulusan penulis pada pendidikan Program Studi Sarjana Informatika Fakultas Ilmu Komputer Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.

Dalam penyusunan Skripsi ini, penulis menyadari bahwa banyak pihak yang menyampaikan dukungan, bantuan, dan motivasi kepada penulis. Oleh karenanya, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT, yang telah memberikan petunjuk, hidayah, dan kemudahan sepanjang hidup penulis, utamanya pada saat proses pengerjaan Skripsi.
2. Kedua orang tua, Mama dan Ayah, yang telah selalu memberikan semangat, motivasi, dan doa yang tiada hentinya untuk kelancaran penulis dalam membimbing mulai dari awal masa perkuliahan hingga menyelesaikan tugas akhir skripsi.
3. Kakak dan Adik, beserta seluruh keluarga yang memberikan dukungan dan semangat untuk penulis.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Supriyanto, S.T., M.Sc., IPM. selaku Dekan Fakultas Ilmu Komputer Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.
5. Bapak Dr. Ridwan Raafi'udin, S.Kom, M.Kom. selaku Koordinator Program Studi S1 Informatika Fakultas Ilmu Komputer Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.
6. Bapak Nurhuda Maulana, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik.
7. Bapak Dr. Indra Permana Solihin, S.Kom., M.Kom. selaku Dosen Pembimbing 1.
8. Bapak Hamonangan Kinantan Prabu, M.T. selaku Dosen Pembimbing 2.
9. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan Program Studi Informatika Fakultas Ilmu Komputer Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta yang telah memberikan ilmu berharga selama masa perkuliahan.
10. Rekan-rekan sejawat penulis, Rico, Hasbul, Abdef, Fadawkas, Ridhan, Thaariq, Marhaban, dan rekan lainnya yang menjadi sahabat selama menjalani masa perkuliahan.
11. Teman-teman dan Mentor magang penulis di Telkomsel dan Bank Indonesia, yang selalu memberikan kesan berharga bagi penulis dalam mengisi masa-masa perkuliahan.

12. Arsenal Football Club dan Oracle Red Bull Racing Team yang menjadi sumber hiburan utama bagi penulis untuk melepaskan penat selama mengerjakan Skripsi.
13. Serta tidak lupa seluruh teman-teman Informatikans, Team Gacoan, Sahabat Nawasena, dan seluruh rekan-rekan yang telah menemani dan menjadi bagian dari perjalanan hidup penulis.

Semoga segala kebaikan yang telah tercurahkan kepada penulis mendapatkan berkah dari Allah SWT. Penulis berharap Skripsi ini dapat bermanfaat untuk pembaca dan dapat dijadikan referensi.

Jakarta, 30 April 2026

Penulis



Muchammad Dimas Mufti Baskara

NIM. 2210511099

DAFTAR ISI

PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA.....	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	iii
LEMBAR PERSETUJUAN.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR RUMUS	xv
DAFTAR ISTILAH	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian	4
1.4.1. Tujuan Penelitian.....	4
1.4.2. Manfaat Penelitian.....	4
1.5. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Teknologi Komunikasi.....	7
2.2. Jaringan Komputer	7
2.2.1. Elemen Jaringan	7
2.2.2. Topologi	8
2.2.3. <i>Broadcast dan Selective Forwarding</i>	8

2.3.	Protokol Komunikasi.....	9
2.3.1.	<i>Long Range (LoRa)</i>	9
2.3.2.	<i>Chirp Spread Spectrum (CSS)</i>	10
2.3.3.	<i>Received Signal Strength Indicator (RSSI)</i>	11
2.3.4.	<i>Signal-to-Noise-Ratio (SNR)</i>	12
2.3.5.	<i>Time on Air (ToA)</i>	12
2.3.6.	<i>Time To Live (TTL)</i>	13
2.3.7.	<i>Coding Rate</i>	13
2.3.8.	<i>Payload</i>	14
2.3.9.	<i>Bandwidth</i>	15
2.3.10.	<i>Air Data Rate</i>	15
2.3.11.	<i>Spreading Factor (SF)</i>	16
2.3.12.	<i>Packet Delivery Ratio (PDR)</i>	17
2.3.13.	<i>Line of Sight (LOS)</i>	18
2.3.14.	Latensi.....	19
2.3.15.	Konsumsi Energi	19
2.4.	Optimasi Jaringan.....	19
2.5.	<i>Network Simulator-3 (ns-3)</i>	20
2.6.	<i>Deep Learning</i>	21
2.6.1.	<i>Graph Neural Network</i>	23
2.6.2.	<i>Graph Attention Network</i>	23
2.7.	Hipotesis Penelitian.....	25
2.7.1.	Ruang Lingkup	25
2.7.2.	Hipotesis Utama	26
2.7.3.	Pengujian Hipotesis	26
2.8.	Penelitian Terdahulu	28
BAB III METODE PENELITIAN.....		30
3.1.	Tahapan Penelitian	30

3.1.1.	Identifikasi Masalah	30
3.1.2.	Analisis Kebutuhan	33
3.1.3.	Perancangan dan Pembuatan Karya	38
3.1.4.	Pengujian Hasil Karya	45
3.1.5.	Evaluasi Hasil Karya	47
3.2.	Pengujian Hipotesis	49
3.3.	Lingkungan dan Alat	52
3.4.	Jadwal Penelitian	53
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		55
4.1.	Implementasi dan Validasi Simulator Jaringan LoRa <i>Mesh</i>	55
4.1.1.	Inisialisasi Parameter dan Konstruksi Topologi	55
4.1.2.	Praproses Dataset dan Pembentukan Graf PyTorch Geometric	61
4.2.	Implementasi dan Evaluasi Model <i>Graph Attention Network</i> (GAT)	66
4.2.1.	Arsitektur Model LoRaMeshGAT	66
4.2.2.	Dinamika Pelatihan Model	69
4.3.	Pengujian Hipotesis dan Evaluasi Performa Jaringan	75
4.3.1.	Hipotesis 1: Peningkatan <i>Packet Delivery Ratio</i>	77
4.3.2.	Hipotesis 2: Pengurangan <i>Overhead</i> Transmisi	80
4.3.3.	Hipotesis 3: Latensi <i>End-to-End</i>	82
4.3.4.	Hipotesis 4: Efisiensi Energi	84
4.3.5.	Analisis Multidimensional	87
4.3.6.	Analisis Kepatuhan Duty Cycle	91
4.4.	Pembahasan Umum	93
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		95
5.1.	Kesimpulan	95
5.1.1.	Karakteristik Komunikasi Darurat dan Parameter Jaringan	95
5.1.2.	Adaptasi Pemodelan Graf dan Arsitektur GAT	95
5.1.3.	Perbandingan Performa Kebijakan GAT vs Baseline	96

5.2.	Saran.....	96
5.2.1.	Implementasi dan Validasi Fisik di Lapangan	97
5.2.2.	Integrasi dengan Protokol MAC untuk <i>Duty Cycle</i>	97
5.2.3.	Pengembangan Komunikasi Dua Arah	98
DAFTAR PUSTAKA		100
LAMPIRAN.....		106

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Prinsip Kerja <i>Chirp Spread Spectrum</i> (CSS) (Agung <i>et al.</i> 2023)....	10
Gambar 2.2 Tampilan perangkat lunak ns-3 di command line (CLI) Ubuntu	20
Gambar 2.3 Visualisasi cara kerja <i>Graph Neural Network</i> (GNN) (Petar Veličković 2023)	23
Gambar 3.1 Tahapan Metode Penelitian DSR (Agung Premananda <i>et al.</i> 2022). 30	
Gambar 3.2 Tahapan Identifikasi Masalah (Agung Premananda <i>et al.</i> 2022).....	31
Gambar 3.3 Tahapan Analisis Kebutuhan (Agung Premananda <i>et al.</i> 2022).....	33
Gambar 3.4 Tahapan Perancangan dan Pembuatan Karya (Agung Premananda <i>et al.</i> 2022)	39
Gambar 3.5 Tahapan Seleksi dan Kurasi Perancangan Karya.....	39
Gambar 3.6 Tahapan Pengujian Hasil Karya (Agung Premananda <i>et al.</i> 2022)... 46	
Gambar 3.7 Tahapan Evaluasi Hasil Karya (Agung Premananda <i>et al.</i> 2022).....	47
Gambar 4.1 Hasil eksekusi <code>run_all.sh</code> pada terminal Ubuntu	57
Gambar 4.2 Praproses dataset dari <code>dataset_v2.py</code> pada terminal Ubuntu ..	63
Gambar 4.3 Hasil Praproses dataset dari <code>dataset_v2.py</code> pada terminal Ubuntu	65
Gambar 4.4 Inisialisasi model LoRaMeshGAT pada terminal Ubuntu.....	68
Gambar 4.5 Pergerakan nilai <code>focal_loss</code> pada pelatihan & validasi model LoRaMeshGAT.....	71
Gambar 4.6 Pergerakan nilai <code>F1-score</code> dan akurasi validasi per <i>epoch</i>	72
Gambar 4.7 Jadwal penurunan <i>learning rate</i> <code>ReduceLROnPlateau</code>	72
Gambar 4.8 Distribusi kepadatan kelas per data <code>geo_label</code>	73
Gambar 4.9 Box plot distribusi σ_{ij} per kelas.....	74
Gambar 4.10 Perbandingan <i>routing baseline</i> dengan GAT	77
Gambar 4.11 Hasil uji hipotesis H1	78
Gambar 4.12 Hasil uji hipotesis H1 (<i>Packet Delivery Ratio</i> /PDR)	79
Gambar 4.13 Hasil uji hipotesis H2	80
Gambar 4.14 Hasil uji hipotesis H2 (<i>Overhead</i> transmisi).....	81
Gambar 4.15 Hasil uji hipotesis H3	82
Gambar 4.16 Hasil uji hipotesis H3 (Latensi).....	83

Gambar 4.17 Hasil uji hipotesis H4	85
Gambar 4.18 Hasil uji hipotesis H4 (Efisiensi Energi).....	86
Gambar 4.19 Perbandingan penurunan TX <i>Overhead</i> antara <i>baseline</i> dengan LoRaMeshGAT pada tiap <i>Spreading Factor</i>	88
Gambar 4.20 Perbandingan penggunaan energi antara <i>baseline</i> dengan LoRaMeshGAT pada tiap <i>Spreading Factor</i>	88
Gambar 4.21 Perbandingan nilai PDR antara <i>baseline</i> dengan LoRaMeshGAT berdasarkan luas area	90
Gambar 4.22 Analisis kepatuhan hasil simulasi <i>baseline</i> dan LoRaMeshGAT terhadap regulasi <i>duty cycle</i> LoRa di Indonesia.....	92

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hubungan <i>Spreading Factor</i> dengan metriks jaringan LoRa (Semtech 2024)	16
Tabel 2.2. Ringkasan Penelitian Terdahulu	28
Tabel 3.1 Justifikasi Pemilihan Fitur Node (11 Dimensi).....	34
Tabel 3.2 Justifikasi Pemilihan Fitur Edge (8 Dimensi)	36
Tabel 3.3 Evaluasi Komparatif Opsi Simulator Jaringan.....	40
Tabel 3.4 Evaluasi Komparatif Arsitektur GNN untuk <i>Selective Forwarding</i>	41
Tabel 3.5 Perancangan Grid Parameter Simulasi.....	42
Tabel 3.6 Konfigurasi Arsitektur Model LoRaMeshGAT	44
Tabel 3.7 Rancangan Pengujian Hipotesis	49
Tabel 3.8 Spesifikasi Perangkat Keras	52
Tabel 3.9 Perangkat Lunak dan Dependensi.....	53
Tabel 3.10 Jadwal Penelitian.....	54
Tabel 4.1 Statistik Utama Dataset Simulasi <i>Baseline</i>	64
Tabel 4.2 Konfigurasi Lengkap Arsitektur Model LoRaMeshGAT	68
Tabel 4.3 Dinamika Pelatihan Model LoRaMeshGAT.....	70
Tabel 4.4 Metrik Performa Klasifikasi <i>Edge</i> model LoRaMeshGAT	74
Tabel 4.5 Perbandingan Efisiensi <i>Routing Baseline</i> dengan model LoRaMeshGAT	77
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Hipotesis 1 (PDR).....	79
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Hipotesis 2 (TX Overhead).....	81
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Hipotesis 3 (Latensi <i>End-to-End</i>)	83
Tabel 4.9 Hasil Pengujian Hipotesis 4 (Efisiensi Energi).....	86
Tabel 4.10 Analisis Performa per Spreading Factor	87
Tabel 4.11 Analisis Performa per Jumlah Node (Kapal)	89
Tabel 4.12 Analisis Performa per Luas Area Operasi.....	89
Tabel 4.13 Analisis Performa per Ukuran Payload SOS	90
Tabel 4.14 Ringkasan Analisis Duty Cycle	92
Tabel 4.15 Ringkasan Komprehensif Hasil Penelitian	93

DAFTAR RUMUS

Rumus (2.1) penghitungan nilai RSSI	11
Rumus (2.2) penghitungan nilai SNR	12
Rumus (2.3) penghitungan nilai <i>Time on Air</i>	13
Rumus (2.4) penghitungan nilai <i>Coding Rate</i>	13
Rumus (2.5) penghitungan nilai <i>Payload</i>	14
Rumus (2.6) penghitungan nilai <i>Air Data Rate</i>	15
Rumus (2.7) penghitungan nilai <i>Packet Delivery Ratio</i> (PDR)	17
Rumus (2.8) penghitungan nilai Latensi	19
Rumus (2.9) penghitungan nilai Energi per-hop	19
Rumus (2.10) penghitungan transformasi linier pada model GAT	24
Rumus (2.11) pembentukan pasangan <i>node</i> pada model GAT	24
Rumus (2.12) pembentukan skor atensi pada model GAT	24
Rumus (2.13) penghitungan normalisasi <i>softmax</i> untuk koefisien atensi pada model GAT	25
Rumus (2.14) agregasi fitur bobot tetangga dengan bobot atensi pada model GAT	25
Rumus (2.15) penghitungan <i>focal loss</i> untuk pelatihan model GAT	25
Rumus (2.16) penghitungan <i>total loss</i> atas semua edge untuk pelatihan model GAT	25
Rumus (3.1) <i>Haversine</i>	37
Rumus (3.2) penghitungan jumlah label per-edge	38
Rumus (3.3) penghitungan nilai selisih berpasangan	50
Rumus (3.4) penghitungan nilai uji normalitas <i>Shapiro-Wilk</i>	51
Rumus (3.5) penghitungan nilai uji <i>Wilcoxon Signed-Rank</i>	51
Rumus (3.6) penghitungan nilai <i>Effect Size Rank-Biserial r</i>	52
Rumus (3.7) penghitungan estimasi peluang keunggulan (<i>Probability of Superiority</i>)	52

DAFTAR ISTILAH

Istilah	Definisi singkat
<i>Node</i>	Titik atau elemen dalam jaringan (seperti kapal nelayan atau stasiun pantai) yang berfungsi sebagai pengirim, penerima, atau penerus (<i>relay</i>) paket data.
<i>Hop</i>	Satu lompatan transmisi paket data dari satu <i>node</i> ke <i>node</i> berikutnya dalam sebuah jalur komunikasi <i>multi-hop</i> .
<i>Relay</i>	Fungsi pada <i>node</i> untuk menerima paket data dan meneruskannya ke <i>node</i> lain yang berada di luar jangkauan pengirim awal guna memperluas area jaringan.
<i>Flooding</i>	Teknik penyiaran (<i>broadcast</i>) konvensional di mana setiap <i>node</i> meneruskan paket ke semua tetangganya tanpa adanya penyaringan atau pemilihan jalur khusus.
<i>Broadcast Storm</i>	Fenomena merugikan ketika banyak <i>node</i> melakukan <i>relay</i> paket (<i>flooding</i>) secara serentak, sehingga menyebabkan tabrakan sinyal, kepadatan kanal, dan latensi tinggi.
<i>Selective Forwarding</i>	Kebijakan cerdas di mana <i>node</i> secara mandiri memutuskan apakah akan meneruskan (<i>forward</i>) atau mengabaikan paket berdasarkan kondisi jaringan untuk mengurangi beban komunikasi.
LoRa (<i>Long Range</i>)	Teknologi komunikasi nirkabel berbasis LPWAN yang mampu mentransmisikan data jarak jauh dengan ketahanan tinggi dan konsumsi daya yang sangat rendah.
GAT (<i>Graph Attention Network</i>)	Model <i>deep learning</i> yang mengolah data berbentuk graf dengan mempelajari "bobot atensi" secara dinamis, digunakan dalam penelitian ini untuk menilai kelayakan rute secara adaptif.
PDR (<i>Packet Delivery Ratio</i>)	Metrik keandalan jaringan yang mengukur persentase jumlah paket darurat (SOS) yang berhasil diterima di pantai dibandingkan dengan total paket yang dikirim kapal.
<i>Overhead</i>	Beban tambahan pada jaringan (seperti transmisi ekstra atau jumlah hop yang redundan) yang tidak efisien dan muncul akibat mekanisme penyiaran paket yang kurang optimal.
SF (<i>Spreading Factor</i>)	Parameter LoRa yang menentukan jangkauan dan durasi sinyal. Nilai SF yang tinggi menjangkau area lebih jauh namun memakan waktu lebih lama dan memperlambat laju data.

ToA (<i>Time on Air</i>)	Durasi transmisi sebuah paket ketika mengudara. Semakin besar paket atau semakin tinggi nilai SF, maka waktu <i>ToA</i> akan semakin lama.
TTL (<i>Time To Live</i>)	Batas maksimal jumlah lompatan (<i>hop</i>) sebuah paket. Setiap kali diteruskan, TTL berkurang satu; jika habis, paket dihentikan agar tidak menyebar tanpa ujung.
RSSI (<i>Received Signal Strength Indicator</i>)	Ukuran yang merepresentasikan seberapa kuat sinyal radio yang diterima oleh suatu perangkat, diukur dalam satuan desibel-miliwatt (dBm).
SNR (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>)	Perbandingan antara kekuatan sinyal yang diterima dengan besaran kebisingan latar (<i>noise</i>), menentukan kualitas data dan kelayakan dekode sinyal.
<i>Seed</i>	Nilai inisialisasi awal pada program simulasi yang digunakan untuk menghasilkan kondisi acak (seperti posisi kapal) secara deterministik agar eksperimen dapat direplikasi.