

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah berhasil merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem optimasi *routing broadcast* berbasis *Graph Attention Network* (GAT) pada jaringan *LoRa Mesh* untuk komunikasi darurat kapal nelayan. Berdasarkan hasil simulasi, pelatihan model, dan pengujian hipotesis menggunakan prosedur statistik berpasangan, dapat ditarik tiga kesimpulan utama yang secara langsung menjawab rumusan masalah penelitian:

5.1. Kesimpulan

5.1.1. Karakteristik Komunikasi Darurat dan Parameter Jaringan

Eksperimen berskala besar melalui 8.100 *runs* simulasi pada ns-3.41 mandiri menunjukkan bahwa komunikasi darurat via *flooding* tradisional sangat rentan terhadap *broadcast storm*. Mekanisme *deduplication* (*seen-packet table*) terbukti krusial karena mampu mereduksi rekaman data redundan hingga 99,9%. Variasi parameter fisik secara empiris mengonfirmasi batasan kanal radio maritim, di mana skenario kritis terjadi pada area luas (50×50 km) menggunakan SF7 yang menurunkan PDR *baseline* hingga menyentuh angka 15,8%. Selain itu, *payload* besar pada SF12 teridentifikasi sebagai konsumen energi terbesar akibat durasi *Time-on-Air* (ToA) yang panjang. Terkait evaluasi kepatuhan regulasi *duty cycle* 1% AS923 ((KOMINFO) 2024), berjalannya fungsi *deduplication* secara optimal membuat metode *baseline* kini menghasilkan rata-rata *airtime* sebesar 0,935 detik per *node* (0,94%), yang berarti secara teknis telah mematuhi batas legal aturan tersebut. Meskipun demikian, pengoperasian pada level 0,94% ini sangat mendekati ambang batas kritis pelanggaran, sehingga penerapan optimasi jaringan yang lebih selektif tetap krusial untuk menjaga stabilitas dan skalabilitas jika kepadatan armada kapal meningkat.

5.1.2. Adaptasi Pemodelan Graf dan Arsitektur GAT

Jaringan *LoRa Mesh* maritim berhasil dimodelkan ke dalam struktur graf objek *PyTorch Geometric* menggunakan 11 fitur *node* dan 8 fitur *edge*. Arsitektur model *LoRaMeshGAT* yang terdiri atas *Node Encoder*, 3 lapisan *GATConv* dengan 4 *attention heads*, dan *EdgeScoringMLP* (total 29.969 parameter) terbukti mampu mempelajari kebijakan *selective forwarding* secara mandiri. Menggunakan data uji (*test set* dari *seed* 28–30), model menghasilkan performa klasifikasi yang tinggi dan seimbang tanpa gejala *overfitting*, dengan capaian *F1-Score* 90,70%, akurasi 90,00%, *Precision* 89,47%, dan *Recall* 91,96%. Hasil ini membuktikan bahwa GAT mampu menghasilkan keputusan *forward/skip* yang akurat murni dari parameter fisik kanal radio (RSSI/SNR) tanpa memerlukan akses langsung ke informasi geografis (bebas *data leakage*).

5.1.3. Perbandingan Performa Kebijakan GAT vs Baseline

Analisis statistik inferensial menggunakan uji *Wilcoxon signed-rank* pada taraf $\alpha = 0,05$ membuktikan bahwa kebijakan GAT memberikan dampak praktis yang sangat besar (*Effect Size* $r_c = 1,0000$; Peluang Keunggulan $PS_{dep} = 100\%$) dengan diterimanya tiga dari empat hipotesis utama:

1. Keandalan (H1 Diterima): GAT secara signifikan meningkatkan rata-rata PDR dari 85,00% menjadi 89,20% ($p = 0,000000$). Lompatan performa tercatat pada skenario jaringan area luas (40×40 km), di mana PDR meningkat dari 73,7% menjadi 84,2% (meningkat +10,5 poin persen), serta pada area ekstrem (50×50 km) yang meningkat dari 62,1% menjadi 70,1%
2. *Overhead* Transmisi (H2 Diterima): Jumlah operasi relay per kejadian SOS terpengkas sebanyak 4,8% (dari 15,88 menjadi 15,11 operasi; $p = 0,000000$). Pengurangan yang presisi ini secara langsung menurunkan beban akumulasi *airtime* spektrum, sehingga mengamankan status kepatuhan perangkat terhadap regulasi *duty cycle* AS923 dengan menekan konsumsi waktu mengudara dari 0,94% menjadi 0,89% (menjauhkan perangkat dari ambang batas kritis pelanggaran 1%).
3. Latensi Jaringan (H3 Gagal Diterima): Kebijakan GAT mengalami sedikit perlambatan latensi sebesar +30,11 ms atau +1,3% (menjadi 2.274,95 ms; $p = 1,000000$) karena sifat selektifnya yang mengeliminasi beberapa rute acak sekunder. Hambatan kecil ini bukan kegagalan algoritma, melainkan kompensasi logis (*trade-off*) demi tercapainya efisiensi energi dan keandalan tingkat tinggi pada topologi *mesh*.
4. Konsumsi Energi (H4 Diterima): Konsumsi daya jaringan berhasil dihemat sebesar 33,8% (dari 9.988,96 mJ menjadi 6.612,28 mJ; $p = 0,000000$), dengan reduksi absolut terbesar pada konfigurasi SF12 (menghemat 8.322,05 mJ/kejadian) yang secara konsisten memperpanjang usia baterai perangkat *edge* kapal nelayan

Secara keseluruhan, model LoRaMeshGAT memenuhi seluruh kriteria keberhasilan DSR dan dinyatakan sebagai solusi cerdas yang sangat layak serta efektif untuk mengoptimalkan jaringan komunikasi darurat maritim.

5.2. Saran

Berdasarkan temuan penelitian, terdapat tiga arah pengembangan lanjutan yang direkomendasikan untuk meningkatkan kesiapan sistem menuju pengembangan atau implementasi.

5.2.1. Implementasi dan Validasi Fisik di Lapangan

Penelitian ini seluruhnya berbasis simulasi menggunakan ns-3 versi 3.41 dengan model propagasi *log-distance path loss* ($n = 2,4$, $\sigma = 3$ dB). Meskipun parameter tersebut telah dikalibrasi berdasarkan referensi pengujian lapangan (Khan *et al.* 2024), model propagasi deterministik tidak dapat sepenuhnya merepresentasikan kondisi kanal maritim nyata yang dipengaruhi oleh dinamika gelombang laut, variasi angin, pantul *multipath* dari lambung kapal besar, dan perubahan ketinggian antena akibat guncangan kapal.

Disarankan untuk melakukan validasi lapangan menggunakan perangkat LoRa berbasis SX1276 atau SX1262 yang diimplementasikan pada mikrokontroler seperti ESP32 atau Raspberry Pi dengan modul LoRa. Metode *deployment* yang direkomendasikan adalah dengan memasang beberapa unit di atas kapal nelayan operasional di perairan pesisir Indonesia, misalnya di Teluk Jakarta atau Pantai Utara Jawa, dan mencatat data RSSI, SNR, serta keberhasilan pengiriman SOS secara riil. Data lapangan tersebut kemudian dapat digunakan untuk melatih ulang atau *fine-tune* model LoRaMeshGAT guna meningkatkan akurasi pada kondisi nyata. Penelitian serupa oleh (Jiang *et al.* 2022) menunjukkan bahwa model GNN secara terbukti efektif dalam optimalisasi kondisi berbagai topologi jaringan, dengan proses *deployment* yang cepat.

Untuk implementasi fisik, bobot model LoRaMeshGAT yang hanya memiliki 29.969 parameter dapat dieksekusi pada perangkat *edge computing* berdaya rendah seperti NVIDIA Jetson Nano atau bahkan mikrokontroler STM32H7 dengan akselerator *floating-point unit*. Ukuran model yang kompak (≈ 3 MB dalam format *float32*) menjadikannya layak untuk *deployment* on-device tanpa bergantung pada konektivitas awan (*cloud*), yang krusial untuk operasional di tengah laut yang jauh dari infrastruktur internet.

5.2.2. Integrasi dengan Protokol MAC untuk *Duty Cycle*

Meskipun kebijakan *selective forwarding* GAT telah berhasil mengamankan status kepatuhan perangkat terhadap regulasi *duty cycle* AS923 (menekan konsumsi waktu mengudara menjadi 0,89%), nilai tersebut masih berada cukup dekat dengan ambang batas kritis 1%. Apabila terjadi eskalasi jumlah armada kapal nelayan secara masif di masa depan, akumulasi kepadatan transmisi berpotensi kembali menekan batas regulasi tersebut. Untuk mengantisipasi skalabilitas jaringan tanpa mengorbankan keandalan, disarankan untuk mengintegrasikan model GAT dengan mekanisme koordinasi di lapisan *Medium Access Control* (MAC).

Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah adaptasi *Time-Slotted Channel Hopping* (TSCH) untuk LoRa *Mesh*. Pada mekanisme ini, setiap *node* hanya diizinkan mentransmisikan pada *slot* waktu yang telah dijadwalkan secara

deterministik, sehingga total *airtime* dapat dibatasi secara presisi. Penelitian oleh (Rekha dan Pavithra 2025) menunjukkan bahwa kombinasi *selective forwarding* berbasis kecerdasan buatan dengan penjadwalan TSCH mampu mengurangi nilai dengan ambang batas *duty cycle* hingga lebih dari 90% pada jaringan LoRa *mesh* perkotaan. Dalam konteks penelitian ini, jadwal TSCH dapat disusun berdasarkan *output* σ_{ij} dari model GAT, yaitu *edge* dengan skor tinggi diprioritaskan mendapatkan *slot* transmisi lebih awal, sedangkan *edge* dengan skor rendah dialokasikan *slot* dengan jeda lebih panjang atau diabaikan sama sekali.

Pendekatan alternatif yang lebih mudah diimplementasikan pada jaringan yang bersifat *ad hoc* adalah *Adaptive Duty Cycle Management* (ADCM), yang dapat mengatur batas *duty cycle* secara dinamis per-*node* berdasarkan kondisi kepadatan jaringan (Sarang dan Member 2023). Dalam skenario komunikasi SOS darurat, mekanisme ADCM dapat diatur untuk memberikan kelonggaran *duty cycle* sementara guna memastikan paket darurat terkirim, lalu segera membatasi kembali transmisi setelah pengiriman selesai untuk menyeimbangkan beban spektrum frekuensi.

5.2.3. Pengembangan Komunikasi Dua Arah

Sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini bersifat searah (*unidirectional*): pesan SOS mengalir dari kapal nelayan menuju stasiun pantai. Dalam skenario operasional nyata, kemampuan stasiun pantai untuk mengirimkan respons konfirmasi atau instruksi penyelamatan kembali ke kapal yang membutuhkan pertolongan merupakan fitur yang sangat diperlukan. Ketiadaan konfirmasi menyebabkan nelayan tidak dapat mengetahui apakah pesan SOS-nya telah diterima, yang dapat memunculkan perilaku pengiriman berulang yang justru memperparah pelanggaran *duty cycle*.

Pengembangan komunikasi dua arah dapat dilakukan melalui dua pendekatan. Pertama, model GAT dapat diperluas untuk menangani dua tugas secara bersamaan: memilih *relay* terbaik untuk pesan SOS dari kapal ke pantai (*uplink*), sekaligus memilih *relay* terbaik untuk pesan konfirmasi dari pantai ke kapal (*downlink*). Karena kondisi kanal LoRa bersifat *reciprocal* (RSSI dari A ke B kira-kira sama dengan RSSI dari B ke A dalam kondisi stasioner), bobot atensi α_{ij} yang dipelajari model untuk arah *uplink* dapat digunakan kembali dengan modifikasi minimal untuk arah *downlink*.

Kedua, dapat dikembangkan protokol *acknowledgement* ringkas yang hanya mengirimkan paket ACK berukuran sangat kecil (misalnya 5–10 *byte* yang hanya memuat *packet ID* dan koordinat kapal) dari stasiun pantai menuju sumber SOS melalui jalur *reverse relay*. Paket ACK yang kecil ini memiliki ToA yang pendek (sekitar 26 ms untuk SF7/BW125), sehingga dampaknya terhadap *duty cycle* sangat minimal. Penelitian Lora-MACx oleh (Xiao *et al.* 2023) menunjukkan bahwa

mekanisme ACK ringan semacam ini dapat meningkatkan keandalan pengiriman pada jaringan IoT *mesh* sebesar 23% dengan hanya menambahkan 4% beban *airtime* tambahan, suatu *trade-off* yang sangat menguntungkan untuk sistem komunikasi darurat.

Selain itu, komunikasi dua arah membuka peluang untuk mengintegrasikan mekanisme *cooperative spectrum sensing* di mana setiap kapal dapat melaporkan kondisi kanal radio yang diobservasinya kepada model GAT, sehingga model tidak hanya bergantung pada fitur fisik dari data simulasi historis melainkan dapat memperbarui keputusan routingsnya secara adaptif berdasarkan kondisi kanal nyata saat ini. Pendekatan *online learning* semacam ini merupakan arah penelitian yang sangat menjanjikan untuk meningkatkan kesiapan sistem terhadap variasi kondisi lingkungan yang tidak terduga (Balachander *et al.* 2024).