

**PEMODELAN ALGORITMA *Q-LEARNING* UNTUK PENENTUAN
RUTE EFISIEN PADA SIMULASI KOMUNIKASI DARURAT
JARINGAN LORA *MESH* KAPAL NELAYAN**



**RICO APRIYAN CHANIAGO
NIM.2210511103**

**S1 INFORMATIKA
FAKULTAS ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL “VETERAN” JAKARTA
JAKARTA
2026**

**PEMODELAN ALGORITMA *Q-LEARNING* UNTUK PENENTUAN
RUTE EFISIEN PADA SIMULASI KOMUNIKASI DARURAT
JARINGAN LORA *MESH* KAPAL NELAYAN**

sebagai salah satu syarat untuk melaksanakan
penelitian oleh mahasiswa pada
Program Studi S1 Informatika

**RICO APRIYAN CHANIAGO
NIM. 2210511103**

**S1 INFORMATIKA
FAKULTAS ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL “VETERAN” JAKARTA
JAKARTA
2026**

ABSTRAK

Tingginya angka kecelakaan pelayaran nelayan Indonesia mendorong kebutuhan sistem komunikasi darurat antarkapal yang andal di perairan lepas pantai. Jaringan LoRa *Mesh multi-hop* menjadi kandidat yang menjanjikan karena berdaya rendah dan tidak bergantung pada infrastruktur terpusat, namun metode *routing* konvensional seperti *Greedy geographic routing* kerap gagal saat kondisi kanal memburuk atau topologi kapal bergeser secara dinamis. Penelitian ini merancang dan mengevaluasi algoritma *Q-learning* sebagai kebijakan pemilihan rute adaptif pada jaringan LoRa *Mesh* antarkapal nelayan. *Agent* dirancang dengan *state space* 28 dimensi yang merepresentasikan tujuh kategori RSSI dan empat zona jarak ke *shore station*, empat aksi semantik pemilihan *relay*, serta mekanisme *retry* per hop maksimum dua kali. Simulasi dijalankan menggunakan NS-3.41 pada tiga skenario kepadatan jaringan (15, 20, dan 25 kapal) dalam area perairan 20 km × 20 km, dengan total 6.000 episode pelatihan dan 3.000 *run* evaluasi per metode. Hasil menunjukkan bahwa *Q-learning* mencapai *Packet Delivery Ratio* (PDR) sebesar 79,88%, melampaui *Greedy geographic routing* yang sebesar 45,06%, atau meningkat 34,82 poin persentase (77,28%) dengan ukuran efek yang sangat besar (Cohen's $d = 1,3698$). Selain itu, *Q-learning* meningkatkan RSSI rata-rata sebesar 1,4873 dBm dan SNR sebesar 14,41%, serta meningkatkan *Path Reliability* dari 0,4512 menjadi 0,8947 (+98,30%) dengan ukuran efek yang sangat besar (Cohen's $d = 2,3942$). Sebagai konsekuensi, *hop count*, latensi *end-to-end*, *Time on air* (ToA), dan konsumsi energi total masing-masing meningkat sebesar 82,52%, 32,60%, 32,60%, dan 32,60% sebagai bentuk *trade-off*. Meskipun demikian, konsumsi energi per paket yang berhasil mencapai *shore station* justru 52,36% lebih rendah dibandingkan *Greedy geographic routing*. Uji *robustness* pada 14 kondisi operasional yang berbeda menunjukkan bahwa *Q-learning* secara konsisten memberikan performa yang lebih baik dengan nilai $p < 0,001$. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan *Q-learning* berbasis RSSI layak diterapkan sebagai solusi *routing* adaptif untuk meningkatkan keandalan komunikasi darurat maritim pada jaringan LoRa *Mesh*.

Kata Kunci : *Greedy geographic routing* , Kapal Nelayan, Komunikasi Darurat, LoRa *Mesh*, *Q-learning*.

ABSTRACT

The high rate of fishing vessel accidents in Indonesia underscores the urgent need for reliable inter-vessel emergency communication systems in open-water environments. LoRa Mesh multi-hop networks present a promising solution due to their low power consumption and independence from centralized infrastructure; however, conventional routing methods such as Greedy geographic routing frequently fail under deteriorating channel conditions or dynamic network topology. This study designs and evaluates a Q-learning algorithm as an adaptive routing policy for LoRa Mesh networks among fishing vessels. The agent is built upon a 28-dimensional state space representing seven RSSI categories and four distance zones to the shore station, four semantic relay-selection actions, and a per-hop retry mechanism with a maximum of two attempts. Simulations were conducted using NS-3.41 across three network density scenarios (15, 20, and 25 vessels) within a 20 km × 20 km maritime area, comprising 6,000 training episodes and 3,000 evaluation runs per method. Results demonstrate that Q-learning achieves a Packet Delivery Ratio (PDR) of 79.88%, outperforming Greedy geographic routing at 45.06%, representing an absolute improvement of 34.82 percentage points (77.28%) with a very large effect size (Cohen's $d = 1.3698$). Furthermore, Q-learning improves the average RSSI by 1.49 dBm, increases SNR by 14.41%, and increases Path Reliability from 0.4512 to 0.8947 (+98.30%) with a very large effect size (Cohen's $d = 2.3942$). As a trade-off, hop count, end-to-end latency, Time on air (ToA), and total energy consumption increase by 82.52%, 32.60%, 32.60%, and 32.60%, respectively. Nevertheless, the energy consumed per successfully delivered packet is 52.36% lower than that of Greedy geographic routing. Robustness testing across 14 distinct operational conditions consistently confirms the superiority of Q-learning with $p < 0.001$. These findings demonstrate that an RSSI-based Q-learning approach is a viable adaptive routing solution for improving the reliability of maritime emergency communication systems over LoRa Mesh networks.

Keywords : Emergency Communication, Fishing Vessel, Greedy geographic routing , LoRa Mesh, Q-learning.

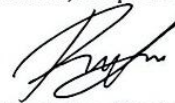
PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “PEMODELAN ALGORITMA *Q-LEARNING* UNTUK PENENTUAN RUTE EFISIEN PADA SIMULASI KOMUNIKASI DARURAT JARINGAN LORA *MESH* 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 proposal ini.

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

Jakarta, 30 April 2026



Rico Apriyan Chaniago

2210511103

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Rico Apriyan Chaniago

NIM : 2210511103

Tanggal : 24 Juli 2026

Judul : PEMODELAN ALGORITMA *Q-LEARNING* UNTUK PENENTUAN
Skripsi RUTE EFISIEN PADA SIMULASI KOMUNIKASI DARURAT
JARINGAN LORA *MESH* 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,



Rico Apriyan Chaniago

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Rico Apriyan Chaniago

NIM : 2210511103

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-Echange Royalty Free Right*) untuk publikasi dengan judul:

PEMODELAN ALGORITMA *Q-LEARNING* UNTUK PENENTUAN RUTE EFISIEN PADA SIMULASI KOMUNIKASI DARURAT JARINGAN LORA *MESH* 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 sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada Tanggal : 24 Juli
2026

Yang menyatakan,



Rico Apriyan Chaniago

LEMBAR PERSETUJUAN SIDANG TUGAS AKHIR SKRIPSI

LEMBAR PERSETUJUAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rico Apriyan Chaniago

NIM : 2210511103

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 :

PEMODELAN ALGORITMA Q-LEARNING UNTUK PENENTUAN RUTE EFISIEN
PADA SIMULASI KOMUNIKASI DARURAT JARINGAN LORA MESH KAPAL
NELAYAN

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

Jakarta, 12 Mei 2026

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I



Ditandatangani secara digital oleh:
Indra Permana Solihin

Verifikasi di design.upnvj.ac.id

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

Dosen Pembimbing II



Ditandatangani secara digital oleh:
Hamonangan Kinantan Prabu

Verifikasi di design.upnvj.ac.id

Hamonangan Kinantan Prabu, 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 : Pemodelan Algoritma *Q-Learning* untuk Penentuan Rute Efisien
pada Simulasi Komunikasi Darurat Jaringan LoRa *Mesh* Kapal
Nelayan
Nama : Rico Apriyan Chaniago
NIM : 2210511103
Program Studi : S1 Informatika

Disetujui oleh:

Penguji 1:
Dr. Widya Cholil, M.I.T

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:
14 Juli 2026



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “PEMODELAN ALGORITMA *Q-LEARNING* UNTUK PENENTUAN RUTE EFISIEN PADA SIMULASI KOMUNIKASI DARURAT JARINGAN LORA *MESH* KAPAL NELAYAN”. Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis memperoleh banyak bantuan, dukungan, serta bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua serta seluruh keluarga yang selalu mendukung penulis, memberikan dukungan doa dan semangat dalam penyelesaian tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Supriyanto, ST., M.Sc., IPM, selaku Dekan Fakultas Ilmu Komputer Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.
3. Bapak Dr. Ridwan Raafi'udin, S.Kom., M.Kom. selaku Kepala Program Studi S1 Informatika Fakultas Ilmu Komputer UPN Veteran Jakarta.
4. Bapak Nurhuda Maulana, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik saya pada Program Studi S1 Informatika Fakultas Ilmu Komputer UPN Veteran Jakarta.
5. Bapak Dr. Indra Permana Solihin, S.Kom., M.Kom. dan Bapak Hamonangan Kinantan Prabu, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah memberikan bimbingan secara teori maupun praktis dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Seluruh dosen Fakultas Ilmu Komputer UPN Veteran Jakarta yang telah memberikan ilmu yang sangat berharga dan bermanfaat selama masa perkuliahan.
7. Sahabat-sahabat terdekat penulis, Baskara, Ariza, Farhan, Fadawkas, Thaariq, Hasbul, Ridhan, Abdef dan teman-teman OSIS SMAN 38 Jakarta (dunem), yang telah memberikan dukungan moral selama penyelesaian tugas akhir ini.
8. Scuderia Ferrari *Formula 1 Team* dan olahraga *Tennis* yang secara tidak langsung telah memberikan hiburan serta membantu penulis dalam menjaga semangat selama proses penyusunan tugas akhir ini.
9. Semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kerja sama sehingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
10. Diri penulis sendiri, yang telah bertahan melewati setiap tantangan, bangkit dari setiap kesalahan, dan membuktikan bahwa kerja keras serta ketekunan tidak pernah mengkhianati hasil hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan penelitian ini di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca pada umumnya.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iii
PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA	v
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	vi
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vii
LEMBAR PERSETUJUAN SIDANG TUGAS AKHIR SKRIPSI.....	viii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL.....	xviii
DAFTAR <i>PSEUDOCODE</i>	xix
DAFTAR RUMUS	xx
DAFTAR ISTILAH	xxi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Batasan Masalah	4
1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian	9
1.5. Sistematika Penulisan	11
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	12
2.1. Komunikasi.....	12
2.1.1. Teknologi Komunikasi	12
2.1.2. Komunikasi Darurat	13
2.1.3. Komunikasi Jaringan.....	14

2.1.3.1.	<i>Unicast</i>	14
2.1.3.2.	<i>Broadcast</i>	15
2.1.3.3.	<i>Multicast</i>	16
2.1.3.4.	<i>Anycast</i>	17
2.2.	<i>Nelayan</i>	18
2.3.	<i>Lingkungan lepas pantai</i>	20
2.4.	<i>Shore station</i>	20
2.5.	<i>Greedy geographic routing</i>	21
2.6.	<i>Algoritma</i>	21
2.7.	<i>Reinforcement Learning</i>	22
2.8.	<i>Algoritma Q-learning</i>	23
2.8.1.	<i>Desain State space</i>	24
2.8.2.	<i>Desain Action space</i>	24
2.8.3.	ϵ -greedy	25
2.8.4.	<i>Reward Function</i>	25
2.8.5.	<i>Learning Rate</i>	26
2.8.6.	<i>Discount Factor</i>	27
2.8.7.	<i>Epsilon</i>	27
2.9.	<i>Pita Industrial, Scientific, Medical</i>	28
2.10.	<i>Chirp Spread Spectrum</i>	29
2.11.	<i>Processing Gain</i>	30
2.12.	<i>Long Range</i>	30
2.12.1.	<i>Long Range Mesh</i>	32
2.12.2.	<i>Long Range WAN</i>	34
2.12.3.	<i>Arsitektur Simulasi Jaringan Penelitian</i>	36
2.13.	<i>Network simulator 3</i>	37
2.14.	<i>End-device</i>	37
2.15.	<i>Relay</i>	38
2.16.	<i>Duty cycle</i>	39
2.17.	<i>Flooding terkontrol</i>	40

2.18.	<i>Random Waypoint</i>	40
2.19.	<i>Nakagami Fading Model</i>	41
2.20.	<i>Time on air</i>	42
2.21.	<i>Airtime</i>	43
2.22.	<i>Latensi</i>	43
2.23.	<i>Packet Delivery Ratio</i>	44
2.24.	<i>Hop count</i>	44
2.25.	<i>Path Reliability</i>	45
2.26.	<i>Payload</i>	46
2.27.	<i>Link Budget</i>	47
2.28.	<i>Spreading factor</i>	47
2.29.	<i>Bandwidth</i>	49
2.30.	<i>Coding Rate</i>	49
2.31.	<i>Transmit Power dan Receiver Power</i>	50
2.32.	<i>Received Signal Strength Indicator</i>	50
2.33.	<i>Signal to Noise Ratio</i>	51
2.34.	<i>Packet Reception Rate</i>	52
2.35.	<i>Time to Live</i>	52
2.36.	<i>Estimasi Energi</i>	53
2.37.	<i>Shapiro-Wilk Test</i>	54
2.38.	<i>Mann-Whitney U Test</i>	55
2.39.	<i>Welch's t-Test</i>	55
2.40.	<i>Robustness</i>	56
2.41.	<i>Penelitian Terdahulu</i>	57
BAB 3.	METODE PENELITIAN	64
3.1.	Tahapan Penelitian	65
3.1.1.	Analisis Masalah	65
3.1.2.	Perumusan Tujuan dan Kebutuhan	65
3.1.3.	Perancangan dan Pengembangan	66
3.1.4.	Demonstrasi	67

3.1.5.	Evaluasi	67
3.2.	Pengujian Hipotesis	68
3.3.	Lingkungan dan Alat Penelitian	70
3.3.1.	Lingkungan Perangkat Lunak	70
3.3.2.	Spesifikasi Perangkat Keras	71
3.4.	Jadwal Penelitian	72
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	73
4.1.	Pendahuluan Simulasi	73
4.2.	Tahapan Simulasi.....	75
4.2.1.	Analisis Masalah	75
4.2.2.	Perumusan Tujuan dan Kebutuhan	76
4.2.3.	Perancangan dan Pengembangan	78
4.2.4.	Demonstrasi	89
4.3.	Hasil Simulasi.....	96
4.3.1.	Ringkasan Hasil Komparatif.....	97
4.3.2.	Visualisasi <i>Packet Delivery Ratio</i> (PDR).....	97
4.3.3.	<i>Dahsboard</i> Metrik Performa	99
4.3.4.	Distribusi Statistik PDR	102
4.3.5.	Analisis <i>Trade-off</i> Performa.....	103
4.3.6.	Analisis RSSI dan <i>Hop count</i>	106
4.3.7.	Uji <i>Robustness</i>	108
4.3.8.	Profil Performa Multidimensi (<i>Radar chart</i>)	111
4.3.9.	Konvergensi Pelatihan <i>Q-learning</i>	113
4.3.10.	Analisis Efisiensi Energi	119
4.4.	Pengujian Hipotesis	123
4.4.1.	Hipotesis 1: <i>Packet Delivery Ratio</i> (PDR).....	123
4.4.2.	Hipotesis 2: Latensi <i>End-to-end</i>	124
4.4.3.	Hipotesis 3: <i>Hop count</i>	125
4.4.4.	Hipotesis 4: <i>Time on air</i> (ToA)	125
4.4.5.	Hipotesis 5: Estimasi Energi	126

4.4.6.	Hipotesis 6: RSSI Rata-Rata	127
4.4.7.	Hipotesis 7: SNR Rata-Rata.....	128
4.4.8.	Hipotesis 8: <i>Path Reliability</i>	128
4.4.9.	Ringkasan Hasil Seluruh Pengujian Hipotesis.....	129
4.5.	Pembahasan	130
4.5.1.	Interpretasi Keunggulan <i>Q-learning</i>	130
4.5.2.	Interpretasi <i>Trade-off</i>	131
4.5.3.	<i>Robustness</i> dan Generalisasi	132
BAB 5.	PENUTUP.....	133
5.1.	Kesimpulan.....	133
5.1.1.	Kesimpulan Utama.....	133
5.1.2.	Kesimpulan Umum	134
5.2.	Saran	134
5.2.1.	Saran untuk Penelitian Lanjutan	135
5.2.2.	Saran untuk Implementasi Praktis.....	136
5.3.	Penutup	137
DAFTAR PUSTAKA		138
LAMPIRAN		144
Lampiran 1.	Log Simulasi	144
Lampiran 2.	Aplikasi Simulasi	150
Lampiran 3.	Checklist Persyaratan Skripsi.....	151
Lampiran 4.	Riwayat Hidup	152
Lampiran 5.	Laporan Hasil Turnitin	153

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Data Jumlah Kecelakaan Pelayaran (KNKT 2024).....	1
Gambar 2.1 Perkembangan Teknologi Komunikasi (Komunikasi Temuan Terbesar Sejarah Manusia... 2024).....	13
Gambar 2.2 Visualisasi <i>Unicast</i> (Cicek 2021)	15
Gambar 2.3 Visualisasi <i>Broadcast</i> (Cicek 2021)	16
Gambar 2.4 Visualisasi <i>Multicast</i> (Cicek 2021)	17
Gambar 2.5 Visualisasi <i>Anycast</i> (Cicek 2021).....	18
Gambar 2.6 Data Jumlah Nelayan Indonesia (Nelayan KKP RI... 2024)	19
Gambar 2.7 <i>Reinforcement Learning</i> (Torres <i>et al.</i> 2022)	23
Gambar 2.8 Ilustrasi <i>Chirp Spread Spectrum</i> (LoRa Documentation...)	30
Gambar 2.9 LoRa vs Teknologi Komunikasi lainnya (Aldhaheeri <i>et al.</i> 2025)	31
Gambar 2.10 LoRa MAC dan PHY layers (Aldhaheeri <i>et al.</i> 2025).....	31
Gambar 2.11 Arsitektur berbasis LoRa untuk komunikasi <i>peer-to-peer</i> (Berto <i>et al.</i> 2021)	33
Gambar 2.12 Jaringan <i>Mesh</i> berbasis LoRa <i>peer-to-peer multi-hop</i> (Berto <i>et al.</i> 2021)	34
Gambar 2.13 Topologi jaringan LoRaWAN <i>star-of-stars</i> (Citoni <i>et al.</i> 2021).....	35
Gambar 2.14 Skema Simulasi Jaringan <i>Mesh Multi-hop</i> LoRa.....	36
Gambar 3.1 <i>Design Science Research Methodology</i> (Tuunanen <i>et al.</i> 2024).....	64
Gambar 4.1 Struktur <i>Payload</i> Paket SOS (21 Byte)	74
Gambar 4.2 Perbandingan PDR <i>Q-learning</i> vs <i>Greedy geographic routing</i> 15 Kapal	98
Gambar 4.3 Perbandingan PDR <i>Q-learning</i> vs <i>Greedy geographic routing</i> 20 Kapal	98
Gambar 4.4 Perbandingan PDR <i>Q-learning</i> vs <i>Greedy geographic routing</i> 25 Kapal	99
Gambar 4.5 <i>Dahsboard</i> Perbandingan Delapan Metrik Performa <i>Q-learning</i> vs <i>Greedy geographic routing</i>	101
Gambar 4.6 Distribusi Statistik PDR <i>Q-learning</i>	102
Gambar 4.7 Distribusi Statistik PDR <i>Greedy geographic routing</i>	102
Gambar 4.8 Analisis <i>Trade-off</i> PDR vs Latensi	103
Gambar 4.9 Analisis <i>Trade-off</i> PDR vs <i>Hop count</i>	104
Gambar 4.10 Analisis <i>Trade-off</i> PDR vs ToA.....	105
Gambar 4.11 Analisis <i>Trade-off</i> PDR vs Energi	106
Gambar 4.12 Distribusi RSSI <i>Q-learning</i> vs <i>Greedy geographic routing</i>	107
Gambar 4.13 Distribusi <i>Hop count</i> <i>Q-learning</i> vs <i>Greedy geographic routing</i>	108

Gambar 4.14 Hasil Uji <i>Robustness</i> Dimensi Kepadatan Kapal	109
Gambar 4.15 Hasil Uji <i>Robustness</i> Dimensi Jarak ke <i>Shore</i>	109
Gambar 4.16 Hasil Uji <i>Robustness</i> Dimensi Jenis SOS	110
Gambar 4.17 <i>Radar chart</i> Profil Performa Multidimensi <i>Q-learning</i> vs <i>Greedy geographic routing</i>	112
Gambar 4.18 Kurva Konvergensi PDR selama Pelatihan <i>Q-learning</i> (15 Kapal)....	113
Gambar 4.19 Kurva Konvergensi PDR selama Pelatihan <i>Q-learning</i> (20 Kapal)....	114
Gambar 4.20 Kurva Konvergensi PDR selama Pelatihan <i>Q-learning</i> (25 Kapal)....	114
Gambar 4.21 Kurva Konvergensi RSSI selama Pelatihan <i>Q-learning</i> (15 Kapal) ...	115
Gambar 4.22 Kurva Konvergensi RSSI selama Pelatihan <i>Q-learning</i> (20 Kapal) ...	115
Gambar 4.23 Kurva Konvergensi RSSI selama Pelatihan <i>Q-learning</i> (25 Kapal) ...	116
Gambar 4.24 Konvergensi semua Skenario <i>Q-learning</i> PDR	117
Gambar 4.25 Konvergensi semua Skenario <i>Q-learning</i> RSSI.....	117
Gambar 4.26 Konvergensi semua Skenario <i>Q-learning</i> Epsilon per Episode	118
Gambar 4.27 Energi Total per Run <i>Q-learning</i> vs <i>Greedy geographic routing</i>	120
Gambar 4.28 Energi per Paket Berhasil <i>Q-learning</i> vs <i>Greedy geographic routing</i>	120
Gambar 4.29 ROI Energi <i>Q-learning</i> vs <i>Greedy geographic routing</i>	121

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Batasan Masalah SOS Pesan Darurat.....	5
Tabel 1.2 Batasan Masalah Parameter Lingkungan Radio.....	5
Tabel 1.3 Batasan Masalah Desain <i>State space</i>	6
Tabel 1.4 Batasan Masalah Desain <i>Action space</i>	7
Tabel 1.5 Batasan Masalah <i>Reward Function</i>	7
Tabel 1.6 Batasan Masalah <i>Hyperparameter Q-learning</i>	8
Tabel 1.7 Batasan Masalah Skenario Simulasi	9
Tabel 2.1 Ringkasan Penelitian Terdahulu	57
Tabel 3.1 Tabel Lingkungan Perangkat Lunak.....	71
Tabel 3.2 Tabel Spesifikasi Perangkat Keras	72
Tabel 3.3 Rencana Jadwal Penelitian	72
Tabel 4.1 Parameter Konfigurasi Utama Simulasi	73
Tabel 4.2 Fungsi Komputasi Parameter Kanal LoRa.....	78
Tabel 4.3 Model PRR Bertingkat Tujuh Kategori Berbasis RSSI	79
Tabel 4.4 Desain <i>State space Q-learning (28 State)</i>	83
Tabel 4.5 Desain <i>Action space Q-learning (4 Aksi Semantik)</i>	83
Tabel 4.6 Fungsi <i>Reward Q-learning</i>	84
Tabel 4.7 Parameter <i>Hyperparameter Q-learning</i>	85
Tabel 4.8 Tabel Ringkasan Hasil Komparatif	97
Tabel 4.9 Ringkasan Hasil Uji <i>Robustness Q-learning vs Greedy geographic routing</i>	111
Tabel 4.10 Statistik Konvergensi PDR per Skenario Kapal.....	119
Tabel 4.11 Statistik Konvergensi RSSI per Skenario Kapal	119
Tabel 4.12 Perbandingan Energi per Skenario Kapal	122
Tabel 4.13 Perbandingan Energi per Perspektif.....	122
Tabel 4.14 Hasil Uji Hipotesis 1 (PDR)	123
Tabel 4.15 Hasil Uji Hipotesis 2 (Latensi).....	124
Tabel 4.16 Hasil Uji Hipotesis 3 (<i>Hop count</i>).....	125
Tabel 4.17 Hasil Uji Hipotesis 4 (ToA)	125
Tabel 4.18 Hasil Uji Hipotesis 5 (Energi).....	126
Tabel 4.19 Hasil Uji Hipotesis 6 (RSSI)	127
Tabel 4.20 Hasil Uji Hipotesis 7 (SNR).....	128
Tabel 4.21 Hasil Uji Hipotesis 8 (<i>Path Reliability</i>)	128
Tabel 4.22 Ringkasan Hasil Uji Hipotesis (8 Hipotesis).....	129

DAFTAR PSEUDOCODE

<i>Pseudocode 4.1 Greedy geographic routing (Baseline)</i>	80
<i>Pseudocode 4.2 Q-learning (Usulan)</i>	85
<i>Pseudocode 4.3 Alur Eksekusi Simulasi Greedy Geographic Routing (Shell Script)</i>	90
<i>Pseudocode 4.4 Alur Eksekusi Simulasi Training Q-Learning (Shell Script)</i>	90
<i>Pseudocode 4.5 Alur Eksekusi Simulasi Evaluasi Q-Learning (Shell Script)</i>	91
<i>Pseudocode 4.6 Alur Analisis Statistik Simulasi (Python Script)</i>	92
<i>Pseudocode 4.7 Alur Analisis Konvergensi Simulasi (Python Script)</i>	94
<i>Pseudocode 4.8 Alur Analisis Uji Robustness Simulasi (Python Script)</i>	95

DAFTAR RUMUS

Nomor	Judul Rumus	Halaman
2.1	Rumus <i>Q-learning</i>	23
2.2	Rumus Nakagami <i>Fading</i> Model	41
2.3	Rumus Reliabilitas Jalur	46
2.4	Rumus Probabilitas Keberhasilan <i>Hop</i> dengan Mekanisme <i>Retry</i>	46
2.5	Rumus Laju Simbol	47
2.6	Rumus Durasi Simbol	47
2.7	Rumus Laju Bit Efektif	48
2.8	Rumus Estimasi Energi	53

DAFTAR ISTILAH

Istilah	Definisi
<i>Design Science Research Methodology</i> (DSRM)	Kerangka riset rekayasa yang merancang, membangun, mendemonstrasikan, dan mengevaluasi artefak untuk memecahkan masalah.
<i>Reinforcement Learning</i> (RL)	Kerangka pembelajaran keputusan berbasis interaksi <i>agent</i> lingkungan dengan umpan balik <i>reward</i> .
<i>Q-learning</i>	Algoritma RL <i>off-policy</i> berbasis tabel-Q yang memaksimalkan <i>reward</i> jangka panjang tanpa model lingkungan.
<i>State space</i>	Ruang keadaan yang mencakup seluruh kemungkinan kondisi yang dapat diamati oleh <i>agent</i> dalam suatu lingkungan pada proses <i>Reinforcement Learning</i> .
<i>Action space</i>	Ruang aksi yang berisi seluruh tindakan yang dapat dilakukan oleh <i>agent</i> pada setiap keadaan dalam lingkungan.
ϵ -greedy	Kebijakan yang menyeimbangkan eksplorasi (ϵ pilih acak) dan eksploitasi ($1-\epsilon$ pilih <i>action</i> terbaik).
Eksplorasi (<i>Exploration</i>)	Proses <i>agent</i> mencoba aksi secara acak untuk memperoleh informasi baru mengenai lingkungan dan imbalan yang mungkin diperoleh.
Eksplorasi (<i>Exploitation</i>)	Proses <i>agent</i> dalam memilih aksi terbaik berdasarkan pengetahuan yang telah dipelajari sebelumnya untuk memaksimalkan imbalan yang diperoleh.
<i>Reward Function</i>	Aturan penilaian atas dampak <i>action</i> berupa positif atau negatif yang memandu pembaruan nilai-Q dan aturan pemilihan <i>action</i> untuk mengeksekusi keputusan.
<i>Learning Rate</i>	Parameter pembelajaran yang mengatur besarnya pengaruh informasi baru terhadap pembaruan nilai yang telah dipelajari sebelumnya.

<i>Discount Factor</i>	Parameter yang menentukan tingkat kepentingan imbalan di masa depan dibandingkan dengan imbalan saat ini dalam proses pengambilan keputusan.
<i>Epsilon</i>	Parameter dalam strategi <i>ϵ-greedy</i> yang mengatur probabilitas <i>agent</i> dalam melakukan eksplorasi dibandingkan eksploitasi.
<i>Chirp Spread Spectrum</i>	Teknik modulasi <i>spread spectrum</i> berbasis sinyal <i>chirp</i> yang memberi <i>processing gain</i> sehingga tahan derau atau interferensi.
<i>Processing Gain</i>	Penguatan efektif dari penyebaran sinyal ke <i>bandwidth</i> lebih lebar, meningkatkan ketahanan terhadap derau.
<i>Long Range (LoRa)</i>	Teknologi modulasi <i>Chirp Spread Spectrum</i> berdaya rendah untuk komunikasi jarak jauh di pita ISM.
<i>LoRa Mesh</i>	Jaringan LoRa <i>multi-hop</i> yang mana <i>node</i> dapat meneruskan paket <i>node</i> lain tanpa bergantung <i>gateway</i> .
<i>LoRaWAN</i>	Protokol jaringan <i>star-of-stars</i> untuk perangkat LoRa melalui <i>gateway</i> , <i>network</i> , <i>server</i> , hingga <i>application server</i> .
<i>End-device</i>	Perangkat ujung yang mengirim atau menerima data dan pada <i>Mesh</i> , perangkat ini juga dapat bertindak sebagai <i>relay</i> .
<i>Relay</i>	<i>Node</i> perantara yang meneruskan paket untuk memperluas jangkauan atau menghindari jalur buruk.
<i>Unicast</i>	Pengiriman satu ke satu ke alamat tujuan spesifik.
<i>Broadcast</i>	Pengiriman satu ke semua dalam jangkauan dan pada <i>multi-hop</i> dapat disiarkan ulang oleh penerima.
<i>Multicast</i>	Pengiriman satu ke banyak ke kelompok atau zona tertentu.
<i>Anycast</i>	Banyak lokasi mengumumkan satu alamat dan trafik diarahkan ke lokasi terdekat menurut <i>routing</i> .
<i>NS-3</i>	Simulator jaringan berbasis <i>event</i> diskrit untuk memodelkan dan mengevaluasi performa jaringan.
<i>Pita ISM</i>	Pita frekuensi tanpa lisensi khusus untuk perangkat nirkabel berdaya rendah.

<i>Spreading factor</i> (SF)	Parameter LoRa yang mengatur laju simbol.
<i>Bandwidth</i> (BW)	Lebar kanal yang memengaruhi <i>data rate</i> dan <i>Time on air</i> .
<i>Coding Rate</i> (CR)	Tingkat <i>Forward Error Correction</i> (FEC) yang menandakan jika CR lebih kuat, keandalan meningkat dengan konsekuensi <i>airtime</i> lebih panjang.
<i>Transmit Power</i> (Tx)	Daya pancar pemancar yang memengaruhi <i>link budget</i> dan jangkauan, dibatasi regulasi/energi.
<i>Link Budget</i>	Selisih daya pancar dan ambang sensitivitas minimum penerima yang menentukan jangkauan maksimum tautan.
<i>Receiver Power</i> (Rx)	Daya sinyal yang diterima yang menentukan keberhasilan dekode paket.
<i>Duty cycle</i>	Batas persentase waktu pemancar boleh <i>on-air</i> dalam periode tertentu.
<i>Time on air</i> (ToA)	Durasi paket berada di udara yang dipengaruhi <i>payload</i> , SF, BW, dan CR.
<i>Airtime</i>	Durasi kanal terpakai oleh satu transmisi paket, setara dengan <i>Time on air</i> dalam konteks pemakaian kanal bersama.
Latensi (<i>end-to-end Delay</i>)	Waktu tempuh total paket dari sumber ke tujuan termasuk antrian/penjadwalan.
<i>Packet Delivery Ratio</i> (PDR)	<i>Ratio</i> paket yang diterima terhadap yang dikirim yaitu indikator reliabilitas jaringan.
<i>Hop count</i>	Jumlah lompatan yang dilalui oleh paket data dari sumber menuju tujuan melalui <i>node</i> perantara dalam suatu jaringan.
<i>Path Reliability</i>	Tingkat keandalan suatu jalur komunikasi dalam menjamin keberhasilan pengiriman data dari sumber ke tujuan.
<i>Payload</i>	Muatan data <i>byte</i> dalam paket jika makin besar, ToA lebih lama.
<i>Received Signal Strength Indicator</i> (RSSI)	Indikator kuat-lemahnya daya sinyal yang diterima (dBm).

<i>Signal to Noise Ratio (SNR)</i>	Perbandingan daya sinyal terhadap derau yang menggambarkan kualitas penerimaan/kemampuan dekode.
<i>Packet Reception Rate (PRR)</i>	<i>Ratio</i> paket diterima pada suatu tautan/interval yang merupakan kualitas <i>link</i> lokal.
<i>Time to Live (TTL)</i>	Batas umur/ <i>hop</i> maksimum paket untuk mencegah <i>loop</i> dan <i>broadcast storm</i> .
Estimasi Energi	Perhitungan perkiraan jumlah energi yang digunakan oleh suatu sistem atau perangkat selama proses operasional.
<i>Random Waypoint</i>	Model mobilitas yang menggambarkan pergerakan <i>node</i> secara acak dari satu titik ke titik lainnya dengan kecepatan dan waktu jeda tertentu.
Nakagami <i>Fading</i> Model	Model statistik yang digunakan untuk menggambarkan variasi amplitudo sinyal akibat fenomena pelemahan sinyal (<i>Fading</i>) pada kanal komunikasi nirkabel.
Shapiro-Wilk <i>Test</i>	Metode uji statistik yang digunakan untuk menentukan apakah suatu data mengikuti distribusi normal.
Mann-Whitney U <i>Test</i>	Metode uji statistik non-parametrik yang digunakan untuk membandingkan dua kelompok independen tanpa mensyaratkan distribusi normal.
Welch's t- <i>Test</i>	Metode uji statistik yang digunakan untuk membandingkan rata-rata dua kelompok independen tanpa asumsi kesamaan varians.
<i>Robustness</i>	Ketangguhan sistem saat kondisi berubah tetap berkinerja baik.
<i>Hardware in the Loop (HIL)</i>	Uji prototipe yang memadukan sebagian modul nyata dengan simulasi.
<i>Line of sight (LoS)</i>	Kondisi jalur pandang langsung atau zona Fresnel bersih antara pemancar–penerima.