

ANALISIS KINERJA *ROUTING PROTOCOL FOR LOW-POWER AND LOSSY NETWORKS* PADA NODE BERGERAK PADA *WIRELESS SENSOR NETWORKS* DENGAN IPV6

TISNA SUDRAJAT



**PROGRAM MAGISTER ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Analisis Kinerja *Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks* pada *Node* Bergerak pada *Wireless Sensor Networks* dengan IPv6” 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 tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juni 2026

Tisna Sudrajat
G6501231063

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

RINGKASAN

TISNA SUDRAJAT. Analisis Kinerja *Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks* pada *Node* Bergerak pada *Wireless Sensor Networks* dengan IPv6. Dibimbing oleh SRI WAHJUNI dan HENDRA RAHMAWAN.

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) telah mendorong pemanfaatan *Wireless Sensor Networks* (WSN) pada berbagai bidang, termasuk sistem pemantauan ternak. Pada aplikasi tersebut, sensor digunakan untuk memantau kondisi ternak dan lingkungan secara *real-time* sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat. Sebagian besar implementasi WSN berbasis IoT beroperasi pada lingkungan *Low-power and Lossy Networks* (LLN), yaitu jaringan dengan keterbatasan daya, kapasitas pemrosesan, memori, dan kualitas komunikasi yang berubah-ubah. Untuk mendukung komunikasi berbasis IPv6 pada perangkat berdaya rendah digunakan teknologi *IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks* (6LoWPAN), sedangkan proses routing dilakukan menggunakan *Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks* (RPL) yang dikembangkan oleh *Internet Engineering Task Force* (IETF). Meskipun RPL telah menjadi protokol standar pada jaringan LLN, sebagian besar penelitian masih dilakukan pada kondisi jaringan statis, sedangkan pada aplikasi pemantauan ternak *node* sensor bergerak mengikuti aktivitas hewan sehingga menyebabkan perubahan topologi jaringan secara dinamis.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh model mobilitas *node* terhadap kinerja RPL pada jaringan WSN berbasis IPv6. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis pengaruh variasi jumlah *node* dan jangkauan transmisi terhadap performa jaringan serta hubungan antar metrik kinerja dalam menggambarkan stabilitas komunikasi pada jaringan LLN. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai karakteristik RPL pada kondisi mobilitas rendah yang merepresentasikan lingkungan peternakan serta menjadi referensi dalam pengembangan sistem pemantauan ternak berbasis IoT.

Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan simulasi dengan sistem operasi *Contiki-NG* dan simulator *Cooja*. Simulasi menggunakan *node Tmote Sky*, standar komunikasi IEEE 802.15.4, protokol transport UDP, serta protokol routing RPL yang menerapkan *Minimum Rank with Hysteresis Objective Function* (MRHOF) berbasis metrik *Expected Transmission Count* (ETX). Skenario simulasi menggunakan tiga model mobilitas, yaitu Static, Random Walk, dan Random Waypoint, dengan variasi jumlah *node* sebanyak 10, 30, 100, dan 150 *node*, jangkauan transmisi 30 meter dan 50 meter, area simulasi 100 × 100 meter, kecepatan *node* 1 m/s, serta waktu simulasi selama 600 detik. Setiap skenario dijalankan sebanyak 10 kali menggunakan *random seed* yang berbeda. Evaluasi dilakukan menggunakan enam metrik, yaitu *Packet Delivery Ratio* (PDR), *throughput*, *latency*, konsumsi energi, *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), dan *Expected Transmission Count* (ETX). Analisis korelasi juga dilakukan untuk mengetahui hubungan antar metrik dalam menggambarkan performa jaringan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model mobilitas berpengaruh terhadap performa RPL. Model Static memberikan performa paling stabil dengan nilai PDR yang lebih tinggi, *latency* yang lebih rendah, serta nilai ETX yang lebih kecil dibandingkan model mobilitas lainnya. Sebaliknya, model Random Walk



menunjukkan penurunan performa akibat perubahan topologi yang berlangsung secara terus-menerus sehingga meningkatkan frekuensi pergantian *parent* dan retransmisi paket. Model Random Waypoint menghasilkan performa yang berada di antara kedua model tersebut karena adanya waktu jeda (*pause time*) yang mengurangi intensitas perubahan topologi. Peningkatan jumlah *node* menyebabkan kepadatan jaringan bertambah sehingga PDR cenderung menurun, *latency* meningkat, dan kualitas jalur komunikasi menjadi kurang stabil. Sementara itu, jangkauan transmisi yang lebih besar mampu meningkatkan peluang keterhubungan antar *node* sehingga pada beberapa kondisi menghasilkan performa komunikasi yang lebih baik. Analisis korelasi menunjukkan bahwa peningkatan nilai ETX berkaitan dengan penurunan PDR, sedangkan *throughput*, *latency*, dan RSSI saling berkaitan dalam menggambarkan kualitas komunikasi pada jaringan.

Penelitian ini menunjukkan bahwa RPL dengan MRHOF masih mampu mempertahankan komunikasi pada kondisi mobilitas rendah, namun performanya menurun seiring meningkatnya mobilitas dan kepadatan jaringan. Temuan penelitian ini memberikan gambaran mengenai karakteristik RPL pada jaringan WSN berbasis IPv6 dengan *node* bergerak serta dapat menjadi dasar bagi pengembangan mekanisme routing yang lebih adaptif terhadap perubahan topologi pada aplikasi IoT, khususnya sistem pemantauan ternak berbasis sensor nirkabel.

Kata kunci: IPv6, mobilitas *node*, pemantauan sapi perah, *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*, *Wireless Sensor Networks*.

SUMMARY

TISNA SUDRAJAT. Performance Analysis of RPL on Mobile *Nodes* in WSN with IPv6. Supervised by SRI WAHJUNI, and HENDRA RAHMAWAN.

The rapid advancement of the *Internet of Things* (IoT) has accelerated the adoption of *Wireless Sensor Networks* (WSNs) in various application domains, including environmental monitoring, precision agriculture, healthcare, industrial automation, and livestock monitoring. In livestock farming, WSNs enable real-time monitoring of animal health, behavior, and environmental conditions through distributed sensor *nodes*, thereby supporting more effective farm management and early detection of health-related issues. Most IoT-based WSN applications operate in *Low-power and Lossy Networks* (LLNs), which are characterized by limited energy resources, constrained processing capabilities, restricted memory, and unstable wireless communication *links*. To support IPv6 communication in such constrained environments, *IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks* (6LoWPAN) is employed, while network routing is handled by the *Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks* (RPL), the standard routing protocol developed by the Internet Engineering Task Force (IETF). Although RPL has been extensively studied, most existing research has focused on static network scenarios, whereas practical livestock monitoring systems involve mobile sensor *nodes* attached to animals, resulting in dynamic network topology changes.

This study aims to analyze the impact of *node* mobility on the performance of RPL in IPv6-based WSNs. Furthermore, it investigates the effects of different network sizes and *transmission ranges* on routing performance, as well as the relationships among network performance metrics in representing communication stability within LLNs. The findings are expected to provide a better understanding of the behavior of standard RPL under low-mobility conditions representative of livestock monitoring environments and to serve as a reference for the development of more reliable IoT-based monitoring systems.

The research was conducted through simulation using the *Contiki-NG* operating system and the *Cooja* network simulator. Simulations employed *Tmote Sky* sensor *nodes*, the IEEE 802.15.4 communication standard, the UDP transport protocol, and the RPL routing protocol configured with the *Minimum Rank with Hysteresis Objective Function* (MRHOF) based on the *Expected Transmission Count* (ETX) routing metric. Three mobility models—Static, Random Walk, and Random Waypoint—were evaluated under different network configurations consisting of 10, 30, 100, and 150 sensor *nodes*, *transmission ranges* of 30 m and 50 m, a simulation area of 100 × 100 m, a *node* speed of 1 m/s, and a simulation duration of 600 seconds. Each simulation scenario was executed ten times using different random seeds to improve the reliability of the results. Network performance was evaluated using six metrics: *Packet Delivery Ratio* (PDR), *throughput*, end-to-end *latency*, *energy consumption*, *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), and *Expected Transmission Count* (ETX). In addition, correlation analysis was performed to examine the relationships among these performance metrics.



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

The simulation results demonstrate that *node* mobility significantly affects the performance of RPL. The Static mobility model achieved the most stable network performance, characterized by higher *Packet Delivery Ratio*, lower end-to-end *latency*, and smaller ETX values than the other mobility models. In contrast, the Random Walk model exhibited the lowest performance because continuous topology changes increased parent switching frequency and packet retransmissions. The Random Waypoint model produced intermediate performance due to the presence of pause intervals that reduced the frequency of topology changes. Increasing the number of sensor *nodes* led to higher network density, which consequently reduced *Packet Delivery Ratio*, increased *latency*, and degraded communication stability. Conversely, a larger *transmission range* improved *node* connectivity and, under several scenarios, enhanced overall communication performance. Correlation analysis further revealed that higher ETX values were associated with lower *Packet Delivery Ratios*, while *throughput*, *latency*, and RSSI collectively reflected the quality and stability of network communication.

Overall, the results indicate that RPL employing MRHOF remains capable of maintaining reliable communication under low-mobility conditions, although its performance gradually deteriorates as *node* mobility and network density increase. This study provides a comprehensive evaluation of standard RPL performance in dynamic IPv6-based WSN environments and contributes valuable insights for the design and optimization of adaptive routing mechanisms in IoT applications, particularly wireless sensor network-based livestock monitoring systems.

Keywords: Dairy cattle monitoring, IPv6, *node* mobility, *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*, *Wireless Sensor Networks*.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

ANALISIS KINERJA *ROUTING PROTOCOL FOR LOW-POWER AND LOSSY NETWORKS* PADA NODE BERGERAK PADA *WIRELESS SENSOR NETWORKS* DENGAN IPV6

TISNA SUDRAJAT

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada
Program Magister Ilmu Komputer

**PROGRAM MAGISTER ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:

1. Dr. Shelve Nidya Neyman S.Kom., M.Si.



Judul Tesis : Analisis Kinerja *Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks*
pada *Node Bergerak* pada *Wireless Sensor Networks* dengan IPv6
Nama : TISNA SUDRAJAT
NIM : G6501231063

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr.Ir. Sri Wahjuni, M.T.

Pembimbing 2:
Dr. Hendra Rahmawan, S.Kom, M.T.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Irman Hermadi, SKom MS, PhD
NIP 197503112006041009

Dekan Sekolah Sains Data, Matematika dan Informatika:
Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom
NIP. 196607021993021001

Tanggal Ujian:
(30 Juni 2026)

Tanggal Lulus:

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Maret 2025 sampai bulan Januari 2026 ini ialah evaluasi kinerja protokol routing RPL pada jaringan sensor nirkabel dengan *node* bergerak, dengan judul “Analisis Kinerja *Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks* pada *Node* Bergerak pada *Wireless Sensor Networks* dengan IPv6”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, ibu Dr. Ir. Sri Wahjuni, M.T. dan bapak Dr. Hendra Rahmawan, S.Kom, M.T. yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada komisi pembimbing, moderator seminar, dan penguji luar komisi pembimbing. Ungkapan terima kasih juga saya sampaikan kepada kedua orang tua, Bapak Soleh dan Ibu Sati, yang senantiasa memberikan dukungan serta doa kepada penulis. Ucapan terima kasih juga saya tujukan kepada istri tercinta, Evik Kurnaeti, atas motivasi dan bantuan yang diberikan dalam menyelesaikan penelitian ini. Tidak lupa, terima kasih kepada anak-anak saya, Kenzio Arsyi, Musa Zanki dan Kalyna Aisyah, atas pengertian dan kesabarannya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juni 2026

Tisna Sudrajat



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xi
PENDAHULUAN	12
1.1 Latar Belakang	12
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
1.5 Ruang Lingkup	3
TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Wireless Sensor Network (WSN)	4
2.2 <i>Low-power and Lossy Networks</i> (LLN)	5
2.3 <i>Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks</i> (RPL)	6
2.4 <i>Objective Function</i> pada RPL	12
2.5 <i>Objective Function Zero</i> (OF0)	12
2.6 <i>Minimum Rank with Hysteresis Objective Function</i> (MRHOF)	12
2.7 Model Mobilitas	13
2.8 Metrik Evaluasi Kinerja Jaringan RPL	Error! Bookmark not defined.
2.9 Simulator <i>Cooja</i>	16
METODE	18
3.1 Perencanaan Penelitian	18
3.2 Tahap Perancangan Simulasi	19
3.3 Tahap Pelaksanaan Simulasi	21
3.4 Tahap Analisis dan Evaluasi	22
3.5 Tahap Penarikan Kesimpulan dan Penyusunan Laporan	23
HASIL DAN PEMBAHASAN	24
4.1 Pengaruh Model Mobilitas <i>Node</i>	24
4.2 Dampak Skala Jaringan dan Jangkauan Transmisi	29
4.3 Korelasi Antarmetrik	Error! Bookmark not defined.
SIMPULAN DAN SARAN	34
5.1 Simpulan	34
5.2 Saran	34
DAFTAR PUSTAKA	35
RIWAYAT HIDUP	38



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR TABEL

1	Perbandingan Simulator Jaringan (Thamizhselvan <i>et al.</i> 2020)	17
2	Skenario Simulasi	20
3	Parameter Simulasi	21

DAFTAR GAMBAR

1	Struktur WSN-IoT (Zijie <i>et al.</i> 2023)	4
2	Lapisan protokol IoT (Rahman <i>et al.</i> 2024)	7
3	Ilustrasi Berbagai Operasi Mekanisme RPL (Lamaazi <i>et al.</i> 2018).	9
4	Format Pesan Kontrol RPL (Kaviani dan Soltanaghaei 2022)	11
5	Urutan Pertukaran Pesan RPL (Solapure dan Kenchannavar 2020)	11
6	Diagram Alir Penelitian	18
7	Topologi jaringan simulasi yang digunakan pada penelitian	20
8	Pengaruh mobilitas terhadap PDR	25
9	Pengaruh mobilitas terhadap <i>throughput</i>	25
10	Pengaruh mobilitas terhadap <i>latency</i>	26
11	Pengaruh mobilitas terhadap konsumsi energi	28
12	Pengaruh mobilitas terhadap RSSI	28
13	Pengaruh mobilitas terhadap ETX	28
14	Pengaruh skala jaringan terhadap PDR	30
15	Pengaruh skala jaringan terhadap <i>throughput</i>	30
16	Pengaruh skala jaringan terhadap <i>latency</i>	32
17	Pengaruh skala jaringan terhadap konsumsi energi	32
18	<i>Heatmap</i> korelasi antarmetrik kinerja jaringan	33