

Analisis Kinerja Protokol Routing RPL pada Simulator Cooja

I Nyoman Rudy Hendrawan

STIKOM Bali

Jl. Raya Puputan No. 86, Denpasar, Bali

e-mail: rudyhendrawan@stikom-bali.ac.id

Abstrak

Perangkat tertanam memiliki keterbatasan energi, dimana penggunaan energi pada perangkat tertanam berperan penting terhadap kinerja dari WSN. Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL) adalah protokol routing standar yang dirancang secara khusus untuk perangkat WSN berdaya rendah, sehingga perangkat tersebut dapat terhubung langsung dengan jaringan Internet. Kinerja dari RPL mempengaruhi penggunaan energi pada perangkat WSN, sehingga kinerja protokol routing dan penggunaan energi adalah parameter kunci dari kinerja keseluruhan WSN. Oleh karena itu, untuk mengetahui seberapa besar pengaruh kinerja RPL terhadap penggunaan energi pada perangkat tertanam dilakukan penelitian eksperimental pengukuran kinerja WSN berdasarkan kinerja dari protokol routing RPL dan penggunaan energinya itu sendiri. Kinerja protokol routing diukur berdasarkan parameter total paket jaringan yang diterima, rata-rata paket jaringan yang diterima oleh setiap node, total paket jaringan yang hilang, rata-rata paket jaringan yang hilang di setiap node, rata-rata routing metric, dan rata-rata Expected Transmission Count (ETX). Penelitian ini juga dilakukan pada lingkup simulasi dengan simulator Cooja, dimana pada simulasi tersebut dilakukan dua skenario simulasi berdasarkan topologi jaringan dan rasio transmisi (Tx/Rx). Hasil pengujian menunjukkan bahwa topologi jaringan tidak mempengaruhi kinerja WSN secara signifikan, namun rasio transmisi dapat menurunkan kinerja routing protokol dan meningkatkan penggunaan energi secara signifikan disetiap skenario pengujian.

Kata kunci: WSN, RPL, Simulator Cooja

Abstract

Embedded device has limited energy, where energy usage on embedded devices are instrumental towards the performance of the WSN. Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL) is a standard routing protocol that is designed specifically for low-power WSN device, so that the device can be directly connected to the Internet. The performance of the RPL affects energy usage on the device, hence the performance of the WSN routing protocols and the use of energy is the key parameters of the overall performance of WSN. Therefore, to know how much impact of the performance of RPL against the energy usage on an embedded device, we conducted experimental research to measure WSN routing protocols performance. The performance is measured based on the total received network packet, average received packet by individual nodes, total lost packet, average lost packet by individual node, average routing metric, and average Expected Transmission Count (ETX). Two different scenarios are implemented using the Cooja Simulator based on network topology and transmission ratio (Tx/Rx). The simulation result shows that the network topology does not affect the performance of the WSN significantly, however the transmission ratio degrade the routing protocols performance and increase the energy usage significantly in all scenarios.

Keywords: WSN, RPL, Simulator Cooja

1. Pendahuluan

Teknologi Wireless Sensor Network (WSN) melibatkan banyak perangkat komunikasi, sehingga teknologi WSN cenderung sangat heterogen, dimana teknologi ini umumnya melibatkan perangkat tertanam (*embedded device*) atau mikrokontroler, hingga perangkat sensor. Perkembangan dari teknologi WSN menghasilkan paradigma baru yang saat ini dikenal sebagai *Internet of Things* (IoT). Perangkat tertanam memiliki keterbatasan energi, sehingga perangkat pada WSN mentransmisikan sinyal dengan

daya rendah dan komputasi yang rendah juga. Untuk memfasilitasi konektivitas WSN dan Internet maka *Internet Engineering Task Force* (IETF) membentuk kelompok kerja IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN). Mereka mengembangkan standar protokol *routing* baru dengan nama IPv6 *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Network* (RPL) [1].

Beberapa contoh perangkat yang dapat menggunakan protokol *routing* RPL adalah *MicaZ*, *Zolertia*, *Sky*, dan *ESB*. Perangkat-perangkat ini dapat disimulasikan melalui simulator Cooja. Penggunaan simulator dapat berperan penting dalam hal proses *prototyping* dan pengujian skala besar dibandingkan dengan yang dilakukan di dunia nyata [2][3]. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan suatu simulasi penggunaan energi pada perangkat sensor *Zolertia*. Penelitian penggunaan energi sangat kompleks jika dilakukan pada dunia nyata, karena memerlukan banyak pertimbangan parameter lingkungan penelitian. Namun dengan menggunakan simulator, penulis dapat membatasi parameter-parameter tersebut sehingga lingkungan penelitian menjadi terkendali serta bisa mendapatkan output yang dikehendaki.

2. Penelitian Terkait

Pada bagian ini disajikan beberapa penelitian terkait dengan penelitian yang telah dilakukan. Penelitian-penelitian tersebut adalah penelitian yang melibatkan simulator Cooja. Penelitian oleh [4] melakukan perbandingan antara simulator Cooja dan simulator WSN [5][6]. Peneliti melakukan dua eksperimen terhadap simulator tersebut, pertama melakukan eksperimen kinerja *mobile sink* pada WSN untuk mengetahui kemampuan sensor dalam memperpanjang waktu hidup dari jaringan. Eksperimen kedua adalah melakukan perbandingan kinerja dari WSN yang disimulasikan oleh kedua simulator. Berdasarkan hasil penelitiannya dijelaskan bahwa simulator WSN memiliki kemampuan mensimulasikan mobilitas pada *node sink*, sedangkan simulator Cooja memiliki fitur Powerline Communication Networks (PLC).

Penelitian oleh [7] dilakukan analisis kinerja protokol *stack* yang berbasis Internet Protocol (IP), antara lain adalah Constraint Application Protocol (CoAP), 6LoWPAN, dan ZigBee. Kinerja protokol-protokol tersebut diukur berdasarkan parameter *throughput*, *end-to-end delay*, dan *packet loss*. Hasil penelitian lainnya pada penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa protokol 6LoWPAN dapat mengatasi permasalahan interoperabilitas yang sebelumnya ada pada protokol ZigBee. Protokol ZigBee hanya dapat berkomunikasi dengan baik dengan *sensor node* yang juga mengimplementasikan protokol ZigBee.

Algoritma *spanning tree* juga dapat diimplementasikan pada protokol RPL, dimana algoritma tersebut berperan pada saat pembentukan derajat *tree* oleh *node* yang sedang mengenali *node* tetangganya sehingga berperan sebagai *load-balancer* pada RPL [8]. Parameter yang digunakan antara lain *routing metric* dan *node rank*. Peneliti menyebut protokol hasil penelitiannya dengan Minimum Degree-RPL (MD-RPL).

Penelitian oleh [9] dilakukan pengujian terhadap kinerja beberapa RPL *routing tree instance*. Pada penelitiannya diimplementasikan pada lingkungan *lossy network*. Kinerja protokol diukur berdasarkan parameter *tree convergence*, *latency*, dan *Packet Delivery Ratio* (PDR). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa dengan beberapa RPL *routing tree instance* kinerja protokol pada parameter PDR dan *latency* lebih baik jika dibandingkan dengan yang menggunakan RPL *routing tree instance* tunggal.

Kinerja protokol *routing* RPL juga dapat diuji dengan membatasi jangkauan transmisi dari setiap *node*. Hal ini dilakukan karena pada kondisi sebenarnya transmisi dari setiap *node* tidak mungkin bebas hambatan. Parameter yang diukur untuk menguji kinerja dari RPL adalah *Packet Delivery Ratio* (PDR), *latency*, dan konsumsi energi. Berdasarkan penelitian oleh [10] mengukur ketiga parameter tersebut berdasarkan skenario *Objective Function Zero* (OF0) Hop-count dengan Minimum Rank with *Hysteresis Objective Function* (MRHOF) dan *Expected Transmission Count* (ETX).

Penelitian lainnya yaitu mengukur konsumsi energi protokol *routing* RPL pada perangkat *Zolertia Z1*, kemudian membandingkannya dengan konsumsi energi yang dilakukan pada lingkup simulasi [11]. Terdapat dua aspek berdasarkan hasil penelitian tersebut, pertama, konsumsi energi pada level *node* mencapai nilai maksimum pada saat *node* menerima data dari *node* lainnya dibandingkan pada saat *node* melakukan pengiriman dan pemrosesan data. Kedua, konsumsi energi pada level jaringan bergantung pada nilai RSSI.

3. Simulasi

Pada bagian ini terdapat penjelasan singkat tentang protokol *routing* RPL, ContikiOS dan Simulator Cooja, dan simulasi pengukuran energi *sensor node* pada simulator Cooja.

3.1. Routing Protocol for Low-Power and Lossy Network (RPL)

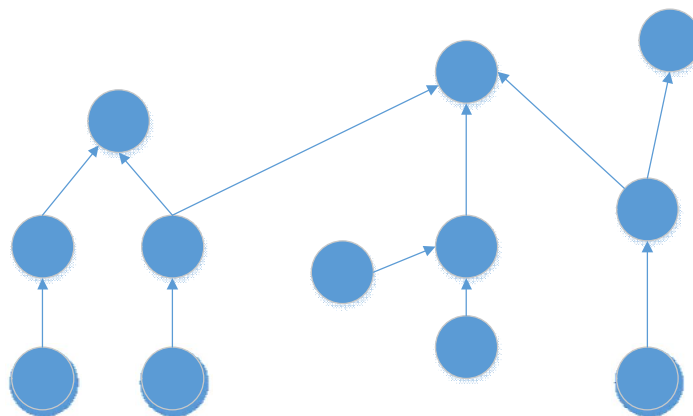
RPL adalah protokol *routing* berbasis IPv6 yang khusus dirancang untuk perangkat *sensor node* pada WSN. Protokol ini juga dirancang untuk mengintegrasikan protokol *routing* pada standar IEEE 802.15.4 dengan protokol IP berbasis IPv6. Sehingga dapat mengatasi heterogenitas pada konsep IoT.

Protokol *routing* RPL mengimplementasikan topologi *multi-hop* dengan membentuk Directed Acyclic Graph (DAG), yaitu sebuah jaringan dengan topologi *tree* yang berbentuk graf berarah. DAG (terlihat pada Gambar 1) dapat dibentuk dari satu atau lebih jaringan [9]. DAG terbentuk dari satu atau lebih kriteria yang ditentukan oleh *node* sendiri, misalnya *transmission count* (ETX), *latency*, jumlah *hop*, ataupun energi. *Destination Oriented Directed Acyclic Graph* (DODAG) terbentuk dari DAG yang memiliki satu *node root*, dimana *node* tersebut adalah *node* tujuan akhir dari *node* lainnya yang berada di dalam jaringan [9] (terlihat pada Gambar 2).

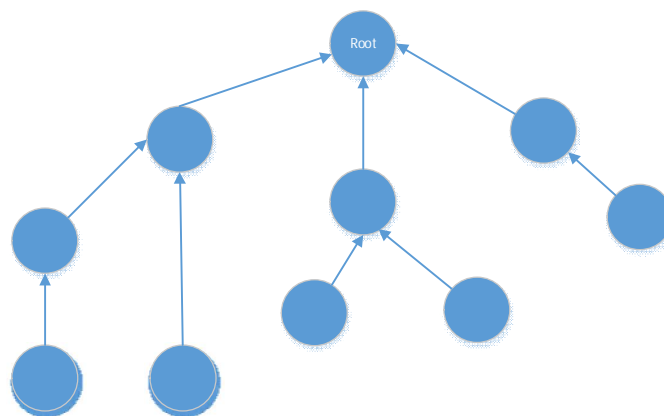
3.2. ContikiOS dan Simulator Cooja

ContikiOS [12] adalah sistem operasi open source yang dirancang khusus untuk sensor node pada WSN. ContikiOS memiliki fitur *event-drive kernel*, *pre-emptive multithreading*, serta mendukung penuh teknologi TCP/IP stack [3].

Simulator Cooja pertama kali diperkenalkan pada sebuah *technical report* oleh [3]. Simulator Cooja dapat mensimulasikan WSN yang berbasiskan ContikiOS dan TinyOS. Keunggulan utama dari simulator Cooja adalah dapat mensimulasikan *sensor node* berdasarkan karakter yang sebenarnya, karena simulator Cooja memanfaatkan Java Native Interface (JNI) untuk mengeksekusi kode program ContikiOS dan TinyOS. JNI menyediakan hubungan antara kode program dalam pemrograman C (bahasa pemrograman yang umumnya digunakan *firmware sensor node*) dengan bagian dari Java Virtual Machine. Oleh karena itu simulator Cooja dapat mengemulasikan berbagai *platform sensor node* mendekati perangkat *sensor node* yang sebenarnya.



Gambar 1. DAG



Gambar 2. DODAG

3.3. Skenario Simulasi

Setiap *node* tersebut mengimplementasikan *Unit Disk Graph Medium* (UDGM) dan CSMA/CA. *Node sink* adalah *node* yang berperan sebagai penerima informasi dari seluruh *node* yang berada di jaringannya. Protokol *routing* yang digunakan oleh seluruh *node* adalah RPL. Setiap skenario simulasi diberlakukan pengujian berdasarkan rasio keberhasilan transmisi setiap *node* (Rasio Tx dan Rx). Parameter lingkungan simulasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Simulasi

Parameter	Value
Wireless Channel Model	UDGM
MAC Layer Protocol	CSMA + ContikiMAC
Transport Protocol	6LoWPAN/RPL
Jumlah Node	16
Transmission Range	50 meter
Interference Range	100 meter
Transmission Rasio (Tx)	100% and 50 %
Transmission Rasio (Rx)	100% and 50 %
Platform Sensor Node	Zolertia Z1
Simulation Time	30 minutes

Skenario 1 dapat dilihat pada Gambar 3.a dan Gambar 3.c. Pada gambar terlihat enam belas *node* dimana lima belas *node* sebagai *sensor node* dan satu *node* (*node* nomor 16) berperan sebagai *node sink* (peran ini berlaku juga pada Skenario 2). Hal selanjutnya yang dilakukan adalah memberikan nilai jangkauan transmisi kepada seluruh *node* yaitu jangkauan transmisi sebesar 50 meter, dan jangkauan interferensi sebesar 100 meter. Skenario 1 – Pengujian 1 (disebut Skenario 1.1 dibagian selanjutnya) adalah rasio nilai Tx dan nilai Rx setiap *sensor node* termasuk *node sink* sebesar 100%. Kemudian, pada Skenario 1 – Pengujian 2 (disebut Skenario 1.2 dibagian selanjutnya) rasio nilai Tx dan nilai Rx setiap *sensor node* termasuk *node sink* diturunkan menjadi 50%.

Skenario 2 dapat dilihat pada Gambar 3.b dan Gambar 3.d. Skenario pengujian pada topologi ini sama seperti pada Skenario 1 (tabel skenario pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.). Skenario 1 dan Skenario 2 dilakukan dengan pertimbangan untuk mengetahui dampak pencarian rute menuju *node sink* dari setiap *sensor node* terhadap penggunaan energi setiap *sensor node* tersebut. Perbedaan topologi jaringan akan mempengaruhi keputusan pembentukan DAG dan DODAG, *sensor node* akan mencari rute terbaik menuju *node sink* berdasarkan nilai *routing metric* setiap tetangganya. Pemilihan rute terbaik ini tentu akan berdampak pada kinerja komputasi setiap *sensor node*. Oleh karena itu pada paper ini penulis berasumsi akan ada perbedaan penggunaan energi pada skenario pengujian yang dilakukan.

Tabel 2. Skenario pengujian

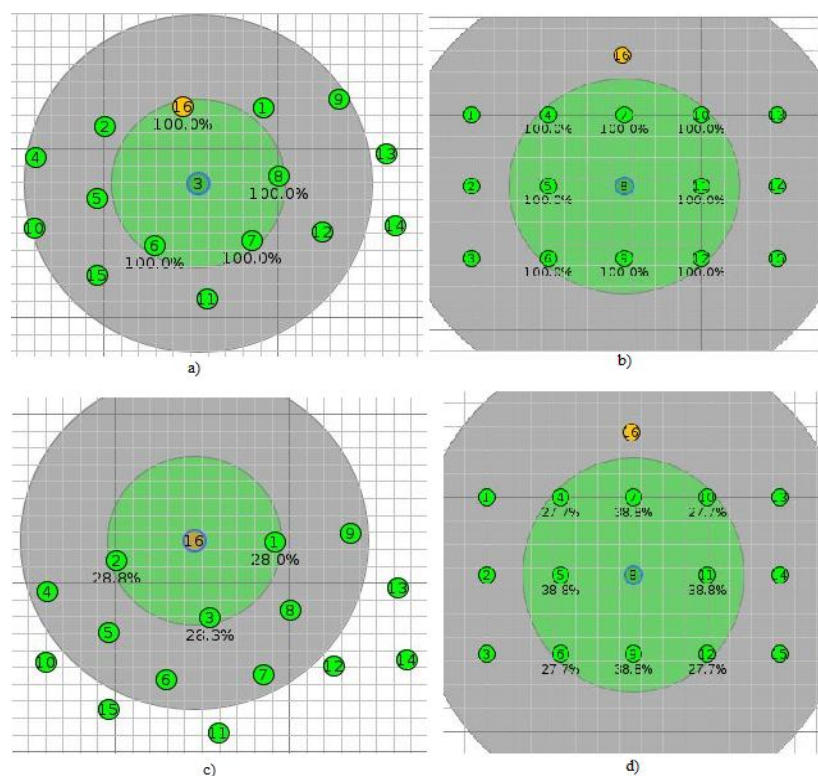
Parameter Simulasi	Skenario 1		Skenario 2	
	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 1	Pengujian 2
Wireless Channel Model			UDGM	
MAC Layer Protocol			CSMA + ContikiMAC	
Transport Protocol			6LoWPAN/RPL	
Jumlah Node			16	
Topologi Jaringan	Gambar 3.a	Gambar 3.c	Gambar 3.b	Gambar 3.d
Transmission Range			50 meter	
Interference Range			100 meter	
Transmission Rasio (Tx)	100%	50%	100%	50%
Transmission Rasio (Rx)	100%	50%	100%	50%
Platform Sensor Node			Zolertia Z1	
Simulation Time			30 minutes	

Berdasarkan [12][10], penulis berasumsi bahwa perbedaan topologi jaringan dapat mempengaruhi *node* dalam menentukan DAG dan DODAG. Hal ini dikarenakan *node* akan memilih jalur terbaik berdasarkan nilai *routing metric* dari setiap *node* tetangganya. Pemilihan jalur terbaik ini dapat mempengaruhi komputasi dari setiap *node*, semakin tinggi komputasinya maka semakin besar energi yang diperlukan, semakin besar energi yang diperlukan maka akan mempengaruhi waktu hidup setiap *node*.

4. Hasil Pengujian

Kinerja protokol routing diukur berdasarkan parameter total paket jaringan yang diterima (TRP), rata-rata paket jaringan yang diterima oleh setiap *node* (ARP), total paket jaringan yang hilang (TLP), rata-rata paket jaringan yang hilang di setiap *node* (ALP), rata-rata *routing metric* (RM), dan rata-rata Expected Transmission Count (ETX).

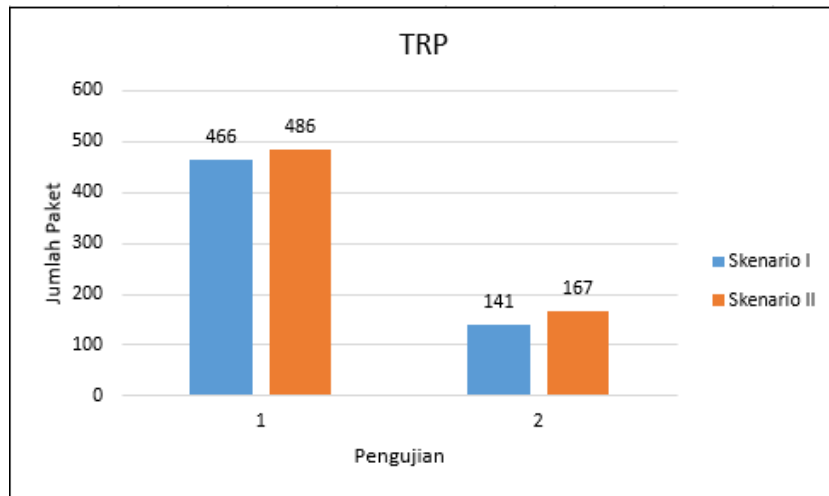
Penggunaan energi dari setiap *node* diukur berdasarkan persentase yang didapatkan dari *plugin* simulator Cooja, PowerTracker. PowerTracker mengakumulasi persentase penggunaan energi setiap *node* setiap 2 detik simulasi. Parameter yang didapatkan dari *PowerTracker* adalah Radio On, Radio Tx, dan Radio Rx. Radio On adalah persentase energi yang diperlukan saat radio dalam keadaan hidup (*on*). Radio Tx adalah persentase energi yang diperlukan saat radio dalam keadaan mengirim paket jaringan. Radio Rx adalah persentase energi yang diperlukan saat radio dalam keadaan menerima paket jaringan. Pada simulator Cooja, nilai dari parameter-parameter ini didapatkan dari data yang diterima oleh *sink node*. Karena seluruh informasi *sensor node* yang berada di dalam jaringan pasti melalui *sink node* sebelum diteruskan pada umumnya ke *node gateway*.



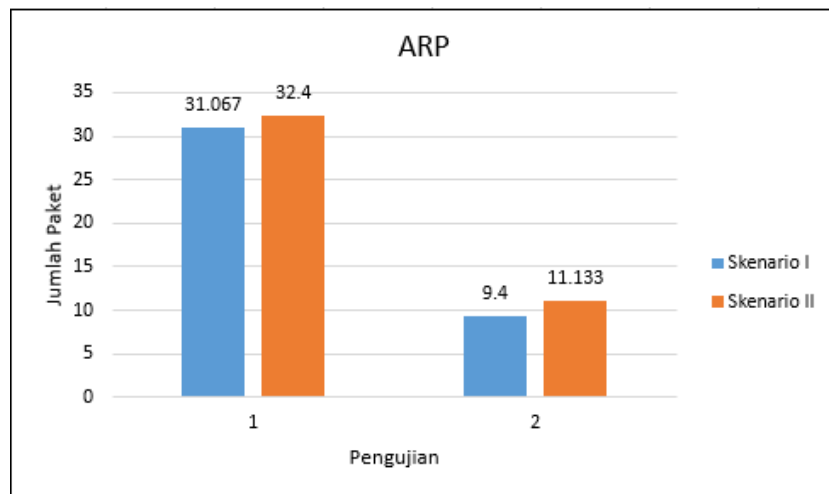
Gambar 3. Skenario Simulasi; a) Skenario 1.1; b) Skenario 1.2; c) Skenario 2.1; d) Skenario 2.2

Gambar 4 sampai dengan Gambar 7 adalah grafik yang menunjukkan kinerja protokol *routing* RPL berdasarkan parameter TRP, ARP, TLP, dan ALP secara berturut-turut. Nilai TRP (Gambar 4) dan ARP (Gambar 5) pada Skenario 1.1 dan Skenario 2.1 memiliki nilai yang lebih tinggi daripada pada nilai yang dihasilkan pada Skenario 1.2 dan Skenario 2.1. Berdasarkan Tabel 2, nilai rasio transmisi pada Skenario 1.1 dan Skenario 2.1 sebesar 100%, sedangkan pada Skenario 1.2 dan Skenario 2.2 sebesar 50%. Perbedaan nilai rasio transmisi sangat mempengaruhi kinerja dari protokol *routing* RPL. Hal ini didukung oleh hasil yang didapatkan oleh parameter lainnya, yaitu TLP dan ALP. Hasil yang didapatkan pada

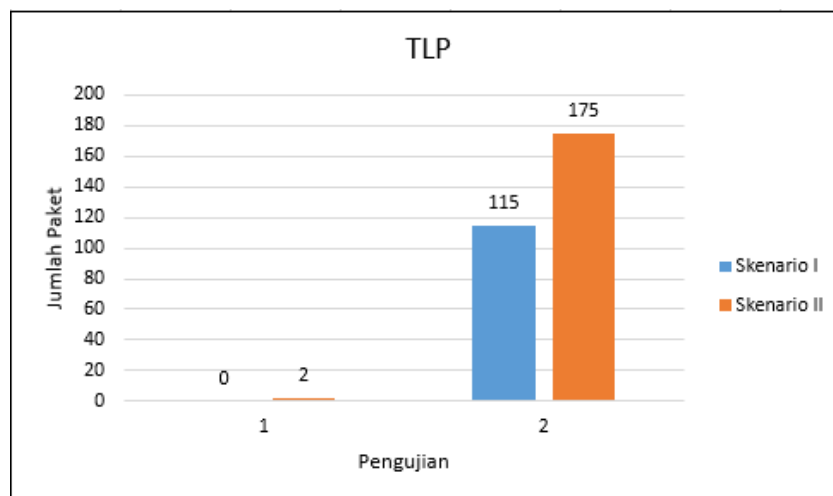
parameter TLP (Gambar 6) dan ALP (Gambar 7) juga mengalami perbedaan yang signifikan antara Skenario 1.1 dan 2.1, dengan Skenario 1.2 dan Skenario 2.2.



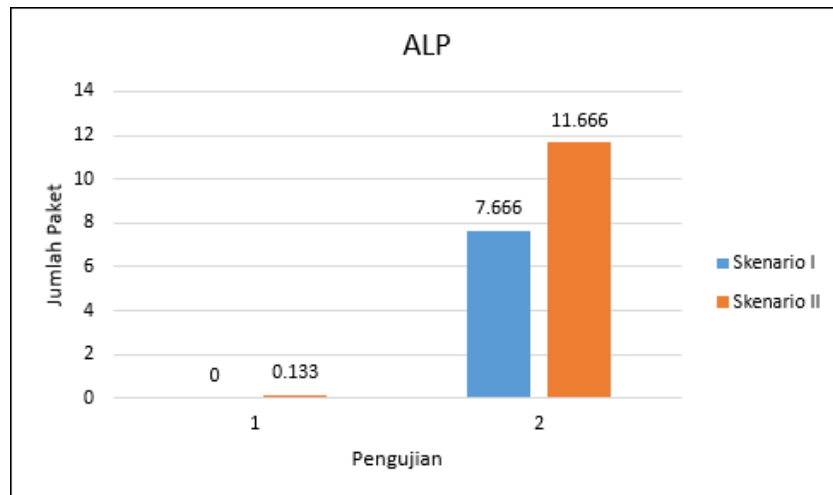
Gambar 4. Total Paket Jaringan yang diterima



Gambar 5. Rata-rata Paket Jaringan yang diterima



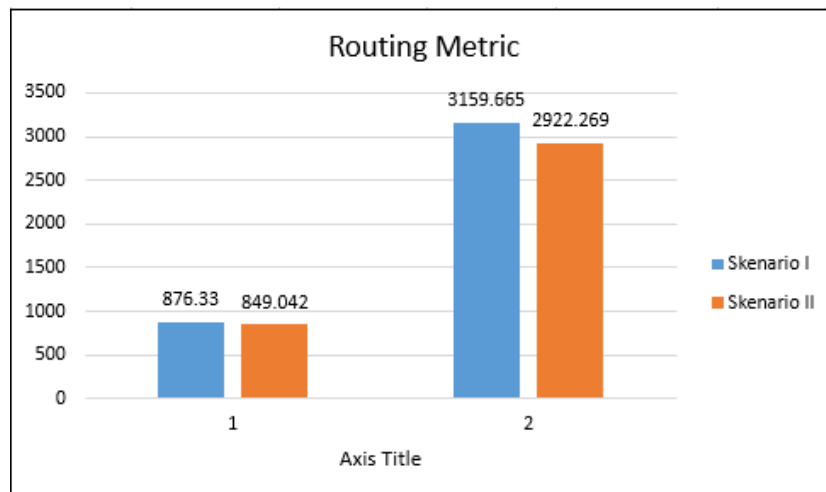
Gambar 6. Total Paket Jaringan yang Hilang



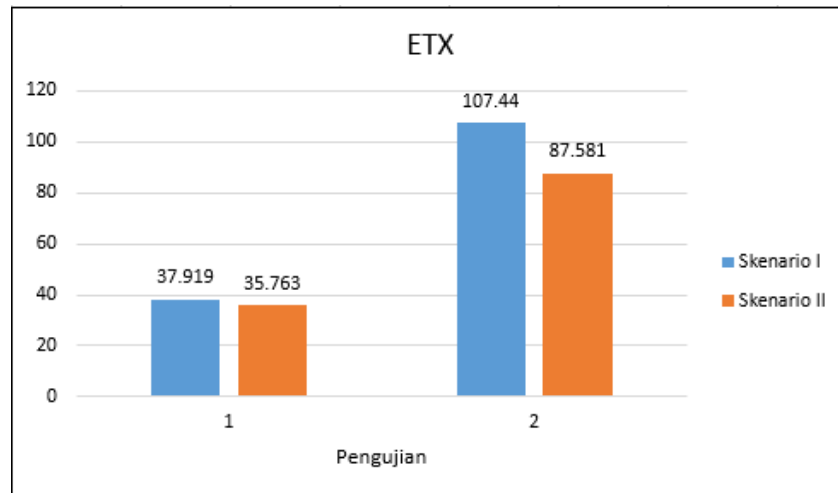
Gambar 7. Rata-rata Paket Jaringan yang Hilang

Hasil yang ditunjukkan pada parameter TRP, ARP, TLP, dan ALP didukung oleh hasil yang ditunjukkan pada parameter RM (Gambar 8) dan ETX (Gambar 9). RM adalah nilai peringkat yang ditentukan dari jumlah *hop* dan nilai ETX dari setiap *node* [1]. Nilai *routing metric* menentukan kualitas dari suatu jalur transmisi, nilai jumlah hop dan ETX yang rendah dikarenakan setiap *node* mengalami kesulitan dalam memilih *node* tetangganya. Semakin rendah nilai *routing metric* dari suatu jaringan maka semakin baik kualitas jaringannya [13]. Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 8, bahwa nilai RM pada Skenario 1.1 dan Skenario 2.1 jauh lebih rendah daripada nilai RM yang dihasilkan dari Skenario 1.2 dan Skenario 2.2. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa *routing metric* pada Skenario 1.1 dan Skenario 2.1 lebih baik daripada Skenario 1.2 dan Skenario 2.1.

Nilai yang dihasilkan dari parameter ETX juga memiliki pola yang sama dengan parameter RM. Nilai ETX adalah nilai yang diharapkan dari suatu paket jaringan untuk diterima ditujuan tanpa *error*. Nilai ETX bervariasi antara 1 sampai tak hingga, dimana nilai 1 menunjukkan jalur transmisi yang baik dan nilai tak hingga menunjukkan jalur transmisi tersebut tidak berfungsi [14]. Sehingga semakin kecil nilai ETX maka semakin baik kualitas suatu jalur transmisi.



Gambar 8. Routing Metric

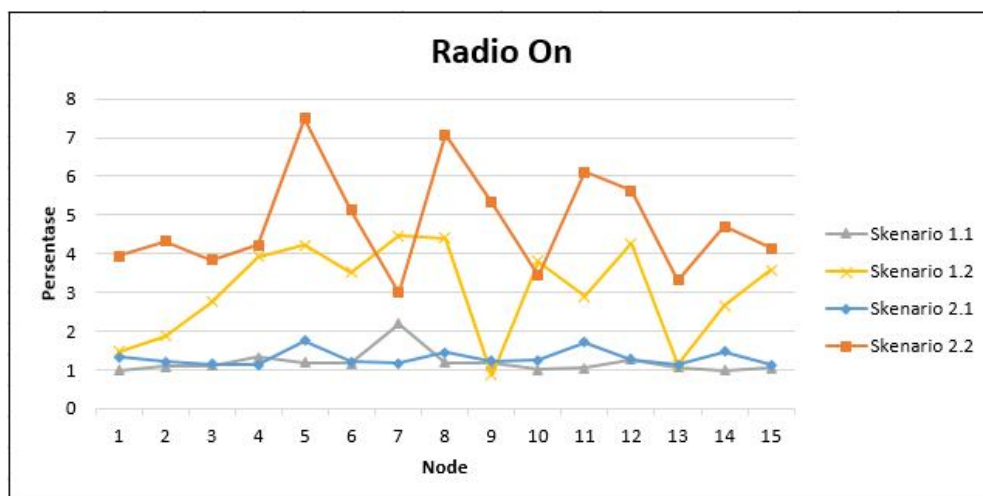


Gambar 9. ETX

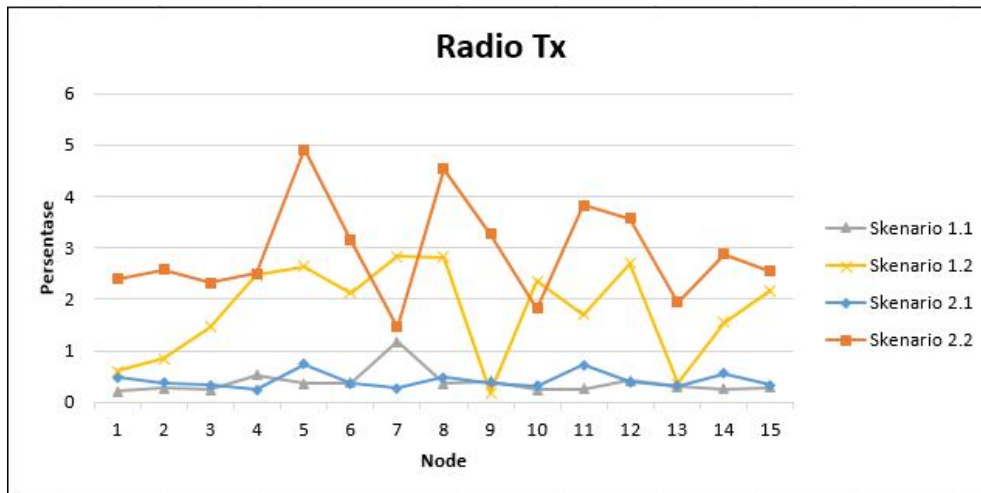
Berdasarkan Gambar 9, terlihat bahwa nilai ETX yang didapatkan dari Skenario 1.1 dan 2.1 jauh lebih kecil daripada nilai ETX yang dihasilkan dari Skenario 1.2 dan Skenario 2.2. Oleh karena itu, nilai rasio transmisi yang rendah sangat mempengaruhi kinerja protokol *routing* RPL secara keseluruhan disetiap parameter yang berhubungan dengan kinerja jaringan. Kinerja jaringan yang menurun disebabkan oleh komputasi dari setiap *node* yang meningkat. Komputasi yang meningkat dari setiap *node* juga menyebabkan penggunaan energi yang lebih besar. Hasil ini diperkuat oleh penelitian sebelumnya [15] yang dilakukan oleh peneliti, dimana peneliti melakukan eksperimen berdasarkan parameter CPU Power, LPM Power, Listen Power, dan Transmit Power. Pada penelitian tersebut dipaparkan bahwa rasio transmisi setiap *node* sangat berpengaruh terhadap kinerja protokol *routing* RPL.

Grafik pada Gambar 10 menunjukkan persentase penggunaan energi pada saat perangkat radio hidup (*radio on*). Pada gambar tersebut, persentase penggunaan energi terbesar didapatkan dari Skenario 2.2. *Radio Tx* (Gambar 11) menunjukkan persentase penggunaan energi pada saat *node* mentransmisikan data menuju *node* lainnya, sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10 bahwa Skenario 2.2 juga menghasilkan nilai persentase penggunaan energi yang lebih besar dari skenario lainnya. Namun hal ini tidak terlihat pada grafik parameter *Radio Rx* (Gambar 12), dimana setiap skenario relatif menghasilkan nilai persentase yang hampir sama satu sama lain.

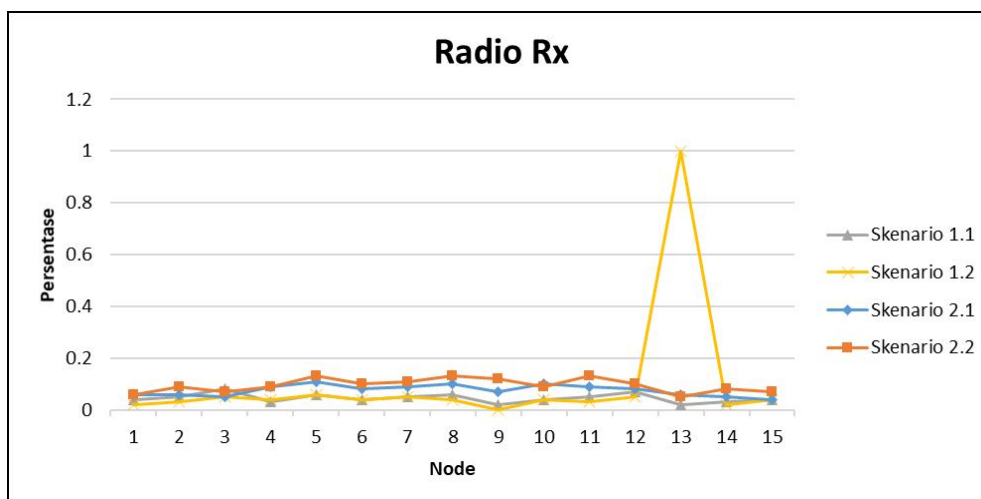
Pada grafik menunjukkan juga pola yang sama seperti hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4 sampai Gambar 9, dimana rasio transmisi memang mempengaruhi penggunaan energi dari *node* secara signifikan. Rasio transmisi yang rendah dapat menyebabkan penggunaan energi yang sangat besar juga. Penggunaan energi yang besar menunjukkan komputasi *node* yang tinggi, semakin tinggi komputasi dari suatu *node* maka dapat menurunkan kinerja dari protokol *routing* RPL.



Gambar 10. Radio On



Gambar 11. Radio Tx



Gambar 12. Radio Rx

5. Kesimpulan

Kinerja protokol *routing* RPL pada penelitian ini diukur berdasarkan dua jenis parameter yaitu, parameter yang berhubungan dengan kinerja jaringan dan parameter yang berhubungan dengan penggunaan energi. Berdasarkan seluruh skenario, topologi jaringan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap parameter kinerja jaringan dan parameter penggunaan energi. Namun, hasil ini tidak seperti yang ditunjukkan pada skenario rasio transmisi. Rasio transmisi yang rendah (sebesar 50% untuk Tx dan Rx) sangat mempengaruhi parameter kinerja jaringan dan parameter penggunaan energi. Pada rasio transmisi yang rendah, kinerja jaringan semakin menurun, hal ini disebabkan oleh komputasi dari setiap *node* yang meningkat. Setiap *node* harus bekerja lebih banyak untuk mendapatkan jalur terbaik saat membentuk DAG dan DODAG. Hal inilah yang berdampak pada peningkatan penggunaan energi diskenario yang serupa, seperti terlihat Gambar 10 dan Gambar 11.

Daftar Pustaka

- [1] T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struick, J. Vasseur, and R. Alexander, "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Network," 2012.
- [2] A. Sehgal, "Using the Contiki Cooja Simulator," 2013.
- [3] F. Österlind, "A sensor network simulator for the Contiki OS," 2006.
- [4] L. Ben Saad, C. Chauvenet, and B. Tourancheau, "Simulation of the RPL Routing Protocol for IPv6 Sensor Networks: two cases studies," in *International Conference on Sensor Technologies and Applications*, 2011.

-
- [5] N. Fournel, A. Fraboulet, G. Chelius, E. Fleury, B. Allard, and O. Brevet, "Worldsens: From Lab to Sensor Network Application Development and Deployment," in *Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 2007, pp. 551–552.
- [6] G. Chelius, A. Fraboulet, and E. Fleury, "Demonstration of worldsens: a fast prototyping and performance evaluation of wireless sensor network applications & protocols," in *Proceedings of the second international workshop on Multi-hop ad hoc networks: from theory to reality - REALMAN '06*, 2006, p. 131.
- [7] S. Thombre, R. Ul Islam, K. Andersson, and M. S. Hossain, "Performance analysis of an IP based protocol stack for WSNs," in *Proceedings - IEEE INFOCOM*, 2016, vol. 2016–Septe, pp. 360–365.
- [8] M. Mamdouh, K. Elsayed, and A. Khattab, "RPL Load Balancing via Minimum Degree Spanning Tree," in *Ninth IEEE International Workshop on Selected Topics in Mobile and Wireless Computing*, 2016.
- [9] M. Banh, H. Mac, N. Nguyen, K. H. Phung, N. H. Thanh, and K. Steenhaut, "Performance evaluation of multiple RPL routing tree instances for Internet of Things applications," in *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, 2016, vol. 2016–Janua, pp. 206–211.
- [10] C. Thomson, I. Wadhaj, I. Romdhani, and A. Al-Dubai, "Performance evaluation of RPL metrics in environments with strained transmission ranges," in *Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA*, 2017, pp. 1–8.
- [11] S. Kharche and S. Pawar, "Node level energy consumption analysis in 6LoWPAN network using real and emulated Zolertia Z1 motes," in *2016 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, 2016, pp. 1–5.
- [12] S. V. Vijayasree, A. P. Renold, and V. Saravanan, "Node Lifetime Assessment Based Routing for Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of Global Conference on Communication Technologies*, 2015.
- [13] H. Lamaazi, N. Benamar, and A. J. Jara, "RPL-based networks in static and mobile environment: A performance assessment analysis," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, p. , Apr. 2017.
- [14] N. Javaid, A. Javaid, I. A. Khan, and K. Djouani, "Performance study of ETX based wireless routing metrics," in *2009 2nd International Conference on Computer, Control and Communication, IC4 2009*, 2009, pp. 1–7.
- [15] I. N. R. Hendrawan and I. G. N. W. Arsa, "Zolertia Z1 energy usage simulation with Cooja simulator," in *2017 1st International Conference on Informatics and Computational Sciences (ICICoS)*, 2017, pp. 147–152.