

# Evaluasi Performansi Protokol 6LoWPAN terhadap CSMA/CA pada perangkat IoT

*(Evaluation of 6LoWPAN Protocol Performance against CSMA/CA on IoT devices)*

Raphael Bianco Huwae, Andy Hidayat Jatmika\*, Noor Alamsyah  
Dept. Informatics Engineering, University of Mataram  
Jl. Majapahit 62, Mataram, Lombok NTB, INDONESIA  
Email: [raphael.bianco.huwae, andy, nooralamsyah]@unram.ac.id

## Abstract

*The Internet of Things (IoT) has unique design requirements compared to typical network devices, particularly regarding energy efficiency and performance expectations. To meet the need for low power consumption and easy integration with existing IP network devices, 6LoWPAN is a viable option. 6LoWPAN is an adaptation layer that enables efficient transport of IPv6 packets within small link layer frames, such as those defined by IEEE 802.15.4. In this study, we conducted experiments to compare the delay and throughput performance of 6LoWPAN to the legacy CSMA/CA protocol, which uses IPv4 for addressing.*

*In the experiment, NS3 was utilized to construct separate network system architectures for 6LoWPAN and CSMA/CA. The tests were conducted individually based on various research scenarios, with each scenario comprising 50 to 750 nodes and utilizing the same traffic type. The results were visualized for ease of comparison and analysis.*

**Keywords:** IoT, 6LoWPAN, CSMA/CA, NS3, Simulation

\*Penulis Korespondensi

## 1. PENDAHULUAN

IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN) adalah standar terbuka yang didefinisikan oleh *Internet Engineering Task Force (IETF)* yang bertujuan untuk perangkat hemat daya dan koneksi IPv6. Protokol ini bekerja dengan jaringan mesh besar sehingga dapat menjadi pilihan untuk jaringan Internet of Things (IoT). Saat ini, pengguna IoT diperkirakan mencapai sekitar 30 miliar pengguna, dibutuhkan 30 tahun untuk pengembangan teknologi IP untuk menggunakan infrastruktur berbasis IP end-to-end yang memfasilitasi jaringan standar terbuka yang dapat digunakan untuk pengguna internet sehari-hari.

Di Indonesia, penggunaan teknologi IoT terus berkembang pesat seiring dengan semakin banyaknya perangkat pintar yang diadopsi oleh masyarakat. Penerapan teknologi IoT di Indonesia meliputi berbagai sektor, seperti industri, pertanian, kesehatan, transportasi, dan lainnya. Contohnya, perusahaan transportasi telah menggunakan teknologi IoT untuk memantau posisi dan ketersediaan kendaraan, memperbaiki sistem pembayaran, dan meningkatkan pengalaman pengguna. Selain itu, teknologi IoT juga digunakan untuk mengontrol irigasi di pertanian, memonitor kesehatan pasien secara jarak jauh, dan

meningkatkan keamanan pada gedung dan kampus universitas.

Dalam perkembangan teknologi IoT di Indonesia, protokol 6LoWPAN dapat menjadi solusi yang tepat untuk mengatasi masalah koneksi dan konsumsi daya yang terbatas pada perangkat IoT. 6LoWPAN memungkinkan perangkat IoT terhubung langsung ke infrastruktur jaringan berbasis IPv6. Dengan memanfaatkan kemampuan protokol IPv6, perangkat IoT dapat memanfaatkan fitur-fitur seperti alamatasi unik global, kemampuan routing global, dan dukungan untuk skala jaringan yang luas. Ini membantu dalam mengatasi batasan skala dan interoperabilitas yang terkait dengan alamatasi IPv4 tradisional, serta memungkinkan komunikasi yang lebih luas dan terhubung dalam jaringan IoT.

6LoWPAN adalah protokol yang menggunakan lapisan antara tumpukan IP dan lapisan jaringan untuk mengirimkan data IPv6 melalui standar 802.15.4 *radio links*. Keuntungan menggunakan protokol ini adalah bahwa tidak perlu menggunakan Protokol Kontrol Akses Media klasik seperti Aloha dan CSMA/CA, karena 6LoWPAN telah menggunakan mekanisme penghindaran tabrakan pada lapisan data link yang mirip dengan CSMA/CA, sehingga tidak perlu mendengarkan transmisi radio saat tidak ada orang lain yang mentransmisikan.

Namun, 6LoWPAN memiliki tugas tambahan yaitu menangani ukuran besar header paket IPv6, seperti kompresi header dan memecah dan merakit kembali paket selama transmisi. Hal ini berpotensi menyebabkan penambahan *delay* dan ukuran header yang tidak efisien, terutama untuk transmisi paket berukuran kecil.

Studi ini dilakukan untuk memastikan kemungkinan ketidak efisienan dalam *Delay* dan *Throughput* untuk transmisi paket dalam protokol 6LoWPAN. Metodanya adalah dengan membandingkan kinerja dalam transmisi paket perangkat IoT antara menggunakan protokol 6LoWPAN dan Protokol Kontrol Akses Media klasik, yaitu CSMA/CA dengan addressing IPv4 di lapisan jaringan. Parameter kinerja yang diukur adalah *delay* dan *throughput* untuk berbagai jumlah node dalam jaringan. Hasil studi menunjukkan bahwa protokol 6LoWPAN memiliki *delay* yang lebih tinggi dan *throughput* yang lebih rendah dibandingkan dengan CSMA/CA pada jaringan dengan jumlah node yang sedikit. Namun, pada jaringan yang lebih besar dengan ratusan atau bahkan ribuan node, 6LoWPAN menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan CSMA/CA, terutama dalam hal penghematan energi dan mengoptimalkan penggunaan bandwidth. Hal ini disebabkan oleh kemampuan 6LoWPAN dalam mengompresi header paket IPv6 dan memecah paket untuk transmisi yang lebih efisien, yang secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi jaringan IoT dengan jumlah node yang besar. Meskipun demikian, perlu diingat bahwa protokol 6LoWPAN masih dalam tahap pengembangan dan terus menerima perbaikan untuk meningkatkan kinerjanya dalam jaringan IoT yang semakin berkembang.

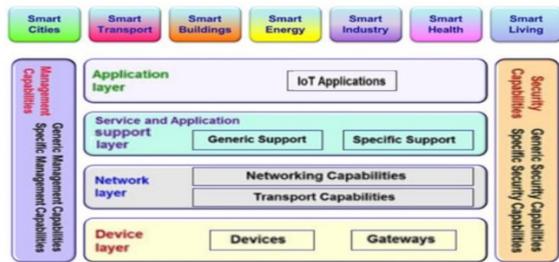
Struktur dari makalah ini adalah sebagai berikut. Pada bagian 1, Penelitian akan menjelaskan latar belakang dan penjelasan yang lebih mendalam tentang konsep Internet of Things (IoT) dan Protokol Kontrol Akses Media CSMA/CA, serta protokol 6LoWPAN. Dalam bagian ini akan dijelaskan tentang tujuan dari setiap protokol dan bagaimana mereka dapat berkontribusi pada pengembangan teknologi IoT. Selanjutnya pada bagian 2 akan memperkenalkan beberapa karya terkait yang memiliki korelasi dengan makalah ini, seperti studi yang telah dilakukan sebelumnya tentang protokol yang dilakukan pada IoT baik CSMA, 6LoWPAN maupun protokol lainnya. Pada Bagian 3 penelitian akan membahas detail tentang pengaturan eksperimental yang digunakan dalam studi ini, termasuk perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan, serta prosedur yang diikuti selama

pengumpulan data. Bagian 4, akan mempresentasikan hasil dari eksperimen dan analisis statistik yang dilakukan untuk membandingkan kinerja protokol 6LoWPAN dan CSMA/CA dengan addressing IPv4 di lapisan jaringan. Kami juga akan membahas faktor-faktor yang mempengaruhi *delay* dan *throughput* dalam transmisi paket perangkat IoT. Bagian terakhir akan mempresentasikan kesimpulan yang diambil dari hasil studi ini, termasuk implikasi praktis dari temuan kami terhadap pengembangan teknologi IoT di masa depan. Kami juga akan membahas beberapa tantangan yang harus diatasi untuk meningkatkan efisiensi protokol 6LoWPAN dan menjamin kehandalan transmisi data dalam jaringan IoT. Selain itu, kami juga akan mengidentifikasi beberapa bidang penelitian yang dapat dieksplorasi lebih lanjut untuk memperbaiki kinerja protokol 6LoWPAN dan penggunaannya dalam jaringan IoT.

Penelitian ini dapat memberikan evaluasi kinerja yang obyektif antara protokol 6LoWPAN dan CSMA dalam skenario jaringan IoT. Evaluasi ini dapat meliputi parameter kinerja seperti *throughput* dan *delay*. Dengan membandingkan kinerja keduanya, penelitian ini dapat memberikan wawasan tentang keunggulan dan keterbatasan masing-masing protokol dalam konteks aplikasi dan kondisi jaringan yang dianalisis. Sehingga dapat dipertimbangkan faktor-faktor seperti tingkat lalu lintas, stabilitas, dan *throughput* yang diinginkan untuk pekerjaan IoT di masa mendatang.

### 1.1. Internet Of Things

Internet of Things (IoT) adalah integrasi antara teknologi informasi dengan objek/sistem fisik. IoT adalah revolusi yang menyambut era masyarakat 5.0 dan industri 4.0. Berbagai jenis perangkat yang dilengkapi sensor dan perangkat pintar akan terhubung dengan telepon pintar untuk dapat berkomunikasi. Kehadiran perangkat IoT akan membangun lingkungan cerdas dengan perangkat kontrol otonom seperti rumah pintar, gedung pintar, transportasi pintar, perawatan kesehatan pintar, gaya hidup pintar, dan lain sebagainya [1]. Infrastruktur pada IoT memiliki 4 lapisan. Pada lapisan perangkat terdapat sensor, pembaca RFID, dan perangkat lainnya, dalam menentukan rute pada lapisan ini gateway digunakan untuk mengumpulkan pembacaan sensor dan jaringan sehingga dapat menentukan di mana data diambil. Lapisan *middleware* akan memberikan layanan spesifik dan generik yang berfungsi untuk menyembunyikan kompleksitas lapisan yang lebih rendah ke lapisan aplikasi. [7].



Gambar 1. Arsitektur Layer IoT

Pada tahun 2020 para ahli memperkirakan bahwa jumlah instalasi perangkat IoT mencapai 31 miliar dan diperkirakan akan lebih dari 75 miliar perangkat pada tahun 2025 yang terhubung ke web, sehingga skalabilitas, kestabilan, dan keamanan pada alamat IP diperlukan untuk jumlah perangkat IoT yang sangat besar ini. Perangkat IoT yang terhubung dengan perangkat dan jaringan lain dapat melakukan fungsi untuk mengumpulkan informasi dan melakukan tindakan tertentu.

Banyak protokol yang sudah ada dalam IoT seperti DTLS, CCN, TSMP, dan lainnya. Salah satu jenis protokol di jaringan IoT adalah 6LoWPAN, yang memungkinkan komunikasi nirkabel menggunakan IPv6 dengan daya rendah. Protokol 6LoWPAN menggunakan link IEEE 802.15.4 untuk mengangkut paket IPv6. 6LoWPAN memecah paket besar menjadi paket-paket yang lebih kecil agar dapat muat di dalam frame 802.15.4 [1]. Protokol Komunikasi dalam IoT dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL I. PARAMETER SIMULASI

Standard	Tujuan	Implementasi
IEEE 802.15.4	Frekuensi radio untuk perangkat terbatas	Dikembangkan untuk memungkinkan komunikasi nirkabel pada perangkat rendah energi
6LoWPAN	Lapisan adaptasi untuk memungkinkan perangkat terhubung ke IP	Menggunakan standar IEEE802.15.4 sebagai lapisan adaptasi untuk fragmentasi dan penggabungan paket IPV6
CoAP	<i>Constrained Application Protocol</i> (Protokol Aplikasi Terbatas)	Digunakan sebagai protokol HTTP dengan fungsi tambahan untuk perangkat terbatas

RPL	Protokol Routing Jaringan	Digunakan untuk routing paket pada jaringan dengan kerugian dan daya rendah
-----	---------------------------	---

## 1.2. CSMA

Protokol standar yang digunakan oleh Media Access Control (MAC) untuk mentransmisikan stasiun jaringan melalui media yang umumnya digunakan bersama adalah Carrier Sense Multiple Access (CSMA) [10]. Protokol ini mengalami tabrakan yang lebih tinggi dalam transmisi paket data dan memberikan kinerja yang buruk pada lalu lintas yang padat [8]. Pada CSMA, stasiun menunggu untuk mengirim paket sampai saluran selesai. Ketika saluran siap, stasiun dapat mengambil salah satu dari tiga pendekatan yang berbeda [6] untuk mengirim paket. Pendekatan-pendekatan tersebut adalah:

### 1.2.1. 1-persistent CSMA

Dalam versi CSMA ini, data akan ditransmisikan dengan probabilitas 1 setiap kali menemukan saluran yang kosong. Ketika stasiun mengirimkan data pada CSMA, stasiun akan mendengarkan saluran untuk mencari keberadaan stasiun pemancar. Jika saluran sedang sibuk, paket akan menunggu sejenak hingga saluran menjadi kosong. Stasiun mentransmisikan sebuah frame sambil berganti saluran yang tidak digunakan. Jika terjadi tabrakan, stasiun akan memulai dari awal dan menunggu beberapa waktu [4].

Sementara itu, mekanisme 1-persistent CSMA adalah node yang mendeteksi saluran. Jika saluran kosong, node akan langsung mengirimkan data. Namun, jika saluran sedang digunakan, node akan terus mendengarkan saluran. Jika saluran tidak digunakan, data akan segera ditransmisikan. Namun, jika terjadi tabrakan, node akan memulai dari awal dan menunggu secara acak [7].

### 1.2.2. P-persistent CSMA

Protokol p-persistent CSMA dengan terus memantau media transmisi bertujuan untuk memaksimalkan penggunaan saluran [10]. P-persistent CSMA diterapkan pada saluran slot. Setiap stasiun mentransmisikan dengan probabilitas p dan menunggu hingga slot berikutnya dengan probabilitas 1-p jika saluran tidak digunakan. Jika slot juga kosong, stasiun akan terus mentransmisikan atau menolak dengan probabilitas p dan 1-p. Proses ini akan terus berulang hingga paket data telah ditransmisikan atau pengguna

lain telah mulai mentransmisikan. Proses akan terus menunggu saluran stasiun awal hingga proses dapat diterapkan, sedangkan stasiun lain bertindak seolah-olah terjadi tabrakan dan memulai kembali. Dibandingkan dengan skema lainnya, *throughput* yang lebih tinggi lebih baik [4].

Mekanisme p-persistent CSMA bekerja sebagai berikut, jika media sedang tidak digunakan, maka node akan mentransmisikan datanya dengan probabilitas p. Namun, jika media sedang digunakan, maka node akan terus memantau sampai media menjadi tidak digunakan. Jika pengiriman data tertunda selama satu slot waktu, maka node akan mentransmisikan data dengan probabilitas p yang telah ditentukan [7].

### 1.3. 6LoWPAN

*Low-power and lossy networks* (LLNs) adalah istilah yang umum digunakan untuk perangkat terbatas (CPU, memori, daya) yang terhubung ke perangkat lain yang "lossy" untuk membangun jaringan (jaringan radio daya rendah). LoWPAN adalah contoh khusus dari LLN. Karakteristik tipikal dari perangkat di dalam LoWPAN adalah [2]:

- Kemampuan Pemrosesan Terbatas: prosesor dimulai dari 8-bit dengan laju clock 10 MHz.
- Kapasitas Memori Kecil: Rentang memori tipikal antara 2KB dan 10KB RAM dengan beberapa lusin kilobita dari 48KB hingga 128KB memori ROM/flash.
- Daya Rendah: Dalam urutan puluhan miliamper.
- Jarak Pendek: jarak aplikasi adalah 10 meter.
- Bit Rate Rendah: maksimum perangkat laju udara adalah 250Kbps.

6LoWPAN (IPv6 melalui Jaringan Wilayah Personal Nirkabel Berdaya Rendah) memungkinkan penggunaan daya rendah yang efisien dari perangkat daya rendah dengan jaringan nirkabel melalui IPv6 pada perangkat tertanam sederhana melalui optimasi protokol terkait dan lapisan adaptasi [9].

Manfaat dari 6LoWPAN adalah mudah dipelajari, andal, kecil memori, integrasi jaringan transparan, pemeliharaan jaringan mudah, skalabilitas yang luas, aliran data end-to-end. Karakteristik menggunakan 6LoWPAN adalah sebagai berikut [9]:

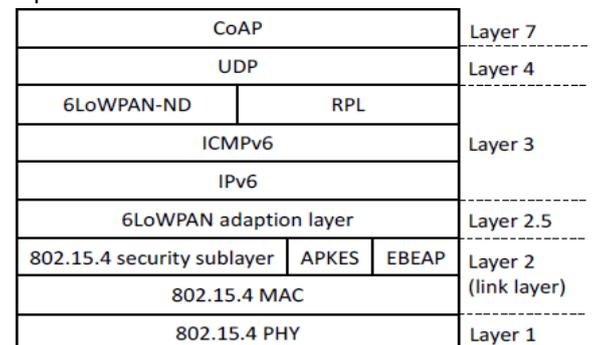
- jaringan heterogen rendah daya perlu diikat bersama,
- perangkat tertanam membutuhkan layanan berbasis Internet,

- memiliki jaringan terbuka sehingga dapat digunakan kembali untuk mengembangkan penggunaan dan layanan baru, dan
- skalabilitas jaringan yang dapat membangun infrastruktur jaringan besar dengan mobilitas.

Tujuan utama dari 6LoWPAN adalah [2]:

- Fragmentasi dan pengumpulan kembali lapisan
- Kompresi header
- Konfigurasi otomatis alamat
- Protokol routing mesh
- IEEE 802.15.4 mendefinisikan empat jenis frame
- Frame data dapat secara opsional meminta pengakuan.

Keamanan 6LoWPAN yang didefinisikan dalam IEEE 802.15.4 menggunakan keamanan lapisan tautan AES-128. Standar ini menyediakan otentikasi tautan yang aman dan enkripsi. Mekanisme keamanan lain seperti TLS atau tanda tangan digital juga dapat diterapkan



Gambar 2. Protokol 6LowPAN

Gambar 2 adalah protokol 6LoWPAN. Media access control (MAC) 802.15.4 dan physical layer (PHY) pada lapisan 1 dan 2 mentransmisikan bingkai one-hop ke lapisan berikutnya. Pada Lapisan 2.5, paket akan dikompresi menjadi IPv6. Pada Lapisan 3, 6LoWPAN-ND dikompresi menjadi awalan jaringan IPv6 dan IPv6 *routing protocol for low-power and lossy networks* (RPL) mengarahkan paket IPv6. Pada Lapisan 7 terdapat *User-Datagram Protocol* (UDP) [5]. Tabel 2 menunjukkan perbandingan protokol TCP/IP dan 6LoWPAN.

TABEL II. PERBANDINGAN PROTOKOL TCP/IP DAN 6LOWPAN.

TCP/IP Protocol Stack	Layers	6Lowpan Protocol
HTTP, FTP, DNS,SMTP	Application	COAP, MQTT

TCP,UDP,ICMP	Transport	UDP,ICMP, DTLS
IP	Network	IPv6 With Lowpan
Ethernet,PPP	Data Link	IEEE 802.15.4 MAC
Ethernet	Physical	IEEE 802.15.4 PHY

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian protocol 802.11ah dan 802.15.4 untuk IoT dilakukan dengan menggunakan simulasi. Pada penelitian tersebut, digunakan protokol MAC (*Media Access Control*) CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) dalam standar 802.15.4, namun protokol ini memiliki kesulitan dalam menangani tabrakan, terutama saat banyak STAs (*Stationary Access Points*) bersaing secara bersamaan untuk saluran. Untuk mengatasi masalah ini, standar 802.11ah memperkenalkan mekanisme RAW (*Resource Allocation Window*) yang secara signifikan meningkatkan kinerja jaringan. Mekanisme ini membagi STAs menjadi kelompok dan memungkinkan STAs yang termasuk ke dalam kelompok tertentu untuk mengakses medium selama waktu tertentu. Informasi RAW *Parameter Set* (RPS), yang berisi satu atau beberapa interval RAW, disertakan dalam balok sinyal yang ditransmisikan oleh APs (*Access Points*). Studi simulasi menunjukkan bahwa 802.11ah lebih unggul daripada 802.15.4 dalam hal waktu asosiasi, *throughput*, kinerja *delay*, dan jangkauan jaringan untuk aplikasi IoT. Namun, 802.15.4 lebih hemat energi daripada 802.11ah. [13]

Pada Penelitian Perbandingan IEEE 802.11 and IEEE 802.15.4 untuk Future Green Multichannel Multi-radio Wireless Sensor Networks adalah membandingkan dua standar protokol nirkabel IEEE 802.11 dan IEEE 802.15.4 untuk jaringan sensor nirkabel multi-channel multi-radio yang ramah lingkungan. Tujuan penelitian adalah untuk mengevaluasi kinerja dari kedua protokol dan menentukan protokol mana yang lebih cocok untuk jaringan sensor nirkabel multi-radio yang ramah lingkungan. Penelitian ini juga mengevaluasi penggunaan multiple radio dan multiple channel untuk memperbaiki efisiensi energi dan ketersediaan jaringan. Penelitian ini mengumpulkan data melalui simulasi menggunakan platform NS-3 untuk mengukur parameter jaringan seperti *throughput*, *delay*, dan konsumsi daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa protokol IEEE 802.15.4 memiliki konsumsi daya yang lebih rendah dan *throughput* yang lebih baik dibandingkan dengan protokol IEEE 802.11. Namun,

protokol IEEE 802.11 menunjukkan performa yang lebih baik dalam hal latency dan efektifitas channel utilization. Berdasarkan hasil penelitian, para peneliti merekomendasikan penggunaan protokol IEEE 802.15.4 untuk jaringan sensor nirkabel multi-radio yang ramah lingkungan dengan menggunakan multiple channel dan multiple radio untuk memperbaiki efisiensi jaringan.

Penelitian perbandingan teknologi (Low Power Wide Area Network) LPWAN untuk penerapan IoT dalam skala besar membandingkan Sigfox, LoRa, dan NB-IoT. Faktor-faktor dan perbedaan teknis dari teknologi Sigfox, LoRa, dan NB-IoT pada Internet of Things (IoT) akan mempengaruhi kemungkinan penggunaan mereka untuk aplikasi yang spesifik. Penelitian ini membahas bahwa satu teknologi tidak dapat secara sempurna digunakan untuk semua aplikasi IoT, karena setiap aplikasi memiliki kebutuhan yang berbeda-beda. Oleh karena itu, penelitian tersebut menggunakan beberapa kasus penggunaan aplikasi IoT seperti pengukuran listrik, smart farming, otomatisasi manufaktur, smart building, terminal penjualan ritel, dan pelacakan palet untuk logistik. Untuk masing-masing aplikasi tersebut, dijabarkan teknologi yang paling cocok digunakan, agar dapat memenuhi kebutuhan dan tujuan dari aplikasi tersebut secara efektif. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa Sigfox dan LoRa memiliki keuntungan dalam hal masa pakai baterai, kapasitas, dan biaya. Sementara itu, NB-IoT menawarkan manfaat dalam hal laten dan kualitas layanan. Selain itu, penelitian ini menganalisis faktor kesuksesan IoT dari teknologi LPWAN [12]

Pada penelitian dari lapisan adaptasi dalam stack protokol 6LowPAN adalah untuk mengevaluasi efisiensi dan kinerja protokol 6LowPAN tanpa dan dengan lapisan adaptasi. Penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan apakah penggunaan lapisan adaptasi dapat meningkatkan kinerja dan efisiensi protokol 6LowPAN. Penelitian ini dilakukan melalui simulasi menggunakan platform NS-3 untuk mengukur kinerja protokol 6LowPAN tanpa dan dengan lapisan adaptasi. Beberapa parameter yang diukur adalah packet delivery ratio, konsumsi daya, dan waktu respons. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan lapisan adaptasi dapat meningkatkan kinerja dan efisiensi protokol 6LowPAN. Dengan menggunakan lapisan adaptasi, packet delivery ratio dapat ditingkatkan hingga 98%, sedangkan konsumsi daya dapat dikurangi hingga 60%. Berdasarkan hasil penelitian, para peneliti merekomendasikan penggunaan lapisan adaptasi dalam protokol 6LowPAN

untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi jaringan sensor nirkabel.

Penelitian selanjutnya menyelidiki teknologi jaringan nirkabel IEEE 802.11ah dan bagaimana teknologi ini dapat digunakan dalam konteks kota cerdas atau smart cities. IEEE 802.11ah, juga dikenal sebagai Wi-Fi HaLow, adalah sebuah standar jaringan nirkabel yang dirancang untuk menyediakan konektivitas internet ke berbagai jenis perangkat IoT (Internet of Things) dengan jangkauan jaringan yang lebih luas dan konsumsi daya yang lebih rendah. Dalam penelitian ini, para peneliti melakukan survei tentang berbagai aspek teknologi IEEE 802.11ah, seperti arsitektur jaringan, keamanan, kinerja jaringan, dan konsumsi daya. Mereka juga mempelajari bagaimana teknologi ini dapat digunakan dalam aplikasi kota cerdas, seperti pengelolaan lalu lintas, penghematan energi, dan pengelolaan limbah. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa IEEE 802.11ah memiliki potensi besar sebagai teknologi jaringan nirkabel untuk aplikasi kota cerdas. Namun, ada beberapa tantangan teknis yang perlu diatasi, seperti interferensi jaringan dan keterbatasan kapasitas jaringan. Selain itu, keamanan data dan privasi menjadi masalah yang penting dalam penggunaan teknologi ini.

### 3. METODE PENELITIAN

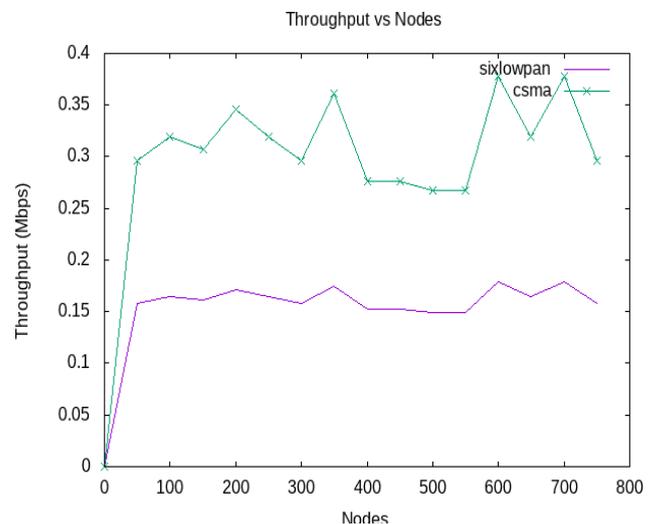
Simulasi NS-3 yang digunakan untuk membandingkan kinerja CSMA dan 6LoWPAN, telah banyak digunakan oleh komunitas penelitian untuk simulasi jaringan. Kedua protokol diberikan nilai yang sama untuk arsitektur, konfigurasi perangkat jaringan dan protokol, serta aliran lalu lintas untuk membandingkannya dengan parameter yang sama. Standar 802.15.4, yang beroperasi di band 2,4 GHz tanpa lisensi, dapat menampung kecepatan data hingga 250 Kbps. Di sisi lain, 802.11ah menggunakan band bebas lisensi sub-1 GHz untuk memberikan cakupan luas pada jaringan Wi-Fi dengan kecepatan data dari 650 Kbps hingga 7,8 Mbps. Jumlah beban perangkat yang sama, berkisar dari 50 hingga 750 node, diberikan pada kedua protokol. Alamat IP yang realistis dan phy wifi dihubungkan menggunakan switch ethernet 1.000 Mbps. Paket secara acak dipasangkan ke semua node yang terdiri dari pengirim dan penerima untuk menghasilkan aliran lalu lintas. Simulasi untuk kedua arsitektur dijalankan selama 100 detik, dan setiap paket mengirimkan data 1 Mbps dari pengirim ke penerima secara simultan. Modul pemantauan aliran di NS-3 digunakan untuk mengumpulkan dan menganalisis statistik kinerja.

Parameter simulasi yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja standar CSMA dan 6LoWPAN diberikan pada Tabel 3.

TABEL III. PARAMETER SIMULASI

Parameter	CSMA	6LoWPAN
Bandwidth	2 MHz	2 MHz
Data rate	650 Kbps	250 Kbps
Number of nodes	50-750	50-750
Simulation time	100s	100s
Packet size	1024 bytes	1024 bytes
Data rate for packet sending	1 Mbps	1 Mbps
Data rate for device channel	1000 Mbps	1000 Mbps
Traffic flow pattern	Exponential random	Exponential random

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN



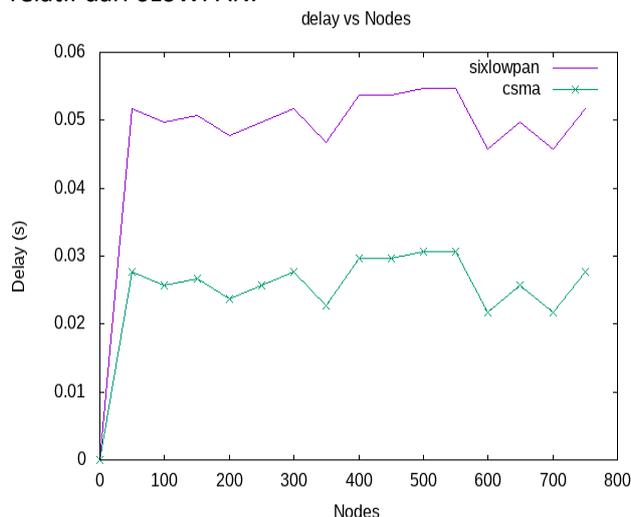
Gambar 3. Perbandingan Performansi Throghput

Ketika jumlah node perangkat meningkat dari 50 menjadi 750 dengan kondisi lalu lintas jenuh yang dapat mempengaruhi throughput, telah diidentifikasi bahwa mekanisme CSMA memiliki kinerja throughput yang lebih unggul dibandingkan dengan 6LoWPAN. Hal ini dapat dilihat dari hasil pengukuran yang menunjukkan throughput rata-rata yang jauh lebih

tinggi untuk CSMA, seperti yang terlihat pada Gambar 3.

Meskipun CSMA menawarkan kinerja throughput yang lebih tinggi, terdapat keunggulan khusus yang dimiliki oleh 6LoWPAN dalam hal stabilitas throughput pada kisaran 1,5 Mbps hingga 2 Mbps. Hal ini memberikan indikasi bahwa, meskipun CSMA dapat memberikan throughput yang lebih tinggi dalam situasi dengan lalu lintas yang padat, 6LoWPAN memiliki kemampuan untuk tetap menjaga stabilitas throughput pada tingkat yang lebih rendah namun konsisten. Ini dapat menjadi keuntungan yang penting dalam skenario yang mengharuskan konsistensi dalam pengiriman data, meskipun dengan throughput yang sedikit lebih rendah.

Sebagai hasilnya, mekanisme CSMA digunakan dengan batasan tertentu untuk mengurangi peluang terjadinya tabrakan pada situasi yang sama. Dengan membatasi jumlah node perangkat atau memperketat aturan akses media, risiko tabrakan dapat ditekan, sehingga kinerja throughput yang lebih tinggi dapat tetap dicapai dengan mempertahankan stabilitas yang relatif dari 6LoWPAN.



Gambar 4. Perbandingan Performansi Delay

Pada Gambar 4 terlihat bahwa kinerja mekanisme CSMA memiliki delay yang lebih rendah dibandingkan dengan 6LoWPAN. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa dalam situasi dengan jumlah node yang tinggi, mekanisme CSMA memiliki kinerja yang lebih baik dalam hal delay dibandingkan dengan 6LoWPAN. Rentang keterlambatan yang lebih rendah pada CSMA (0,02 detik hingga 0,03 detik) menunjukkan bahwa pengiriman data dapat dilakukan dengan lebih cepat dan responsif dibandingkan dengan 6LoWPAN (0,045 detik hingga 0,055 detik).

Faktor utama yang menyebabkan perbedaan ini adalah perbedaan dalam lapisan MAC (Medium Access

Control) yang digunakan oleh kedua mekanisme. Pada 6LoWPAN, lapisan MAC yang digunakan adalah MAC 802.15.4, sementara pada CSMA, digunakan MAC 802.11.

Lapisan MAC 802.15.4 pada 6LoWPAN cenderung lebih lambat dalam beradaptasi dengan jumlah node yang semakin tinggi. Hal ini dapat terjadi karena adanya kompleksitas dalam mekanisme sinkronisasi waktu dan pengaturan jendela waktu pada lapisan MAC 802.15.4. Dalam situasi dengan jumlah node yang tinggi, keterlambatan dalam sinkronisasi dan pengaturan jendela waktu ini dapat meningkat, yang pada akhirnya menyebabkan keterlambatan yang lebih tinggi dalam pengiriman data.

Sementara itu, pada CSMA, lapisan MAC 802.11 dapat beradaptasi dengan cepat dan efisien dengan jumlah node yang semakin meningkat. Mekanisme CSMA pada lapisan MAC 802.11 memungkinkan perangkat untuk mendeteksi keberadaan paket data pada saluran komunikasi sebelum mereka mengirim data mereka sendiri. Hal ini memungkinkan pengaturan jendela waktu yang lebih efisien dan penjadwalan akses media yang lebih baik, yang pada gilirannya mengurangi keterlambatan pengiriman data.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam makalah ini, protokol IEEE 802.15.4 MAC dibahas untuk membantu pemahaman skema 802.11 CSMA/CA dan 802.15.4 6lowpan. Melalui simulasi NS3, kami mengevaluasi dan membandingkan kinerja kedua protokol untuk membuat keputusan rasional mengenai protokol mana yang layak untuk perangkat IoT di masa depan yang beroperasi dengan sistem multimedia atau surveilans dalam lingkungan radio multichannel. Protokol 6lowPAN dapat efektif digunakan dalam aplikasi otomatisasi dan hiburan di lingkungan rumah, kantor, dan pabrik, sedangkan protokol 802.11 CSMA/CA dapat diterapkan dalam lingkungan kota cerdas dan rumah pintar yang membutuhkan tingkat data yang lebih tinggi.

Studi ini menyediakan perbandingan antara CSMA dan 6LoWPAN dalam hal kinerja *throughput* dan *delay* dalam konteks IoT, memungkinkan untuk implementasi protokol yang efektif. Berdasarkan hasil simulasi, CSMA menunjukkan kinerja *throughput* yang lebih tinggi dibandingkan dengan 6LoWPAN, 6LoWPAN memiliki keunggulan dalam hal stabilitas *throughput* pada kisaran tertentu. Kemudian perbedaan dalam lapisan MAC yang digunakan oleh mekanisme CSMA

dan 6LoWPAN menjadi faktor penentu dalam perbedaan keterlambatan kinerja. Lapisan MAC 802.11 pada CSMA memiliki kemampuan yang lebih baik dalam beradaptasi dengan jumlah node yang tinggi, sementara lapisan MAC 802.15.4 pada 6LoWPAN memiliki keterbatasan dalam hal adaptasi tersebut. Oleh karena itu, mekanisme CSMA menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam hal delay jika dibandingkan dengan 6LoWPAN pada situasi dengan jumlah node yang tinggi.

Perbandingan kinerja CSMA dengan 6LoWPAN dengan ukuran paket rendah, sedang, dan tinggi direncanakan untuk pekerjaan IoT di masa depan. Pilihan mekanisme akses media harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dan tujuan penggunaan, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti tingkat lalu lintas, stabilitas, dan throughput yang diinginkan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam proses penerbitan artikel ini, termasuk penulis pendamping dan semua orang yang terlibat atas dukungan, bimbingan dan bantuan yang diberikan sebagai masukan pada penelitian ini dan juga kepada Jurnal Teknologi Informasi Komputer dan Aplikasinya yang telah memfasilitasi publikasi artikel penelitian kami.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alkuhlani, Ahmed M. I, et.al. 2015 Internet of Things (IoT) Standard, Protocols, and Security Issues. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 4, Issue 11, November 2015
- [2] Colina, Antonio L, et.al. 2016. Internet of Things in 5 Days.
- [3] Garg, Ruchi and Sanjay Sharma. 2017. A study on Need of Adaptation Layer in 6LoWPAN Protocol Stack. IJ. Wireless and Microwave Technologies, 2017, 3, 49-57.
- [4] Gurusamy, Vijay. 2002. Service Differentiation Using p-Persistent CSMA/CA. Faculty of The Graduate College of The Oklahoma State University
- [5] Krentz, Konrad-Felix, et.al. 2013. 6LoWPAN Security: Adding Compromise Resilience to the 802.15.4. Security Sublayer
- [6] Marsic, I., "Wireless Networks: Local and Ad Hoc Networks" in 2005, Rutgers University.
- [7] Nasri, Nejah, Abdennaceur Kachouri, and Mounir Samet. 2018. CSMA-based MAC Protocol for Collision Avoidance in a Dense RFID Network.
- [8] Sarker, Manobendu. 2017. Development of CSMA MAC Protocol and Throughput Analysis For MU-MIMO WLAN. Bangladesh University of Engineering and Technology.
- [9] Shelby, Zach and Carsten Bormann. 2009. 6LoWPAN The Wireless Embedded Internet. Finland: Wiley
- [10] Wong, Pui King, et.al. Performance Analysis of Markov Modulated 1-Persistent CSMA/CA Protocols with Exponential Backoff Scheduling.
- [11] N. Ahmed, H. Rahman, et.al. 2016 A Comparison of 802.11ah and 802.15.4 for IoT. Korean Institute of Communications and Information Sciences
- [12] Kais Mekki, Eddy Bajic, et.al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express, Volume 5, Issue 1, 2019, pp. 1-7
- [13] Carlene E-A Campbell, K-K Loo, et.al. 2011. Comparison of IEEE 802.11 and IEEE 802.15.4 for Future Green Multichannel Multi-radio Wireless Sensor Networks. International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS) Vol. 3, No. 1, April 2011
- [14] E. Khorojhv, A. Lyakhov, et.al. 2015. A survey on IEEE 802.11ah: An enabling networking technology for smart cities. Comput. Commun., 58 (2015), pp. 53-69
- [15] A. Hazmi, J. Rinne, et.al. 2012. Feasibility study of IEEE 802.11ah radio technology for IoT and M2M use cases. Globecom Workshops, IEEE (2012), pp. 1687-1.