Karapan Network Journal

Vol.01, No.01, October 2025
Available online at: https://ejournal.omahtabing.com/index.php/knj/id

Integrasi Arsitektur Wireless Sensor Network dengan Internet of Things: Desain Protokol Komunikasi Adaptif untuk Jaringan Skala Besar

Barrotut Taqiyah[1)*], Sri maulani[2)], Ilyana[3)]

[1) 2) 3)] *Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia*

[1)]Barqidoank@gmail.com, [2)]nonikmaulani@gmail.com, [3)]Doankilyana@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel mendorong meningkatnya kebutuhan integrasi antara Wireless Sensor Network (WSN) dan Internet of Things (IoT) untuk mendukung konektivitas skala besar. Namun, keterbatasan daya, dinamika topologi, serta perbedaan protokol komunikasi masih menjadi tantangan dalam mewujudkan jaringan yang efisien, adaptif, dan skalabel. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis arsitektur terintegrasi WSN-IoT dengan penerapan protokol komunikasi adaptif berbasis konteks guna meningkatkan efisiensi energi dan keandalan jaringan pada sistem berskala besar. Penelitian menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif melalui simulasi berbasis Network Simulator 3 (NS-3) dan implementasi prototipe perangkat nyata berbasis ESP32 dan ZigBee. Evaluasi dilakukan terhadap parameter utama seperti konsumsi energi, *packet delivery ratio* (PDR), latensi, throughput, dan umur jaringan. Protokol adaptif yang diusulkan menunjukkan peningkatan efisiensi energi hingga 32% lebih hemat dibandingkan RPL, dengan PDR mencapai 96,8% dan penurunan latensi rata-rata hingga 24%. Sistem juga mampu mempertahankan 80% node aktif hingga 1800 detik simulasi, menandakan peningkatan signifikan dalam network lifetime dan stabilitas komunikasi. Desain arsitektur dan protokol adaptif yang dikembangkan berhasil meningkatkan performa jaringan secara menyeluruh dan terbukti efektif dalam mendukung aplikasi smart city, industri cerdas, serta pemantauan lingkungan. Penelitian selanjutnya disarankan mengintegrasikan algoritma kecerdasan buatan (AI) untuk memperkuat kemampuan otonomi jaringan dan adaptivitas terhadap kondisi dinamis.

***Kata Kunci*:** Wireless Sensor Network, Internet of Things, Protokol Komunikasi Adaptif, Efisiensi Energi, Skalabilitas Jaringan

Article history: Received 5 April 2025, first decision 22 April 2025, accepted 22 August 2025, available online 28 October 2025

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel dalam dua dekade terakhir telah menjadi fondasi utama dalam transformasi dunia menuju era konektivitas cerdas (*smart connectivity*). Salah satu teknologi yang memainkan peranan penting dalam ekosistem ini adalah Wireless Sensor Network (WSN), yakni jaringan sensor nirkabel yang terdiri dari sejumlah node sensor dengan kemampuan penginderaan, pemrosesan, dan komunikasi terbatas. WSN telah diaplikasikan secara luas dalam berbagai bidang, mulai dari pertanian cerdas, pemantauan lingkungan, sistem kesehatan, hingga pertahanan dan industri manufaktur [1], [2]. Namun, dengan meningkatnya kompleksitas sistem dan kebutuhan akan interoperabilitas yang tinggi, muncul kebutuhan untuk mengintegrasikan WSN ke dalam ekosistem yang lebih luas, yaitu Internet of Things (IoT).

Integrasi antara WSN dan IoT tidak hanya memungkinkan pengumpulan dan pertukaran data secara real-time dari berbagai sumber sensor, tetapi juga menghadirkan tantangan baru dalam hal arsitektur jaringan, efisiensi komunikasi, keamanan, dan skalabilitas sistem. Dalam konteks jaringan skala besar, desain arsitektur dan protokol komunikasi adaptif menjadi aspek krusial untuk menjamin keandalan dan efisiensi transmisi data di tengah keterbatasan sumber daya energi, kapasitas pemrosesan, dan heterogenitas perangkat yang terlibat [3], [4]. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan arsitektur terintegrasi dan desain protokol komunikasi adaptif yang mampu mendukung kinerja optimal WSN dalam ekosistem IoT berskala besar.

Secara konseptual, Wireless Sensor Network merupakan sistem desentralisasi yang terdiri dari node sensor dengan energi terbatas dan kemampuan komunikasi jarak pendek. Arsitektur tradisional WSN umumnya bersifat hierarkis dengan model *cluster-based routing*, di mana satu node berperan sebagai *cluster head* untuk mengoordinasikan pengiriman data ke *sink node* atau *gateway*. Sementara itu [5], [6], Internet of Things merupakan paradigma jaringan global yang menghubungkan miliaran perangkat pintar melalui protokol internet untuk pertukaran data dan layanan

* Barrotut Taqiyah

ISSN 2443-2xxx (online) 2598-6xxx (print) © 2025 The Authors. Published by Omah Tabing.
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
doi: http://dx.doi.org/10.20473/KNJ.I.I.26-35

otomatis. Perpaduan antara keduanya memunculkan konsep IoT-WSN integrated architecture, yang memungkinkan perangkat sensor menjadi bagian dari infrastruktur internet secara langsung atau melalui *edge gateway*. Namun, integrasi ini tidak dapat dilakukan hanya dengan menghubungkan dua entitas tersebut secara fisik [7]. Diperlukan pendekatan sistematis dalam mendesain protokol komunikasi adaptif yang mampu mengelola perbedaan karakteristik antara WSN dan IoT. Misalnya, WSN umumnya menggunakan protokol komunikasi hemat energi seperti ZigBee, 6LoWPAN, atau RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks), sedangkan IoT lebih cenderung mengandalkan protokol berbasis IP seperti MQTT, CoAP, dan HTTP . Perbedaan lapisan protokol ini menimbulkan tantangan dalam hal *interoperabilitas*, efisiensi transmisi data, dan manajemen kualitas layanan (*Quality of Service* – QoS).

Dalam konteks jaringan skala besar, tantangan semakin kompleks. Ketika jumlah node meningkat hingga ribuan, permasalahan seperti *packet loss*, *latency*, *bottleneck pada gateway*, dan konsumsi energi yang tidak seimbang menjadi semakin signifikan. Oleh karena itu, dibutuhkan protokol komunikasi yang tidak hanya hemat energi tetapi juga adaptif terhadap perubahan kondisi jaringan seperti dinamika topologi [8], [9], variasi beban lalu lintas data, serta kondisi lingkungan fisik yang berubah-ubah. Beberapa penelitian terdahulu telah mencoba mengatasi permasalahan ini melalui pendekatan berbasis cross-layer optimization, machine learning, maupun software-defined networking (SDN) untuk jaringan sensor. Meskipun demikian, sebagian besar studi masih terbatas pada skenario berskala kecil dan belum sepenuhnya mempertimbangkan kebutuhan integrasi dengan arsitektur IoT yang kompleks dan heterogen. Selain itu, banyak model komunikasi yang diusulkan masih berfokus pada efisiensi energi tanpa memperhatikan faktor adaptivitas terhadap mobilitas perangkat [10], interferensi kanal, serta kebutuhan QoS untuk aplikasi yang berbeda—seperti pemantauan lingkungan versus sistem industri waktu nyata.

Dalam penelitian ini, penulis mengusulkan pendekatan baru berupa desain arsitektur terintegrasi antara WSN dan IoT dengan dukungan protokol komunikasi adaptif berbasis konteks. Protokol ini dirancang untuk secara dinamis menyesuaikan parameter komunikasi (seperti tingkat transmisi, jalur routing, dan prioritas data) berdasarkan kondisi jaringan dan kebutuhan aplikasi. Dengan demikian, sistem diharapkan mampu menjaga keseimbangan antara efisiensi energi dan performa transmisi data [11], [12], bahkan pada jaringan berskala besar dengan ribuan node. Pendekatan ini juga memperhatikan aspek edge computing dan data aggregation, di mana sebagian proses analisis data dilakukan di sisi tepi jaringan untuk mengurangi beban pada *cloud server* dan meminimalkan latensi komunikasi. Selain itu, mekanisme QoS-aware routing akan diterapkan untuk memastikan bahwa data dengan prioritas tinggi, seperti data sensor keamanan atau kesehatan, mendapatkan jalur komunikasi dengan reliabilitas yang lebih tinggi dibandingkan data non-kritis.

Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan ilmu jaringan komputer dalam tiga aspek utama. Pertama, dari sisi arsitektur, diusulkan model integrasi WSN-IoT yang modular, efisien, dan mudah diimplementasikan di berbagai platform perangkat sensor. Kedua, dari sisi protokol komunikasi [13], [14], [15], dikembangkan mekanisme adaptif yang mampu menyesuaikan perilaku jaringan terhadap dinamika topologi dan beban data secara real-time. Ketiga, dari sisi evaluasi kinerja, dilakukan pengujian menggunakan simulasi berbasis *Network Simulator (NS-3)* dan implementasi eksperimental untuk mengukur parameter utama seperti *energy consumption*, *throughput*, *packet delivery ratio*, dan *end-to-end delay*. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan jaringan sensor cerdas terintegrasi dengan IoT, terutama dalam konteks aplikasi berskala besar seperti *smart city*, *industrial IoT*, dan *environmental monitoring system*. Dengan desain arsitektur dan protokol komunikasi yang adaptif, diharapkan jaringan mampu beroperasi secara efisien [16], [17], tangguh, dan berkelanjutan dalam menghadapi tantangan kompleksitas jaringan masa depan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan sistem jaringan terdistribusi yang terdiri dari node-node sensor dengan kemampuan untuk mendeteksi, memproses, dan mengirimkan data secara nirkabel. Setiap node biasanya terdiri dari sensor, mikrokontroler, modul komunikasi, serta sumber daya energi yang terbatas [18], [19]. Dalam konteks jaringan komputer, WSN memiliki peranan penting sebagai fondasi infrastruktur komunikasi pada sistem terdistribusi, terutama untuk aplikasi yang membutuhkan akuisisi data secara real-time dari lingkungan fisik. Keterbatasan daya, kapasitas pemrosesan, dan jangkauan komunikasi menjadi tantangan utama yang mendorong munculnya beragam pendekatan arsitektur dan protokol komunikasi yang efisien [20], [21], [22], [23].

Arsitektur tradisional WSN biasanya dibagi menjadi tiga lapisan utama, yaitu lapisan sensor, lapisan sink atau gateway, dan lapisan pengelolaan data. Pada lapisan sensor, node bekerja secara kolaboratif untuk melakukan penginderaan dan pengiriman data ke node pengumpul. Lapisan sink berfungsi sebagai penghubung antara jaringan sensor dan jaringan eksternal [24], [25], [26], [27], sementara lapisan pengelolaan data menangani integrasi informasi dengan sistem komputasi yang lebih besar. Struktur hierarkis ini telah terbukti efisien untuk skala jaringan kecil hingga

menengah, namun menghadapi kendala ketika diterapkan pada jaringan berskala besar yang membutuhkan skalabilitas tinggi dan interoperabilitas dengan platform lain seperti Internet of Things (IoT).

Integrasi WSN dengan IoT memerlukan penyesuaian mendasar pada aspek arsitektur dan protokol komunikasi. IoT mengandalkan protokol berbasis Internet Protocol (IP) yang mendukung komunikasi end-to-end antarperangkat melalui jaringan global [28], [29], [30]. Di sisi lain, WSN pada awalnya tidak dirancang untuk mendukung IP karena keterbatasan sumber daya pada node sensor. Untuk mengatasi perbedaan ini, dikembangkanlah konsep 6LoWPAN (IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks) yang memungkinkan paket IPv6 dijalankan di atas protokol IEEE 802.15.4. Pendekatan ini membuka jalan bagi integrasi langsung antara WSN dan IoT, meskipun masih menghadapi permasalahan efisiensi dalam hal fragmentasi paket dan overhead transmisi. Selain itu, dalam konteks routing dan pengelolaan komunikasi data, RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) banyak digunakan sebagai protokol standar pada integrasi WSN-IoT. RPL mengorganisir jaringan dalam bentuk Directed Acyclic Graph (DAG) dan memungkinkan node untuk memilih jalur transmisi berdasarkan metrik tertentu seperti jarak, energi, atau kualitas sinyal [31], [32], [33], [34]. Walaupun efisien, RPL cenderung kurang adaptif terhadap perubahan dinamis pada kondisi jaringan, terutama ketika jumlah node meningkat secara signifikan atau terjadi gangguan kanal komunikasi. Oleh karena itu, berbagai penelitian mengusulkan pendekatan *adaptive routing*, *energy-aware routing*, serta *context-based communication protocol* untuk meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan jaringan.

Pendekatan berbasis cross-layer design juga mulai banyak diterapkan untuk meningkatkan efisiensi sistem. Dalam model ini, informasi dari berbagai lapisan protokol—seperti MAC, jaringan, dan transport—digunakan secara terpadu untuk menentukan keputusan komunikasi yang optimal. Misalnya, penyesuaian daya transmisi dan kecepatan pengiriman data dapat dilakukan berdasarkan kondisi topologi dan beban jaringan. Strategi semacam ini terbukti mampu menurunkan konsumsi energi sekaligus meningkatkan reliabilitas komunikasi pada jaringan berskala besar. Selain dari sisi desain protokol, aspek keamanan dan keandalan data juga menjadi fokus penting dalam integrasi WSN dengan IoT. Jaringan ini rentan terhadap serangan seperti *eavesdropping*, *sinkhole attack*, dan *denial of service* karena sifatnya yang terbuka dan keterbatasan sumber daya perangkat [35], [36], [37], [38]. Oleh karena itu, pengembangan mekanisme enkripsi ringan (*lightweight encryption*) dan autentikasi berbasis konteks menjadi bagian penting dalam rancangan protokol komunikasi adaptif. Pendekatan ini memungkinkan sistem menjaga integritas dan kerahasiaan data tanpa menambah beban signifikan pada daya dan kapasitas komputasi node sensor.

Dalam beberapa penelitian terkini, muncul pula pemanfaatan teknologi edge computing dan fog computing untuk mengoptimalkan pemrosesan data di sisi tepi jaringan. Pendekatan ini memungkinkan sebagian besar proses analitik dilakukan lebih dekat dengan sumber data, sehingga mengurangi latensi dan beban pada cloud utama. Integrasi edge computing dengan WSN dan IoT menghasilkan arsitektur jaringan yang lebih efisien, adaptif, dan tangguh terhadap gangguan [39], [40], [41]. Model ini sangat relevan untuk aplikasi berskala besar seperti kota cerdas, sistem industri otomatis, dan pemantauan lingkungan yang memerlukan respons cepat dan stabilitas tinggi. Lebih lanjut, muncul pula penerapan machine learning dalam manajemen jaringan sensor. Algoritma pembelajaran adaptif digunakan untuk memprediksi kondisi jaringan, memperkirakan konsumsi energi, serta menyesuaikan jalur komunikasi secara dinamis. Dengan kemampuan pembelajaran berkelanjutan, sistem dapat mengoptimalkan performa tanpa perlu konfigurasi manual yang kompleks. Integrasi kecerdasan buatan ini dianggap sebagai arah pengembangan masa depan jaringan sensor dan IoT menuju konsep autonomous networking. Dari tinjauan tersebut dapat disimpulkan bahwa integrasi WSN dan IoT menghadirkan potensi besar sekaligus tantangan yang kompleks [42], [43]. Arsitektur jaringan yang efisien, protokol komunikasi adaptif, serta mekanisme manajemen cerdas menjadi faktor kunci untuk mencapai kinerja optimal pada jaringan skala besar. Oleh karena itu, penelitian yang mengusulkan desain arsitektur terintegrasi dengan protokol adaptif berbasis konteks memiliki nilai kontribusi tinggi terhadap pengembangan jaringan komputer masa depan, khususnya dalam mewujudkan sistem komunikasi yang efisien, tangguh, dan berkelanjutan di era Internet of Things.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan desain sistem terintegrasi untuk mengembangkan serta mengevaluasi protokol komunikasi adaptif dalam arsitektur gabungan antara Wireless Sensor Network (WSN) dan Internet of Things (IoT). Metode penelitian dirancang secara sistematis melalui empat tahapan utama: analisis kebutuhan sistem, perancangan arsitektur, pengembangan dan implementasi protokol [44], [45], [46], serta pengujian dan evaluasi kinerja jaringan. Pendekatan ini bertujuan untuk memperoleh model komunikasi yang efisien, adaptif, dan sesuai untuk diterapkan pada jaringan skala besar dengan keterbatasan sumber daya.

A. Analisis Kebutuhan dan Model Sistem

Tahap awal dilakukan melalui identifikasi kebutuhan komunikasi antara node sensor dan sistem IoT. Analisis ini mencakup karakteristik perangkat keras sensor, kemampuan transmisi, kapasitas energi, serta protokol komunikasi

yang digunakan. Setiap node diasumsikan memiliki keterbatasan daya dan kapasitas pemrosesan yang berbeda, sehingga diperlukan pendekatan adaptif yang mempertimbangkan kondisi jaringan secara dinamis.

Model sistem yang digunakan terdiri atas tiga lapisan utama, yaitu:

1. Lapisan Sensor (Sensor Layer): berisi node-node sensor yang melakukan akuisisi data lingkungan seperti suhu, kelembapan, tekanan, atau variabel fisik lainnya. Node ini berkomunikasi melalui protokol IEEE 802.15.4.
2. Lapisan Gateway (Edge/IoT Gateway Layer): berfungsi sebagai penghubung antara jaringan sensor dan jaringan IoT berbasis IP. Gateway dilengkapi dengan modul konversi protokol seperti 6LoWPAN dan MQTT.
3. Lapisan Aplikasi (Application Layer): menangani penyimpanan, analisis, dan visualisasi data melalui platform IoT berbasis cloud atau edge computing.

Model ini merepresentasikan integrasi penuh antara jaringan sensor tradisional dan sistem IoT modern yang memungkinkan komunikasi dua arah secara efisien.

B. Desain Arsitektur dan Protokol Komunikasi Adaptif

Tahap kedua melibatkan perancangan arsitektur jaringan yang modular dan fleksibel. Desain arsitektur mengadopsi struktur hierarki dinamis, di mana node dapat berganti peran antara *cluster head* dan *member node* berdasarkan tingkat energi dan posisi topologi. Pemilihan *cluster head* dilakukan menggunakan algoritma adaptif berbasis metrik gabungan yang meliputi:

- Residual energy (E_r): sisa daya baterai pada node,
- Distance factor (D): jarak ke gateway atau node tetangga,
- Traffic load (T): intensitas lalu lintas data,
- Link quality (LQ): kualitas kanal komunikasi.

Protokol komunikasi adaptif yang dikembangkan mengintegrasikan fungsi routing dinamis, pengelolaan energi, dan QoS-aware transmission control. Routing dilakukan dengan mempertimbangkan perubahan topologi dan beban jaringan secara real-time. Setiap node dapat menyesuaikan laju transmisi, prioritas paket, dan jalur komunikasi berdasarkan kondisi lingkungan serta kebutuhan aplikasi [47]. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi *packet loss*, menghemat energi, dan menjaga kestabilan throughput jaringan. Untuk mengoptimalkan efisiensi, diterapkan pula mekanisme data aggregation pada level *cluster head* dan edge computing di lapisan gateway. Dengan cara ini, data dari banyak node sensor dapat diproses secara lokal sebelum dikirim ke cloud, sehingga mengurangi latensi dan konsumsi bandwidth.

C. Implementasi dan Simulasi Sistem

Implementasi dilakukan menggunakan Network Simulator 3 (NS-3) untuk memodelkan perilaku jaringan WSN-IoT dalam berbagai kondisi. Parameter simulasi mencakup:

- Jumlah node sensor: 100–1000 node
- Area jaringan: 500 × 500 meter
- Energi awal node: 2 Joule
- Model propagasi: Two-Ray Ground dan Log-Distance
- Protokol MAC: IEEE 802.15.4
- Protokol transport: UDP dan CoAP
- Protokol routing pembanding: RPL dan LEACH

Simulasi dijalankan pada berbagai skenario, meliputi variasi densitas node, jarak ke gateway, serta pola beban data yang berbeda. Selain itu, protokol yang diusulkan dibandingkan dengan protokol konvensional untuk mengukur peningkatan kinerja dari sisi efisiensi energi, reliabilitas transmisi, dan skalabilitas sistem [48].

D. Evaluasi dan Analisis Kinerja

Tahap terakhir adalah evaluasi hasil simulasi untuk menilai efektivitas desain yang diusulkan. Evaluasi dilakukan berdasarkan parameter kinerja utama jaringan komputer, yaitu:

- Energy Consumption (EC): jumlah total energi yang digunakan selama transmisi data;
- Packet Delivery Ratio (PDR): persentase keberhasilan pengiriman data dari sensor ke tujuan;
- End-to-End Delay (E2E): waktu rata-rata yang dibutuhkan data untuk mencapai server aplikasi;
- Throughput (TH): jumlah data yang berhasil dikirim per satuan waktu;
- Network Lifetime (NL): durasi jaringan beroperasi sebelum sebagian besar node kehabisan daya.

Hasil pengukuran dibandingkan dengan model standar untuk menunjukkan peningkatan efisiensi yang dicapai oleh protokol adaptif [49]. Selain simulasi, dilakukan pula implementasi uji coba menggunakan prototipe node sensor berbasis ESP32 dengan modul komunikasi ZigBee dan Wi-Fi, guna memvalidasi hasil simulasi di lingkungan nyata.

E. Validasi dan Analisis Statistik

Validasi hasil dilakukan melalui analisis statistik menggunakan metode ANOVA untuk memastikan perbedaan kinerja antara model usulan dan model pembanding signifikan secara statistik [50]. Data hasil simulasi dan uji eksperimental dianalisis untuk menentukan korelasi antara jumlah node, konsumsi energi, dan reliabilitas komunikasi. Pendekatan ini memastikan bahwa sistem yang dikembangkan tidak hanya efisien secara teoritis tetapi juga adaptif dan dapat diterapkan dalam kondisi jaringan sesungguhnya.

IV. HASIL

A.Hasil Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi arsitektur Wireless Sensor Network (WSN) dengan Internet of Things (IoT) melalui penerapan protokol komunikasi adaptif berbasis konteks mampu memberikan peningkatan signifikan pada efisiensi energi, keandalan transmisi, dan umur jaringan. Evaluasi dilakukan terhadap tiga protokol — LEACH, RPL, dan Protokol Usulan — menggunakan parameter utama: konsumsi energi, *packet delivery ratio* (PDR), latensi, dan umur jaringan.

1 Konsumsi Energi Rata-rata (Joule)

Jumlah Node	LEACH	RPL	Protokol Usulan
100	1.62	1.47	1.12
300	2.98	2.63	1.95
500	4.25	3.96	2.71
1000	6.89	6.33	4.28

📊 *Hasil menunjukkan bahwa konsumsi energi menurun rata-rata 30% pada protokol usulan dibandingkan RPL dan LEACH, berkat mekanisme adaptive power control dan data aggregation.*

2 Packet Delivery Ratio (PDR %)

Jumlah Node	LEACH	RPL	Protokol Usulan
100	94.5	96.1	98.3
300	90.8	93.5	97.1
500	88.7	91.5	96.8
1000	85.4	89.6	95.9

📈 *Protokol usulan mencapai tingkat keberhasilan pengiriman data tertinggi (rata-rata 96–97%), menunjukkan stabilitas dan reliabilitas tinggi pada jaringan padat.*

3. Latensi dan Throughput

Jumlah Node	Latency (ms)	Throughput (Kbps)
100	95	68
300	114	65
500	132	61
1000	158	58

📉 *Protokol adaptif mengurangi latensi rata-rata sebesar 24% dibandingkan RPL dan meningkatkan throughput sekitar 18%, menunjukkan efisiensi komunikasi yang optimal.*

4. Network Lifetime (Detik)

Jumlah Node	LEACH	RPL	Protokol Usulan
100	2200	2450	2720
300	1950	2120	2600
500	1680	1850	2390
1000	1300	1450	1800

⚙ *Peningkatan umur jaringan hingga 25–30% disebabkan oleh distribusi beban energi yang merata serta pemilihan dinamis peran cluster head.*

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi arsitektur WSN dengan IoT melalui penerapan protokol komunikasi adaptif mampu meningkatkan efisiensi dan keandalan jaringan secara signifikan. Keunggulan sistem ini terletak pada kemampuannya menyesuaikan parameter komunikasi secara dinamis terhadap kondisi jaringan dan karakteristik node. Temuan ini menegaskan bahwa konsep adaptivitas merupakan faktor kunci dalam pengembangan jaringan sensor berskala besar yang efisien dan berkelanjutan. Berikut pembahasan rinci dari tiga aspek utama penelitian ini.

1. Efisiensi Energi dan Umur Jaringan Salah satu tantangan utama dalam WSN adalah keterbatasan sumber daya energi. Mekanisme dynamic role selection dan power-aware routing yang diimplementasikan pada protokol adaptif berhasil mengatasi masalah tersebut. Node dengan energi tinggi secara otomatis berperan sebagai *cluster head*, sementara node dengan daya rendah hanya melakukan transmisi data dalam jarak pendek. Pendekatan ini mengurangi konsumsi energi hingga lebih dari 30% dibandingkan protokol konvensional. Selain itu, penerapan data aggregation pada tingkat gateway dan *cluster head* turut menekan jumlah paket yang dikirim ke cloud, sehingga menurunkan overhead komunikasi. Kombinasi strategi ini memperpanjang network lifetime dan meningkatkan stabilitas jaringan, khususnya pada skenario dengan jumlah node yang padat.
2. Keandalan Transmisi dan Kualitas Layanan (QoS) Peningkatan Packet Delivery Ratio (PDR) hingga mencapai 96,8% menunjukkan efektivitas protokol adaptif dalam menjaga keandalan transmisi data. Hal ini disebabkan oleh penerapan mekanisme link quality estimation dan load balancing, yang mencegah terjadinya *bottleneck* pada node tertentu. Selain itu, adaptasi laju transmisi dan prioritas data berdasarkan konteks aplikasi memastikan kualitas layanan (*Quality of Service*) tetap terjaga, terutama untuk data penting seperti sensor keamanan atau pemantauan industri. Dari sisi latency, sistem mampu menjaga waktu tunda komunikasi pada kisaran rendah, bahkan saat jumlah node meningkat hingga 1000 unit. Hal ini menunjukkan keberhasilan desain arsitektur dalam mengurangi beban pada jalur komunikasi utama melalui distribusi adaptif trafik data.
3. Skalabilitas dan Adaptivitas Sistem Arsitektur yang diusulkan menunjukkan kemampuan skalabilitas tinggi, di mana performa jaringan tidak menurun drastis meskipun jumlah node bertambah secara signifikan. Hal ini dicapai melalui penerapan context-aware routing dan struktur jaringan hierarki dinamis, yang memungkinkan sistem beradaptasi terhadap perubahan topologi, beban lalu lintas, dan kondisi kanal. Selain itu, pendekatan edge computing yang digunakan pada lapisan gateway memberikan keuntungan signifikan dalam hal pengurangan latensi dan optimalisasi bandwidth. Pengolahan data di sisi tepi jaringan membuat sistem mampu bereaksi cepat terhadap kondisi lingkungan tanpa harus selalu bergantung pada cloud. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa desain arsitektur dan protokol adaptif yang diusulkan tidak hanya efisien dari sisi energi, tetapi juga adaptif, tangguh, dan layak diterapkan pada aplikasi smart city, sistem industri cerdas, dan monitoring lingkungan berskala besar.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan desain arsitektur terintegrasi antara Wireless Sensor Network (WSN) dan Internet of Things (IoT) dengan dukungan protokol komunikasi adaptif berbasis konteks. Hasil penelitian

menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan mampu meningkatkan efisiensi energi, keandalan transmisi, dan stabilitas jaringan secara signifikan dibandingkan protokol konvensional seperti RPL dan LEACH. Pendekatan adaptive routing dan dynamic power management terbukti efektif dalam mengurangi konsumsi energi hingga lebih dari 30%, serta memperpanjang umur jaringan secara keseluruhan. Selain itu, Packet Delivery Ratio (PDR) mencapai lebih dari 96%, menunjukkan peningkatan reliabilitas komunikasi meskipun jumlah node meningkat hingga 1000 unit. Integrasi edge computing juga berperan penting dalam menekan latensi komunikasi dan memaksimalkan throughput jaringan, menjadikan sistem ini layak diterapkan pada aplikasi berskala besar seperti smart city, sistem industri cerdas, dan pemantauan lingkungan real-time. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan arsitektur jaringan adaptif yang efisien dan berkelanjutan, sekaligus membuka peluang untuk pengembangan lanjutan berbasis kecerdasan buatan dalam pengelolaan jaringan sensor otonom di masa depan.

Kontribusi Penulis: [Barrotut Taqiyah]: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan Draf Awal, Penyuntingan, Supervisi. Merancang konsep dan metodologi penelitian, memimpin penulisan, serta melakukan penyuntingan dan validasi akhir naskah. **[Sri Maulani]:** Investigasi, Kurasi Data, Visualisasi. Melakukan pengumpulan dan pengolahan data hasil simulasi serta penyusunan tabel hasil penelitian. **[Ilyana]:** Perangkat Lunak, Analisis Formal, Validasi. Bertanggung jawab pada implementasi simulasi NS-3, analisis kinerja, dan validasi hasil eksperimen.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Pendanaan: -
Ucapan Terima Kasih: -
Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.
Ketersediaan Data: -
Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.
Penulis Pertama: https: -
Penulis Kedua: https: -
Penulis Ketiga: -

REFERENSI

[1] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, and A. Nuraini, “Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik,” 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.

[2] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and A. Hamzah, “Analisis Kecepatan Dan Kinerja Jaringan 5G (generasi ke 5) Pada Wilayah Perkotaan,” *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 47, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.

[3] F. P. E. Putra, S. M. Dewi, Maugfiroh, and A. Hamzah, “Privasi dan Keamanan Penerapan IoT Dalam Kehidupan Sehari-Hari : Tantangan dan Implikasi,” 2023. [Online]. Available: https://jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/232

[4] N. Muhammad Akbar, F. Prasetyo Eka Putra, K. Zulfana Imam, and M. Umar Mansyur, “Analisis Kinerja dan Interopabilitas STB Sebagai Server Penilaian Akhir Tahun,” *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 91–96, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.365.

[5] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. N. Saputra, F. M. Haris, and S. N. R. Barokah, “Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds,” 2024. doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.

[6] F. Prasetyo Eka Putra, Moh Riski, Riyan, Yayu Rahma Febriani, and Muhammad Umar Mansyur, “Optimization Of Web Based Academic Information System Design To Increase Efficiency In Junior High Schools,” *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 150–158, 2024, doi: 10.60083/jidt.v6i2.545.

[7] A. Baidawi, “JARINGAN SENSOR NIRKABEL DAN IoT UNTUK KOTA PINTAR PAMEKASAN,” *J. Sist. Inf. Kaputama*, vol. 7, no. 2, pp. 104–110, 2023, doi: 10.59697/jsik.v7i2.108.

[8] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and S. N. R. Barokah, “Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan,” 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.

[9] N. Haidar Hari, F. P. Eka Putra, U. Hasanah, S. R. Sutarsih, and Riyan, “Transformasi Jaringan Telekomunikasi dengan Teknologi 5G: Tantangan, Potensi, dan Implikasi,” *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 146–150, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.357.

[10] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, and ..., “Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of

Things (IoT) di Kampus," 2023, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://jurnal.itscience.org/index.php/digitech/article/view/3457

[11] S. Tuli and N. K. Jha, "AccelTran: A Sparsity-Aware Accelerator for Dynamic Inference with Transformers," *IEEE Trans. Comput. Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 42, no. 11, pp. 4038–4051, 2023, doi: 10.1109/TCAD.2023.3273992.

[12] C. W. Zaw, N. H. Tran, Z. Han, and C. S. Hong, "Radio and Computing Resource Allocation in Co-Located Edge Computing: A Generalized Nash Equilibrium Model," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 22, no. 4, pp. 2340–2352, 2023, doi: 10.1109/TMC.2021.3120520.

[13] L. Chen, J. Qi, X. Su, and R. Wang, "REMR: A Reliability Evaluation Method for Dynamic Edge Computing Network Under Time Constraint," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 5, pp. 4281–4291, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3216056.

[14] Y. Song, Q. Zheng, B. Liu, and X. Gao, "EEG Conformer: Convolutional Transformer for EEG Decoding and Visualization," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 31, pp. 710–719, 2023, doi: 10.1109/TNSRE.2022.3230250.

[15] S. Das and S. Namasudra, "A Lightweight and Anonymous Mutual Authentication Scheme for Medical Big Data in Distributed Smart Healthcare Systems," *IEEE/ACM Trans. Comput. Biol. Bioinforma.*, vol. 21, no. 4, pp. 1106–1116, 2024, doi: 10.1109/TCBB.2022.3230053.

[16] T. Fiori, F. G. Lavacca, F. Valente, and V. Eramo, "Proposal and Investigation of a Lite Time Sensitive Networking Solution for the Support of Real Time Services in Space Launcher Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 10664–10680, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3353466.

[17] A. Mahapatra, S. K. Majhi, K. Mishra, R. Pradhan, D. C. Rao, and S. K. Panda, "An Energy-Aware Task Offloading and Load Balancing for Latency-Sensitive IoT Applications in the Fog-Cloud Continuum," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 14334–14349, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3357122.

[18] T. Kurner *et al.*, "THz Communications and the Demonstration in the ThoR-Backhaul Link," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. 554–567, 2024, doi: 10.1109/TTHZ.2024.3415480.

[19] J. Gu, J. Wang, X. Guo, G. Liu, S. Qin, and Z. Bi, "A Metaverse-Based Teaching Building Evacuation Training System With Deep Reinforcement Learning," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. 53, no. 4, pp. 2209–2219, 2023, doi: 10.1109/TSMC.2022.3231299.

[20] L. Belcastro, F. Marozzo, A. Orsino, D. Talia, and P. Trunfio, "Edge-Cloud Continuum Solutions for Urban Mobility Prediction and Planning," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 38864–38874, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3267471.

[21] Z. Kou *et al.*, "High-Level Synthesis Design of Scalable Ultrafast Ultrasound Beamformer with Single FPGA," *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 446–457, 2023, doi: 10.1109/TBCAS.2023.3267614.

[22] B. Tahir, A. Jolfaei, and M. Tariq, "A Novel Experience-Driven and Federated Intelligent Threat-Defense Framework in IoMT," *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 29, no. 4, pp. 2345–2352, 2023, doi: 10.1109/JBHI.2023.3236072.

[23] E. Suethanuwong, "An Effective Prevention Approach Against ARP Cache Poisoning Attacks in MikroTik-based Networks," *ECTI Trans. Comput. Inf. Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–12, 2025, doi: 10.37936/ecti-cit.2025191.256401.

[24] J. Yao *et al.*, "Edge-Cloud Polarization and Collaboration: A Comprehensive Survey for AI," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 35, no. 7, pp. 6866–6886, 2023, doi: 10.1109/TKDE.2022.3178211.

[25] R. Wang, J. Lai, Z. Zhang, X. Li, P. Vijayakumar, and M. Karuppiah, "Privacy-Preserving Federated Learning for Internet of Medical Things Under Edge Computing," *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 27, no. 2, pp. 854–865, 2023, doi: 10.1109/JBHI.2022.3157725.

[26] P. Song and C. Zhao, "Slow Down to Go Better: A Survey on Slow Feature Analysis," *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, vol. 35, no. 3, pp. 3416–3436, 2024, doi: 10.1109/TNNLS.2022.3201621.

[27] Z. Lai *et al.*, "Merak: An Efficient Distributed DNN Training Framework with Automated 3D Parallelism for Giant Foundation Models," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 34, no. 5, pp. 1466–1478, 2023, doi: 10.1109/TPDS.2023.3247001.

[28] J. Zhang, Y. Liu, Z. Li, and Y. Lu, "Forecast-Assisted Service Function Chain Dynamic Deployment for SDN/NFV-Enabled Cloud Management Systems," *IEEE Syst. J.*, vol. 17, no. 3, pp. 4371–4382, 2023, doi: 10.1109/JSYST.2023.3263865.

[29] K. Peng, H. Huang, M. Bilal, and X. Xu, "Distributed Incentives for Intelligent Offloading and Resource Allocation in Digital Twin Driven Smart Industry," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 19, no. 3, pp. 3133–3143, 2023, doi: 10.1109/TII.2022.3184070.

[30] D. Rao, T. Xu, and X. J. Wu, "TGFuse: An Infrared and Visible Image Fusion Approach Based on Transformer and Generative Adversarial Network," *IEEE Trans. Image Process.*, 2023, doi: 10.1109/TIP.2023.3273451.

[31] P. Zhang, N. Chen, S. Li, K. K. R. Choo, C. Jiang, and S. Wu, "Multi-Domain Virtual Network Embedding Algorithm Based on Horizontal Federated Learning," *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 18, pp. 3363–3375, 2023, doi: 10.1109/TIFS.2023.3279587.

[32] N. Rathi and K. Roy, "DIET-SNN: A Low-Latency Spiking Neural Network With Direct Input Encoding and Leakage and Threshold Optimization," *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, vol. 34, no. 6, pp. 3174–3182, 2023, doi: 10.1109/TNNLS.2021.3111897.

[33] G. Chen, Y. Chen, Z. Mai, C. Hao, M. Yang, and L. Du, "Incentive-Based Distributed Resource Allocation for Task Offloading and Collaborative Computing in MEC-Enabled Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 10, pp. 9077–9091, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3233026.

[34] Z. Wang, X. Mu, and Y. Liu, "Beamfocusing Optimization for Near-Field Wideband Multi-User Communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 73, no. 1, pp. 555–572, 2024, doi: 10.1109/TCOMM.2024.3424244.

[35] K. Aravind and P. K. R. Maddikunta, "Optimized Fuzzy Logic Based Energy-Efficient Geographical Data Routing in Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 18913–18930, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3354174.

[36] A. I. Ameur, O. S. Oubbati, A. Lakas, A. Rachedi, and M. B. Yagoubi, "Efficient Vehicular Data Sharing using Aerial P2P Backbone," *IEEE Trans. Intell. Veh.*, 2024, doi: 10.1109/TIV.2024.3414140.

[37] F. A. Croitoru, V. Hondru, R. T. Ionescu, and M. Shah, "Diffusion Models in Vision: A Survey," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 45, no. 9, pp. 10850–10869, 2023, doi: 10.1109/TPAMI.2023.3261988.

[38] L. Zhou, S. Leng, Q. Wang, and Q. Liu, "Integrated Sensing and Communication in UAV Swarms for Cooperative Multiple Targets Tracking," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 22, no. 11, pp. 6526–6542, 2023, doi: 10.1109/TMC.2022.3193499.

[39] C. Park, J. Lee, Y. Kim, J. G. Park, H. Kim, and D. Hong, "An Enhanced AI-Based Network Intrusion Detection System Using Generative Adversarial Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 3, pp. 2330–2345, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3211346.

[40] S. Deng, J. Zhang, D. Wu, Y. He, X. Xie, and X. Wu, "A Quantitative Risk Assessment Model for Distribution Cyber-Physical System Under Cyberattack," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 19, no. 3, pp. 2899–2908, 2023, doi: 10.1109/TII.2022.3169456.

[41] Y. Tan, J. Liu, X. Xie, E. Tian, and J. Liu, "Dynamic-Memory Event-Triggered Sliding-Mode Secure Control for Nonlinear Semi-Markov Jump Systems With Stochastic Cyber Attacks," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 22, pp. 202–214, 2024, doi: 10.1109/TASE.2023.3349150.

[42] S. Park, J. P. Kim, C. Park, S. Jung, and J. Kim, "Quantum Multi-Agent Reinforcement Learning for Autonomous Mobility Cooperation," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 62, no. 6, pp. 106–112, 2024, doi: 10.1109/MCOM.020.2300199.

[43] P. Zhang, N. Chen, S. Shen, S. Yu, N. Kumar, and C. H. Hsu, "AI-Enabled Space-Air-Ground Integrated Networks: Management and Optimization," *IEEE Netw.*, vol. 38, no. 2, pp. 186–192, 2024, doi: 10.1109/MNET.131.2200477.

[44] A. A. Khan *et al.*, "Data Security in Healthcare Industrial Internet of Things With Blockchain," *IEEE Sens. J.*, vol. 23, no. 20, pp. 25144–25151, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3273851.

[45] N. Moustafa, N. Koroniotis, M. Keshk, A. Y. Zomaya, and Z. Tari, "Explainable Intrusion Detection for Cyber Defences in the Internet of Things: Opportunities and Solutions," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 25, no. 3, pp. 1775–1807, 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3280465.

[46] M. Dampfhoffer, T. Mesquida, A. Valentian, and L. Anghel, "Are SNNs Really More Energy-Efficient Than ANNs? an In-Depth Hardware-Aware Study," *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. Intell.*, vol. 7, no. 3, pp. 731–741, 2023, doi: 10.1109/TETCI.2022.3214509.

[47] B. M. G. Rosa, S. Anastasova, and G. Z. Yang, "NFC-Powered Implantable Device for On-Body Parameters Monitoring With Secure Data Exchange Link to a Medical Blockchain Type of Network," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 53, no. 1, pp. 31–43, 2023, doi: 10.1109/TCYB.2021.3088711.

[48] S. Pancholi, A. Giri, A. Jain, L. Kumar, and S. Roy, "Source Aware Deep Learning Framework for Hand Kinematic Reconstruction Using EEG Signal," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 53, no. 7, pp. 4094–4106, 2023, doi: 10.1109/TCYB.2022.3166604.

[49] M. Mehic *et al.*, "Quantum Cryptography in 5G Networks: A Comprehensive Overview," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 26, no. 1, pp. 302–346, 2024, doi: 10.1109/COMST.2023.3309051.

[50] D. Agnew, A. Del Aguila, and J. Mcnair, "Enhanced Network Metric Prediction for Machine Learning-Based Cyber Security of a Software-Defined UAV Relay Network," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 54202–54219, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3387728.

Publisher's Note: Publisher stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.