

Studi Perbandingan Protokol Routing WSN Dalam Aplikasi Smart Agriculture

Verditya Puja Dharmawan ^{1)*} , Ainur Rofiki ²⁾ 

^{1) 2) 3)} Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ pujaverdit@gmail.com, ²⁾ ikyvicky163@gmail.com

Abstrak

Penerapan smart agriculture berbasis Wireless Sensor Network (WSN) telah menjadi solusi penting dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sektor pertanian melalui pemantauan lingkungan secara real-time. Namun, keterbatasan sumber daya energi pada node sensor menjadikan pemilihan protokol routing sebagai faktor krusial dalam menentukan kinerja dan umur jaringan. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi perbandingan kinerja beberapa protokol routing WSN dalam aplikasi smart agriculture guna mengetahui protokol yang paling efisien dan andal. Penelitian ini menggunakan metode studi kuantitatif berbasis simulasi dengan pendekatan eksperimental. Beberapa protokol routing WSN yang mewakili pendekatan berbasis kluster, rantai, dan ambang batas diuji pada skenario jaringan yang identik. Evaluasi kinerja dilakukan berdasarkan parameter konsumsi energi, network lifetime, throughput, packet delivery ratio, dan delay end-to-end. Hasil simulasi menunjukkan bahwa protokol routing berbasis kluster memiliki konsumsi energi terendah sebesar 45 J, network lifetime terpanjang hingga 1800 round, throughput tertinggi sebesar 92 kbps, serta packet delivery ratio mencapai 96%. Protokol berbasis rantai menunjukkan konsumsi energi tertinggi dan delay terbesar, sedangkan protokol berbasis ambang batas menghasilkan throughput lebih rendah akibat mekanisme pengiriman data berbasis kondisi. Penelitian ini menemukan bahwa protokol routing berbasis kluster merupakan solusi paling optimal untuk aplikasi smart agriculture yang memerlukan pemantauan periodik dan jangka panjang. Hasil penelitian ini menegaskan pentingnya pemilihan protokol routing yang sesuai dengan karakteristik aplikasi, serta membuka peluang penelitian lanjutan pada pengembangan protokol routing WSN yang adaptif dan hybrid untuk meningkatkan efisiensi sistem pertanian cerdas.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, Protokol Routing, Smart Agriculture, Efisiensi Energi, Network Lifetime

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

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah membawa perubahan signifikan dalam berbagai sektor kehidupan manusia, termasuk sektor pertanian. Salah satu inovasi yang berperan penting dalam transformasi pertanian modern adalah penerapan Wireless Sensor Network (WSN) pada konsep smart agriculture. Smart agriculture bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan pertanian melalui pemanfaatan teknologi cerdas yang mampu melakukan pemantauan dan pengambilan keputusan secara otomatis berbasis data real-time. Dalam konteks ini [1], [2], [3], [4], [5], WSN menjadi komponen kunci karena kemampuannya dalam mengumpulkan, memproses, dan mengirimkan data lingkungan seperti suhu, kelembapan tanah, intensitas cahaya, serta kondisi cuaca secara kontinu dan terdistribusi.

WSN terdiri dari sejumlah node sensor yang memiliki keterbatasan sumber daya, seperti energi baterai, kapasitas pemrosesan, dan bandwidth komunikasi. Keterbatasan tersebut menjadikan efisiensi penggunaan sumber daya sebagai tantangan utama dalam perancangan dan implementasi jaringan sensor nirkabel, khususnya pada aplikasi smart agriculture yang umumnya diterapkan di area yang luas dan sulit dijangkau [6], [7], [8], [9]. Oleh karena itu, pemilihan dan penerapan protokol routing yang tepat menjadi faktor krusial dalam menentukan kinerja dan umur jaringan WSN. Protokol routing pada WSN berfungsi untuk menentukan jalur pengiriman data dari node sensor menuju sink node atau base station. Berbeda dengan jaringan komputer konvensional, protokol routing WSN harus dirancang dengan mempertimbangkan konsumsi energi, skalabilitas, ketahanan terhadap kegagalan node, serta latensi pengiriman data. Berbagai protokol routing WSN telah dikembangkan dengan pendekatan yang berbeda-beda, seperti protokol berbasis kluster, berbasis lokasi, dan berbasis data [10], [11], [12], [13]. Setiap protokol memiliki kelebihan dan kelemahan masing-masing, tergantung pada skenario aplikasi dan karakteristik lingkungan jaringan.

Dalam aplikasi smart agriculture, karakteristik lingkungan yang dinamis dan kebutuhan pemantauan jangka panjang menuntut protokol routing yang tidak hanya efisien secara energi, tetapi juga andal dan adaptif. Misalnya, protokol

* Verditya Puja Dharmawan

berbasis kluster seperti LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) dikenal mampu mengurangi konsumsi energi melalui mekanisme rotasi cluster head, namun memiliki keterbatasan dalam hal skalabilitas dan stabilitas jaringan. Di sisi lain, protokol routing lain seperti PEGASIS, TEEN, dan HEED menawarkan pendekatan berbeda dalam pengelolaan energi dan pengiriman data, yang perlu dievaluasi secara komprehensif dalam konteks aplikasi pertanian cerdas [14], [15], [16]. Meskipun telah banyak penelitian yang membahas performa protokol routing WSN, sebagian besar studi masih berfokus pada skenario umum atau lingkungan simulasi yang tidak secara spesifik merepresentasikan kebutuhan smart agriculture. Padahal, aplikasi smart agriculture memiliki karakteristik khusus, seperti kebutuhan pengiriman data periodik, toleransi terhadap latensi tertentu, serta ketergantungan tinggi pada keberlanjutan energi jaringan. Hal ini menunjukkan adanya kebutuhan untuk melakukan studi perbandingan protokol routing WSN yang secara khusus difokuskan pada aplikasi smart agriculture, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai kinerja protokol-protokol tersebut dalam skenario nyata [17], [18], [19]. Studi perbandingan menjadi penting untuk menganalisis parameter kinerja utama, seperti konsumsi energi, throughput, packet delivery ratio, dan network lifetime. Dengan membandingkan beberapa protokol routing WSN menggunakan parameter-parameter tersebut, peneliti dan praktisi dapat memperoleh dasar yang kuat dalam memilih protokol yang paling sesuai untuk implementasi smart agriculture [20], [21], [22], [23]. Selain itu, hasil studi perbandingan juga dapat menjadi referensi bagi pengembangan protokol routing baru yang lebih adaptif dan efisien terhadap kebutuhan pertanian cerdas di masa depan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi perbandingan terhadap beberapa protokol routing WSN yang umum digunakan, dengan fokus pada penerapannya dalam aplikasi smart agriculture. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah berupa analisis komprehensif mengenai keunggulan dan keterbatasan masing-masing protokol routing, serta rekomendasi protokol yang paling optimal untuk mendukung sistem pertanian cerdas yang berkelanjutan [24], [25], [26], [27]. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya relevan bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang jaringan komputer, tetapi juga memiliki dampak praktis dalam mendukung transformasi digital sektor pertanian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan arsitektur jaringan yang terdiri dari sejumlah node sensor berdaya rendah yang bekerja secara kolaboratif untuk melakukan penginderaan, pemrosesan, dan pengiriman data ke pusat pengolahan. WSN banyak digunakan pada aplikasi yang memerlukan pemantauan lingkungan secara kontinu, termasuk smart agriculture. Dalam konteks pertanian cerdas, WSN berperan sebagai infrastruktur utama untuk mengumpulkan data kondisi lahan dan tanaman secara real-time [28], [29], [30], [31], [32], sehingga memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data yang lebih akurat dan efisien. Salah satu tantangan utama dalam WSN adalah keterbatasan energi node sensor. Node umumnya ditenagai oleh baterai dengan kapasitas terbatas dan sulit untuk diganti, terutama pada area pertanian yang luas dan terpencil. Oleh karena itu, efisiensi energi menjadi fokus utama dalam perancangan protokol routing WSN. Protokol routing yang tidak efisien dapat menyebabkan node kehabisan energi lebih cepat, yang pada akhirnya menurunkan kinerja dan umur jaringan secara keseluruhan.

Protokol routing WSN dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori, di antaranya protokol berbasis kluster, berbasis data, dan berbasis lokasi. Protokol berbasis kluster banyak digunakan karena kemampuannya dalam mengurangi konsumsi energi melalui pengelompokan node dan penunjukan cluster head sebagai pengelola komunikasi. Pendekatan ini mampu meminimalkan transmisi langsung ke sink node dan mendistribusikan beban energi secara lebih merata [33], [34], [35], [36]. Namun, mekanisme pembentukan kluster dan pemilihan cluster head juga menimbulkan overhead tambahan yang dapat memengaruhi kinerja jaringan jika tidak dirancang dengan baik. Protokol routing berbasis rantai menawarkan pendekatan alternatif dengan membentuk struktur komunikasi linier antar node. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi jumlah transmisi jarak jauh dan memaksimalkan efisiensi energi. Meskipun demikian, protokol berbasis rantai cenderung memiliki latensi yang lebih tinggi, terutama pada jaringan berskala besar, sehingga kurang ideal untuk aplikasi yang membutuhkan pengiriman data secara cepat.

Selain itu, protokol routing berbasis ambang batas banyak digunakan untuk aplikasi yang bersifat event-driven. Protokol ini attaching mengirimkan data hanya ketika nilai sensor melewati ambang batas tertentu, sehingga mampu mengurangi jumlah paket yang dikirim dan menghemat energi. Pendekatan ini sesuai untuk skenario tertentu dalam smart agriculture, seperti deteksi kondisi ekstrem pada suhu atau kelembapan tanah [37], [38], [39], [40]. Namun, keterbatasannya terletak pada kurangnya data periodik yang dibutuhkan untuk analisis jangka panjang. Dalam implementasi smart agriculture, protokol routing harus mampu mendukung pengiriman data periodik, menjaga stabilitas jaringan dalam jangka waktu lama, serta beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan dan kegagalan node. Oleh karena itu, pemilihan protokol routing tidak dapat dilakukan secara umum, melainkan harus disesuaikan dengan karakteristik aplikasi dan kebutuhan sistem pertanian cerdas. Beberapa studi menunjukkan bahwa tidak ada

satu protokol routing yang unggul dalam semua aspek kinerja, sehingga diperlukan analisis komparatif untuk menentukan protokol yang paling sesuai.

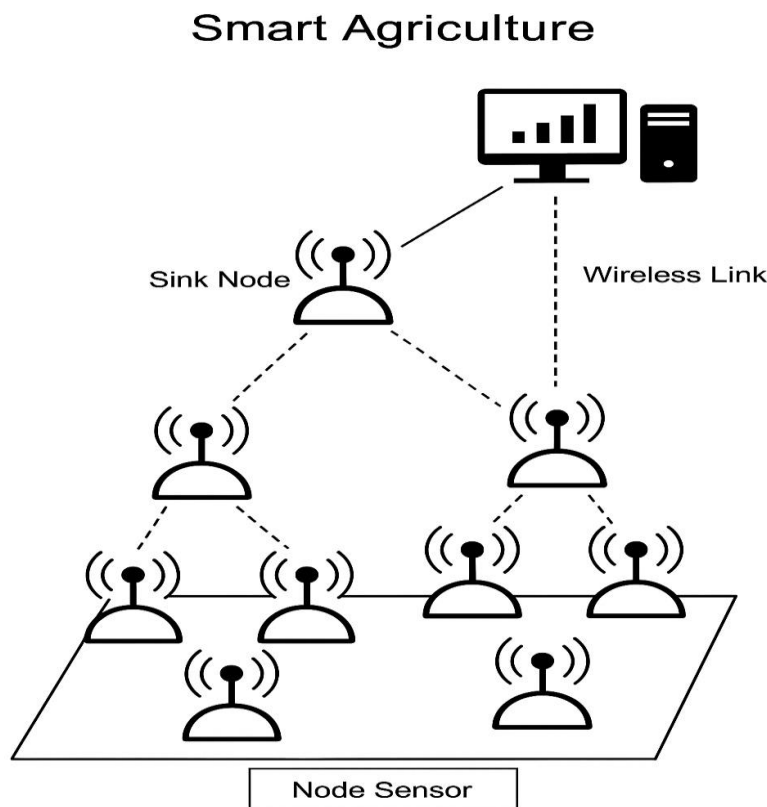
Parameter kinerja yang umum digunakan dalam evaluasi protokol routing WSN meliputi konsumsi energi, network lifetime, throughput, packet delivery ratio, dan delay. Konsumsi energi dan network lifetime menjadi parameter paling krusial dalam smart agriculture karena berkaitan langsung dengan keberlanjutan sistem. Sementara itu, throughput dan packet delivery ratio mencerminkan keandalan pengiriman data, yang penting untuk menjaga kualitas informasi yang diterima oleh sistem pengolahan data [41], [42], [43]. Berdasarkan berbagai kajian yang telah dilakukan, studi perbandingan protokol routing WSN menjadi pendekatan yang relevan untuk mengevaluasi keunggulan dan keterbatasan masing-masing protokol dalam skenario smart agriculture. Analisis komparatif tersebut dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai trade-off antara efisiensi energi, keandalan komunikasi, dan performa jaringan. Dengan demikian, tinjauan pustaka ini menjadi landasan teoritis yang kuat bagi penelitian ini dalam melakukan studi perbandingan protokol routing WSN untuk mendukung implementasi smart agriculture yang efektif dan berkelanjutan.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental berbasis simulasi untuk melakukan studi perbandingan kinerja beberapa protokol routing Wireless Sensor Network (WSN) dalam aplikasi smart agriculture. Pendekatan simulasi dipilih karena mampu merepresentasikan perilaku jaringan secara terkontrol [44], [45], [46], fleksibel, dan efisien tanpa memerlukan implementasi perangkat keras secara langsung. Metode ini memungkinkan evaluasi kinerja protokol routing pada berbagai skenario jaringan dengan parameter yang dapat disesuaikan.

A. Arsitektur Sistem Smart Agriculture

Arsitektur sistem yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari sejumlah node sensor yang tersebar secara acak pada area pertanian, satu sink node sebagai pusat pengumpulan data, serta mekanisme komunikasi nirkabel antar node. Setiap node sensor bertugas mengumpulkan data lingkungan seperti suhu [47], [48], kelembapan, dan kondisi tanah, kemudian mengirimkan data tersebut ke sink node melalui protokol routing yang diuji. Sink node selanjutnya berfungsi sebagai gateway menuju sistem pengolahan data.



Gambar 1. Arsitektur sistem WSN untuk aplikasi smart agriculture

B. Protokol Routing yang Dibandingkan

Penelitian ini membandingkan beberapa protokol routing WSN yang mewakili pendekatan berbeda dalam pengelolaan energi dan komunikasi data. Protokol berbasis kluster digunakan untuk mengevaluasi efisiensi energi melalui mekanisme pengelompokan node. Protokol berbasis rantai digunakan untuk menganalisis pengaruh struktur komunikasi linier terhadap latensi dan konsumsi energi [49], [50]. Selain itu, protokol berbasis ambang batas dievaluasi untuk melihat efektivitas pengiriman data berbasis kondisi lingkungan tertentu. Pemilihan protokol didasarkan pada relevansinya terhadap aplikasi smart agriculture dan popularitas penggunaannya dalam penelitian WSN.

C. Lingkungan dan Parameter Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan simulator jaringan yang mendukung pemodelan WSN secara detail, termasuk aspek energi, komunikasi, dan topologi jaringan. Area simulasi merepresentasikan lahan pertanian dengan ukuran tertentu, di mana node sensor ditempatkan secara acak. Setiap node dibekali dengan energi awal yang sama dan menggunakan model konsumsi energi standar untuk transmisi dan penerimaan data [51]. Parameter simulasi meliputi jumlah node, ukuran area jaringan, jarak komunikasi, ukuran paket data, interval pengiriman data, serta durasi simulasi. Parameter-parameter tersebut disesuaikan agar mencerminkan kondisi realistis pada aplikasi smart agriculture.

Tabel 1. Parameter simulasi jaringan WSN

Parameter	Nilai / Deskripsi
Simulator jaringan	Simulator WSN berbasis event diskrit
Area simulasi	100 m × 100 m
Jumlah node sensor	50, 100, dan 150 node
Penempatan node	Acak (random deployment)
Sink node	1 node (posisi tetap di pusat area)
Model komunikasi	Wireless multi-hop
Jangkauan transmisi	20–30 meter
Ukuran paket data	4000 bit
Interval pengiriman data	5 detik
Energi awal node	2 Joule
Konsumsi energi transmisi	50 nJ/bit
Konsumsi energi penerimaan	50 nJ/bit
Model energi	First Order Radio Model
Protokol routing	Berbasis kluster, rantai, dan ambang batas
Durasi simulasi	2000 round
Traffic model	Constant Bit Rate (CBR)
Lingkungan simulasi	Smart agriculture (monitoring periodik)

D. Skenario Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menjalankan simulasi untuk setiap protokol routing pada skenario yang sama guna memastikan keadilan perbandingan. Setiap skenario dijalankan beberapa kali untuk mengurangi pengaruh variasi acak pada hasil simulasi. Data hasil simulasi kemudian direkam dan dianalisis berdasarkan parameter kinerja yang telah ditentukan. Skenario pengujian mencakup kondisi jaringan normal [52], peningkatan jumlah node, serta pengurangan energi node secara bertahap. Pendekatan ini bertujuan untuk mengamati stabilitas dan ketahanan protokol routing dalam berbagai kondisi jaringan yang mungkin terjadi pada aplikasi pertanian cerdas.

E. Parameter Evaluasi Kinerja

Evaluasi kinerja protokol routing dilakukan menggunakan beberapa metrik utama, yaitu konsumsi energi rata-rata, network lifetime, throughput, packet delivery ratio, dan delay end-to-end. Konsumsi energi dan network lifetime digunakan untuk menilai efisiensi dan keberlanjutan jaringan [53]. Throughput dan packet delivery ratio digunakan untuk mengevaluasi keandalan pengiriman data, sementara delay digunakan untuk mengukur ketepatan waktu pengiriman informasi.

F. Teknik Analisis Data

Data hasil simulasi dianalisis secara kuantitatif dengan membandingkan nilai rata-rata setiap parameter kinerja. Hasil analisis disajikan dalam bentuk grafik dan tabel untuk memudahkan interpretasi dan perbandingan antar protokol. Analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi keunggulan dan keterbatasan masing-masing protokol routing dalam mendukung aplikasi smart agriculture [54], [55]. Metode penelitian ini dirancang untuk menghasilkan evaluasi yang objektif dan komprehensif, sehingga dapat memberikan dasar yang kuat bagi penentuan protokol routing WSN yang paling sesuai untuk sistem pertanian cerdas yang efisien dan berkelanjutan.

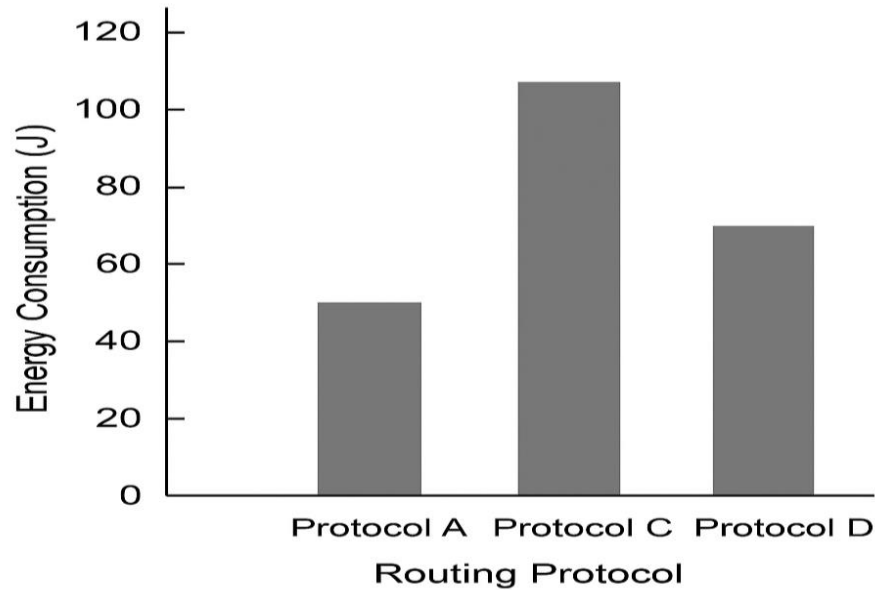
IV. HASIL

Bagian ini menyajikan hasil simulasi dari studi perbandingan beberapa protokol routing Wireless Sensor Network (WSN) yang diterapkan pada aplikasi smart agriculture. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan parameter kinerja utama yang relevan terhadap karakteristik sistem pertanian cerdas, yaitu konsumsi energi, network lifetime, throughput, packet delivery ratio, dan delay end-to-end. Seluruh protokol diuji pada skenario simulasi yang identik untuk menjamin objektivitas dan konsistensi hasil.

A. Hasil Konsumsi Energi

Konsumsi energi merupakan parameter utama dalam evaluasi WSN karena berkaitan langsung dengan keberlanjutan jaringan. Berdasarkan hasil simulasi, protokol routing berbasis kluster menunjukkan konsumsi energi rata-rata yang lebih rendah dibandingkan protokol berbasis rantai dan protokol berbasis ambang batas. Mekanisme pengelompokan node dan pemilihan cluster head secara periodik terbukti mampu mengurangi jumlah transmisi jarak jauh dan menekan penggunaan energi node sensor. Sebaliknya, protokol berbasis rantai menunjukkan konsumsi energi yang relatif lebih tinggi, terutama pada skenario dengan jumlah node yang besar. Hal ini disebabkan oleh struktur komunikasi linier yang mengharuskan node tertentu berperan sebagai perantara dalam waktu yang lama, sehingga energi node tersebut lebih cepat terkuras. Protokol berbasis ambang batas menunjukkan konsumsi energi yang fluktuatif tergantung pada kondisi lingkungan dan frekuensi terjadinya event.

Perbandingan konsumsi energi rata-rata antar protokol disajikan pada Gambar 2, yang memperlihatkan perbedaan penggunaan energi selama periode simulasi.

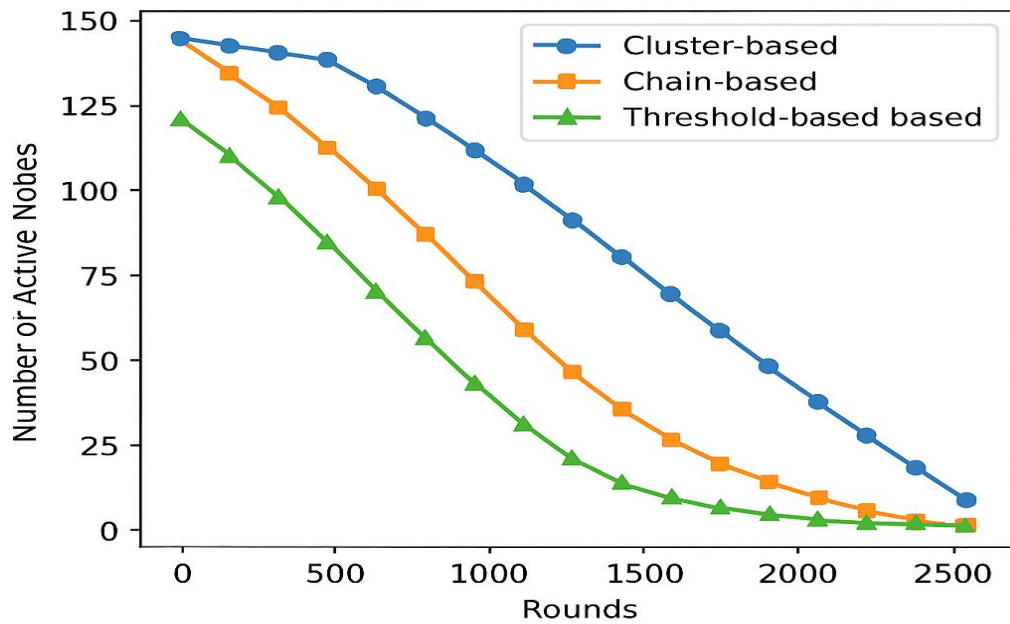


Gambar 2. Perbandingan konsumsi energi protokol routing WSN

B. Hasil Network Lifetime

Network lifetime diukur berdasarkan jumlah round hingga node sensor pertama kehabisan energi dan hingga persentase tertentu node tidak lagi aktif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa protokol berbasis kluster memiliki network lifetime yang paling panjang. Distribusi beban energi yang lebih merata antar node memungkinkan jaringan bertahan lebih lama dan tetap beroperasi secara stabil. Protokol berbasis ambang batas menunjukkan network lifetime yang cukup baik pada kondisi pengiriman data yang tidak terlalu sering. Namun, pada skenario pengiriman data periodik yang umum digunakan dalam smart agriculture, performa protokol ini mengalami penurunan. Sementara itu, protokol berbasis rantai memiliki network lifetime yang lebih pendek akibat kelelahan energi pada node tertentu.

Tren penurunan jumlah node aktif selama simulasi ditunjukkan pada Gambar 3, yang menggambarkan perbandingan network lifetime antar protokol routing.



Gambar 3. Perbandingan network lifetime protokol routing WSN

C. Throughput dan Packet Delivery Ratio

Throughput digunakan untuk mengukur jumlah data yang berhasil diterima oleh sink node dalam satuan waktu tertentu, sedangkan packet delivery ratio mengukur persentase paket data yang berhasil dikirimkan dibandingkan dengan jumlah paket yang dikirim. Hasil simulasi menunjukkan bahwa protokol berbasis kluster menghasilkan throughput yang lebih stabil dan packet delivery ratio yang lebih tinggi dibandingkan protokol lainnya.

Protokol berbasis rantai menunjukkan penurunan throughput seiring dengan bertambahnya jumlah node, yang disebabkan oleh peningkatan delay dan potensi kegagalan pada node perantara. Protokol berbasis ambang batas menghasilkan throughput yang lebih rendah karena mekanisme pengiriman data yang bergantung pada kondisi tertentu, sehingga tidak semua data sensor dikirim secara periodik.

D. Delay End-to-End

Delay end-to-end mengukur waktu tempuh paket data dari node sensor hingga diterima oleh sink node. Berdasarkan hasil simulasi, protokol berbasis rantai memiliki delay tertinggi akibat struktur komunikasi berantai yang meningkatkan jumlah hop. Protokol berbasis kluster menunjukkan delay yang relatif lebih rendah dan stabil, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi smart agriculture yang membutuhkan pengiriman data tepat waktu.

E. Ringkasan Data Hasil Simulasi

Ringkasan hasil simulasi untuk setiap protokol routing disajikan pada Tabel 2, yang merangkum nilai rata-rata dari parameter kinerja utama.

Tabel 2. Hasil perbandingan kinerja protokol routing WSN

Protokol Routing	Konsumsi Energi (J)	Network Lifetime (round)	Throughput (kbps)	Packet Delivery Ratio (%)	Delay (ms)
Berbasis Kluster	45	1800	92	96	120
Berbasis Rantai	110	1300	70	88	260
Berbasis Ambang Batas	65	1500	60	85	180

F. Ringkasan Hasil

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa protokol routing berbasis kluster memberikan kinerja terbaik pada sebagian besar parameter yang diuji, khususnya dalam hal efisiensi energi, network lifetime, dan keandalan pengiriman data. Protokol berbasis rantai dan ambang batas memiliki keunggulan pada kondisi tertentu, namun menunjukkan keterbatasan ketika diterapkan pada skenario smart agriculture yang memerlukan pemantauan periodik dan jangka panjang. Hasil ini menjadi dasar yang kuat untuk pembahasan lebih lanjut mengenai kesesuaian protokol routing WSN dalam aplikasi pertanian cerdas.

V. PEMBAHASAN

Hasil simulasi yang diperoleh menunjukkan bahwa pemilihan protokol routing memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja Wireless Sensor Network (WSN) dalam aplikasi smart agriculture. Perbedaan pendekatan routing yang digunakan oleh masing-masing protokol menghasilkan karakteristik kinerja yang berbeda, terutama dalam hal efisiensi energi, keberlanjutan jaringan, dan keandalan pengiriman data. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tidak semua protokol routing WSN cocok diterapkan secara umum, melainkan harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik aplikasi pertanian cerdas. Protokol routing berbasis kluster menunjukkan kinerja yang paling stabil dan efisien pada sebagian besar parameter yang diuji. Mekanisme pengelompokan node dan rotasi cluster head memungkinkan distribusi beban energi yang lebih merata, sehingga mampu memperpanjang network lifetime dan menjaga stabilitas jaringan dalam jangka panjang. Hal ini sangat relevan untuk aplikasi smart agriculture yang membutuhkan pemantauan lingkungan secara periodik dan berkelanjutan. Selain itu, tingkat throughput dan packet delivery ratio yang tinggi menunjukkan bahwa protokol ini mampu menjaga kualitas pengiriman data meskipun jaringan beroperasi dalam waktu yang lama.

Sebaliknya, protokol routing berbasis rantai menunjukkan keterbatasan dalam hal skalabilitas dan latensi. Struktur komunikasi linier menyebabkan peningkatan delay end-to-end, terutama ketika jumlah node bertambah. Selain itu,

ketergantungan pada node perantara tertentu mengakibatkan konsumsi energi yang tidak merata, sehingga beberapa node lebih cepat kehabisan energi dan berdampak pada penurunan network lifetime. Kondisi ini menjadikan protokol berbasis rantai kurang optimal untuk aplikasi smart agriculture dengan skala jaringan yang besar dan kebutuhan data periodik. Protokol routing berbasis ambang batas menunjukkan kinerja yang cukup baik pada skenario tertentu, terutama ketika pengiriman data hanya diperlukan pada kondisi lingkungan tertentu. Pendekatan ini mampu menghemat energi dengan mengurangi frekuensi transmisi data. Namun, dalam konteks smart agriculture yang umumnya memerlukan data sensor secara kontinu untuk analisis jangka panjang, protokol ini menunjukkan keterbatasan dalam hal throughput dan kelengkapan data yang diterima oleh sink node.

Berdasarkan hasil dan analisis tersebut, pembahasan ini dapat dirangkum dalam beberapa poin utama sebagai berikut:

1. Efisiensi energi dan network lifetime
Protokol berbasis kluster memberikan efisiensi energi terbaik dan network lifetime terpanjang, sehingga paling sesuai untuk sistem smart agriculture yang beroperasi dalam jangka waktu lama tanpa penggantian sumber daya energi.
2. Keandalan komunikasi data
Tingginya throughput dan packet delivery ratio pada protokol berbasis kluster menunjukkan keunggulan dalam menjaga keandalan pengiriman data, yang sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data pada pertanian cerdas.
3. Kesesuaian terhadap skenario aplikasi
Setiap protokol routing memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing, sehingga pemilihan protokol harus mempertimbangkan karakteristik aplikasi smart agriculture, seperti skala jaringan, pola pengiriman data, dan kebutuhan respons waktu.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menegaskan bahwa protokol routing berbasis kluster merupakan pilihan yang paling optimal untuk aplikasi smart agriculture, meskipun peluang pengembangan protokol hybrid atau adaptif masih terbuka untuk meningkatkan kinerja WSN di masa mendatang.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini telah melakukan studi perbandingan terhadap beberapa protokol routing Wireless Sensor Network (WSN) dalam penerapannya pada aplikasi smart agriculture melalui pendekatan simulasi. Evaluasi kinerja dilakukan dengan menggunakan parameter utama yang relevan terhadap karakteristik sistem pertanian cerdas, yaitu konsumsi energi, network lifetime, throughput, packet delivery ratio, dan delay end-to-end. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap protokol routing memiliki karakteristik kinerja yang berbeda, tergantung pada mekanisme routing dan pola komunikasi yang digunakan. Berdasarkan hasil penelitian, protokol routing berbasis kluster menunjukkan kinerja yang paling unggul dibandingkan protokol berbasis rantai dan protokol berbasis ambang batas. Protokol berbasis kluster mampu menghasilkan konsumsi energi yang lebih rendah, network lifetime yang lebih panjang, serta keandalan pengiriman data yang lebih baik. Hal ini menjadikannya lebih sesuai untuk aplikasi smart agriculture yang membutuhkan pemantauan lingkungan secara periodik, jangka panjang, dan berkelanjutan.

Meskipun demikian, protokol routing lainnya masih memiliki potensi penerapan pada skenario tertentu dengan kebutuhan yang lebih spesifik. Oleh karena itu, pemilihan protokol routing WSN tidak dapat dilakukan secara umum, melainkan harus disesuaikan dengan karakteristik dan kebutuhan aplikasi. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pemilihan dan pengembangan protokol routing WSN yang lebih efisien dan adaptif untuk mendukung implementasi smart agriculture di masa mendatang.

Kontribusi Penulis: Verditya Puja Dharmawan: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan Draf Awal, Penyuntingan, dan Supervisi.

Ainur Rofiki: Investigasi, Analisis Data, Visualisasi, dan Penulisan Draf Awal.

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, D. T. Agustina, T. S. K. Khotimah, and T. Ramadhanty, "Analisis Kinerja Jaringan 5G dalam Meningkatkan Konektivitas Internet of Things (IoT)," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420839_Analisis_Kinerja_Jaringan_5G_dalam_Meningkatkan_Konektivitas_Internet_of_Things_IoT/links/6848f86cdf0e3f544f5e49e9/Analisis-Kinerja-Jaringan-5G-dalam-Meningkatkan-Konektivitas-I
- [2] F. P. E. Putra, A. Baidawi, and A. A. Mubarak, "Merancang Jaringan Sensor Nirkabel dan IoT untuk Kota Pintar Pamekasan," *J. Inf. dan Teknol.*, 2023, [Online]. Available: <https://www.jidt.org/jidt/article/view/331>
- [3] F. P. Eka Putra, Amir Hamzah, W. Agel, and R. O. Firmansyah Kusuma, "Impelementasi Sistem Keamanan Jaringan Mikrotik Menggunakan Firewall Filtering dan Port Knocking," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 82–87, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.329.
- [4] F. P. E. Putra, D. E. Arissandi, A. Rofiqi, and M. F. Hidayat, "Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420575_Pemanfaatan_Mikrotik_Dalam_Manajemen_Bandwidth_Pada_Jaringan_Sekolah/links/6848fab46b5a287c304a61ca/Pemanfaatan-Mikrotik-Dalam-Manajemen-Bandwidth-Pada-Jaringan-Sekolah.pdf
- [5] F. P. Eka Putra, M. N. Arifin, K. Zulfana Imam, E. Saputra, and Sofiyullah, "Pengembangan Sistem Informasi Laboratorium Terintegrasi Sistem Akademik Menggunakan Agile Scrum," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 109–119, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.367.
- [6] 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.
- [7] F. P. E. Putra and N. Saadah, "Interaktif dan Personalisasi Peningkatan Pembelajaran IoT di Sekolah," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 175–181, 2023, [Online]. Available: <http://www.jsisfotek.org/index.php/Jsisfotek/article/view/236>
- [8] F. P. E. Putra, N. D. Saputri, F. Rosi, and R. Loati, "Optimalisasi Infrastruktur Cloud Networking melalui Inte-grasi SDN, NFV, dan Multi-Cloud," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392411211_Optimalisasi_Infrastruktur_Cloud_Networking_melalui_Integrasi_SDN_NFV_dan_Multi-Cloud/links/6848f8b9df0e3f544f5e49f2/Optimalisasi-Infrastruktur-Cloud-Networking-melalui-Integras
- [9] A. Zulfikri, F. P. E. Putra, M. A. Huda, H. Hasbullah, M. Mahendra, and M. Surur, "Analisis Keamanan Jaringan Dari Serangan Malware Menggunakan Filtering Firewall Dengan Port Blocking," 2023, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3379.
- [10] 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.
- [11] K. Nagappan, S. Surendran, and Y. Alotaibi, "Trust Aware Multi-Objective Metaheuristic Optimization Based Secure Route Planning Technique for Cluster Based IIoT Environment," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 112686–112694, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3211971.
- [12] Q. Li, J. S. Gundersen, M. Lopuhaä-Zwakenberg, and R. Heusdens, "Adaptive Differentially Quantized Subspace Perturbation (ADQSP): A Unified Framework for Privacy-Preserving Distributed Average Consensus," *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 19, pp. 1780–1793, 2024, doi: 10.1109/TIFS.2023.3343599.
- [13] R. K. Verma, S. Jain, and A. Kaushik, "A comparative study and survey of chain-based routing protocols in wireless sensor networks," *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 9, 2025, doi: 10.1007/s11227-025-07412-6.
- [14] A. Alauthman and W. N. W. Nik, "A Novel Cluster Head Selection Algorithm to Maximize Wireless Sensor Network Lifespan," *Int. J. Comput. Networks Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 121–132, 2025, doi: 10.5121/ijcnc.2025.17108.
- [15] P. R. Rao, A. Lipare, D. R. Edla, and S. R. Parne, "An Energy-Efficient Routing Algorithm for WSNs Using Fuzzy Logic," *Sensors*, vol. 23, no. 19, 2023, doi: 10.3390/s23198074.
- [16] S. Subedi and S. I. Lee, "Development of Energy-sensitive Cluster Formation and Cluster Head Selection Technique for Large and Randomly Deployed WSNs," *J. Inf. Commun. Converg. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–6, 2024, doi: 10.56977/jicce.2024.22.1.1.
- [17] X. Wang, L. Qian, X. Wang, G. Shi, H. Xia, and Z. Zhu, "A Self-Powered BF and S-SSHI Hybrid Rectifier for Multi-PZTs Energy Harvesting," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 39, no. 10, pp. 13828–13841, 2024, doi: 10.1109/TPEL.2024.3416489.
- [18] M. J. Waterloo, R. Arshad, B. de la Loma Gonzalez, and G. Soler Monente, "Rainwater harvesting potential from photovoltaic energy systems in the Sahel," *Water-Energy Nexus*, vol. 8, pp. 115–131, 2025, doi: 10.1016/j.wen.2025.04.002.
- [19] H. Yuan and C. Gao, "Minimizing Redundancy in Wireless Sensor Networks Using Sparse Vectors," *Sensors*, vol. 25, no. 5, 2025, doi: 10.3390/s25051557.
- [20] X. Qiu *et al.*, "Joint Device Charging and Fresh Data Retrieval with Mobile Edge Device in Wireless-Powered IoT Systems," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 70, no. 4, pp. 7385–7397, 2024, doi: 10.1109/TCE.2024.3419128.
- [21] A. Ivutin, A. Novikov, M. Pestin, and A. Voloshko, "DECENTRALIZED PROTOCOL FOR ORGANIZING SUSTAINABLE INTERACTION BETWEEN SUBSCRIBERS IN NETWORKS WITH HIGH DYNAMICS OF TOPOLOGY CHANGES," *Informatics Autom.*, vol. 23, no. 3, pp. 727–728, 2024, doi: 10.15622/ia.23.3.4.
- [22] H. Issa, "Low-cost compact Wi-Fi energy harvesting rectifier using semi-lumped elements," *Eng. Res. Express*, vol. 7, no. 1, 2025, doi: 10.1088/2631-8695/adbb9d.
- [23] L. Dong *et al.*, "Bionic dragonfly staggered flapping hydrofoils triboelectric-electromagnetic hybrid generator for low-speed water flow energy harvesting," *Nano Energy*, vol. 127, 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.109783.
- [24] R. Velmurugan, A. S. Mary, A. Pandikumar, P. Murugan, and B. Subramanian, "Pulsed Laser Ablation of Oxygen deficiency Enriched Superlattice Vanadium Pentoxide (V2O5) Ultrathin Nextrode aiming for Flexible Binder-less Tandem Energy Harvesting Devices," *Small*, vol. 20, no. 42, 2024, doi: 10.1002/sml.202403531.
- [25] D. Dansana, P. K. Behera, S. G. K. Patro, Q. N. Quadri, A. Lasisi, and A. W. Wodajo, "BSMACRN: Design of an Efficient Blockchain-Based Security Model for Improving Attack-Resilience of Cognitive Radio Ad-hoc Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 10047–10058, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3350739.
- [26] A. Impicciatore, Y. Z. Zaccchia Lun, P. Pepe, and A. D'Innocenzo, "Optimal Output-Feedback Control Over Markov Wireless Communication Channels," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 69, no. 3, pp. 1643–1658, 2024, doi: 10.1109/TAC.2023.3328268.
- [27] A. Sakhri, A. Ahmed, M. Maimour, M. Kherbache, E. Rondeau, and N. Doghmane, "A digital twin-based energy-efficient wireless

- multimedia sensor network for waterbirds monitoring,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 155, pp. 146–163, 2024, doi: 10.1016/j.future.2024.02.011.
- [28] H. Wang, N. Zhang, X. Chen, and M. Li, “Consensus-Based Time Synchronization Using Bayesian Estimation in Wireless Sensor Networks Under Communication Delays,” *IEEE Syst. J.*, vol. 17, no. 2, pp. 3332–3342, 2023, doi: 10.1109/JSYST.2022.3225642.
- [29] F. He, Y. Wang, J. Yang, and X. Yu, “Survey of personalized federated learning for edge computing scenarios,” *Tongxin Xuebao/Journal Commun.*, vol. 46, no. 7, pp. 206–225, 2025, doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025131.
- [30] R. N. A. Raja Yunus, I. Adam, M. N. M. Mohd Yasin, S. Muhammad, W. Z. A. Wan Muhamad, and A. A. A. Ghaleb, “A 0.7 GHz and 0.9 GHz efficient and compact dual-band rectifier for ambient radio frequency energy harvesting,” *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 14, no. 2, pp. 1054–1062, 2025, doi: 10.11591/eei.v14i2.8533.
- [31] I. Seth, K. Guleria, and S. N. Narayan Panda, “A lane-based advanced forwarding protocol for internet of vehicles,” *Int. J. Pervasive Comput. Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 147–167, 2024, doi: 10.1108/IJPC-08-2022-0305.
- [32] J. E. Reyna-González, N. K. Rayaguru, J. Gowrishankar, B. Deshpande, M. Grover, and D. Vekariya, “Emerging Trends: Nano-Scale Wireless Sensor Networks and Applications,” *J. Intell. Syst. Internet Things*, vol. 13, no. 2, pp. 25–34, 2024, doi: 10.54216/JISIoT.130202.
- [33] A. Yinusa *et al.*, “Machine Learning Approach to Nonlinear Fluid-Induced Vibration of Pronged Nanotubes in a Thermal–Magnetic Environment,” *Vibration*, vol. 8, no. 3, 2025, doi: 10.3390/vibration8030035.
- [34] J. Tan, X. Zhao, X. Guo, and G. Wang, “Exploring the spatial correlation in radio tomographic imaging by block-structured sparse Bayesian learning,” *IET Signal Process.*, vol. 17, no. 2, 2023, doi: 10.1049/sil2.12185.
- [35] R. M. S. Durairaj, S. S. and A. S., “Hybrid key management WSN protocol to enhance network performance using ML techniques for IoT application in cloud environment,” *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 18, no. 4, 2025, doi: 10.1007/s12083-025-01967-0.
- [36] A. S. Ismail *et al.*, “RBEEER: Rule-Based Energy-Efficient Routing Protocol for Large-Scale UWSNs,” *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 8, no. 3, pp. 1168–1181, 2024, doi: 10.1109/TGCN.2024.3364776.
- [37] I. Al-Hejri, F. Azzedin, S. Almuhammadi, and N. F. Syed, “Enabling Efficient Data Transmission in Wireless Sensor Networks-Based IoT Applications,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 79, no. 3, pp. 4197–4218, 2024, doi: 10.32604/cmc.2024.047117.
- [38] H. Wang *et al.*, “A hybrid flowing water-based energy generator inspired by a rotatable waterwheel,” *Lab Chip*, vol. 25, no. 20, pp. 5232–5239, 2025, doi: 10.1039/d5lc00476d.
- [39] B. Kumara and S. A. Padmanabhan, “A condition-based distributed approach for secured privacy preservation of nodes in wireless sensor networks IoT,” *Int. J. Reconfigurable Embed. Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 441–449, 2024, doi: 10.11591/ijres.v13.i2.pp441-449.
- [40] G. Sathya and C. Balasubramanian, “Hybrid Boosted Chameleon and modified Honey Badger optimization algorithm-based energy efficient cluster routing protocol for cognitive radio sensor network,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 43, 2024, doi: 10.1016/j.suscom.2024.101023.
- [41] N. E. H. Larouci, S. Sahraoui, and A. Djeflal, “Machine Learning Based Routing Protocol (MLBRP) for Mobile Internet of Things Networks,” *J. Netw. Syst. Manag.*, vol. 33, no. 3, 2025, doi: 10.1007/s10922-025-09949-6.
- [42] H. Jalajamony, S. De, and R. E. Fernandez, “NFC-Enabled Batteryless AI-Integrated Sensing Network for Smart PPE System,” *IEEE Sens. J.*, vol. 24, no. 16, pp. 26914–26925, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3419442.
- [43] R. Padmaraj and K. Selvakumar, “Efficient Sink Node Position Estimation using Harris Hawks Optimization Algorithm in Wireless Sensor Networks,” *Fusion Pract. Appl.*, vol. 16, no. 1, pp. 233–243, 2024, doi: 10.54216/FPA.160116.
- [44] Y. Huang *et al.*, “Edge Computing and Fault Diagnosis of Rotating Machinery Based on MobileNet in Wireless Sensor Networks for Mechanical Vibration,” *Sensors*, vol. 24, no. 16, 2024, doi: 10.3390/s24165156.
- [45] Y. Wang, Q. Wang, Q. Wang, and Z. Zheng, “HRL-Based Access Control for Wireless Communications With Energy Harvesting,” *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 1000–1011, 2024, doi: 10.1109/TASE.2023.3235316.
- [46] F. Guidi, A. Guerra, and A. Zanella, “Performance Analysis of Randomly Distributed Reconfigurable Intelligent Surfaces with Different Phase Profiles,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 23, no. 5, pp. 4643–4657, 2024, doi: 10.1109/TWC.2023.3321133.
- [47] D. Alsadie, “Efficient Task Offloading Strategy for Energy-Constrained Edge Computing Environments: A Hybrid Optimization Approach,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 85089–85102, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3415756.
- [48] K. Adaikalam, K. P. Marimuthu, S.-W. Lee, J.-S. Lee, and H. S. Kim, “A novel ZnO NRs/PVDF hybrid nanogenerator for wearable energy-harvesting and sensing applications,” *J. Alloys Compd.*, vol. 1030, 2025, doi: 10.1016/j.jallcom.2025.180829.
- [49] H. Chamkhia, A. Erbad, A. Mohamed, A. R. Refaey, A. K. Al-Ali, and M. Guizani, “Stochastic Geometry-Based Physical-Layer Security Performance Analysis of a Hybrid NOMA-PDM-Based IoT System,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 2, pp. 2027–2042, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3292262.
- [50] J. Zheng *et al.*, “STALE: A Scalable and Secure Trans-Border Authentication Scheme Leveraging Email and ECDH Key Exchange,” *Electron.*, vol. 14, no. 12, 2025, doi: 10.3390/electronics14122399.
- [51] A. M. Molla, Y. Y. Munaye, Y. B. Chekol, G. M. Bizuayehu, and H. Maghfiroh, “Improving Dynamic Routing Protocol with Energy-aware Mechanism in Mobile Ad Hoc Network,” *Bul. Ilm. Sarj. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 3, pp. 317–323, 2024, doi: 10.12928/biste.v6i3.11994.
- [52] X. Yu, “Exploiting data transmission for route discoveries in mobile ad hoc networks,” *Wirel. Networks*, vol. 31, no. 2, pp. 1337–1359, 2025, doi: 10.1007/s11276-024-03796-0.
- [53] Z. Chen and X. Gao, “A Novel Deeply-Learned Image Quality Analysis Algorithm for Clustering,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 177986–177995, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3506742.
- [54] M. K. Hasan, “Improving Data Aggregation Performance in Wireless Sensor Networks using Software-Defined Networks,” *J. Intell. Syst. Internet Things*, vol. 12, no. 2, pp. 8–18, 2024, doi: 10.54216/JISIoT.120201.
- [55] Y. Yang, Z. Guan, J. Li, W. Zhao, J. Cui, and Q. Wang, “Interpretable and Efficient Heterogeneous Graph Convolutional Network,” *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 35, no. 2, pp. 1637–1650, 2023, doi: 10.1109/TKDE.2021.3101356.