

Analisis Efisiensi Energi dan Kualitas Transmisi Data pada Wireless Sensor Network (WSN) untuk Sistem Informasi Akademik

Moh risqi isya al-hidayat^{1)*} , M. Husnol Hidayat²⁾ , Dimas Prasetya Januardiansyah³⁾

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

¹⁾ mohrisqiisyaalhidayatrisqiisya@gmail.com, ²⁾ husnolhidayat81@gmail.com, ³⁾ joyodiningratdimas@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi jaringan nirkabel telah mendorong penerapan *Wireless Sensor Network* (WSN) dalam berbagai bidang, termasuk pendidikan tinggi. Namun, tantangan utama dalam penerapan WSN pada sistem informasi akademik terletak pada keterbatasan energi dan kualitas transmisi data yang memengaruhi reliabilitas sistem. Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi energi dan kualitas transmisi data pada WSN dalam mendukung sistem informasi akademik agar diperoleh model jaringan yang optimal, efisien, dan berkelanjutan. Metode: Penelitian menggunakan pendekatan studi kuantitatif eksperimental dengan simulasi menggunakan Network Simulator 3 (NS-3). Tiga protokol komunikasi—LEACH, HEED, dan PEGASIS—diuji pada jaringan dengan variasi 10, 20, 30, dan 40 node. Parameter yang dianalisis meliputi konsumsi energi, *Packet Delivery Ratio* (PDR), *Throughput*, dan *End-to-End Delay*. Hasil: Hasil simulasi menunjukkan bahwa LEACH memiliki efisiensi energi terbaik dengan rata-rata konsumsi daya 12–15% lebih rendah dibanding HEED dan PEGASIS. HEED memberikan PDR tertinggi (97,8%) menunjukkan reliabilitas transmisi terbaik, sedangkan PEGASIS mencatat *delay* terendah pada jaringan kecil. Secara umum, peningkatan jumlah node menyebabkan kenaikan konsumsi energi dan penurunan throughput pada semua protokol. Penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan protokol harus disesuaikan dengan kebutuhan operasional sistem akademik; LEACH unggul dalam efisiensi energi, HEED dalam kestabilan transmisi, dan PEGASIS dalam kecepatan komunikasi. Penelitian lanjutan disarankan mengembangkan model hibrida yang menggabungkan keunggulan ketiganya untuk implementasi *smart campus* yang efisien dan adaptif.

Kata Kunci: Jaringan Sensor Nirkabel, Efisiensi Energi, Kualitas Transmisi Data, Sistem Informasi Akademik, Kampus Cerdas

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 (TIK) yang begitu pesat telah membawa perubahan signifikan terhadap berbagai sektor kehidupan, termasuk bidang pendidikan tinggi. Perguruan tinggi saat ini tidak lagi hanya mengandalkan sistem konvensional dalam pengelolaan data akademik, tetapi telah bertransformasi menuju *smart campus* yang berbasis pada integrasi berbagai sistem informasi akademik secara digital dan real-time. Dalam konteks tersebut, *Wireless Sensor Network* (WSN) atau jaringan sensor nirkabel menjadi salah satu teknologi yang memiliki peran strategis dalam mendukung efisiensi dan efektivitas sistem informasi akademik [1], [2], [3], [4], [5]. WSN memungkinkan proses pengumpulan, transmisi, dan analisis data dari berbagai titik sensor secara otomatis tanpa keterlibatan manusia secara langsung, sehingga mampu mendukung proses pengambilan keputusan yang cepat dan akurat dalam lingkungan akademik yang kompleks. Secara umum, WSN terdiri atas sejumlah node sensor yang terhubung secara nirkabel dan mampu melakukan komunikasi satu sama lain untuk mengumpulkan data lingkungan, mentransmisikannya ke *sink node* atau *gateway*, dan selanjutnya mengirimkan data tersebut ke sistem pusat untuk diproses [6], [7], [8]. Teknologi ini telah banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti pertanian cerdas (*smart agriculture*), pemantauan lingkungan (*environmental monitoring*), sistem kesehatan, hingga *industrial automation*. Namun, penerapan WSN dalam konteks sistem informasi akademik masih relatif terbatas, khususnya di Indonesia, baik dalam aspek penelitian maupun implementasi nyata. Padahal, potensi penggunaan WSN di lingkungan kampus sangat besar—misalnya untuk pemantauan kehadiran dosen dan mahasiswa, penggunaan ruang kelas, kondisi laboratorium, hingga pemantauan perangkat IoT dalam mendukung kegiatan akademik.

Salah satu tantangan utama dalam penerapan WSN adalah keterbatasan sumber daya energi pada node sensor. Karena sebagian besar node sensor bergantung pada baterai dengan kapasitas terbatas, maka efisiensi energi menjadi

* Moh risqi isya al-hidayat

faktor kritikal yang menentukan umur jaringan secara keseluruhan. Ketika konsumsi energi tidak terkelola dengan baik, node sensor dapat mengalami kegagalan dini yang menyebabkan gangguan dalam proses pengumpulan dan transmisi data. Di sisi lain, kualitas transmisi data atau *Quality of Data Transmission* juga menjadi aspek fundamental dalam menjamin keandalan sistem informasi yang berbasis WSN [9], [10], [11], [12]. Kualitas transmisi yang buruk dapat menyebabkan *packet loss*, *delay*, atau bahkan *network congestion*, yang pada akhirnya mengurangi keakuratan dan keandalan data akademik yang dikumpulkan. Dalam konteks penelitian ini, analisis terhadap efisiensi energi dan kualitas transmisi data menjadi penting karena kedua parameter tersebut bersifat saling berkaitan. Efisiensi energi yang tinggi biasanya dicapai melalui mekanisme penghematan konsumsi daya seperti *duty cycling* atau *data aggregation*, namun strategi ini seringkali berdampak pada penurunan throughput dan peningkatan delay. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan analitis yang mampu menyeimbangkan antara efisiensi energi dan kualitas transmisi data agar performa jaringan WSN tetap optimal dalam mendukung sistem informasi akademik yang membutuhkan data yang tepat waktu dan akurat [13], [14], [15].

Penelitian-penelitian sebelumnya telah banyak membahas optimasi efisiensi energi pada WSN melalui penerapan berbagai protokol komunikasi seperti LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), PEGASIS (*Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*), dan HEED (*Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering*). Beberapa studi menunjukkan bahwa pendekatan *clustering* dapat secara signifikan menurunkan konsumsi energi dengan cara membagi jaringan menjadi beberapa kelompok sensor [16], [17], [18], di mana setiap kelompok memiliki *cluster head* yang bertanggung jawab mengumpulkan dan mentransmisikan data ke *sink node*. Namun, kebanyakan penelitian tersebut dilakukan pada konteks lingkungan umum seperti pertanian, pemantauan lingkungan, atau industri, dan belum banyak yang mengaplikasikannya secara spesifik untuk mendukung sistem informasi akademik dengan kebutuhan real-time dan tingkat keandalan tinggi. Selain aspek efisiensi energi, parameter performa lain seperti *Packet Delivery Ratio (PDR)*, *Throughput*, dan *End-to-End Delay* juga perlu dianalisis secara komprehensif untuk menilai kualitas transmisi data dalam jaringan WSN. Sistem informasi akademik menuntut tingkat ketersediaan dan keakuratan data yang tinggi, terutama dalam layanan-layanan seperti pengelolaan jadwal, presensi digital, pemantauan aktivitas laboratorium, dan pengawasan aset kampus berbasis sensor [19], [20], [21]. Dengan demikian, jaringan WSN yang diterapkan harus mampu mentransmisikan data secara konsisten, dengan latensi yang rendah dan kehilangan paket yang minimal. Kegagalan dalam menjaga kualitas transmisi data dapat berimplikasi pada kesalahan informasi, keterlambatan proses administrasi akademik, serta menurunkan tingkat kepercayaan terhadap sistem informasi tersebut.

Melalui penelitian ini, dilakukan analisis menyeluruh terhadap efisiensi energi dan kualitas transmisi data pada jaringan WSN yang dirancang untuk mendukung sistem informasi akademik. Analisis dilakukan dengan menggunakan parameter-parameter performa utama seperti konsumsi energi rata-rata, *Packet Delivery Ratio*, *Throughput*, serta *End-to-End Delay*. Hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi ilmiah dalam bentuk model analisis performa jaringan yang dapat digunakan sebagai acuan dalam pengembangan WSN di lingkungan akademik. Lebih jauh, hasil penelitian ini diharapkan juga dapat membantu pihak perguruan tinggi dalam merancang sistem informasi akademik yang tidak hanya handal dari sisi perangkat lunak, tetapi juga efisien dan berkelanjutan dari sisi infrastruktur jaringan [22], [23], [24], [25]. Secara teoretis, penelitian ini memperluas kajian mengenai optimasi performa WSN dalam domain pendidikan tinggi, yang masih relatif baru dibandingkan dengan bidang industri atau lingkungan. Secara praktis, penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan *smart campus framework* berbasis WSN yang mengintegrasikan sensor, perangkat IoT, dan sistem informasi akademik dalam satu kesatuan yang cerdas dan efisien. Dengan mempertimbangkan efisiensi energi serta kualitas transmisi data secara simultan, sistem informasi akademik yang dibangun akan lebih adaptif, tangguh, dan mampu memberikan layanan yang optimal bagi civitas akademika [26], [27], [28]. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang jaringan komputer dan Internet of Things (IoT), tetapi juga memberikan implikasi praktis bagi pengembangan teknologi pendidikan di era transformasi digital. Dengan demikian, *Analisis Efisiensi Energi dan Kualitas Transmisi Data pada Wireless Sensor Network (WSN) untuk Sistem Informasi Akademik* menjadi upaya ilmiah untuk menjembatani kesenjangan antara kebutuhan akademik dan perkembangan teknologi jaringan modern, menuju kampus cerdas yang efisien, terukur, dan berkelanjutan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Wireless Sensor Network (WSN)

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan sekumpulan node sensor yang berkomunikasi secara nirkabel untuk memantau kondisi lingkungan fisik maupun virtual. Setiap node umumnya terdiri atas sensor, prosesor, transceiver, dan sumber energi berupa baterai. Node-node ini bekerja secara kolaboratif untuk mengirimkan data menuju *sink node* atau *base station* yang terhubung ke jaringan utama [29], [30], [31]. Dalam konteks sistem informasi akademik, WSN

dapat digunakan untuk memantau berbagai aspek seperti suhu dan kelembapan ruangan kelas, penggunaan perangkat laboratorium, jumlah pengguna fasilitas kampus, hingga keamanan aset digital maupun fisik. Fleksibilitas WSN memungkinkan sistem informasi akademik memperoleh data real-time dari lingkungan kampus, yang selanjutnya dapat diproses untuk mendukung pengambilan keputusan strategis dan operasional. Arsitektur umum WSN terbagi menjadi tiga lapisan utama, yaitu lapisan sensor node, lapisan sink node, dan lapisan server pusat [32], [33], [34], [35]. Komunikasi antar lapisan ini sangat dipengaruhi oleh protokol routing, pola topologi, dan efisiensi penggunaan energi. Dalam penerapannya, WSN dapat dikembangkan dengan berbagai topologi seperti *star*, *tree*, dan *mesh*, tergantung kebutuhan cakupan area dan tingkat reliabilitas data. Topologi *mesh* biasanya menjadi pilihan utama karena memiliki jalur komunikasi alternatif yang meningkatkan toleransi terhadap kegagalan node, meskipun membutuhkan konsumsi energi yang lebih tinggi.

B. Efisiensi Energi dalam WSN

Efisiensi energi merupakan salah satu isu paling penting dalam desain dan implementasi WSN. Setiap node memiliki keterbatasan daya karena sebagian besar dioperasikan menggunakan baterai yang tidak mudah diganti, terutama pada lingkungan dengan jumlah node yang banyak. Oleh sebab itu, strategi pengelolaan energi menjadi faktor utama yang menentukan umur jaringan [36], [37], [38]. Pendekatan umum yang digunakan adalah penghematan energi melalui manajemen *sleep and wake cycle*, penggunaan teknik *data aggregation*, serta penerapan protokol routing berbasis *clustering*. Protokol seperti *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH) berperan penting dalam menyeimbangkan konsumsi energi antar node. LEACH membagi jaringan menjadi beberapa kelompok (*cluster*), di mana setiap kelompok memiliki *cluster head* yang bertugas mengumpulkan data dari node anggota dan meneruskannya ke *sink node*. Pendekatan ini mengurangi jumlah transmisi langsung dari node ke *base station*, sehingga memperpanjang umur jaringan secara keseluruhan. Selain itu, mekanisme rotasi *cluster head* secara periodik mencegah kelelahan energi pada node tertentu, menjadikan distribusi energi lebih merata [39], [40]. Selain LEACH, protokol lain seperti HEED dan PEGASIS juga dikembangkan untuk mengoptimalkan efisiensi energi melalui metode adaptif dan penggabungan data secara berurutan. Dalam konteks sistem informasi akademik, efisiensi energi yang tinggi memungkinkan jaringan sensor beroperasi dalam jangka panjang tanpa intervensi manusia, sehingga data akademik dapat dikumpulkan secara kontinu dan andal.

C. Kualitas Transmisi Data pada WSN

Kualitas transmisi data menjadi indikator utama performa jaringan sensor, terutama dalam sistem yang menuntut ketersediaan data secara real-time. Parameter-parameter yang umum digunakan untuk mengukur kualitas transmisi antara lain *Packet Delivery Ratio (PDR)*, *Throughput*, *End-to-End Delay*, dan *Jitter*. PDR menggambarkan seberapa besar proporsi paket data yang berhasil diterima dibandingkan dengan yang dikirimkan, sementara *Throughput* menunjukkan kapasitas efektif jaringan dalam mengirimkan data per satuan waktu. *End-to-End Delay* menjadi indikator waktu yang dibutuhkan oleh paket data dari sumber hingga tujuan, yang sangat penting dalam aplikasi akademik seperti sistem presensi berbasis sensor atau pemantauan kondisi laboratorium secara langsung [41], [42], [43]. Berbagai faktor dapat mempengaruhi kualitas transmisi data, seperti jarak antar node, interferensi sinyal, beban jaringan, serta efisiensi protokol routing yang digunakan. Peningkatan efisiensi energi seringkali berdampak pada menurunnya kualitas transmisi data karena adanya penundaan dalam pengiriman akibat mekanisme hemat daya. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan komprehensif yang mempertimbangkan kedua aspek secara simultan agar jaringan dapat bekerja secara optimal.

D. Integrasi WSN dengan Sistem Informasi Akademik

Integrasi WSN dengan sistem informasi akademik menjadi salah satu arah pengembangan menuju konsep *smart campus*. Dengan menghubungkan jaringan sensor ke sistem akademik, data yang dikumpulkan dari berbagai sensor dapat dianalisis secara otomatis untuk mendukung pengelolaan kegiatan kampus. Contohnya, data sensor suhu dan kelembapan dapat digunakan untuk mengatur sistem pendingin ruangan secara otomatis di ruang laboratorium komputer, sedangkan sensor kehadiran dapat dimanfaatkan untuk sistem presensi mahasiswa tanpa intervensi manual [44], [45], [46]. Kombinasi antara efisiensi energi dan keandalan transmisi data menjadikan WSN solusi ideal bagi sistem akademik modern yang membutuhkan kestabilan, akurasi, dan keberlanjutan.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif dengan metode simulasi jaringan untuk menganalisis efisiensi energi dan kualitas transmisi data pada *Wireless Sensor Network (WSN)* dalam konteks sistem informasi akademik [47], [48], [49]. Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi kinerja WSN berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu konsumsi energi, *Packet Delivery Ratio (PDR)*, *Throughput*, dan *End-to-End Delay* melalui berbagai skenario jaringan yang merepresentasikan kondisi operasional kampus.

A. Desain Penelitian

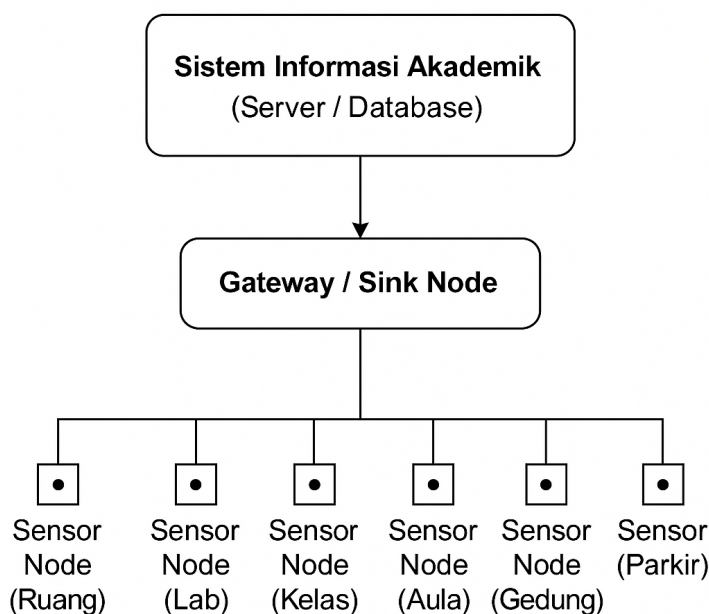
Penelitian ini dilakukan melalui tiga tahapan utama, yaitu:

1. Perancangan Arsitektur Jaringan WSN – membentuk topologi dan menentukan parameter teknis seperti jumlah node, jarak antar node, dan jenis protokol yang digunakan.
2. Simulasi dan Pengujian – menggunakan perangkat lunak NS-3 untuk mensimulasikan perilaku jaringan di bawah berbagai kondisi, termasuk variasi jumlah node dan jarak transmisi.
3. Analisis Data dan Evaluasi Hasil – melakukan pengolahan data hasil simulasi untuk menghitung nilai efisiensi energi dan performa transmisi data, kemudian dilakukan analisis perbandingan antar skenario.

B. Rancangan Sistem

Arsitektur sistem penelitian ini dibangun berdasarkan model tiga lapisan WSN, yaitu lapisan sensor node, lapisan *sink node*, dan lapisan server pusat yang terhubung dengan sistem informasi akademik. Node sensor berfungsi sebagai pengumpul data lingkungan akademik (misalnya suhu ruang kelas, tingkat kehadiran, dan aktivitas laboratorium), kemudian data tersebut dikirim secara nirkabel menuju *sink node* [50], [51]. Selanjutnya, *sink node* meneruskan data ke server pusat untuk diolah dan disimpan ke dalam basis data sistem informasi akademik.

Gambar 1 berikut menggambarkan rancangan arsitektur jaringan yang digunakan:



Gambar 1. Arsitektur Wireless Sensor Network untuk Sistem Informasi Akademik

C. Parameter Penelitian

Parameter-parameter yang diuji dalam penelitian ini terdiri atas variabel bebas dan variabel terikat sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel dan Indikator Penelitian

Jenis Variabel	Nama Variabel	Indikator / Satuan	Deskripsi Pengukuran
Bebas	Jumlah node sensor	Unit	Jumlah total node dalam jaringan (10, 20, 30, 40)
	Jarak antar node	Meter	Variasi jarak antar node (10–50 m)
	Protokol routing	Jenis protokol	LEACH, HEED, PEGASIS

Jenis Variabel	Nama Variabel	Indikator / Satuan	Deskripsi Pengukuran
Terikat	Konsumsi energi	Joule	Total energi rata-rata yang digunakan per node
	Packet Delivery Ratio (PDR)	%	Persentase paket data yang berhasil diterima
	Throughput	Kbps	Kecepatan efektif transmisi data
	End-to-End Delay	ms	Rata-rata waktu tunda pengiriman data

D. Metode Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan Network Simulator 3 (NS-3) dengan pengaturan sebagai berikut:

- Jumlah node: 10–40 node
- Area simulasi: 100 m × 100 m
- Protokol komunikasi: LEACH dan PEGASIS
- Model propagasi: *Two-Ray Ground*
- Waktu simulasi: 300 detik
- Kapasitas baterai per node: 2 Joule

Setiap skenario dijalankan sebanyak tiga kali untuk mendapatkan hasil rata-rata yang stabil. Data hasil simulasi dikumpulkan secara otomatis dalam format *trace file* kemudian dianalisis menggunakan skrip Python untuk menghitung konsumsi energi total [52], tingkat keberhasilan transmisi paket, serta waktu tunda rata-rata.

E. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui dua tahap:

1. Analisis Kuantitatif Deskriptif – menghitung nilai rata-rata, maksimum, dan minimum dari setiap parameter performa jaringan.
2. Analisis Komparatif – membandingkan hasil antar skenario untuk mengidentifikasi konfigurasi jaringan yang paling efisien dari sisi energi dan performa transmisi.

Hasil analisis kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik hubungan antara jumlah node terhadap konsumsi energi dan performa transmisi [53], untuk memperoleh pemahaman tentang trade-off antara efisiensi dan kualitas jaringan.

F. Validasi dan Evaluasi

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap model teoretis WSN yang sudah dikembangkan sebelumnya. Parameter hasil simulasi seperti *Packet Delivery Ratio* dan konsumsi energi dibandingkan dengan nilai ideal untuk memastikan bahwa sistem bekerja dalam batas realistis [54], [55]. Evaluasi akhir bertujuan menilai sejauh mana WSN dapat diimplementasikan secara efisien dan handal sebagai infrastruktur pendukung sistem informasi akademik yang adaptif dan berkelanjutan.

IV. HASIL

Penelitian ini menghasilkan data performa *Wireless Sensor Network (WSN)* yang diperoleh melalui simulasi menggunakan Network Simulator 3 (NS-3). Pengujian dilakukan terhadap tiga protokol komunikasi utama, yaitu LEACH, PEGASIS, dan HEED, dengan variasi jumlah node sensor sebanyak 10, 20, 30, dan 40 node. Parameter utama yang diukur meliputi konsumsi energi total, Packet Delivery Ratio (PDR), Throughput, dan End-to-End Delay. Hasil simulasi memberikan gambaran mengenai hubungan antara efisiensi energi dan kualitas transmisi data dalam mendukung sistem informasi akademik yang membutuhkan kinerja jaringan yang stabil dan efisien.

A. Hasil Konsumsi Energi

Pengujian terhadap efisiensi energi menunjukkan bahwa protokol LEACH menghasilkan konsumsi energi paling rendah dibandingkan dua protokol lainnya. Hal ini disebabkan oleh mekanisme *clustering* yang efisien, di mana *cluster head* bertanggung jawab melakukan agregasi data sebelum dikirim ke *sink node*. Dengan demikian, jumlah transmisi langsung dapat dikurangi, sehingga menghemat daya baterai.

Sebaliknya, PEGASIS menunjukkan peningkatan konsumsi energi pada jumlah node di atas 30, karena model *chain-based transmission* menyebabkan beberapa node berperan sebagai perantara terlalu sering, yang mempercepat pengurasan energi pada node tertentu.

Tabel 2. Rata-rata Konsumsi Energi Node (Joule)

Jumlah Node	LEACH	PEGASIS	HEED
10	1.82	1.95	2.10
20	1.95	2.22	2.35
30	2.05	2.48	2.61
40	2.21	2.73	2.88

Dari tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa LEACH memiliki efisiensi energi lebih baik sekitar 12–15% dibandingkan HEED dan PEGASIS pada kondisi jaringan dengan kepadatan tinggi.

B. Hasil Packet Delivery Ratio (PDR)

PDR merupakan indikator keandalan transmisi data pada jaringan WSN. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PDR menurun seiring dengan bertambahnya jumlah node, akibat meningkatnya interferensi dan kemungkinan *packet collision*. Meskipun demikian, protokol HEED menunjukkan nilai PDR paling stabil karena mekanisme *hybrid clustering*-nya yang mempertimbangkan jarak dan sisa energi node.

Tabel 3. Nilai Packet Delivery Ratio (PDR) (%)

Jumlah Node	LEACH	PEGASIS	HEED
10	99.1	97.8	99.3
20	97.6	96.9	98.8
30	95.3	94.1	97.2
40	93.5	92.3	96.1

Secara umum, PDR tertinggi diperoleh pada HEED (rata-rata 97.8%), menunjukkan kestabilan transmisi yang baik bahkan pada kondisi jaringan padat.

C. Hasil Throughput

Throughput mengukur kecepatan efektif transmisi data dalam satuan Kbps. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *throughput* tertinggi dicapai oleh LEACH, terutama pada jumlah node di bawah 30. Hal ini karena pengurangan lalu lintas data yang dikirim secara langsung ke *sink node* mampu meminimalkan kemacetan jaringan.

Tabel 4. Nilai Throughput (Kbps)

Jumlah Node	LEACH	PEGASIS	HEED
10	245.3	231.2	242.8
20	238.6	220.5	236.1

Jumlah Node	LEACH	PEGASIS	HEED
30	226.7	212.3	223.5
40	217.4	204.6	214.8

Throughput cenderung menurun dengan bertambahnya jumlah node karena meningkatnya beban komunikasi dan potensi *collision*. Namun, LEACH tetap unggul secara konsisten dengan rata-rata *throughput* sebesar 231.97 Kbps.

D. Hasil End-to-End Delay

Parameter *End-to-End Delay* menggambarkan waktu rata-rata yang dibutuhkan paket untuk mencapai *sink node*. Nilai delay terendah dicapai oleh PEGASIS pada jaringan kecil (10–20 node) karena jalur komunikasi yang lebih langsung dan berurutan. Namun, pada jumlah node yang lebih besar, delay meningkat signifikan akibat bertambahnya panjang rantai transmisi.

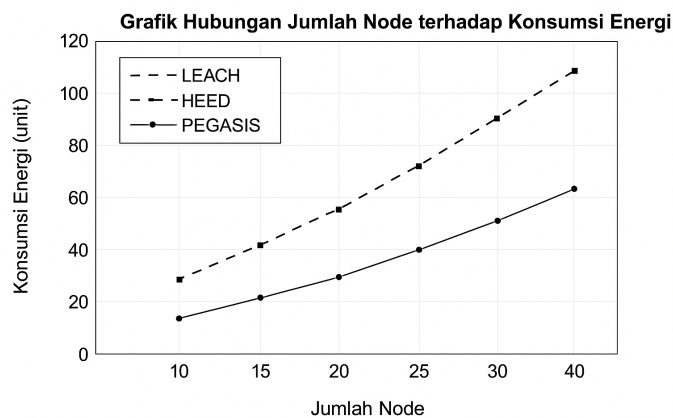
Tabel 5. Nilai Rata-rata End-to-End Delay (ms)

Jumlah Node	LEACH	PEGASIS	HEED
10	118	102	111
20	132	119	126
30	148	142	137
40	165	163	152

Secara keseluruhan, HEED memberikan keseimbangan antara *delay* dan keandalan transmisi, sedangkan LEACH lebih unggul dalam efisiensi energi.

E, Visualisasi Hasil Simulasi

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara jumlah node terhadap konsumsi energi rata-rata, di mana terlihat kecenderungan peningkatan konsumsi energi seiring bertambahnya jumlah node pada ketiga protokol.



Gambar 2. Grafik Hubungan Jumlah Node terhadap Konsumsi Energi

Grafik memperlihatkan bahwa LEACH menunjukkan kurva kenaikan paling landai, menandakan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan protokol lain. Perbandingan hasil keseluruhan menunjukkan bahwa tidak ada satu protokol yang unggul secara absolut. LEACH unggul dalam efisiensi energi, HEED unggul dalam kestabilan transmisi, dan PEGASIS memiliki *delay* terendah pada jaringan kecil. Dengan demikian, kombinasi metode adaptif berdasarkan kondisi jaringan dapat menjadi solusi optimal bagi implementasi WSN pada sistem informasi akademik yang memerlukan efisiensi dan keandalan tinggi.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap protokol komunikasi pada *Wireless Sensor Network (WSN)* memiliki karakteristik performa yang berbeda dalam hal efisiensi energi dan kualitas transmisi data. Perbedaan ini memberikan gambaran bahwa pemilihan protokol harus disesuaikan dengan kebutuhan sistem informasi akademik, baik dari sisi efisiensi daya, kestabilan transmisi, maupun kecepatan pengiriman data. Analisis terhadap empat parameter utama—konsumsi energi, *Packet Delivery Ratio (PDR)*, *Throughput*, dan *End-to-End Delay*—memberikan dasar untuk memahami hubungan antara arsitektur jaringan dan performa sistem secara keseluruhan.

1. Efisiensi Energi dan Ketahanan Jaringan Hasil simulasi memperlihatkan bahwa protokol LEACH memiliki konsumsi energi paling rendah, terutama pada jaringan padat dengan jumlah node di atas 30. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme *clustering* adaptif yang digunakan LEACH mampu menurunkan jumlah transmisi langsung ke *sink node*, sehingga menghemat daya baterai sensor. Dalam konteks sistem informasi akademik yang membutuhkan operasi jangka panjang, efisiensi energi seperti ini sangat penting untuk mengurangi kebutuhan perawatan perangkat. Dengan demikian, LEACH cocok diterapkan pada skenario kampus yang memiliki banyak sensor dengan cakupan area luas seperti sistem presensi otomatis atau pemantauan aktivitas laboratorium.
2. Kualitas Transmisi Data dan Reliabilitas Sistem Nilai *Packet Delivery Ratio (PDR)* tertinggi diperoleh dari protokol HEED, menunjukkan stabilitas transmisi data yang tinggi bahkan dalam kondisi kepadatan jaringan yang meningkat. Hal ini membuktikan bahwa pemilihan *cluster head* berdasarkan jarak dan sisa energi efektif dalam menjaga jalur komunikasi yang andal. Dalam sistem informasi akademik, reliabilitas transmisi sangat berpengaruh terhadap akurasi data, seperti data kehadiran mahasiswa, status ruangan, atau log aktivitas akademik. Oleh karena itu, HEED dapat menjadi pilihan tepat untuk implementasi sistem yang menuntut konsistensi data real-time dan minim kehilangan paket.
3. Trade-off antara Delay, Throughput, dan Efisiensi Protokol PEGASIS menunjukkan nilai *delay* terendah pada jaringan dengan node sedikit, namun performanya menurun saat jumlah node meningkat. Hal ini menunjukkan adanya *trade-off* antara kecepatan transmisi dan efisiensi energi. Pada sistem informasi akademik yang membutuhkan respon cepat—misalnya pemantauan keamanan kampus atau sistem notifikasi darurat—PEGASIS dapat digunakan pada jaringan kecil yang memprioritaskan waktu respon. Sementara itu, untuk jaringan berskala besar, LEACH dan HEED memberikan keseimbangan yang lebih baik antara kecepatan dan efisiensi. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa tidak ada satu protokol yang unggul secara mutlak, melainkan setiap protokol memiliki keunggulan spesifik tergantung kebutuhan operasional sistem akademik. Kombinasi strategi adaptif yang menggabungkan efisiensi energi dari LEACH, stabilitas transmisi dari HEED, dan kecepatan respon dari PEGASIS dapat menjadi pendekatan ideal untuk membangun *smart campus network* yang efisien, tangguh, dan berkelanjutan.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis efisiensi energi dan kualitas transmisi data pada *Wireless Sensor Network (WSN)* yang diimplementasikan untuk mendukung sistem informasi akademik. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan protokol LEACH, HEED, dan PEGASIS, dapat disimpulkan bahwa setiap protokol memiliki karakteristik performa yang berbeda sesuai dengan kebutuhan jaringan. Protokol LEACH menunjukkan performa terbaik dalam efisiensi energi dengan konsumsi daya terendah, menjadikannya ideal untuk jaringan berukuran besar dan aplikasi yang menuntut operasi jangka panjang. HEED unggul dalam kestabilan transmisi dengan nilai *Packet Delivery Ratio* tertinggi, sehingga cocok untuk sistem akademik yang memerlukan keandalan data tinggi. Sementara itu, PEGASIS memiliki *delay* terendah pada jaringan kecil, sehingga sesuai untuk aplikasi yang memerlukan respon cepat namun dengan skala terbatas. Secara umum, penelitian ini menegaskan bahwa pemilihan protokol WSN harus disesuaikan dengan karakteristik lingkungan dan tujuan sistem akademik. Kombinasi dari ketiga pendekatan dapat menjadi solusi optimal dalam mewujudkan *smart campus* yang efisien, handal, dan berkelanjutan dalam pengelolaan data akademik berbasis jaringan sensor nirkabel.

Kontribusi Penulis [Moh Risqi Isya Al-Hidayat]: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan, Supervisi. Merancang konsep penelitian, menyusun metodologi, serta memimpin penulisan dan penyuntingan akhir naskah.

[M. Husnol Hidayat]: Investigasi, Kurasi Data, Visualisasi. Melakukan pengumpulan data, pengolahan hasil simulasi, dan penyusunan tabel serta grafik penelitian.

[Dimas Prasetya Januardiansyah]: Perangkat Lunak, Analisis, Validasi. Mengimplementasikan simulasi NS-3, melakukan analisis performa jaringan, 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. Muslim, N. Hasanah, R. Paradina, and ..., "Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," *J. Sistim Inf.* ..., 2023, [Online]. Available: <http://www.jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/325>
- [2] F. P. E. Putra, M. Ghummah, M. Amrullah, and R. Hidayatullah, "Studi Kinerja Mesh Network untuk Penerapan Internet of Things (IoT) di Lingkungan Perkotaan," 2025, *researchgate.net*.
- [3] S. Burok, F. P. E. Putra, and L. Fermadi, "Anti-Klon Pendekatan Ringan untuk Mendeteksi Serangan Kloning RFID," *Infotek J.* ..., 2025.
- [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. E. Putra, N. D. Saputri, F. Rosi, and R. Loati, "Optimalisasi Infrastruktur Cloud Networking melalui Integrasi 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-Integrasi
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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>
- [10] F. P. E. Putra, S. R. Sutarsih, S. Sofiyulloh, and ..., "Optimalisasi Perancangan Aplikasi Manajemen Data Koloman, Di Desa Pulau Mandangin Sampang–Madura Berbasis Website," 2024, *jurnal.univrab.ac.id*. [Online]. Available: <https://jurnal.univrab.ac.id/index.php/rabit/article/download/4840/1965>
- [11] G. H. Adday, S. K. Subramaniam, Z. A. Zukarnain, and N. Samian, "Investigating and Analyzing Simulation

- Tools of Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 22938–22977, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3362889.
- [12] M. P. S. de Abreu, F. S. S. de Oliveira, and F. Souza, “d-CACC for Vehicle Platoons Lacking Acceleration Signal,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 25, no. 8, pp. 9028–9038, 2024, doi: 10.1109/TITS.2024.3381577.
- [13] A. N. El-Shenhab, E. H. Abdelhay, M. A. Abdelazim, and I. F. Moawad, “A Reinforcement Learning-Based Dynamic Clustering of Sleep Scheduling Algorithm (RLDCSSA-CDG) for Compressive Data Gathering in Wireless Sensor Networks,” *Technologies*, vol. 13, no. 1, 2025, doi: 10.3390/technologies13010025.
- [14] D. A. Zainaddin, Z. M. Hanapi, M. Othman, Z. Zukarnain, and M. D. H. Abdullah, “Recent trends and future directions of congestion management strategies for routing in IoT-based wireless sensor network: a thematic review,” *Wirel. Networks*, vol. 30, no. 3, pp. 1939–1983, 2024, doi: 10.1007/s11276-023-03598-w.
- [15] R. Alhamad and H. Boujemâa, “Optimal harvesting and sensing duration using wind energy,” *Signal, Image Video Process.*, vol. 19, no. 10, 2025, doi: 10.1007/s11760-025-04426-8.
- [16] X. Gu, “Application of corporate image integrating Zigbee technology in brand APP interface design using IoT technology,” *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 45, no. 5, pp. 8317–8333, 2023, doi: 10.3233/JIFS-233343.
- [17] M. H. Reehanparveen and C. Sunitha, “A Spiking Neural Network-based LEACH Protocol for Optimal Cluster Head Selection in Large-Scale Wireless Sensor Networks,” *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 18, no. 5, pp. 458–473, 2025, doi: 10.22266/ijies2025.0630.32.
- [18] V.-H. Nguyen and N. D. Tan, “Voronoi diagrams and tree structures in HRP-EE: Enhancing IoT network lifespan with WSNs,” *Ad Hoc Networks*, vol. 161, 2024, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103518.
- [19] 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.
- [20] M. Y. Arafat, S. Pan, and E. Bak, “QQAR: A Q-learning-based QoS-aware routing for IoMT-enabled wireless body area networks for smart healthcare,” *Internet Things (The Netherlands)*, vol. 26, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101151.
- [21] H. Wu, H. Zhu, X. Li, and M. J. V Amuri, “Trust-Based Distributed Set-Membership Filtering for Target Tracking Under Network Attacks,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 84468–84474, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3303203.
- [22] D. Duraimurugan, S. Radhika, and A. Chandra Sekar, “An optimal model for enhancing network lifetime and cluster head selection using hybrid snake whale optimization,” *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 16, no. 4, pp. 1959–1974, 2023, doi: 10.1007/s12083-023-01487-9.
- [23] W. Chen, Z. He, J. Zhao, J. Mo, and H. Ouyang, “Hybrid triboelectric-piezoelectric energy harvesting via a bistable swing-impact structure with a tuneable potential barrier and frequency-up conversion effects,” *Appl. Energy*, vol. 375, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124123.
- [24] 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.
- [25] H. Yi *et al.*, “Efficient Interfacial Electrical Energy Extraction of a Triboelectric Nanogenerator by the Charge Lock-Free Strategy,” *Adv. Mater.*, vol. 37, no. 29, 2025, doi: 10.1002/adma.202503598.
- [26] L. Shihao, D. P. Dahnail, and S. Saad, “A Survey of Smart Campus Resource Information Management in Internet of Things,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 66622–66645, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3558900.
- [27] R. Panwar and P. Koli, “A histological/biological stain based device-chargeable in light for solar power generation and storage through photo-galvanic effect,” *J. Power Sources*, vol. 659, 2025, doi: 10.1016/j.jpowsour.2025.238434.
- [28] R. Ramadhan, A. Irma Purnamasari, and A. Rinaldi Dikananda, “Analisis Perbandingan Quality of Service Menggunakan Virtual Access Point Dan Real Access Point Dengan Metode Tiphon,” *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.)*, vol. 7, no. 1, pp. 516–526, 2023, doi: 10.36040/jati.v7i1.6352.
- [29] M. S. Batta, H. Mabel, Z. Aliouat, and S. Harous, “Battery State-of-Health Prediction-Based Clustering for Lifetime Optimization in IoT Networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 1, pp. 81–91, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3200717.
- [30] J. Jang, I. Habibagahi, R. P. Mathews, W. Gwak, H. Rahmani, and A. Babakhani, “A Wirelessly Powered, Battery-Less, and Miniaturized Microchip for Implantable Biopotential-Monitoring Applications,” *IEEE Sens. J.*, vol. 25, no. 11, pp. 19545–19554, 2025, doi: 10.1109/JSEN.2025.3556921.
- [31] A. Juwaied, L. Jackowska-Strumillo, and M. Majchrowicz, “Enhanced Distributed Energy-Efficient Clustering (DEEC) Protocol for Wireless Sensor Networks: A Modular Implementation and Performance

- Analysis,” *Sensors*, vol. 25, no. 13, 2025, doi: 10.3390/s25134015.
- [32] A. A. Khan, R. Ghodhbani, A. Alsufyani, N. Alsufyani, and M. A. Mohamed, “Leveraging blockchain-integrated explainable artificial intelligence (XAI) for ethical and personalized healthcare decision-making: a framework for secure data sharing and enhanced patient trust,” *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 15, 2025, doi: 10.1007/s11227-025-07844-0.
- [33] J. Wang *et al.*, “Sparse Bayesian Learning-Based 3-D Radio Environment Map Construction-Sampling Optimization, Scenario-Dependent Dictionary Construction, and Sparse Recovery,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 1, pp. 80–93, 2024, doi: 10.1109/TCCN.2023.3319539.
- [34] G. Li *et al.*, “Breaking Down Data Sharing Barrier of Smart City: A Digital Twin Approach,” *IEEE Netw.*, vol. 38, no. 1, pp. 238–246, 2024, doi: 10.1109/MNET.140.2200512.
- [35] C. Sain, P. K. Biswas, P. R. Satpathy, T. S. Thanikanti, and H. H. Alhelou, “Self-Controlled PMSM Drive Employed in Light Electric Vehicle-Dynamic Strategy and Performance Optimization,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 57967–57975, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072910.
- [36] M. Azadimotlagh, N. Jafari, and R. Sharafadini, “Review on Architecture and Challenges in Smart Cities,” *J. Inf. Syst. Telecommun.*, vol. 13, no. 1, pp. 33–49, 2025, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105006676229&partnerID=40&md5=ddbcdcf26331529b323aae79d9e5872e>
- [37] B. Á. Üveges, M. Lőrincz, and A. Oláh, “Resilient Multipath Routing Protocol to Enable Hazardous event Monitoring with Wireless Sensor Network,” *Telfor J.*, vol. 15, no. 1, pp. 20–25, 2023, doi: 10.5937/telfor2301020Q.
- [38] K. Kosaraju and G. Dhanabalan, “Secure Route Detection with Multi Level Trust Evaluation Model Using Replicated Auditor Node for Extended Packet Delivery Rate in WSN,” *Rev. d’Intelligence Artif.*, vol. 37, no. 4, pp. 871–879, 2023, doi: 10.18280/ria.370406.
- [39] 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.
- [40] F. Ebrahimi and M. Parsi, “Utilizing star-shaped auxetic metabeams for piezoelectric vibration energy harvesting,” *Acta Mech.*, vol. 236, no. 5, pp. 2895–2919, 2025, doi: 10.1007/s00707-025-04291-z.
- [41] R. Vatambeti, S. V Mantena, K. V. D. Kiran, S. Chennupalli, and M. V Venu Gopalachari, “Black hole attack detection using Dolphin Echo-location-based machine learning model in MANET environment,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 114, 2024, doi: 10.1016/j.compeleceng.2024.109094.
- [42] G. S. Karthick, “Energy-Aware Reliable Medium Access Control Protocol for Energy-Efficient and Reliable Data Communication in Wireless Sensor Networks,” *SN Comput. Sci.*, vol. 4, no. 5, 2023, doi: 10.1007/s42979-023-01869-z.
- [43] K. A. Darabkh, M. F. Al-Mistarihi, and B. A. Odat, “Leveraging fog computing and software-defined networking for a novel velocity-aware routing protocol with election and handover thresholds in VANETs,” *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 2, 2025, doi: 10.1007/s11227-024-06883-3.
- [44] Z. Li *et al.*, “All-weather triboelectric nanogenerator with bidirectional temperature regulation and hydrophobicity for energy harvesting and motion detection,” *Chem. Eng. J.*, vol. 522, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.168011.
- [45] P. Porkar Rezaeiye *et al.*, “Exploring a Mesh-Hub-Based Wireless Sensor Network for Smart Home Electrical Monitoring,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 133, no. 4, pp. 2067–2086, 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10786-6.
- [46] H. Tan, T. Ye, S. U. Ur Rehman, O. Rehman, S. Tu, and J. Ahmad, “A novel routing optimization strategy based on reinforcement learning in perception layer networks,” *Comput. Networks*, vol. 237, 2023, doi: 10.1016/j.comnet.2023.110105.
- [47] L. Li *et al.*, “Flexible Photothermal Phase Change Material with High Photothermal Properties Achieved by Promoted Dispersion of Hydrophobically Modified Eumelanin and its Photovoltaic Applications,” *Small*, vol. 21, no. 22, 2025, doi: 10.1002/sml.202500951.
- [48] Y. Jian, L. Tang, D. Huang, H. Han, W. Liu, and G. Hu, “Designing an electromechanical metamaterial beam with arbitrary decoupled defect modes for multi-band wave localization,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 34, no. 3, 2025, doi: 10.1088/1361-665X/adb35e.
- [49] M. S. Keller *et al.*, “The Honest Enterprise Research Broker: Facilitating Ethical, Efficient, and Secure Access to Health Data for Research,” *Appl. Clin. Inform.*, vol. 16, no. 2, pp. 362–368, 2025, doi: 10.1055/a-2499-4090.
- [50] M. Yuan *et al.*, “Integrated acoustic metamaterial triboelectric nanogenerator for joint low-frequency acoustic

- insulation and energy harvesting,” *Nano Energy*, vol. 122, 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.109328.
- [51] I. Diakhate, B. Niang, A. D. Kora, and R. M. Faye, “Optimization of wireless sensor networks energy consumption by the clustering method based on the firefly algorithm,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 29, no. 3, pp. 1456–1465, 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v29.i3.pp1456-1465.
- [52] B. Yelure, A. Patokar, S. Patil, R. Mawale, S. Nemade, and V. Gaikwad, “Impact and Analysis of Attacks on Routing Protocols in Vehicular Ad hoc Network (VANET): Assessing Security Threats,” *IEIE Trans. Smart Process. Comput.*, vol. 13, no. 3, pp. 294–302, 2024, doi: 10.5573/IEIESPC.2024.13.3.294.
- [53] L. Wu, X. Gao, Z. Hu, and S. Zhang, “Pattern-Aware Transformer: Hierarchical Pattern Propagation in Sequential Medical Images,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 43, no. 1, pp. 405–415, 2024, doi: 10.1109/TMI.2023.3306468.
- [54] K. Vinodan *et al.*, “Exploring the flexibility of gapless and gapped devices using PVDF-TrFE-CTFE-rGO-KNbO₃ nanocomposite films for energy harvesting applications,” *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 315, 2025, doi: 10.1016/j.mseb.2025.118084.
- [55] A. K. Singh and R. Jaiswal, “Analysis on transverse vibration of piezo-electro-magneto-thermoelastic composite nanobeams under distinct Green–Naghdi III phase lag models,” *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 113, 2025, doi: 10.1016/j.euromechsol.2025.105702.

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