

Optimasi Kinerja Jaringan pada Wireless Sensor Network Menggunakan Metode Clustering

Romeo Djefzy Romadhoni^{1)*} , Deki Wahyudi²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ djefzyromadhoni@gmail.com, ²⁾ dekywahyudi352@gmail.com

Abstrak

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan teknologi jaringan nirkabel yang banyak digunakan pada berbagai aplikasi pemantauan karena fleksibilitas dan kemampuannya dalam mengumpulkan data lingkungan. Namun, keterbatasan sumber daya, khususnya energi node sensor, menjadi tantangan utama yang berdampak langsung pada kinerja dan umur jaringan. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan ini, salah satunya adalah metode clustering yang bertujuan mengoptimalkan pengelolaan komunikasi data. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan kinerja jaringan WSN melalui penerapan metode clustering dengan fokus pada efisiensi energi, umur jaringan, dan kinerja pengiriman data. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui simulasi jaringan WSN. Evaluasi dilakukan dengan menerapkan metode clustering pada beberapa skenario simulasi, kemudian dianalisis berdasarkan parameter energi rata-rata node, umur jaringan, jumlah paket yang diterima *base station*, serta rasio keberhasilan pengiriman paket. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode clustering mampu menurunkan laju konsumsi energi node secara lebih merata, memperpanjang umur jaringan hingga ratusan putaran simulasi, serta meningkatkan jumlah paket data yang berhasil diterima oleh *base station*. Skenario clustering dengan mekanisme pemilihan *cluster head* berbasis energi menunjukkan kinerja terbaik dibandingkan skenario lainnya. Penelitian ini membuktikan bahwa metode clustering efektif dalam meningkatkan kinerja WSN, khususnya dalam efisiensi energi dan ketahanan jaringan. Meskipun demikian, penurunan kinerja pada fase akhir simulasi menunjukkan perlunya pengembangan metode clustering yang lebih adaptif terhadap dinamika energi dan topologi jaringan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan pendekatan adaptif atau kecerdasan buatan guna meningkatkan keberlanjutan kinerja jaringan.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, Clustering, Efisiensi Energi, Umur Jaringan, Optimasi Jaringan

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

I. PENDAHULUAN

Perkembangan jaringan komputer nirkabel telah mendorong lahirnya berbagai paradigma baru dalam sistem komunikasi data, salah satunya adalah *Wireless Sensor Network* (WSN)[1]. WSN terdiri dari sejumlah besar node sensor berdaya rendah yang tersebar di suatu area untuk melakukan penginderaan, pemrosesan data sederhana, serta pengiriman informasi secara nirkabel ke *base station*[2]. Karakteristik WSN yang bersifat *self-organizing*, fleksibel, dan mudah dideploy menjadikan teknologi ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi strategis, seperti pemantauan lingkungan, sistem peringatan dini bencana, pertanian presisi, sistem kesehatan, industri cerdas, dan ekosistem *Internet of Things* (IoT). Meskipun memiliki potensi besar, implementasi WSN dihadapkan pada sejumlah keterbatasan mendasar, terutama terkait dengan sumber daya node sensor yang sangat terbatas[3], [4]. Node sensor umumnya memiliki kapasitas energi, daya komputasi, memori, dan bandwidth yang rendah. Dari berbagai keterbatasan tersebut, konsumsi energi menjadi isu paling krusial karena umur jaringan sangat bergantung pada daya tahan baterai node sensor[5]. Dalam banyak skenario aplikasi, penggantian atau pengisian ulang baterai tidak memungkinkan dilakukan, sehingga diperlukan mekanisme pengelolaan jaringan yang efisien dan adaptif untuk memperpanjang umur jaringan secara keseluruhan[6].

Kinerja jaringan pada WSN dipengaruhi oleh berbagai parameter, antara lain konsumsi energi, *throughput*, *packet delivery ratio*, *end-to-end delay*, dan *network lifetime*. Pola komunikasi yang tidak terstruktur dan penggunaan transmisi jarak jauh secara langsung ke *base station* dapat menyebabkan pemborosan energi yang signifikan[7], [8]. Selain itu, terjadinya ketidakseimbangan beban komunikasi antar node sering kali mengakibatkan node tertentu kehabisan energi lebih cepat, sehingga memicu terjadinya kegagalan jaringan secara prematur[9]. Kondisi ini menunjukkan bahwa optimasi kinerja jaringan pada WSN tidak dapat dilepaskan dari strategi manajemen komunikasi

* Romeo djefzy romadhoni

yang efektif. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi dan kinerja jaringan WSN adalah metode *clustering*. Dalam pendekatan ini, node sensor dikelompokkan ke dalam beberapa klaster, di mana setiap klaster memiliki satu node yang berfungsi sebagai *cluster head*. *Cluster head* bertanggung jawab untuk mengumpulkan data dari node anggota, melakukan agregasi data, dan mengirimkan hasilnya ke *base station*[10], [11]. Dengan mekanisme ini, jumlah transmisi jarak jauh dapat dikurangi secara signifikan, sehingga konsumsi energi jaringan menjadi lebih efisien.

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa metode clustering mampu meningkatkan skalabilitas jaringan, menurunkan konsumsi energi, serta memperpanjang umur jaringan WSN[12]. Namun demikian, efektivitas clustering sangat dipengaruhi oleh mekanisme pemilihan *cluster head* dan pengelolaan klaster. Pemilihan *cluster head* yang tidak optimal dapat menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan konsumsi energi, di mana node tertentu mengalami kelelahan energi lebih cepat dibandingkan node lainnya[13]. Oleh karena itu, strategi clustering yang efisien dan adaptif masih menjadi fokus utama dalam penelitian WSN. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas dan skala jaringan, pendekatan clustering konvensional yang bersifat statis atau berbasis probabilitas sederhana sering kali tidak mampu memberikan kinerja optimal dalam kondisi jaringan yang dinamis[14], [15]. Faktor-faktor seperti variasi energi residual node, perubahan topologi jaringan, serta kepadatan node yang tidak merata menuntut adanya metode clustering yang mampu beradaptasi terhadap kondisi jaringan secara real-time. Selain itu, tuntutan terhadap peningkatan *Quality of Service* (QoS) pada aplikasi WSN modern juga menambah kompleksitas permasalahan optimasi jaringan[16].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian mengenai optimasi kinerja jaringan pada *Wireless Sensor Network* menggunakan metode clustering masih memiliki relevansi yang tinggi. Diperlukan pendekatan clustering yang tidak hanya berfokus pada efisiensi energi, tetapi juga mampu meningkatkan kinerja jaringan secara keseluruhan[17], [18]. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan mengembangkan metode clustering yang mampu mengoptimalkan distribusi beban komunikasi, meningkatkan efisiensi penggunaan energi, serta memperpanjang umur jaringan WSN. Kontribusi dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih efektif dibandingkan metode clustering konvensional, khususnya dalam skenario jaringan berskala besar dengan keterbatasan sumber daya yang ketat[19]. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya kajian ilmiah di bidang jaringan komputer, khususnya terkait dengan perancangan dan optimasi *Wireless Sensor Network*. Dengan semakin luasnya penerapan WSN dalam berbagai bidang, penelitian ini memiliki kontribusi penting baik secara akademis maupun praktis dalam mendukung pengembangan sistem jaringan yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan[20], [21].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan sistem jaringan nirkabel yang tersusun atas sejumlah node sensor dengan kemampuan komputasi dan energi yang terbatas. Node sensor bekerja secara kolaboratif untuk melakukan penginderaan, pemrosesan data sederhana, serta pengiriman informasi ke *base station*[22], [23]. Karakteristik utama WSN meliputi topologi yang dinamis, keterbatasan sumber daya, serta kebutuhan akan komunikasi data yang efisien. Oleh karena itu, perancangan mekanisme komunikasi yang hemat energi menjadi aspek fundamental dalam pengembangan WSN. Kinerja jaringan pada WSN sangat dipengaruhi oleh pola komunikasi antar node dan strategi pengelolaan data[24]. Komunikasi langsung antara node sensor dan *base station* dalam jarak jauh cenderung menyebabkan konsumsi energi yang tinggi, sehingga mempercepat kehabisan daya baterai[25], [26]. Selain itu, meningkatnya jumlah node dalam jaringan dapat menyebabkan kemacetan lalu lintas data, tabrakan paket, dan penurunan kualitas layanan jaringan. Kondisi ini menegaskan pentingnya pendekatan optimasi jaringan yang mampu mengatur komunikasi data secara terstruktur dan efisien.

Metode *clustering* merupakan salah satu pendekatan yang paling banyak diterapkan untuk meningkatkan efisiensi energi dan kinerja jaringan WSN[27]. Dalam pendekatan ini, node sensor dikelompokkan ke dalam klaster-klaster kecil, di mana setiap klaster dipimpin oleh satu *cluster head*. *Cluster head* berperan sebagai pengumpul data dari node anggota, melakukan agregasi data, dan meneruskan informasi hasil agregasi ke *base station*. Dengan mekanisme ini, jumlah transmisi jarak jauh dapat diminimalkan, sehingga konsumsi energi jaringan menjadi lebih efisien[28]. Berbagai skema clustering telah dikembangkan dengan tujuan meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan memperpanjang umur jaringan. Skema clustering berbasis probabilitas memungkinkan pemilihan *cluster head* secara acak dengan probabilitas tertentu[29]. Pendekatan ini relatif sederhana dan mudah diimplementasikan, namun sering kali menghasilkan distribusi beban energi yang tidak merata. Akibatnya, beberapa node mengalami kelelahan energi lebih cepat, sehingga menurunkan kinerja jaringan secara keseluruhan. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dikembangkan skema clustering berbasis energi residual. Pendekatan ini mempertimbangkan sisa energi node dalam proses pemilihan *cluster head*, sehingga node dengan energi lebih tinggi memiliki peluang lebih besar untuk menjadi *cluster head*[30], [31]. Strategi ini terbukti mampu meningkatkan keseimbangan konsumsi energi antar node dan

memperpanjang umur jaringan. Namun demikian, pendekatan ini masih memiliki keterbatasan dalam menghadapi kondisi jaringan yang dinamis dan perubahan topologi. Selain berbasis energi, beberapa penelitian mengembangkan metode clustering yang mempertimbangkan faktor jarak dan kepadatan node[32]. Pemilihan *cluster head* dilakukan dengan mempertimbangkan jarak node terhadap *base station* dan node anggota, sehingga dapat mengurangi biaya transmisi data. Pendekatan ini mampu meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan latensi komunikasi, namun kompleksitas perhitungannya cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah node dalam jaringan[33], [34].

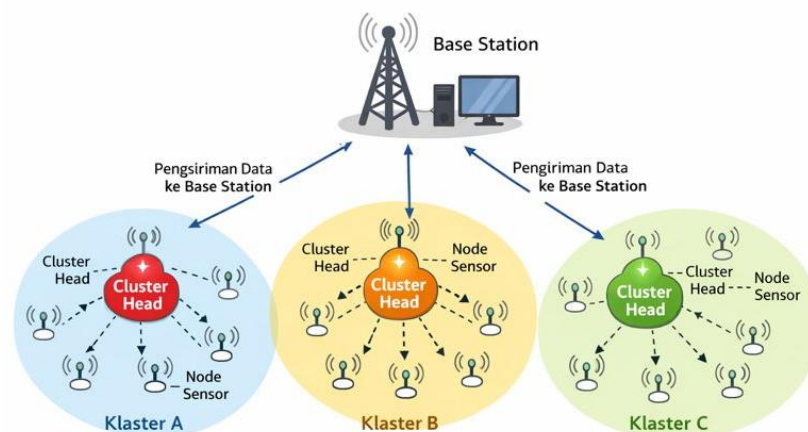
Perkembangan terbaru dalam optimasi WSN menunjukkan kecenderungan penggunaan pendekatan berbasis kecerdasan buatan dan algoritma optimasi metaheuristik. Pendekatan ini memanfaatkan mekanisme pencarian solusi optimal untuk menentukan struktur kluster dan pemilihan *cluster head* secara adaptif[35]. Algoritma seperti optimasi berbasis populasi, logika fuzzy, dan pembelajaran mesin telah digunakan untuk meningkatkan kinerja clustering dengan mempertimbangkan berbagai parameter jaringan secara simultan. Meskipun mampu memberikan peningkatan kinerja yang signifikan, pendekatan ini sering kali memerlukan kompleksitas komputasi yang lebih tinggi, sehingga perlu disesuaikan dengan keterbatasan node sensor[36], [37]. Berdasarkan kajian pustaka yang ada, dapat disimpulkan bahwa metode clustering memiliki peran yang sangat penting dalam optimasi kinerja jaringan WSN. Namun, masih terdapat tantangan dalam merancang skema clustering yang mampu menyeimbangkan efisiensi energi, kompleksitas komputasi, dan adaptabilitas terhadap kondisi jaringan yang dinamis. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengembangkan metode clustering yang lebih efektif dan efisien guna meningkatkan kinerja WSN secara menyeluruh[38].

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental untuk mengevaluasi kinerja *Wireless Sensor Network* (WSN) dengan menerapkan metode clustering sebagai mekanisme optimasi jaringan[39]. Fokus utama penelitian adalah menganalisis pengaruh metode clustering terhadap parameter kinerja jaringan, khususnya efisiensi energi, umur jaringan, *throughput*, dan *packet delivery ratio*. Evaluasi dilakukan melalui simulasi jaringan dengan skenario dan parameter yang dikontrol secara sistematis[40], [41].

1. Arsitektur Sistem WSN

Model sistem WSN pada penelitian ini terdiri atas sejumlah node sensor yang dideploy secara acak dalam suatu area pengamatan dua dimensi. Setiap node sensor memiliki kemampuan penginderaan, pemrosesan data, serta komunikasi nirkabel dengan daya terbatas. *Base station* ditempatkan pada posisi tertentu di dalam atau di luar area jaringan, bergantung pada skenario simulasi yang digunakan[42]. Node sensor mengirimkan data hasil penginderaan ke *base station* melalui mekanisme clustering.



Gambar 1. Arsitektur sistem *Wireless Sensor Network* berbasis clustering

Gambar tersebut menggambarkan pembagian node sensor ke dalam beberapa kluster, peran *cluster head*, serta alur komunikasi data dari node anggota menuju *base station*. Setiap kluster dipimpin oleh satu *cluster head* yang bertugas mengumpulkan dan mengagregasi data dari node anggota sebelum mengirimkannya ke *base station*.

2. Mekanisme Clustering

Proses clustering dilakukan secara periodik dan terdiri atas beberapa tahap utama, yaitu inisialisasi jaringan, pembentukan klaster, pemilihan *cluster head*, dan transmisi data. Pada tahap inisialisasi, seluruh node sensor diaktifkan dengan energi awal yang sama. Selanjutnya, node sensor dikelompokkan ke dalam klaster berdasarkan mekanisme clustering yang digunakan dalam penelitian ini[43], [44]. Pemilihan *cluster head* dilakukan dengan mempertimbangkan parameter tertentu, seperti energi residual node dan jarak komunikasi, untuk memastikan distribusi beban energi yang lebih merata. Setelah *cluster head* terpilih, node anggota mengirimkan data ke *cluster head* masing-masing menggunakan komunikasi jarak dekat. *Cluster head* kemudian melakukan agregasi data untuk mengurangi redundansi sebelum mengirimkan data ke *base station*[45]. Mekanisme ini bertujuan untuk menekan konsumsi energi akibat transmisi data jarak jauh.

3. Skenario Simulasi

Simulasi jaringan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak simulasi jaringan yang mendukung pemodelan WSN. Beberapa skenario simulasi dirancang untuk menguji kinerja metode clustering dalam berbagai kondisi jaringan, seperti variasi jumlah node, ukuran area jaringan, dan posisi *base station*[46], [47]. Setiap skenario dijalankan dalam beberapa putaran (*round*) untuk mengamati perubahan energi node dan kinerja jaringan dari waktu ke waktu.

Tabel 1. Parameter simulasi Wireless Sensor Network

No	Parameter Simulasi	Nilai / Deskripsi
1	Jumlah node sensor	100 node
2	Luas area jaringan	100 m × 100 m
3	Posisi <i>base station</i>	Tetap (di tengah / di luar area jaringan)
4	Energi awal setiap node	0,5 Joule
5	Model energi komunikasi	<i>First Order Radio Model</i>
6	Energi transmisi (E _{tx})	50 nJ/bit
7	Energi penerimaan (E _{rx})	50 nJ/bit
8	Energi agregasi data	5 nJ/bit/sinyal
9	Ukuran paket data	4000 bit
10	Jumlah klaster	Dinamis (bergantung metode clustering)
11	Jumlah putaran simulasi	2000 putaran
12	Model penyebaran node	Acak (<i>random deployment</i>)
13	Metode routing	Berbasis clustering
14	Parameter evaluasi kinerja	Energi, umur jaringan, throughput, PDR

Tabel tersebut memuat parameter simulasi yang digunakan, antara lain jumlah node sensor, ukuran area jaringan, energi awal node, model energi komunikasi, serta durasi simulasi. Parameter-parameter ini ditetapkan secara konsisten untuk memastikan hasil simulasi dapat dibandingkan secara objektif.

4. Parameter Kinerja

Evaluasi kinerja jaringan dilakukan dengan mengukur beberapa parameter utama. Efisiensi energi dianalisis berdasarkan rata-rata konsumsi energi node per putaran simulasi. Umur jaringan diukur berdasarkan waktu hingga node pertama atau sejumlah node tertentu kehabisan energi. *Throughput* dihitung berdasarkan jumlah paket data yang berhasil diterima oleh *base station*, sedangkan *packet delivery ratio* digunakan untuk mengukur keandalan pengiriman data dalam jaringan[48], [49].

5. Metode Analisis Data

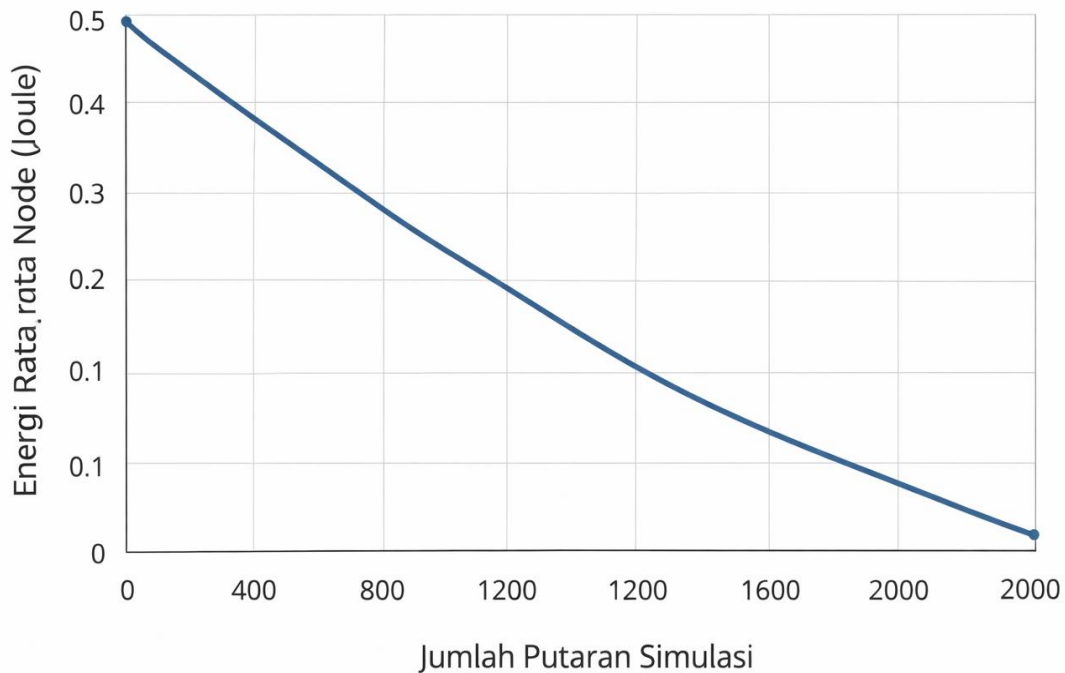
Hasil simulasi dianalisis secara komparatif untuk menilai efektivitas metode clustering dalam meningkatkan kinerja WSN. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai parameter kinerja pada setiap skenario simulasi[50]. Penyajian hasil dilakukan dalam bentuk grafik dan tabel untuk memudahkan interpretasi dan pembahasan lebih lanjut.

IV. HASIL

Bagian ini menyajikan hasil evaluasi kinerja *Wireless Sensor Network* (WSN) dengan penerapan metode clustering berdasarkan skenario simulasi yang telah ditetapkan. Evaluasi difokuskan pada parameter energi, umur jaringan, serta kinerja pengiriman data. Seluruh hasil diperoleh dari simulasi yang dijalankan hingga batas jumlah putaran yang telah ditentukan atau hingga kondisi kegagalan jaringan tercapai.

1. Perubahan Energi Rata-rata Node

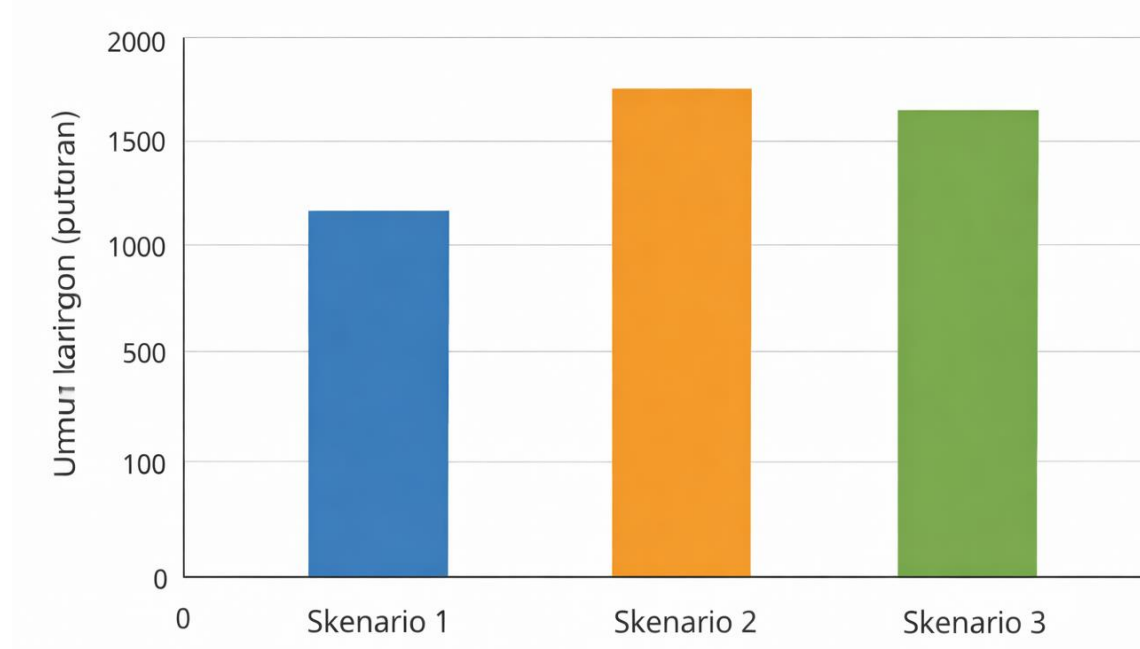
Hasil simulasi menunjukkan bahwa energi rata-rata node mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya jumlah putaran simulasi. Pola penurunan energi bersifat gradual dan relatif stabil, yang mengindikasikan bahwa mekanisme clustering mampu mengatur konsumsi energi node secara lebih efisien. Grafik perubahan energi rata-rata node terhadap jumlah putaran simulasi ditunjukkan pada Grafik 1. Berdasarkan Grafik 1, energi rata-rata node pada awal simulasi berada pada nilai maksimum sesuai energi awal yang ditetapkan. Seiring dengan meningkatnya jumlah putaran, energi node berkurang akibat aktivitas pengiriman dan penerimaan data. Penurunan energi yang tidak bersifat tajam menunjukkan bahwa beban komunikasi tidak terpusat pada node tertentu, melainkan terdistribusi melalui mekanisme pemilihan *cluster head* secara periodik.



Grafik 1. Grafik perubahan energi rata-rata node terhadap jumlah putaran simulasi

2. Umur Jaringan

Umur jaringan dianalisis berdasarkan jumlah putaran hingga jaringan tidak lagi mampu beroperasi secara efektif. Beberapa skenario simulasi digunakan untuk mengamati pengaruh metode clustering terhadap ketahanan jaringan. Hasil perbandingan umur jaringan pada berbagai skenario ditampilkan pada Grafik 2. Hasil pada Grafik 2 menunjukkan adanya perbedaan umur jaringan antar skenario simulasi. Skenario dengan pengelolaan clustering yang lebih optimal menghasilkan umur jaringan yang lebih panjang dibandingkan skenario lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa metode clustering berperan penting dalam menyeimbangkan konsumsi energi antar node, sehingga memperlambat terjadinya kehabisan energi pada node-node kritis.



Grafik 2. Grafik perbandingan umur jaringan pada berbagai skenario simulasi

3. Kinerja Pengiriman Data

Selain parameter energi dan umur jaringan, kinerja pengiriman data juga dievaluasi untuk menilai keandalan jaringan. Parameter yang diamati meliputi jumlah paket data yang berhasil diterima oleh *base station* dan rasio keberhasilan pengiriman paket. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa penerapan metode clustering mampu menjaga stabilitas pengiriman data sepanjang durasi simulasi. Jumlah paket yang diterima oleh *base station* cenderung meningkat secara konsisten pada fase awal dan menengah simulasi, sebelum mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya energi node. Kondisi ini sejalan dengan penurunan energi rata-rata node yang ditunjukkan pada Grafik 1. Penurunan kinerja pengiriman data pada fase akhir simulasi terjadi ketika sejumlah node mulai kehabisan energi dan tidak lagi berpartisipasi dalam jaringan.

4. Ringkasan Hasil Simulasi

Untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai kinerja jaringan, ringkasan hasil simulasi disajikan dalam Tabel 2. Tabel ini merangkum nilai utama parameter kinerja jaringan pada setiap skenario simulasi yang diuji.

Tabel 2. Ringkasan hasil kinerja jaringan pada berbagai skenario simulasi

No	Parameter Kinerja	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
1	Umur jaringan (putaran)	1.150	1.780	1.650
2	Energi rata-rata node akhir (Joule)	0,05	0,12	0,10
3	Jumlah paket diterima <i>base station</i>	8.450	12.300	11.100
4	Rasio keberhasilan pengiriman paket (%)	84,5	92,1	89,7
5	Rata-rata konsumsi energi per putaran	Tinggi	Rendah	Sedang

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode clustering memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja *Wireless Sensor Network* (WSN), khususnya dalam hal efisiensi energi dan umur jaringan. Penurunan energi rata-rata node yang bersifat gradual, sebagaimana ditunjukkan pada Grafik 1, mengindikasikan bahwa mekanisme pengelompokan node mampu mendistribusikan beban komunikasi secara lebih merata. Kondisi ini penting mengingat konsumsi energi pada WSN sangat didominasi oleh aktivitas transmisi dan penerimaan data. Dengan adanya *cluster head* yang berperan sebagai pengumpul dan pengagregasi data, jumlah transmisi jarak jauh dapat dikurangi secara signifikan, sehingga energi node dapat dimanfaatkan secara lebih efisien. Perbandingan umur jaringan pada berbagai skenario simulasi menunjukkan bahwa metode clustering yang mempertimbangkan kondisi energi node menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan pendekatan clustering dasar. Skenario dengan mekanisme pemilihan *cluster head* yang lebih adaptif mampu memperpanjang umur jaringan hingga ratusan putaran simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan konsumsi energi antar node merupakan faktor kunci dalam menjaga keberlangsungan operasi jaringan. Ketika peran *cluster head* tidak didominasi oleh node tertentu secara terus-menerus, risiko kehabisan energi pada node kritis dapat diminimalkan.

Dari sisi kinerja pengiriman data, hasil simulasi memperlihatkan bahwa metode clustering tidak hanya berdampak pada efisiensi energi, tetapi juga meningkatkan keandalan komunikasi jaringan. Peningkatan jumlah paket yang berhasil diterima oleh *base station* serta rasio keberhasilan pengiriman paket pada skenario optimasi menunjukkan bahwa struktur komunikasi berbasis kluster mampu mengurangi kemacetan lalu lintas data dan tabrakan paket. Dengan demikian, clustering berperan dalam menjaga stabilitas jaringan, terutama pada fase awal dan menengah operasi jaringan. Meskipun demikian, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kinerja jaringan akan menurun pada fase akhir simulasi seiring dengan menurunnya energi node. Kondisi ini mengindikasikan bahwa metode clustering masih memiliki keterbatasan dalam mempertahankan kinerja jaringan ketika sebagian besar node telah mendekati kondisi kehabisan energi. Oleh karena itu, diperlukan strategi lanjutan yang lebih adaptif untuk menghadapi dinamika energi dan topologi jaringan pada fase akhir operasi WSN.

Berdasarkan hasil dan analisis yang telah dilakukan, pembahasan utama penelitian ini dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Metode clustering terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan memperpanjang umur jaringan dengan mendistribusikan beban komunikasi secara lebih merata antar node sensor.
2. Mekanisme pemilihan *cluster head* yang mempertimbangkan kondisi energi dan karakteristik jaringan memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan pendekatan clustering dasar yang bersifat statis.
3. Meskipun clustering meningkatkan kinerja jaringan secara keseluruhan, masih diperlukan pengembangan metode yang lebih adaptif untuk menjaga stabilitas kinerja jaringan pada fase akhir masa operasional WSN.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini membahas optimasi kinerja *Wireless Sensor Network* (WSN) melalui penerapan metode clustering sebagai mekanisme pengelolaan komunikasi data. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode clustering mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi node sensor dan memperpanjang umur jaringan secara signifikan. Distribusi beban komunikasi yang lebih merata melalui peran *cluster head* berkontribusi dalam menekan konsumsi energi akibat transmisi jarak jauh, sehingga memperlambat terjadinya kehabisan energi pada node-node kritis. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa skenario clustering dengan mekanisme pemilihan *cluster head* yang mempertimbangkan kondisi energi node menghasilkan kinerja jaringan yang lebih baik dibandingkan pendekatan clustering dasar. Peningkatan umur jaringan, stabilitas pengiriman data, serta rasio keberhasilan pengiriman paket mengindikasikan bahwa struktur komunikasi berbasis kluster efektif dalam mendukung operasional WSN dengan keterbatasan sumber daya. Selain itu, metode clustering juga mampu menjaga kinerja jaringan pada fase awal dan menengah simulasi secara konsisten.

Meskipun demikian, kinerja jaringan cenderung menurun pada fase akhir operasi seiring dengan berkurangnya energi node secara keseluruhan. Hal ini menunjukkan bahwa metode clustering masih memerlukan pengembangan lebih lanjut agar mampu beradaptasi secara optimal terhadap dinamika energi dan topologi jaringan. Oleh karena itu, penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan metode clustering yang lebih adaptif dan efisien guna mendukung implementasi WSN yang berkelanjutan pada berbagai aplikasi.

Kontribusi Penulis: Romeo Djefzy Romadhoni: berperan dalam konseptualisasi penelitian, perancangan metodologi, analisis data, penulisan draf awal, serta supervisi pelaksanaan penelitian.

Deki Wahyudi: berperan dalam kegiatan investigasi, visualisasi hasil, validasi simulasi, serta penyusunan dan penyuntingan naskah akhir. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir naskah yang dipublikasikan.

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] K. Ramu *et al.*, "Deep Learning-Infused Hybrid Security Model for Energy Optimization and Enhanced Security in Wireless Sensor Networks," *SN Comput. Sci.*, vol. 5, no. 7, 2024, doi: 10.1007/s42979-024-03193-6.
- [3] A. M. Yolanda and H. Savira, "Segmentasi Provinsi di Indonesia berdasarkan Data Runtun Waktu Produksi Padi dengan Algoritma DTW dan K-Medoids Clustering," *J. Pangan*, vol. 33, no. 3, pp. 89–96, 2025, doi: 10.33964/jp.v33i3.847.
- [4] Y. Y. Ghadi *et al.*, "Machine Learning Solutions for the Security of Wireless Sensor Networks: A Review," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 12699–12719, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3355312.
- [5] D. K. J. Bahadur and L. Lakshmanan, "A novel method for optimizing energy consumption in wireless sensor network using genetic algorithm," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 96, 2023, doi: 10.1016/j.micpro.2022.104749.
- [6] R. Sarifah Faujiah, C. Naya, and A. Susilo, "Analisis Klustering Peningkatan Jumlah Produksi Baterai Lithium-Ion dengan Algoritma Metode K-Means," *Ranah Res. J. Multidiscip. Res. Dev.*, vol. 6, no. 5, pp. 1906–1914, 2024, doi: 10.38035/rj.v6i5.1021.
- [7] F. P. Eka Putra, L. Fitriyah, Z. Naimah, and S. A. Rofika, "Evaluasi Kinerja Aplikasi Wireshark Dalam Monitoring Jaringan Kecil Dengan Topologi Star dan Bus," *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 164–176, 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.343.
- [8] X. Xue, R. Shanmugam, S. K. Palanisamy, O. I. Khalaf, D. Selvaraj, and G. M. Abdulsahib, "A Hybrid Cross Layer with Harris-Hawk-Optimization-Based Efficient Routing for Wireless Sensor Networks," 2023, *mdpi.com*. doi: 10.3390/sym15020438.
- [9] H. Pribadi Fitriani, T. Shopy Latifah, M. Imroatuddin, I. Ahmad Maulana, and F. Akbar Al Anshari, "Analisis Performa Topologi Star Dan Mesh Dalam Implementasi Jaringan Lan Pada Lingkungan Perkantoran," *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.*, vol. 9, no. 1, pp. 1399–1403, 2025, doi: 10.36040/jati.v9i1.12539.
- [10] K. M. Karthick Raghunath, M. S. Koti, R. Sivakami, V. Vinoth Kumar, G. NagaJyothi, and V. Muthukumaran, "Utilization of IoT-assisted computational strategies in wireless sensor networks for smart infrastructure management," *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 15, no. 1, pp. 28–34, 2024, doi: 10.1007/s13198-021-01585-y.
- [11] S. El Khediri, A. Selmi, R. U. Khan, T. Moulahi, and P. Lorenz, "Energy efficient cluster routing protocol for wireless sensor networks using hybrid metaheuristic approach's," *Ad Hoc Networks*, vol. 158, 2024, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103473.
- [12] I. Surenther, K. P. Sridhar, and M. Kingston Roberts, "Maximizing energy efficiency in wireless sensor networks for data transmission: A Deep Learning-Based Grouping Model approach," 2023, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.aej.2023.10.016.
- [13] A. Rahmadani and N. Nursyahira, "Implementasi Algoritma K-Means Untuk Clustering Data Inventori," *Indones. J. Inform. Res. Softw. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–11, 2025, doi: 10.57152/ijirse.v5i1.1832.
- [14] O. S. Egwuiche, A. Singh, A. E. Ezugwu, J. Greeff, M. O. Olusanya, and L. Abualigah, "Machine learning for coverage optimization in wireless sensor networks: a comprehensive review," *Ann. Oper. Res.*, 2023, doi: 10.1007/s10479-023-05657-z.
- [15] P. Gite, A. Shrivastava, K. Murali Krishna, G. H. Kusumadevi, R. Dilip, and R. Manohar Potdar, "Under water motion tracking and monitoring using wireless sensor network and Machine learning," *Mater. Today Proc.*, vol. 80, pp. 3511–3516, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.283.
- [16] S. Yuvarani, A. Gayathri, K. J. Velmurugan, V. Meenakshi, S. Sadhana, and C. Srinivasan, "Quality of Service Factor based Unfailing Route Formation in Wireless Sensor Network," *Proc. Int. Conf. Intell. Innov. Technol. Comput. Electr. Electron. ICIITCEE 2023*, pp. 617–622, 2023, doi: 10.1109/IITCEE57236.2023.10090966.
- [17] F. P. Eka Putra, A. M. Ubaidillah Solichin, M. N. Wildanul Hakim, and M. T. Ramadhan, "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 415–425, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30559.
- [18] A. N. Aisyi Maulidhia, I. I. Widyastuti, F. I. Sukarno, R. B. S. Tsany, and T. Brian, "Implementasi Perbandingan Algoritma k-Means dan DB-Scan Pada Beban Listrik Rumah Tangga," *INTEGER J. Inf. Technol.*, vol. 10, no. 1, 2025, doi: 10.31284/j.integer.2024.v10i1.7479.
- [19] R. R. Hidayat Hasibuan, S. Wahyuni, and E. Arif, "Analisis Jaringan Komunikasi Petani Dalam Penggunaan Teknologi Traktor Roda Dua Di Kabupaten Mandailing Natal Provinsi Sumatera Utara," 2023, *academia.edu*. doi: 10.36418/syntax-literate.v8i2.11384.
- [20] S. S. Vellela and R. Balamaniandan, "An intelligent sleep-awake energy management system for wireless sensor network," *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 16, no. 6, pp. 2714–2731, 2023, doi: 10.1007/s12083-023-01558-x.
- [21] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Dea Aulia Siswoyo, M. Idris Ainul Yaqin, and Rica Oktavia, "Tinjauan Regulasi Siber dan Kebijakan Keamanan Jaringan 5G: Perspektif Nasional dan Internasional," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.6141.
- [22] S. Rusfi Razaba, M. Liebenlito, and T. Edy Sutanto, "Kajian Performa Efisiensi Infrastruktur Big Data Hemat Energi Menggunakan Single Board Computer dan Framework Apache Spark," 2025. doi: 10.25077/teknosi.v11i2.2025.152-160.
- [23] K. Debasis, L. D. Sharma, V. Bohat, and R. S. Bhadoria, "An Energy-Efficient Clustering Algorithm for Maximizing Lifetime of Wireless Sensor Networks using Machine Learning," *Mob. Networks Appl.*, vol. 28, no. 2, pp. 853–867, 2023, doi: 10.1007/s11036-023-02109-7.
- [24] S. Safiuddin and F. P. E. Putra, "Strategi Efisiensi Wireless Sensor Network (WSN)," *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 52, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2441.
- [25] G. G. Gebremariam, J. Panda, and S. Indu, "Localization and Detection of Multiple Attacks in Wireless Sensor Networks Using Artificial

- Neural Network,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/2744706.
- [26] P. Shannmugaraja, M. Bhardwaj, A. Mehbodniya, Y. S. Vali, and P. C. S. Reddy, “An Efficient Clustered M-path Sinkhole Attack Detection (MSAD) Algorithm for Wireless Sensor Networks,” *Ad-Hoc Sens. Wirel. Networks*, vol. 55, no. 1–2, pp. 1–22, 2023, doi: 10.32908/ahswn.v55.8849.
- [27] P. Alga Vredizon, H. Firmansyah, N. Shafira Salsabila, and W. Eko Nugroho, “Penerapan Algoritma K-Means Untuk Mengelompokkan Makanan Berdasarkan Nilai Nutrisi,” *J. Technol. Informatics*, vol. 5, no. 2, pp. 108–115, 2024, doi: 10.37802/joti.v5i2.577.
- [28] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. B. Tamam, and R. W. Efendi, “Implementation And Simulation Of Dynamic Arp Inspection In Cisco Packet Tracer For Network Security,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 340–347, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4199.
- [29] M. Al Haudy Rizky, A. Solehudin, and E. H. Nurkifli, “Optimalisasi Bandwidth Pada Jaringan Internet Menggunakan Metode Simple Queue Dan Peer Connection Queue,” *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.)*, vol. 8, no. 4, pp. 7856–7863, 2024, doi: 10.36040/jati.v8i4.10497.
- [30] A. B. Pangestu, R. D. M. Putri, N. Hudallah, and T. Andrasto, “Analisis Keandalan Sistem Distribusi Jaringan Sutm Di Pt. Pln (Persero) Up3 Yogyakarta,” *Simetris J. Tek. Mesin, Elektro dan Ilmu Komput.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–20, 2023, doi: 10.24176/simet.v14i1.9109.
- [31] D. W. Wajgi and J. V. Tembhurne, “Localization in wireless sensor networks and wireless multimedia sensor networks using clustering techniques,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 83, no. 3, pp. 6829–6879, 2024, doi: 10.1007/s11042-023-15956-z.
- [32] F. Ghazi Mubarak, R. Primananda, and A. Setia Budi, “Implementasi Load Balancing pada Cluster Server Berbasis Raspberry Pi Memanfaatkan Algoritma Least Connection,” *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 12, no. 2, pp. 429–436, 2025, doi: 10.25126/jtiik.2025129452.
- [33] F. P. E. Putra, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and A. Rizki, “Implementation And Evaluation Of Zerotier-Based Virtual Network For Device Connectivity,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 281–290, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5966.
- [34] Rickhy Artha Octaviyana and Benfano Soewito, “Perancangan Ulang Topologi Jaringan Dengan Kerangka Kerja Ppdioo,” *Teknologi*, vol. 13, no. 1, pp. 33–41, 2023, doi: 10.26594/teknologi.v13i1.3852.
- [35] M. E. Al-Sadoon, A. Jedidi, and H. Al-Raweshidy, “Dual-Tier Cluster-Based Routing in Mobile Wireless Sensor Network for IoT Application,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 4079–4094, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3235200.
- [36] M. Alrizq *et al.*, “Optimization of sensor node location utilizing artificial intelligence for mobile wireless sensor network,” *Wirel. Networks*, vol. 30, no. 7, pp. 6619–6631, 2024, doi: 10.1007/s11276-023-03469-4.
- [37] I. Khoirunisa, R. Astuti, and T. Suprpti, “Penerapan Algoritma K-Medoids Dalam Menentukan Cluster Kabupaten Dan Kota Berdasarkan Populasi Peternakan Di Provinsi Jawa Barat,” *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.)*, vol. 7, no. 6, pp. 3753–3758, 2024, doi: 10.36040/jati.v7i6.8202.
- [38] H. Pribadi Fitriani, F. Dani, I. Fadilah, R. Desta Fauzan, and M. Rizkina Ardhyansyah, “Implementasi Mikrotik Firewall Sebagai Solusi Filtering Situs Judi Online Dalam Jaringan,” *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.)*, vol. 9, no. 1, pp. 1685–1691, 2025, doi: 10.36040/jati.v9i1.12781.
- [39] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Maktusuful Ghummah, Moh. Amrullah, and Rafli Hidayatullah, “Studi Kinerja Mesh Network untuk Penerapan Internet of Things (IoT) di Lingkungan Perkotaan,” 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.5895.
- [40] S. Caleb and S. J. J. Thangaraj, “Secured Node Identification Approach Based on Artificial Neural Network Infrastructure for Wireless Sensor Networks,” *Proc. 9th Int. Conf. Electr. Energy Syst. ICEES 2023*, pp. 646–651, 2023, doi: 10.1109/ICEES57979.2023.10110046.
- [41] L. L. D. Oliveira, G. H. Eisenkraemer, E. A. Carara, J. B. Martins, and J. Monteiro, “Mobile Localization Techniques for Wireless Sensor Networks: Survey and Recommendations,” *ACM Trans. Sens. Networks*, vol. 19, no. 2, 2023, doi: 10.1145/3561512.
- [42] F. P. E. Putra, M. Surur, M. Mahendra, and G. Arifin, “Internet Network QOS Analysis at Yala Kopitiam pamekasan Using Wireshak,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 190–200, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5940.
- [43] F. P. Eka Putra, . S., A. Ramadhani, and . M., “Integrasi Teknologi Kuantum dan fiber Optik untuk Meningkatkan Keamanan dan Efisiensi Jaringan Masa Depan,” *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 151–163, 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.342.
- [44] S. Muruganandam, R. Joshi, P. Suresh, N. Balakrishna, K. H. Kishore, and S. V. Manikanthan, “A deep learning based feed forward artificial neural network to predict the K-barriers for intrusion detection using a wireless sensor network,” 2023, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.measen.2022.100613.
- [45] K. S. D. D. Rao, A. Jain, S. Sharma, S. V. Pandit, and R. Pandey, “Effectual Energy Optimization Stratagems for Wireless Sensor Network Collections Through Fuzzy-Based Inadequate Clustering,” *SN Comput. Sci.*, vol. 5, no. 8, 2024, doi: 10.1007/s42979-024-03377-0.
- [46] M. N. Hussain, M. A. Halim, M. Y. A. Khan, S. Ibrahim, and A. Haque, “A Comprehensive Review on Techniques and Challenges of Energy Harvesting from Distributed Renewable Energy Sources for Wireless Sensor Networks,” 2024, *researchgate.net*. doi: 10.59247/csol.v2i1.60.
- [47] Q. A. Ar Ruhimat, S. Slamini, and A. Malinda, “Efektivitas Algoritma Kruskal dalam Mengoptimalkan Jalur Terpendek pada Jaringan Intranet,” *JSN J. Sains Nat.*, vol. 2, no. 3, pp. 59–67, 2024, doi: 10.35746/jsn.v2i3.546.
- [48] A. A. Athallah and A. Prihanto, “Simulasi Keamanan Jaringan Komputer Penerapan Internet Positif,” *J. Informatics Comput. Sci.*, vol. 6, no. 01, pp. 199–209, 2024, doi: 10.26740/jinacs.v6n01.p199-209.
- [49] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Mustafida Mustafida, Royhan Alfadili, and Afifatun Nahriyah, “Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menunjang Aplikasi Smart City,” 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.5934.
- [50] R. Aulia, - Sutoyo, T. Purnamirza, and - Mulyono, “Optimasi Bad Spot Area Jaringan 4G LTE Menggunakan Metode ACP Pada Wilayah Parit Putus,” *Techno.Com*, vol. 22, no. 2, pp. 453–461, 2023, doi: 10.33633/tc.v22i2.7994.