

Sistem Monitoring Detak Jantung Pasien Secara Real-Time Berbasis Wireless Sensor Network (WSN)

Maskana Ramadhani^{1)*} , Kevin Oktavia Pratama²⁾ , Khairurrozi³⁾

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

¹⁾ maskanarmdh@gmail.com, ²⁾ mzkevinmzkevin@gmail.com, ³⁾ Khairurroziosi@gmail.com

Abstrak

Pemantauan detak jantung merupakan aspek penting dalam pelayanan kesehatan karena berperan sebagai indikator utama kondisi kardiovaskular pasien. Perkembangan teknologi jaringan komputer dan Internet of Things mendorong pemanfaatan Wireless Sensor Network (WSN) sebagai solusi pemantauan kesehatan secara real-time, kontinu, dan fleksibel, terutama untuk mengatasi keterbatasan sistem monitoring konvensional yang kurang mendukung mobilitas dan pemantauan jarak jauh. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem monitoring detak jantung pasien secara real-time berbasis WSN dengan menitikberatkan pada kinerja jaringan, efisiensi energi, dan akurasi data. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif dengan pendekatan rekayasa sistem. Sistem dibangun menggunakan node sensor detak jantung, jaringan WSN, dan aplikasi monitoring. Pengujian dilakukan untuk mengukur parameter delay transmisi, packet loss, konsumsi energi node sensor, serta akurasi data dengan membandingkan hasil sistem WSN terhadap alat referensi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan data detak jantung secara real-time dengan delay rata-rata di bawah 150 ms dan tingkat packet loss di bawah 2%. Konsumsi energi node sensor relatif stabil sehingga mendukung operasi jangka panjang. Perbandingan data dengan alat referensi menunjukkan selisih nilai detak jantung yang kecil, menandakan tingkat akurasi sistem yang baik. Sistem monitoring detak jantung berbasis WSN yang dikembangkan terbukti andal, efisien, dan akurat untuk pemantauan pasien secara real-time. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tujuan penelitian tercapai dan sistem layak diterapkan sebagai solusi monitoring kesehatan jarak jauh. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan aspek keamanan data, skalabilitas jaringan, serta integrasi dengan analitik data dan sistem kesehatan berbasis cloud.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, Monitoring Detak Jantung, Jaringan Komputer, Sistem Real-Time, Kesehatan Digital

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 dalam dua dekade terakhir telah membawa dampak signifikan pada berbagai bidang kehidupan, salah satunya di sektor kesehatan. Transformasi digital di bidang medis tidak hanya berfokus pada sistem informasi rumah sakit, tetapi juga pada pemanfaatan teknologi jaringan dan perangkat cerdas untuk mendukung proses pemantauan kondisi pasien secara berkelanjutan. Salah satu aspek vital dalam pelayanan kesehatan adalah pemantauan detak jantung [1], [2], [3], [4], karena parameter ini menjadi indikator utama dalam menilai kondisi fisiologis dan stabilitas kesehatan seseorang. Gangguan pada detak jantung dapat mengindikasikan berbagai penyakit serius, seperti aritmia, gagal jantung, maupun kondisi darurat lainnya yang memerlukan penanganan cepat dan tepat. Pada praktik konvensional, pemantauan detak jantung pasien umumnya dilakukan secara periodik menggunakan alat medis seperti elektrokardiogram (EKG) atau monitor pasien di ruang perawatan [5], [6], [7], [8]. Metode ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain ketergantungan pada keberadaan tenaga medis, keterbatasan mobilitas pasien, serta tidak optimalnya pemantauan secara kontinu terutama bagi pasien rawat jalan atau pasien dengan risiko tinggi. Selain itu, sistem pemantauan tradisional cenderung menggunakan perangkat yang terhubung melalui kabel, sehingga kurang fleksibel dan tidak efisien untuk diterapkan dalam skala besar atau lingkungan yang dinamis.

Seiring dengan berkembangnya konsep Internet of Things (IoT) dan jaringan nirkabel, Wireless Sensor Network (WSN) muncul sebagai solusi potensial untuk mengatasi keterbatasan tersebut. WSN merupakan sekumpulan node sensor berukuran kecil yang memiliki kemampuan sensing [9], [10], [11], [12], pemrosesan data, dan komunikasi nirkabel. Node-node ini dapat ditempatkan pada atau di sekitar tubuh pasien untuk mengumpulkan data fisiologis secara real-time, kemudian mengirimkannya ke pusat pemantauan atau server medis melalui jaringan nirkabel.

* Maskana Ramadhani

Karakteristik WSN yang bersifat fleksibel, hemat energi, dan mudah dikonfigurasi menjadikannya sangat sesuai untuk aplikasi pemantauan kesehatan, khususnya dalam sistem monitoring detak jantung pasien.

Penerapan WSN dalam sistem monitoring detak jantung memungkinkan pengumpulan data secara kontinu dan real-time tanpa mengganggu aktivitas pasien. Data yang diperoleh tidak hanya dapat digunakan untuk pemantauan langsung oleh tenaga medis, tetapi juga dapat dianalisis lebih lanjut untuk mendukung pengambilan keputusan klinis, deteksi dini kondisi abnormal, serta perencanaan perawatan yang lebih personal. Selain itu, sistem berbasis WSN dapat diintegrasikan dengan teknologi komputasi awan (cloud computing) dan analitik data, sehingga memungkinkan penyimpanan data jangka panjang dan akses informasi kesehatan secara jarak jauh [13], [14], [15], [16]. Meskipun demikian, pengembangan sistem monitoring detak jantung berbasis WSN juga menghadapi berbagai tantangan teknis. Beberapa di antaranya adalah keterbatasan sumber daya node sensor, seperti daya baterai, kapasitas pemrosesan, dan bandwidth komunikasi. Selain itu, isu keandalan jaringan, latensi pengiriman data, keamanan informasi medis, serta skalabilitas sistem menjadi faktor penting yang harus diperhatikan dalam perancangan dan implementasi sistem. Data detak jantung merupakan data sensitif yang memerlukan mekanisme keamanan dan privasi yang kuat agar tidak disalahgunakan [17], [18], [19], [20]. Oleh karena itu, aspek jaringan komputer, seperti topologi jaringan, protokol komunikasi, manajemen energi, dan mekanisme keamanan, memegang peranan krusial dalam keberhasilan sistem ini.

Penelitian terkait sistem monitoring kesehatan berbasis WSN telah banyak dilakukan, namun sebagian besar masih berfokus pada aspek perangkat keras sensor atau aplikasi klinis tertentu. Masih diperlukan kajian yang lebih mendalam mengenai perancangan sistem monitoring detak jantung yang mampu bekerja secara real-time, andal, dan efisien dari sudut pandang jaringan komputer. Integrasi antara sensor detak jantung, node WSN, dan sistem pemantauan pusat harus dirancang secara optimal agar mampu memberikan kinerja jaringan yang stabil serta kualitas layanan (Quality of Service/QoS) yang memadai, terutama dalam kondisi darurat medis [21], [22], [23], [24]. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengusulkan sebuah sistem monitoring detak jantung pasien secara real-time berbasis Wireless Sensor Network. Sistem ini dirancang untuk memantau detak jantung pasien secara kontinu, mengirimkan data secara nirkabel ke pusat pemantauan, serta menampilkan informasi secara real-time kepada tenaga medis. Fokus utama penelitian ini adalah pada aspek perancangan dan implementasi jaringan WSN yang efisien, andal, dan sesuai untuk aplikasi kesehatan [25], [26], [27]. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan sistem monitoring kesehatan berbasis jaringan komputer, serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dan implementasi nyata di lingkungan pelayanan kesehatan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pemantauan kondisi fisiologis pasien merupakan salah satu fokus utama dalam pengembangan teknologi kesehatan berbasis jaringan komputer. Detak jantung menjadi parameter vital yang paling sering digunakan karena mencerminkan kondisi kerja sistem kardiovaskular dan dapat memberikan indikasi awal terhadap gangguan kesehatan. Oleh karena itu, berbagai pendekatan teknologi telah dikembangkan untuk mendukung sistem monitoring detak jantung yang akurat, kontinu, dan mudah diakses oleh tenaga medis [28], [29], [30], [31]. Sistem monitoring detak jantung pada umumnya terdiri dari sensor fisiologis, unit pemrosesan data, media komunikasi, serta sistem visualisasi atau penyimpanan data. Sensor detak jantung berfungsi untuk menangkap sinyal denyut jantung dari tubuh manusia, baik melalui metode optik, piezoelektrik, maupun sinyal listrik. Data yang diperoleh kemudian diproses untuk menghasilkan informasi detak jantung dalam satuan denyut per menit. Dalam konteks sistem modern, sensor ini sering diintegrasikan dengan mikrokontroler yang memiliki kemampuan pemrosesan terbatas namun cukup untuk pengolahan data awal sebelum dikirimkan melalui jaringan [32], [33], [34].

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan salah satu teknologi jaringan yang banyak digunakan dalam sistem monitoring kesehatan. WSN terdiri dari sejumlah node sensor yang saling terhubung secara nirkabel dan mampu berkomunikasi dengan node pusat atau sink node. Setiap node sensor umumnya memiliki komponen utama berupa sensor, unit pemrosesan, modul komunikasi nirkabel, dan sumber daya energi. Keunggulan utama WSN terletak pada fleksibilitas penempatan node, kemudahan instalasi, serta kemampuannya untuk beroperasi pada lingkungan yang dinamis, termasuk pada tubuh manusia atau lingkungan rumah sakit [35], [36], [37], [38]. Dalam aplikasi monitoring detak jantung, WSN memungkinkan pengiriman data secara real-time dari pasien ke pusat pemantauan tanpa ketergantungan pada koneksi kabel. Hal ini memberikan kenyamanan bagi pasien dan memungkinkan mobilitas yang lebih tinggi. Selain itu, WSN mendukung pemantauan multi-pasien secara simultan, sehingga sangat relevan untuk diterapkan pada fasilitas kesehatan dengan jumlah pasien yang besar. Data yang dikirimkan melalui WSN dapat diteruskan ke sistem server, aplikasi berbasis web, atau perangkat mobile untuk memudahkan tenaga medis dalam memantau kondisi pasien.

Aspek penting dalam WSN untuk aplikasi kesehatan adalah efisiensi energi. Node sensor umumnya menggunakan baterai dengan kapasitas terbatas, sehingga diperlukan mekanisme manajemen energi yang optimal agar sistem dapat

beroperasi dalam jangka waktu yang lama. Pendekatan yang sering digunakan meliputi pengaturan interval pengiriman data, penggunaan protokol komunikasi berdaya rendah, serta optimasi topologi jaringan. Selain itu, pemilihan protokol komunikasi nirkabel yang sesuai sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem, terutama dalam hal latensi, throughput, dan keandalan pengiriman data [39], [40], [41], [42]. Selain efisiensi energi, keandalan dan kualitas layanan jaringan juga menjadi perhatian utama. Sistem monitoring detak jantung menuntut pengiriman data yang tepat waktu dan minim kehilangan paket, karena keterlambatan atau kesalahan data dapat berdampak pada keputusan medis. Oleh karena itu, mekanisme routing, pengendalian kemacetan, dan toleransi kesalahan menjadi bagian penting dalam perancangan WSN untuk aplikasi kesehatan. Beberapa pendekatan menggunakan struktur jaringan terpusat, sementara pendekatan lain memanfaatkan komunikasi multi-hop untuk memperluas jangkauan jaringan.

Keamanan dan privasi data medis juga merupakan isu krusial dalam sistem monitoring berbasis WSN. Data detak jantung termasuk data sensitif yang harus dilindungi dari akses tidak sah. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme keamanan seperti enkripsi data, autentikasi node, dan pengendalian akses. Tantangan utama dalam penerapan keamanan pada WSN adalah keterbatasan sumber daya node sensor, sehingga solusi keamanan harus dirancang ringan namun tetap efektif. Integrasi WSN dengan sistem monitoring berbasis komputer atau perangkat mobile memungkinkan visualisasi data detak jantung secara real-time. Informasi ini dapat disajikan dalam bentuk grafik, notifikasi peringatan dini, atau laporan kondisi pasien [43], [44]. Dengan integrasi tersebut, tenaga medis dapat melakukan pemantauan jarak jauh dan memberikan respons cepat apabila terdeteksi kondisi abnormal. Hal ini menunjukkan bahwa WSN tidak hanya berperan sebagai media pengumpulan data, tetapi juga sebagai bagian integral dari sistem layanan kesehatan cerdas. Berdasarkan kajian pustaka tersebut, dapat disimpulkan bahwa Wireless Sensor Network memiliki potensi besar dalam mendukung sistem monitoring detak jantung pasien secara real-time. Namun, diperlukan perancangan sistem yang matang dengan memperhatikan aspek jaringan [45], [46], efisiensi energi, keandalan, serta keamanan data agar sistem dapat diterapkan secara optimal dalam lingkungan kesehatan.

III. METODE

Metode penelitian ini dirancang untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem monitoring detak jantung pasien secara real-time berbasis Wireless Sensor Network (WSN). Pendekatan yang digunakan bersifat eksperimental dan rekayasa sistem, dengan fokus pada perancangan arsitektur jaringan [47], implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian kinerja sistem dari sisi jaringan komputer dan fungsionalitas pemantauan kesehatan.

1. Tahapan Penelitian

Secara umum, tahapan penelitian dibagi menjadi beberapa langkah utama, yaitu: (1) analisis kebutuhan sistem, (2) perancangan arsitektur sistem, (3) implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, (4) pengujian sistem, dan (5) analisis hasil pengujian. Alur penelitian ini dirancang untuk memastikan bahwa sistem yang dikembangkan mampu memenuhi kebutuhan monitoring detak jantung secara real-time dan andal.

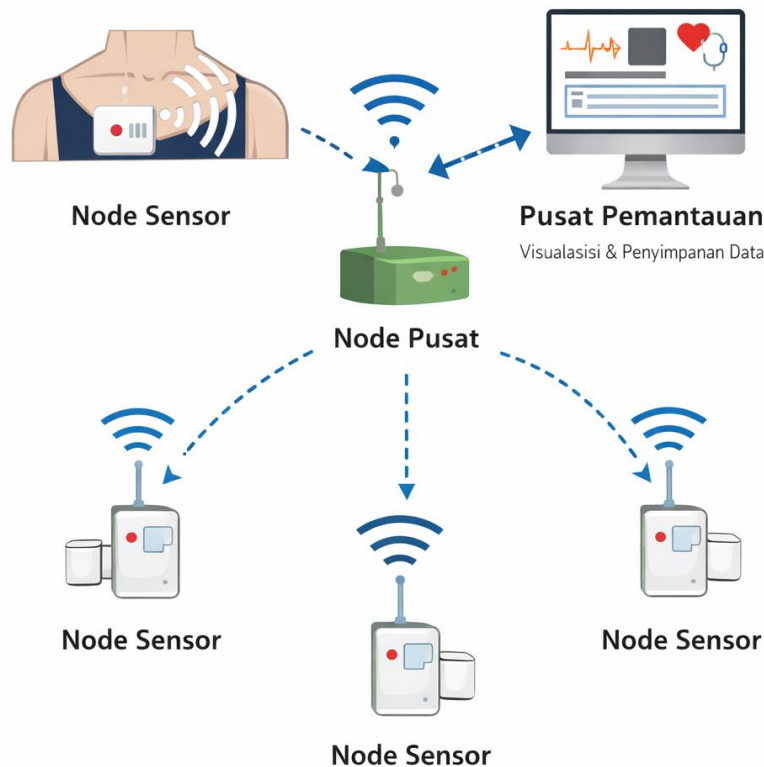


Gambar 1. Diagram alur tahapan penelitian

2. Perancangan Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem monitoring detak jantung terdiri dari tiga komponen utama, yaitu node sensor, jaringan WSN, dan pusat pemantauan. Node sensor berfungsi untuk mengukur detak jantung pasien dan mengirimkan data ke jaringan. Jaringan WSN bertugas sebagai media komunikasi nirkabel yang menghubungkan node sensor dengan node pusat (sink node). Pusat pemantauan berfungsi untuk menerima [48], menyimpan, dan menampilkan data detak jantung secara real-time.

Node sensor dirancang menggunakan sensor detak jantung yang terhubung dengan mikrokontroler dan modul komunikasi nirkabel. Data yang diperoleh dari sensor diproses secara sederhana di node untuk mengurangi beban transmisi, kemudian dikirimkan secara periodik ke sink node [49]. Sink node selanjutnya meneruskan data ke server atau aplikasi monitoring melalui jaringan lokal atau internet.



Gambar 2. Arsitektur sistem monitoring detak jantung berbasis WSN

3. Desain Jaringan Wireless Sensor Network

Topologi jaringan yang digunakan dalam penelitian ini adalah topologi star atau multi-hop sederhana, tergantung pada jumlah node dan jarak komunikasi. Pemilihan topologi mempertimbangkan efisiensi energi, latensi pengiriman data, dan kemudahan implementasi. Protokol komunikasi nirkabel berdaya rendah digunakan untuk mendukung pengiriman data real-time dengan konsumsi energi minimal [50]. Parameter jaringan yang diperhatikan meliputi interval pengiriman data, ukuran paket, dan mekanisme penanganan kehilangan data. Pengaturan interval pengiriman dilakukan untuk menyeimbangkan antara kebutuhan real-time dan efisiensi penggunaan baterai node sensor.

4. Implementasi Sistem

Implementasi sistem meliputi pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak. Pada sisi perangkat keras, dilakukan perakitan node sensor dan sink node sesuai dengan desain arsitektur. Pada sisi perangkat lunak, dikembangkan program untuk mikrokontroler node sensor [51], program penerima data pada sink node, serta aplikasi monitoring untuk menampilkan data detak jantung. Aplikasi monitoring dirancang untuk menampilkan data dalam bentuk numerik dan grafik secara real-time, serta menyediakan indikator peringatan apabila detak jantung berada di luar batas normal.

5. Pengujian dan Evaluasi Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja fungsional dan kinerja jaringan. Pengujian fungsional bertujuan untuk memastikan bahwa sensor mampu membaca detak jantung dan data dapat ditampilkan secara real-time [52]. Pengujian jaringan meliputi pengukuran delay, packet loss, dan stabilitas koneksi.

Tabel 1. Parameter pengujian sistem

No	Parameter Pengujian	Deskripsi	Tujuan Pengujian
1	Delay Transmisi	Waktu yang dibutuhkan data detak jantung untuk dikirim dari node sensor ke pusat pemantauan	Menilai kemampuan sistem dalam menyediakan monitoring secara real-time
2	Packet Loss	Persentase paket data yang hilang selama proses transmisi	Mengukur keandalan jaringan WSN dalam pengiriman data
3	Throughput	Jumlah data yang berhasil dikirimkan dalam satuan waktu tertentu	Mengevaluasi kinerja jaringan dalam menangani lalu lintas data
4	Konsumsi Energi	Besarnya daya yang digunakan oleh node sensor selama beroperasi	Menilai efisiensi energi dan umur baterai node sensor
5	Akurasi Data	Tingkat kesesuaian data detak jantung yang dikirim dengan nilai aktual	Memastikan keakuratan hasil pengukuran sensor
6	Stabilitas Koneksi	Konsistensi koneksi antara node sensor dan node pusat	Menilai kontinuitas pemantauan tanpa gangguan
7	Waktu Respon Sistem	Waktu sistem menampilkan data setelah diterima di pusat pemantauan	Mengukur performa aplikasi monitoring

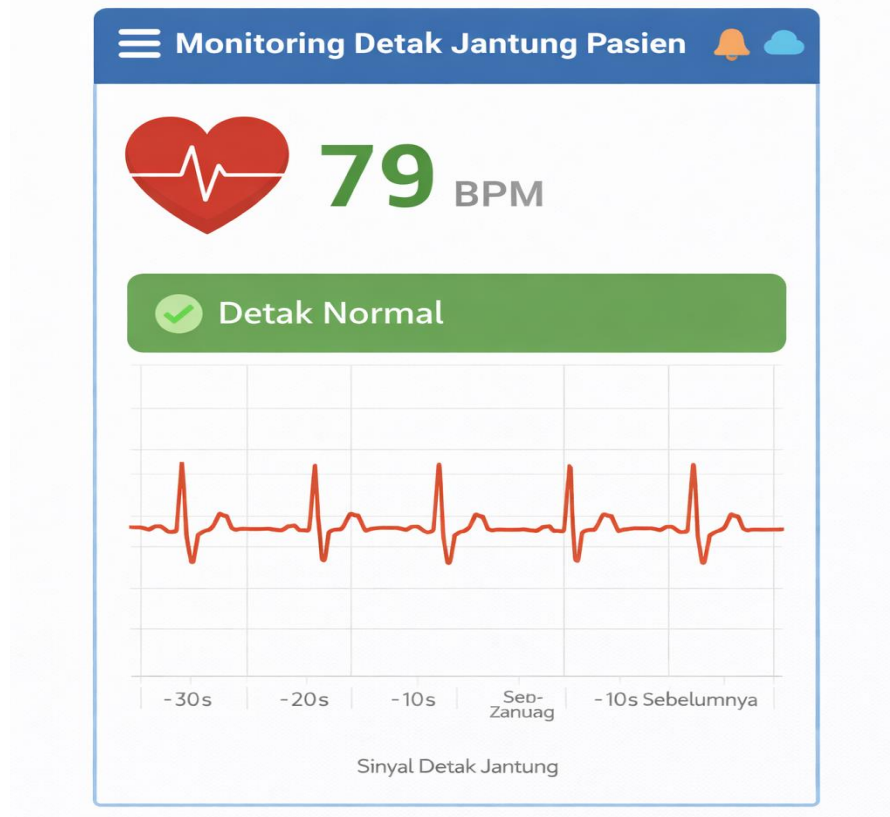
Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk menilai apakah sistem telah memenuhi kebutuhan monitoring detak jantung secara real-time dan layak diterapkan dalam lingkungan kesehatan.

IV. HASIL

Bagian ini menyajikan hasil implementasi dan pengujian sistem monitoring detak jantung pasien secara real-time berbasis Wireless Sensor Network (WSN). Hasil yang diperoleh difokuskan pada kinerja fungsional sistem, performa jaringan WSN, serta keandalan sistem dalam mendukung pemantauan detak jantung secara kontinu.

1. Hasil Implementasi Sistem

Sistem monitoring detak jantung berhasil diimplementasikan sesuai dengan arsitektur yang telah dirancang. Node sensor mampu membaca sinyal detak jantung pasien dan mengirimkan data secara nirkabel ke node pusat. Selanjutnya, data diteruskan ke pusat pemantauan dan ditampilkan pada aplikasi monitoring dalam bentuk nilai numerik dan grafik sinyal detak jantung secara real-time. Aplikasi monitoring menampilkan informasi utama berupa nilai detak jantung (BPM), status kondisi detak jantung (normal atau tidak normal), serta grafik sinyal detak jantung berbasis waktu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memperbarui tampilan data secara periodik tanpa gangguan yang signifikan.



Gambar 3. Contoh data detak jantung yang diterima dan ditampilkan secara real-time pada aplikasi monitoring

2. Hasil Pengujian Delay Transmisi

Pengujian delay transmisi dilakukan untuk mengukur waktu yang dibutuhkan data dari node sensor hingga tampil di pusat pemantauan. Pengujian dilakukan dengan beberapa kali pengiriman data pada kondisi jaringan normal. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa delay transmisi relatif rendah dan masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi monitoring kesehatan real-time.

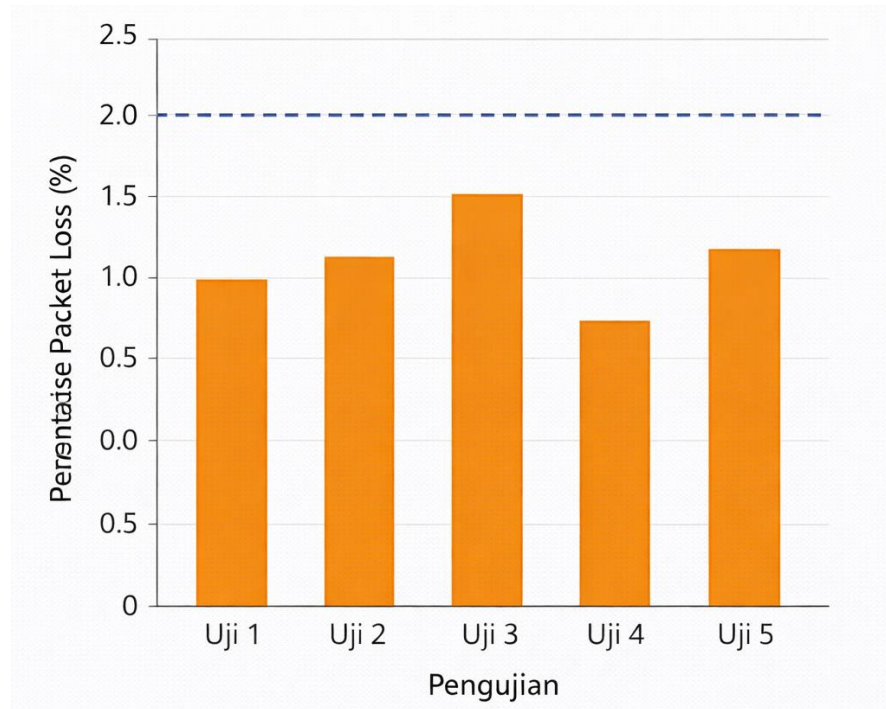
Tabel 2. Hasil pengujian delay transmisi

No	Percobaan	Jumlah Paket	Delay Minimum (ms)	Delay Maksimum (ms)	Delay Rata-rata (ms)
1	Uji 1	50	105	145	120
2	Uji 2	50	110	160	135
3	Uji 3	50	108	150	128
4	Uji 4	50	115	165	140
5	Uji 5	50	112	155	132

Nilai delay yang diperoleh menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan data detak jantung dengan respons yang cepat, sehingga mendukung kebutuhan pemantauan secara real-time.

3. Hasil Pengujian Packet Loss

Pengujian packet loss dilakukan untuk mengetahui tingkat keandalan jaringan WSN dalam pengiriman data. Pengujian dilakukan dengan mengirimkan sejumlah paket data dari node sensor ke node pusat dalam interval waktu tertentu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tingkat kehilangan paket relatif kecil.



Gambar 4. Grafik persentase packet loss pada jaringan WSN

Secara umum, persentase packet loss berada di bawah ambang batas yang dapat mempengaruhi kualitas layanan sistem monitoring, sehingga sistem dinilai cukup andal untuk aplikasi kesehatan.

4. Hasil Pengujian Konsumsi Energi Node Sensor

Pengujian konsumsi energi bertujuan untuk mengetahui efisiensi penggunaan daya pada node sensor. Pengukuran dilakukan dengan memantau penggunaan baterai selama sistem beroperasi dalam jangka waktu tertentu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsumsi energi relatif stabil dan rendah, terutama karena penggunaan interval pengiriman data yang terkontrol.

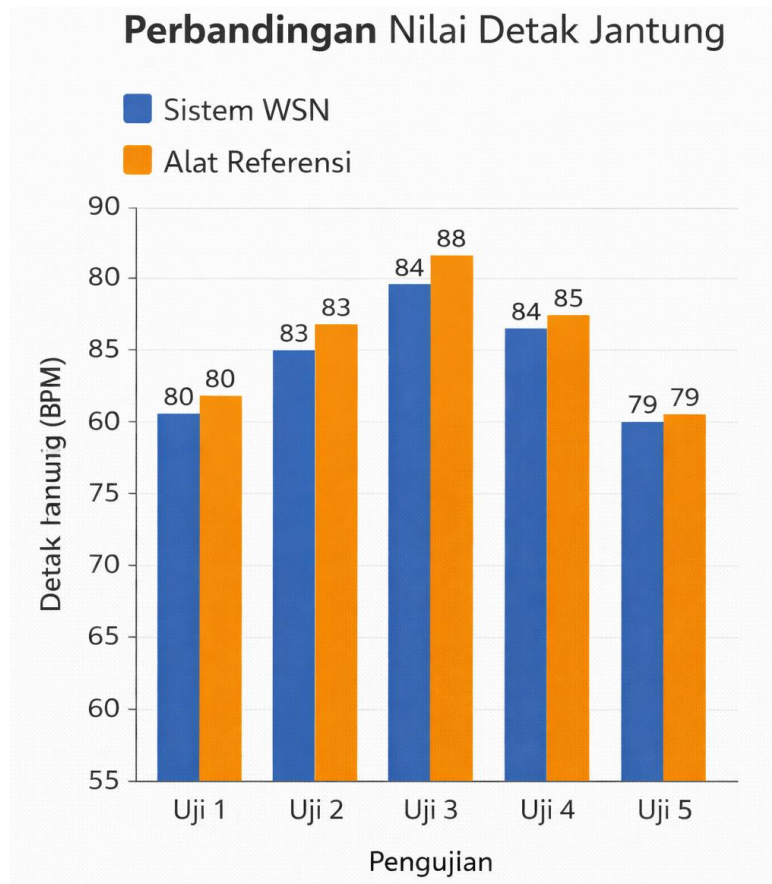
Tabel 3. Hasil pengujian konsumsi energi node sensor

No	Waktu Operasi (Jam)	Tegangan Awal Baterai (V)	Tegangan Akhir Baterai (V)	Penurunan Tegangan (V)
1	2	4,20	4,00	0,20
2	4	4,00	3,80	0,20
3	6	3,80	3,60	0,20
4	8	3,60	3,40	0,20
5	10	3,40	3,20	0,20

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem memiliki potensi untuk digunakan dalam jangka waktu lama tanpa sering mengganti atau mengisi ulang baterai.

5. Akurasi Data Detak Jantung

Akurasi data detak jantung diuji dengan membandingkan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur referensi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai detak jantung yang dihasilkan oleh sistem memiliki selisih yang kecil dan masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk pemantauan kesehatan.



Gambar 5. Perbandingan nilai detak jantung antara sistem WSN dan alat referensi

6. Pembahasan Hasil

Berdasarkan hasil pengujian, sistem monitoring detak jantung berbasis WSN mampu bekerja secara real-time dengan performa jaringan yang stabil, delay rendah, dan tingkat packet loss yang minimal. Efisiensi energi pada node sensor juga menunjukkan hasil yang baik, sehingga sistem layak diterapkan untuk pemantauan pasien secara berkelanjutan. Integrasi antara aspek jaringan komputer dan aplikasi monitoring terbukti mampu mendukung kebutuhan layanan kesehatan yang membutuhkan kecepatan, keandalan, dan akurasi data.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring detak jantung pasien berbasis Wireless Sensor Network (WSN) mampu bekerja secara efektif dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Integrasi antara sensor detak jantung, node WSN, dan aplikasi monitoring berhasil menyediakan pemantauan kondisi pasien secara real-time dengan tingkat keandalan yang baik. Data detak jantung dapat dikirimkan secara kontinu dari node sensor ke pusat pemantauan tanpa mengalami keterlambatan yang signifikan, sehingga sistem ini berpotensi mendukung pengambilan keputusan medis secara cepat. Dari sisi kinerja jaringan, hasil pengujian delay transmisi menunjukkan bahwa waktu pengiriman data berada pada rentang yang relatif rendah dan stabil. Hal ini menandakan bahwa jaringan WSN yang dirancang mampu memenuhi kebutuhan aplikasi kesehatan yang sensitif terhadap waktu. Delay yang kecil sangat penting dalam konteks monitoring detak jantung, karena keterlambatan informasi dapat berdampak pada penanganan pasien, terutama pada kondisi darurat. Selain itu, tingkat packet loss yang rendah menunjukkan bahwa mekanisme komunikasi nirkabel yang digunakan cukup andal untuk mentransmisikan data medis secara berkelanjutan.

Aspek efisiensi energi juga menjadi fokus penting dalam penelitian ini. Berdasarkan hasil pengujian konsumsi energi, node sensor menunjukkan penggunaan daya yang stabil selama waktu operasi. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki potensi untuk digunakan dalam jangka waktu yang lama tanpa sering melakukan penggantian atau pengisian ulang baterai. Efisiensi energi ini sangat relevan untuk aplikasi monitoring kesehatan, khususnya pada pasien rawat jalan atau pemantauan jarak jauh, di mana kontinuitas sistem menjadi faktor utama. Dari sisi akurasi,

perbandingan antara data detak jantung yang dihasilkan oleh sistem WSN dengan alat referensi menunjukkan perbedaan yang relatif kecil. Hasil ini menegaskan bahwa sensor dan mekanisme pengolahan data yang digunakan mampu menghasilkan informasi detak jantung yang cukup akurat untuk keperluan pemantauan kesehatan. Dengan tingkat akurasi yang baik, sistem ini dapat menjadi alternatif atau pendukung bagi perangkat monitoring konvensional, terutama dalam skenario pemantauan jarak jauh.

Secara umum, pembahasan hasil penelitian ini dapat dirangkum dalam beberapa poin utama sebagai berikut:

1. **Kinerja Real-Time dan Keandalan Jaringan**
Sistem WSN mampu mendukung pengiriman data detak jantung secara real-time dengan delay rendah dan packet loss minimal, sehingga sesuai untuk aplikasi monitoring kesehatan yang membutuhkan respons cepat.
2. **Efisiensi Energi Node Sensor**
Penggunaan energi pada node sensor relatif stabil dan efisien, yang memungkinkan sistem beroperasi dalam jangka waktu lama tanpa gangguan akibat keterbatasan daya.
3. **Akurasi dan Kelayakan Sistem**
Data detak jantung yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi yang baik dibandingkan dengan alat referensi, sehingga sistem dinilai layak untuk diterapkan sebagai solusi monitoring detak jantung pasien berbasis jaringan nirkabel.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring detak jantung pasien secara real-time berbasis Wireless Sensor Network (WSN). Sistem yang dikembangkan mampu mengintegrasikan sensor detak jantung, node jaringan nirkabel, dan aplikasi monitoring menjadi satu kesatuan yang bekerja secara andal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data detak jantung dapat dikirimkan dan ditampilkan secara real-time di pusat pemantauan, sehingga memungkinkan tenaga medis atau pengguna untuk memantau kondisi pasien secara kontinu tanpa keterbatasan ruang dan waktu. Dari sisi kinerja jaringan, sistem menunjukkan performa yang baik dengan nilai delay transmisi yang rendah dan tingkat packet loss yang minimal. Hal ini menandakan bahwa arsitektur jaringan WSN dan mekanisme komunikasi yang digunakan telah sesuai untuk aplikasi kesehatan yang bersifat sensitif terhadap waktu. Selain itu, hasil pengujian konsumsi energi menunjukkan bahwa node sensor memiliki efisiensi daya yang cukup baik, sehingga sistem dapat beroperasi dalam jangka waktu yang relatif lama tanpa sering melakukan pengisian ulang baterai.

Perbandingan data detak jantung antara sistem WSN dan alat referensi juga menunjukkan tingkat akurasi yang baik dengan selisih yang kecil. Dengan demikian, sistem monitoring yang dikembangkan dinilai layak untuk digunakan sebagai solusi pemantauan detak jantung pasien, khususnya untuk aplikasi pemantauan jarak jauh. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa penerapan WSN dalam sistem monitoring detak jantung memiliki potensi besar untuk mendukung layanan kesehatan yang lebih efisien, responsif, dan berbasis teknologi jaringan komputer.

Kontribusi Penulis: Maskana Ramadhani: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan, Supervisi.

Kevin Oktavia Pratama: Investigasi, Kurasi Data, Visualisasi.

Khairurrozi: Perangkat Lunak, Analisis, Validasi.

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://orcid.org/> -

Penulis Kedua: <https://orcid.org/> -

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and A. Hamzah, "Analisis Kecepatan Dan Kinerja Jaringan 5G (generasi ke 5) Pada Wilayah Perkotaan," *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 47, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.
- [2] 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
- [3] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, and ..., "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus," 2023, *researchgate.net*. [Online]. Available: <https://jurnal.itscience.org/index.php/digitech/article/view/3457>
- [4] 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>
- [5] 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.
- [6] 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>
- [7] 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.
- [8] F. P. E. Putra, A. Muzayyin, and M. U. Mansyur, "ANALISIS KUALITAS LAYANAN ABSENSI BERBASIS FINGER BERDASARKAN Quality of Service," *J. Inform.*, 2024, [Online]. Available: <https://jurnal.darmajaya.ac.id/index.php/JurnalInformatika/article/view/3949>
- [9] F. P. E. Putra, R. A. Mustafida, and A. Nahriyah, "Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menun-jang Aplikasi Smart City," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392411187_Perancangan_Jaringan_Nirkabel_Berbasis_Mesh_untuk_Menunjang_Aplikasi_Smart_City/links/6848f767d1054b0207fb79de/Perancangan-Jaringan-Nirkabel-Berbasis-Mesh-untuk-Menunjang-Aplika
- [10] N. Muhammad Akbar, F. Prasetyo Eka Putra, K. Zulfana Imam, and M. Umar Mansyur, "Analisis Kinerja dan Interopabilitas STB Sebagai Server Penilaian Akhir Tahun," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 91–96, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.365.
- [11] Y. Jiao *et al.*, "Dynamic p-n junction direct current-generating triboelectric nanogenerators based on lead-free perovskite," *Nano Energy*, vol. 138, 2025, doi: 10.1016/j.nanoen.2025.110857.
- [12] Y. Cheng, Y. Hu, W. Liu, and M. Bilal, "Federated learning with adaptive local aggregation for privacy-aware recommender systems in Internet of Vehicles," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 710, 2025, doi: 10.1016/j.ins.2025.122100.
- [13] H.-C. Tsai, Y.-W. P. Hong, and J.-P. Sheu, "Completion Time Minimization for UAV-Enabled Surveillance

- Over Multiple Restricted Regions,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 22, no. 12, pp. 6907–6920, 2023, doi: 10.1109/TMC.2022.3200732.
- [14] M. Ade Krisna Respati and B. M. Lee, “A Survey on Machine Learning Enhanced Integrated Sensing and Communication Systems: Architectures, Algorithms, and Applications,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 170946–170964, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3501363.
 - [15] M. S. Qamar and M. F. Munir, “A Hybrid Framework Integrating Deterministic Clustering, Neural Networks, and Energy-Aware Routing for Enhanced Efficiency and Longevity in Wireless Sensor Network,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 84, no. 3, pp. 5463–5485, 2025, doi: 10.32604/cmc.2025.064442.
 - [16] R. Benaich, S. El Mendili, and Y. Gahi, “Securing EHRs With a Novel Token-Based and PPoS Blockchain Methodology,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 83183–83204, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3412793.
 - [17] M. Kuliha and S. Varma, “Secure internet of medical things based electronic health records scheme in trust decentralized loop federated learning consensus blockchain,” *Int. J. Intell. Networks*, vol. 5, pp. 161–174, 2024, doi: 10.1016/j.ijin.2024.03.001.
 - [18] S. Singh and N. Bilandi, “Adaptive Relay-Assisted WBAN Protocol: Enhancing Energy Efficiency and QoS through Advanced Multi-Criteria Decision-Making,” *C. - Comput. Model. Eng. Sci.*, vol. 144, no. 1, pp. 489–509, 2025, doi: 10.32604/cmes.2025.065101.
 - [19] M. M. M. B. J. Ananth, and A. Agalya, “Blockchain-based secure data communication with an optimal energy trading model in the IoEV system,” *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 18, no. 3, 2025, doi: 10.1007/s12083-025-01919-8.
 - [20] H. Liang *et al.*, “The design of spatial compliant mechanisms with distributed multi-stability based on post-buckled cylindrical compliant beams,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 228, 2025, doi: 10.1016/j.ymssp.2025.112365.
 - [21] 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.
 - [22] J. Cao, X. Zhu, S. Sun, P. Popovski, S. Feng, and Y. Jiang, “Age of Loop for Wireless Networked Control System in the Finite Blocklength Regime: Average, Variance and Outage Probability,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 22, no. 8, pp. 5306–5320, 2023, doi: 10.1109/TWC.2022.3233085.
 - [23] R. Rajesh, G. H. Gururaj, F. Flammini, A. Anitha, V. K. Venkatesan, and S. K. Gupta, “A Novel Framework on Security and Energy Enhancement Based on Internet of Medical Things for Healthcare 5.0,” *Infrastructures*, vol. 8, no. 2, 2023, doi: 10.3390/infrastructures8020022.
 - [24] J. Wang *et al.*, “A Unified Framework for Guiding Generative AI With Wireless Perception in Resource Constrained Mobile Edge Networks,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 23, no. 11, pp. 10344–10360, 2024, doi: 10.1109/TMC.2024.3377226.
 - [25] W. Jerbi, O. Cheikhrouhou, A. Guermazi, and H. Hafedh, “MSU-TSCH: A Mobile Scheduling Updated Algorithm for TSCH in the Internet of Things,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 19, no. 7, pp. 7978–7985, 2023, doi: 10.1109/TII.2022.3215990.
 - [26] G. Leenders, G. Callebaut, G. Ottoy, L. van der Perre, and L. de Strycker, “An Energy-Efficient LoRa Multi-Hop Protocol through Preamble Sampling for Remote Sensing,” *Sensors*, vol. 23, no. 11, 2023, doi: 10.3390/s23114994.

- [27] S. Gao *et al.*, “Self-Powered System by an Aerodynamic-Complementary Triboelectric-Electromagnetic Hybridized Generator with Triple-Mode Switching Power Management Topology for Wide-Range Wind Energy Collection and Climate Monitoring,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 10, no. 9, 2025, doi: 10.1002/admt.202401840.
- [28] Q. Bian, X. Dong, C. Xu, Z. Liu, and L. Ding, “Hydrodynamic and power-capturing performances of the dual-tube oscillating water column device: A numerical study,” *Energy*, vol. 336, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.138542.
- [29] Y. Dai, X. Jiang, K. Wang, and K. Li, “A phototunable self-oscillatory bistable seesaw via liquid crystal elastomer fibers,” *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 200, 2025, doi: 10.1016/j.chaos.2025.117041.
- [30] J. Kuriakose, S. Joshi, and A. K. Bairwa, “EMBN-MANET: A method to Eliminating Malicious Beacon Nodes in Ultra-Wideband (UWB) based Mobile Ad-Hoc Network,” *Ad Hoc Networks*, vol. 140, 2023, doi: 10.1016/j.adhoc.2022.103063.
- [31] A. A. Yinusa *et al.*, “Development of an App for analyzing and monitoring non-linear fluid-induced vibration of nanotube using analytical and machine learning approaches,” *Next Mater.*, vol. 9, 2025, doi: 10.1016/j.nxmater.2025.101277.
- [32] I. S. M. Isa, T. E. H. El-Gorashi, M. O. I. Musa, and J. M. H. Elmirghani, “Resilient Energy Efficient IoT Infrastructure with Server and Network Protection for Healthcare Monitoring Applications,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 48910–48940, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3352024.
- [33] S. Lingayya, S. B. Bhat, S. R. Pawar, A. Vylala, and S. Senthil Kumar, “Dynamic task offloading for resource allocation and privacy-preserving framework in Kubeedge-based edge computing using machine learning,” *Cluster Comput.*, vol. 27, no. 7, pp. 9415–9431, 2024, doi: 10.1007/s10586-024-04420-8.
- [34] M. Kenyeres and J. Kenyeres, “Distributed Average Consensus Algorithms in d-Regular Bipartite Graphs: Comparative Study,” *Futur. Internet*, vol. 15, no. 5, 2023, doi: 10.3390/fi15050183.
- [35] K. Hamza, G. Bouattour, F. Benbrahim, S. Bader, A. Fakhfakh, and O. Kanoun, “A Robust Energy Management Circuit for Energy Harvesting from Wideband Low-Acceleration Vibrations in Wireless Sensor Screws,” *IEEE Sensors Lett.*, vol. 9, no. 9, 2025, doi: 10.1109/LSSENS.2025.3592235.
- [36] L. Kaur and R. Kaur, “Fog-Based Energy Efficient Routing Protocol for Smart Building Evacuations,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 139, no. 1, pp. 543–571, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-11637-8.
- [37] L. A. K. Mohammed, A. M. Hasan, and E. K. Hamza, “Pruning and Validation Techniques Enhanced Genetic Algorithm for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks,” *Ing. des Syst. d’Information*, vol. 29, no. 4, pp. 1305–1314, 2024, doi: 10.18280/isi.290406.
- [38] B. V Minh, T. N. Nguyen, and L.-T. Tu, “Physical layer security in wireless sensors networks: secrecy outage probability analysis,” *J. Inf. Telecommun.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–23, 2025, doi: 10.1080/24751839.2024.2352961.
- [39] A. Ferreira *et al.*, “Thermomagnetic energy conversion evaluation of Permalloy/Platinum multilayers on poly(vinylidene fluoride)-based flexible substrates,” *J. Alloys Compd.*, vol. 1010, 2025, doi: 10.1016/j.jallcom.2024.178051.
- [40] M. Li and X. P. Wang, “Minimal Solutions of Fuzzy Relation Inequalities With Addition-Min Composition and Their Applications,” *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 31, no. 5, pp. 1665–1675, 2023, doi: 10.1109/TFUZZ.2022.3213884.
- [41] A. K. Rai, R. Kumar, R. Ranjan, A. Srivastava, and M. K. Gupta, “Optimizing routing in wireless sensor

- networks: leveraging pond skater and ant colony optimization algorithms,” *Soft Comput.*, vol. 28, no. 17–18, pp. 9665–9680, 2024, doi: 10.1007/s00500-024-09809-6.
- [42] K. Amara Korba, A. Djamel, F. Mohamed, and B. Djalil, “New chaotic map for real-time medical imaging system in e-Health,” *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 14, no. 10, pp. 13997–14007, 2023, doi: 10.1007/s12652-022-04107-1.
- [43] Y. Watanabe, T. Sugiura, and N. Nakano, “Bulk Carrier Contaminations and Their Effects on MOSFETs Under Energy Harvesting Systems,” *IEEE J. Electron Devices Soc.*, vol. 12, pp. 450–456, 2024, doi: 10.1109/JEDS.2024.3403649.
- [44] S. Madhavi, N. C. Santhosh, S. Rajkumar, and R. Praveen, “Pythagorean Fuzzy Sets-based VIKOR and TOPSIS-based multi-criteria decision-making model for mitigating resource deletion attacks in WSNs,” *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 44, no. 6, pp. 9441–9459, 2023, doi: 10.3233/JIFS-224141.
- [45] M. M. Wang, J. Zhang, and X. You, “Proximity-Based Maritime Internet of Things: A Service-Centric Design,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 101205–101240, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3312578.
- [46] K. Pande, A. Passi, M. Rao, P. K. Sholapurapu, L. Bhagyalakshmi, and S. K. Suman, “Enhancing Energy Efficiency and Data Reliability in Wireless Sensor Networks Through Adaptive Multi-Hop Routing with Integrated Machine Learning,” *J. Mach. Comput.*, vol. 5, no. 4, pp. 2504–2512, 2025, doi: 10.53759/7669/jmc202505192.
- [47] N. Soni, M. Kaur, and V. Bhardwaj, “A forensic analysis of AnyDesk Remote Access application by using various forensic tools and techniques,” *Forensic Sci. Int. Digit. Investig.*, vol. 48, 2024, doi: 10.1016/j.fsidi.2024.301695.
- [48] X. Huang, X. Hua, and Z. Chen, “Exploiting a novel magnetoelastic tunable bi-stable energy converter for vibration energy mitigation,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 113, no. 3, pp. 2017–2043, 2025, doi: 10.1007/s11071-024-10337-z.
- [49] L. S. Martinez-Rau, J. O. Chelotti, L. L. Giovanini, V. Adin, B. Oelmann, and S. Bader, “On-Device Feeding Behavior Analysis of Grazing Cattle,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, pp. 1–13, 2024, doi: 10.1109/TIM.2024.3376013.
- [50] R. Chen and N. Ravishanker, “Feature Construction Using Persistence Landscapes for Clustering Noisy IoT Time Series,” *Futur. Internet*, vol. 15, no. 6, 2023, doi: 10.3390/fi15060195.
- [51] S. G. Aarela, V. P. Yanambaka, S. P. Mohanty, and E. Kougianos, “Fortified-Edge 2.0: Advanced Machine-Learning-Driven Framework for Secure PUF-Based Authentication in Collaborative Edge Computing,” *Futur. Internet*, vol. 17, no. 7, 2025, doi: 10.3390/fi17070272.
- [52] J. Xie, Q. Jia, X. Mu, and F. Lu, “Joint Content Caching, Recommendation, and Transmission for Layered Scalable Videos Over Dynamic Cellular Networks: A Dueling Deep Q-Learning Approach,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 36657–36669, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3375113.