

Jaringan Sensor Nirkabel: Sebuah Survei dan Analisis Arah Penelitian

Suhdi ^{1)*} , Desa Aulia Siswoyo ²⁾ , Marzuq ³⁾

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

^{1) 2) 3)} kakdy21@gmail.ac.id,

Abstract

Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Networks/WSN) biasanya terdiri dari ribuan sensor dengan sumber daya terbatas untuk memonitor lingkungan sekitar, mengumpulkan informasi, dan mengirimkan data ke mesin jarak jauh untuk diproses lebih lanjut. Meskipun WSN dianggap sebagai jaringan ad-hoc yang sangat fleksibel, manajemen jaringan merupakan salah satu tantangan mendasar yang harus diatasi dalam jenis jaringan ini mengingat ukuran penyebaran dan masalah kualitas yang terkait seperti manajemen sumber daya, skalabilitas, dan keandalan. Manajemen topologi dianggap sebagai teknik umum untuk mengatasi masalah ini dalam jaringan ad-hoc seperti WSN. Clustering adalah metode manajemen topologi yang paling terkenal di WSN, mengelompokkan node untuk mengelolanya dan / atau menjalankan berbagai tugas secara terdistribusi, misalnya, manajemen sumber daya. Meskipun teknik clustering terutama dikenal untuk mengurangi konsumsi energi, ada berbagai tujuan berbasis kualitas yang dapat direalisasikan melalui clustering. Dalam makalah ini, kami meninjau secara komprehensif teknik pengelompokan WSN yang sudah ada, tujuan mereka dan sifat jaringan yang didukung oleh teknik tersebut. Setelah menyingkat lebih dari 500 teknik clustering, sekitar 215 teknik yang paling penting diekstraksi, ditinjau, dikategorikan dan diklasifikasikan berdasarkan tujuan clustering dan juga sifat jaringan seperti mobilitas dan heterogenitas. Selain itu, statistik disediakan mengenai metrik yang ditinjau, memberikan wawasan yang sangat berguna untuk desain teknik clustering di WSN.

Keywords: Jaringan Sensor Nirkabel, Pengelompokan, Perutean, Pemilihan kepala cluster, Manajemen Topologi

Article history: Received 5 August 2025, first decision 22 August 2025, accepted 30 August 2025, available online 08 October 2025

I. INTRODUCTION

Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Networks, WSN) merupakan salah satu jenis teknologi jaringan ad-hoc yang muncul lebih dari 20 tahun yang lalu [1], [2], [3] untuk tujuan pemantauan pada aplikasi militer [4], [5], [6]. WSN biasanya mencakup sejumlah besar node sensor atau aktuator (singkatnya disebut node) yang pada dasarnya memiliki sumber daya terbatas, tetapi dapat terhubung ke node lain dalam jaringan untuk mengirimkan data. Tugas utama setiap node adalah memantau lingkungan menggunakan sensor yang terpasang, selain kemampuannya untuk bertindak sebagai relai atau node fusi data. Setiap node dapat digunakan sebagai router untuk mengirim data tetangga ke sink atau Base Station (BS). BS digunakan untuk memproses data secara lokal atau dapat digunakan sebagai pintu gerbang jaringan untuk mentransfer data ke mesin jarak jauh

Berkat infrastruktur yang fleksibel dan transmisi data yang efisien dalam WSN, area aplikasinya cukup beragam [7], [8]. Dalam dua dekade terakhir, berbagai aplikasi telah diusulkan untuk WSN, seperti pemantauan lingkungan, perawatan kesehatan [9], [10], rumah pintar [11], [12], [13], pabrik pintar [14], dan manajemen bencana [15]. Meskipun WSN dianggap sebagai jaringan ad-hoc yang sangat fleksibel, manajemen jaringan telah menjadi salah satu tantangan mendasar yang harus diatasi dalam jenis jaringan ini [16], [17], khususnya yang berkaitan dengan manajemen sumber daya, skalabilitas, keandalan, dan efisiensi. Manajemen topologi dianggap sebagai teknik umum untuk memastikan infrastruktur jaringan yang stabil, dapat diandalkan, dapat dipercaya, dan efisien dalam jaringan ad-hoc seperti WSN [18], [19], [20].

Clustering adalah salah satu teknik yang paling populer untuk manajemen topologi WSN yang dapat meningkatkan efisiensi jaringan. Clustering mengatur node ke dalam satu set kelompok yang disebut cluster berdasarkan seperangkat kriteria yang telah ditentukan sebelumnya seperti mendukung Quality of Service (QoS), mengoptimalkan konsumsi

* marzuq

sumber daya, penyeimbangan beban jaringan, dll. [15]. Setiap cluster memiliki satu atau lebih Cluster Head (CH) yang mengumpulkan data dari node lain dalam cluster yang disebut anggota dan mengirimkan data (gabungan) ke BS secara langsung atau tidak langsung menggunakan node lain yang disebut mid-dlemen node. Dengan menggunakan teknik pengelompokan, node yang memiliki sumber daya terbatas tidak perlu mengirimkan data mereka ke gateway (sink) secara langsung, yang mengakibatkan penipisan energi, inefisiensi konsumsi sumber daya, dan gangguan.

Teknik pengelompokan untuk WSN telah dilaporkan dalam beberapa penelitian. Karena banyak penelitian yang telah dilakukan pada pengelompokan WSN, maka akan sangat berguna untuk melakukan survei yang komprehensif pada penelitian yang sudah ada dan menganalisisnya. Ada sejumlah survei yang layak tentang pengelompokan WSN, seperti [21], [22], [23]. Namun, kebanyakan dari mereka hanya mencakup teknik pengelompokan utama seperti LEACH, HEED dan FLOC [24], [25] sebagai metode dasar yang telah diusulkan dalam berbagai bentuk dan ekstensi. Selain itu, beberapa makalah survei hanya mempertimbangkan satu metrik dalam merancang teknik clustering atau infrastruktur jaringan seperti cluster yang tidak sama [26]. Selain itu, beberapa penelitian survei telah mempelajari teknik yang berasal dari teknik utama. Sebagai contoh, dalam [7], [27] penulis menunjukkan bahwa ada lebih dari 60 versi tambahan dari protokol LEACH dalam literatur. Selain itu, dalam sejumlah makalah survei seperti [28], [29], pengelompokan telah dipelajari dari sudut pandang pengurangan konsumsi energi, sementara itu bukan satu-satunya alasan pengelompokan. Sebagai kesimpulan, sebagian besar makalah survei clustering mempelajari dan membandingkan teknik clustering dan efisiensinya, sementara mereka gagal untuk fokus pada perbandingan tujuan dari teknik-teknik tersebut dan penerapannya dalam jaringan dengan sifat yang berbeda seperti heterogenitas dan mobilitas

Selain itu, sepengetahuan kami, tidak ada makalah survei yang mempelajari teknik pengelompokan yang ada sehubungan dengan properti jaringan yang didukung karena aplikasi WSN sangat beragam.

Hal ini memotivasi kami untuk memberikan survei yang komprehensif tentang tujuan pengelompokan dalam WSN. Dalam makalah ini, teknik clustering berbasis WSN ditinjau berdasarkan tujuan yang dicapai oleh clustering seperti QoS, toleransi kesalahan, penyeimbangan beban, dll. Selain itu, kami mengevaluasi teknik-teknik tersebut berdasarkan parameter yang berkaitan dengan kompatibilitas mereka dengan karakteristik jaringan yang berbeda, misalnya, jaringan heterogen dan jaringan seluler. Akhirnya, kami menganalisis arah penelitian tentang teknik clustering dan memberikan model statistik untuk memotivasi para ilmuwan untuk memanfaatkan clustering dalam mengatasi masalah manajemen jaringan

Karena jumlah teknik clustering WSN yang ada saat ini cukup banyak, survei ini dapat membantu untuk memahami pentingnya teknik-teknik tersebut. Survei ini juga membantu untuk menemukan teknik clustering terkait dengan mempertimbangkan tujuan yang harus dicapai oleh jaringan.

Metodologi yang kami gunakan dalam kerangka kerja survei ini terdiri dari beberapa langkah berikut. Pertama, kami mengekstrak daftar teknik pengelompokan WSN utama dari makalah yang relevan di jurnal, konferensi, dan lokakarya terkemuka, misalnya, ICCCN, WCNC, GLOBCOMM, ICPS, CNCS, SECON, IPDPS, ICDCS, INFOCOM, ITPDS, IEEE IoTJ, ITWC, ITN, ITVT, TOSN, ATSN, dan IEEE TNSM, untuk menyebutkan yang paling penting. Salah satu tantangan dalam menemukan makalah yang relevan adalah bahwa ada banyak sekali penelitian tentang pengelompokan data yang tidak terkait dengan pengelompokan jaringan. Berdasarkan makalah relevan yang diekstrak, kami kemudian memeriksa referensi dan pekerjaan terkait untuk menemukan makalah lain yang tersembunyi. Setelah mengumpulkan teknik-teknik clustering utama, kami akhirnya mencari semua karya penelitian lain yang mengutip teknik-teknik utama seperti LEACH [29], [30] atau mengusulkan solusi clustering mereka sendiri. Untuk itu, kami harus menyaring dan membaca sekitar 500 makalah. Akhirnya, lebih dari 215 makalah diekstraksi sebagai teknik clustering yang paling relevan yang dapat digunakan dalam WSN untuk mencapai berbagai tujuan.

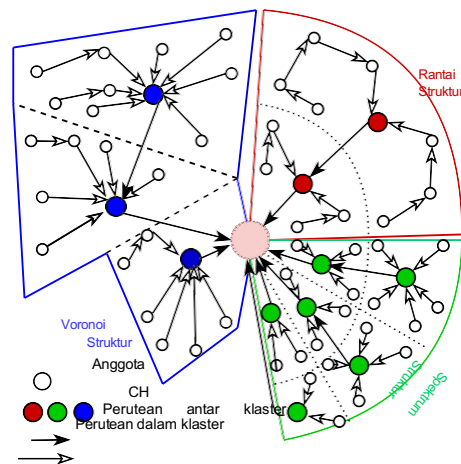
Kontribusi utama dari penelitian ini meliputi:

- Memberikan survei komprehensif tentang teknik clustering di WSN yang berfokus pada tujuan clustering dan properti jaringan
- Meninjau solusi yang paling umum digunakan oleh teknik clustering untuk mencapai tujuan yang telah diidentifikasi.
- Menyediakan analisis statistik dari tujuan teknik clustering dan properti jaringan yang didukung oleh literatur untuk menganalisis arah penelitian di bidang ini.

jurnal ini disusun sebagai berikut. Bagian 2 menjelaskan konsep dasar pengelompokan dan teknik pengelompokan. Bagian 3 menyajikan tinjauan yang komprehensif komprehensif untuk teknik clustering di WSNs sehubungan dengan sifat jaringan dan tujuan dari clustering, selain meninjau secara statistik teknik-teknik clustering yang tersedia. Akhirnya, pada Bagian 5, kami menyimpulkan makalah ini dengan kata penutup

II. LITERATURE REVIEW

Manajemen topologi adalah salah satu tantangan utama dalam merancang jaringan komputer, terutama dalam jaringan ad-hoc karena jumlah node yang sangat banyak dan infrastruktur jaringan yang tidak dapat diandalkan [31], [32], [33]. Dalam teknik manajemen topologi di jaringan ad-hoc, menentukan tetangga yang memungkinkan untuk membuat koneksi dan mengenali tetangga terbaik untuk transmisi data hop-by-hop adalah dua topik yang sangat penting untuk peningkatan skalabilitas, konsumsi sumber daya, keandalan, dll. Clustering adalah jenis teknik manajemen topologi yang dapat mengelompokkan node untuk meningkatkan efisiensi jaringan dengan mengelola sumber daya dan merotasi tanggung jawab di antara node untuk memberikan keadilan. Setiap cluster terdiri dari sejumlah anggota dan memiliki satu atau lebih CH untuk mengelola anggota, serta untuk menggabungkan, memproses, mentransfer, dan mengelola data anggota. Terakhir, setiap jaringan memiliki satu atau lebih BS yang dapat digunakan sebagai gateway atau node pemrosesan data lokal. BS menerima data dari CH secara langsung atau tidak langsung melalui node antara CH dan BS yang disebut node perantara. Ada beberapa langkah untuk membentuk cluster dan menyediakan koneksi antara anggota dan BS yang dijelaskan di bawah ini.



Gambar 1: Berbagai struktur teknik pengelompokan

Secara umum, pengelompokan mencakup dua fase utama: pengelompokan node dan pengalokasian tanggung jawab. Metode pengelompokan umumnya didasarkan pada diagram Voronoi, tetapi juga dapat berupa non-Voronoi seperti rantai atau spektrum. Dalam struktur Voronoi, lingkungan jaringan 2D atau 3D dibagi menjadi beberapa bagian (tidak sama) yang disebut cluster. Setiap cluster memiliki beberapa node dan berinteraksi dengan cluster lain melalui CH atau gateway. Dalam struktur rantai, node dalam sebuah cluster terhubung ke satu sama lain untuk mencapai CH. Dengan kata lain, setiap node hanya memiliki dua koneksi dengan tetangga dalam rantai untuk mencapai CH. Dalam struktur spektrum, sudut node ke BS sama pentingnya dengan jarak ke BS. Sudut node umumnya ditangkap oleh metode Scanning Sweep [34].

Cluster dibentuk berdasarkan sudut dan jarak yang berbeda. gbr. 1 menunjukkan struktur clustering yang berbeda dan perbandingannya. Pada struktur spektrum dan rantai, layering dapat dilakukan yang merealisasikan transmisi data multi-hop dan meningkatkan efisiensi jaringan, terutama dalam hal konsumsi sumber daya. Koneksi tidak langsung antara sumber dan tujuan mengurangi konsumsi energi dengan memecah perjalanan panjang dari node ke CH menjadi perjalanan yang lebih pendek, yang disebut intra-cluster routing. Namun, menggunakan metode routing ini dapat menyebabkan masalah QoS seperti peningkatan delay. Sama halnya dengan menghubungkan CH dan BS, node dalam cluster dapat terhubung ke CH mereka secara langsung atau tidak langsung melalui anggota cluster lainnya.

Metode Pembentukan Cluster: Ada dua metode untuk membentuk cluster dalam jaringan:

- Menentukan cluster dengan mengelompokkan node dan memilih satu atau beberapa node sebagai CH(s) dari cluster: Pengelompokan node dapat didasarkan pada berbagai parameter yang berbeda yang berbeda, terutama kedekatan fisik. Selain itu, cluster yang seimbang dalam hal ukuran cluster, jumlah node atau beban jaringan dapat digunakan sebagai parameter lain untuk mengelompokkan node dan membentuk cluster. Kesamaan layanan yang dibutuhkan dalam aplikasi berbasis layanan, pengumpulan data dan fusi data,

mendukung parameter QoS yang berbeda, dan lain-lain juga dapat dipertimbangkan sebagai parameter yang dapat digunakan untuk mengelompokkan node

- Menentukan CH dan mengundang node lain untuk bergabung dengan CH tetangga: Metode ini didasarkan pada parameter seperti jarak ke CH dan / atau jarak CH ke BS, kesamaan generator data cluster untuk fusi data, atau hosting layanan yang diminta oleh CH.

Metode Pemilihan CH secara umum: Untuk memilih CH, sejumlah metode umum tersedia seperti yang tercantum di bawah ini:

- Dalam beberapa teknik pengelompokan, node yang kaya sumber daya telah ditentukan sebelumnya sebagai CH [24]. Masalah dengan metode ini adalah bahwa sebagian besar WSN bersifat homogen dan sumber daya terbatas, oleh karena itu metode ini tidak beroperasi dalam beberapa kasus. Selain itu, bahkan node yang kaya sumber daya dalam jaringan heterogen dapat ditemukan dan dipilih sebagai CH, menjadi CH dalam waktu yang lama akan menguras daya node dengan cepat dan menyebabkan kematian node. Selain itu, jika CH bersifat tetap, node yang bergerak dan dinamika jaringan dapat membuat cluster tidak seimbang dalam hal jumlah anggota atau volume data yang ditransfer yang menyebabkan beban jaringan dan konsumsi sumber daya yang tidak seimbang.
- Dalam beberapa teknik clustering, keacakan adalah solusi untuk mengedarkan tanggung jawab CH di antara node, misalnya, LEACH sebagai teknik clustering yang paling terkenal [9], [35] Meskipun teknik ini bermanfaat dalam jaringan homo-geneous, dinamika atau ketidakseimbangan dalam WSN dapat menciptakan masalah run-time yang intensif seperti konsumsi energi kronis pada beberapa CH atau konsumsi sumber daya yang tidak seimbang.
- Solusi yang paling umum untuk pemilihan CH disebut pemilihan CH secara sadar yang didasarkan pada node dan keadaan jaringan. Banyak literatur mengusulkan metode pengelompokan berdasarkan solusi ini [7], [10], [36]. Dalam teknik-teknik ini, CH dipilih berdasarkan parameter yang berbeda seperti sumber daya yang tersedia, lokasi, jumlah tetangga, dll. Metode pemilihan CH dapat meningkatkan efisiensi jaringan dengan memilih node yang lebih tepat untuk menjadi CH. Selain itu, beberapa metode dirancang untuk bereaksi terhadap keadaan yang tidak terduga dengan memilih ulang atau mengganti CH dengan node yang lebih tepat secara dinamis

Untuk memilih CH terbaik, metode clustering dapat menggunakan metode pemilihan CH terpusat atau terdistribusi. Dalam teknik terpusat, parameter yang digunakan untuk memilih CH, dikumpulkan di node pusat (umumnya BS) dan dibandingkan, dianalisis dan diproses untuk memilih CH. Meskipun metode terpusat dapat memiliki hasil yang universal karena membandingkan semua node, metode ini sering kali memiliki overhead yang tinggi untuk jaringan yang besar dan / atau sangat dinamis, terutama ketika CH dipilih kembali secara teratur. Dalam jaringan seperti itu, beberapa paket manajemen harus ditransmisikan yang dapat menghabiskan banyak sumber daya dan mengurangi efisiensi jaringan.

Di sisi lain, metode terdistribusi memiliki lebih sedikit overhead, tetapi karena informasi jaringan yang terbatas (yaitu, hanya node tetangga), CH yang dipilih tidak dapat memenuhi semua persyaratan jaringan. Metode pengelompokan ulang: Tidak semua node dapat digunakan sebagai CH untuk waktu yang lama karena penipisan sumber daya, dengan demikian tugas sebagai CH harus dirotasi di antara node yang sesuai selama masa pakai jaringan. Memilih ulang CH adalah tugas yang dapat memutar tanggung jawab di antara node, biasanya terjadi pada fase pengelompokan ulang (set-up).

Pengelompokan ulang dapat dilakukan secara lokal atau global. Dalam kasus global, seluruh jaringan harus di-cluster ulang yang memiliki overhead yang tinggi, tetapi dalam kasus lokal, bagian dari jaringan atau hanya sebuah cluster yang akan di-cluster ulang dan memilih CH yang baru.

Penerusan Data Berbasis Clustering: Data yang dihasilkan oleh node dapat ditransfer dalam format mentah atau sebagai nilai gabungan. Teknik yang berbeda digunakan untuk menggabungkan data, sebagian besar pada CH. CH dapat mengirimkan item data individual ke BS atau menggabungkannya dan mengirimkan nilai data yang digabungkan ke BS. Ada dua metode untuk mengirimkan paket (fused) dari CH ke BS. CH dapat mengirimkan data secara langsung ke BS atau menggunakan node perantara (yang biasanya adalah CH lain) untuk mentransfer data ke BS yang disebut dengan inter-Cluster routing. Sebaliknya, pada komunikasi langsung setiap CH bertanggung jawab untuk mengirimkan data secara langsung ke BS yang dapat menyebabkan pengurasan energi berdasarkan Eq. 1 [27], [37], [38].

$$E_{\text{ kirim}} = F(d^{(2)}) \quad (1)$$

Mirip dengan routing antar cluster, teknik intra-cluster diusulkan untuk menyeimbangkan beban dan konsumsi energi di dalam cluster. Meskipun komunikasi langsung pada kedua teknik routing dapat mengurangi penundaan dan meningkatkan QoS, hal ini meningkatkan konsumsi energi pada CH dan menyebabkan penipisan energi secara bersamaan. Teknik trade-off yang berbeda diusulkan untuk memilih transmisi data langsung atau tidak langsung dalam teknik pengelompokan seperti metode yang diusulkan dalam [28]. Karena teknik pengelompokan yang umum didasarkan pada node yang saling berdekatan secara fisik dan menyediakan data untuk aplikasi yang sama, maka akan lebih efisien untuk melakukan agregasi data dalam CH dan mengurangi jumlah data yang akan ditransmisikan. Hal ini secara signifikan dapat meningkatkan penghematan energi pada node sensor. Selain itu, dengan adanya cluster dalam WSN, memungkinkan untuk membuat beberapa keputusan berdasarkan informasi yang tersedia secara lokal di setiap cluster.

Keputusan tersebut dapat terkait dengan bagaimana menangani situasi yang berbeda di bagian jaringan (yaitu, sebuah cluster) seperti kesalahan, node mobile, dan pelanggaran QoS. Ada berbagai jenis WSN yang digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti WSN Terrestrial [12], [39], [40], WSN Bawah Tanah [41], WSN Bawah Air [42], WSN Multimedia [36], dan WSN Seluler serta Jaringan Sensor dan Aktuator Nirkabel (WSAN) [7], [43]. WSN sering dianggap sebagai jaringan tanpa infrastruktur [31], [32] sehingga node-node harus bekerja sama untuk membangun jaringan, dan mengumpulkan serta mentransfer data. Karena kelangkaan sumber daya dari node sensor, pengelolaan sumber daya merupakan tantangan besar terutama di WSN dengan jumlah node yang sangat besar di mana banyak node yang perlu bertindak sebagai hop untuk transmisi data. Karena transmisi data nirkabel adalah konsumen energi yang dominan dalam platform sensor, kita perlu secara hati-hati mengatasi masalah konsumsi sumber daya di WSN terutama penggunaan energi. Untuk mendukung optimalisasi konsumsi sumber daya dan fusi data, berbagai metode yang berbeda telah diusulkan. Metode pertama dan paling mudah adalah algoritma routing.

Mengingat bahwa konsumsi energi dalam jaringan nirkabel adalah fungsi dari jarak, routing dapat mengurangi konsumsi energi dengan membagi rute yang panjang menjadi rute yang lebih kecil. Namun, ada beberapa masalah dalam metode routing yang harus diatasi seperti fusi data, toleransi kesalahan, dan load balancing. Pengelompokan node dikenal sebagai teknik yang populer untuk meningkatkan efisiensi metode routing dan memecahkan masalah mereka. Dari sekitar tahun 2000 hingga 2019, puluhan teknik pengelompokan telah diusulkan yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi WSN. Ada sejumlah teknik clustering WSN utama yang diusulkan beberapa tahun yang lalu, seperti LEACH [35], [44] dan HEED [25]. Dalam teknik-teknik clustering ini, tujuan utamanya adalah untuk mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan beberapa aspek jaringan seperti load balancing. Pada bagian ini, kami mempelajari semua metode clustering yang signifikan berdasarkan tinjauan lebih dari 215 makalah. Tidak seperti makalah survei lainnya, kami tidak berfokus pada detail desain metode clustering seperti kompleksitas algoritma, metodologi, dll. Pada bagian ini, kami meninjau teknik clustering yang paling signifikan dalam WSN berdasarkan tujuan mereka dan dukungan mereka untuk berbagai properti jaringan seperti node

III. METHODS

Ada dua metode untuk memicu seleksi ulang: i) Metode berbasis waktu: Jaringan akan dikelompokkan ulang pada waktu tertentu untuk menyeimbangkan konsumsi sumber daya di antara node. Metode ini umumnya digunakan pada jaringan homogen yang dapat memiliki beban jaringan yang telah ditentukan sebelumnya, dan ii) Metode berbasis peristiwa: Sebuah peristiwa memicu sebagian atau seluruh jaringan untuk memilih ulang CH dan mungkin mengelompokkan ulang, melebihi ambang batas penggunaan sumber daya seperti energi, CPU, konsumsi bandwidth, atau konsumsi sumber daya yang tinggi dalam waktu yang ditentukan. Menggabungkan metode berbasis waktu dan berbasis peristiwa dapat digunakan untuk pengelompokan ulang juga, tergantung pada metode yang mana kondisi pengelompokan berlaku terlebih dahulu, metode yang sesuai akan dipicu.

Heterogenitas Node: Heterogenitas adalah faktor penting dalam WSN dan generasi baru jaringan yang dibantu oleh WSN seperti Internet of Things (IoT) [45], [46]. Karena jaringan heterogen adalah hal yang umum di berbagai aplikasi jaringan ad-hoc [47], [48] mengelola heterogenitas menjadi lebih menantang di WSN [15], [47], [49]. Selain itu, karena jaringan IoT yang dibantu WSN sebagian besar heterogen [24], [50], merancang teknik untuk mengelola WSN semacam itu membutuhkan lebih banyak perhatian. mendukung heterogenitas node dalam teknik pengelompokan dapat melibatkan berbagai jenis node dan menggunakan kemampuan mereka untuk meningkatkan efisiensi jaringan. Heterogenitas dapat muncul dalam sumber daya yang berbeda seperti energi, daya komputasi, antarmuka jaringan, dll. Setiap node yang kaya sumber daya dapat digunakan untuk membantu node lain melakukan tugas seperti transmisi data. Di sisi lain, node yang memiliki sumber daya terbatas harus didukung oleh node lain agar tetap hidup dan efisien untuk waktu yang lebih lama.

Tabel 2: Statistik karakteristik dan Tujuan dari teknik pengelompokan yang disurvei

Karakteristik		Jumlah Makalah
Dukungan Heterogenitas	Tidak	38 (17.6%)
	Ya	177 (82.4%)
Peran CH	Relay	19 (8.8%)
	Fusi	177 (82.6%)
	Relay dan Fusi	17 (7.9%)
Perutean Antar-Cluster	Langsung (D)	59 (27.4%)
	Multi-Hop (M)	147 (68.3%)
	Keduanya	9 (4.1%)
Dukungan Mobilitas	Tidak	185 (85.7%)
	Ya	30 (14.3%)
Tujuan	Konsumsi Energi (E)	204 (94.8%)
	Penyeimbangan Beban (L)	60 (27.9%)
	Keandalan (R)	4 (1.8%)
	Penundaan (D)	28 (13%)
	Jitter (J)	3 (1.3%)
	Throughput (T)	26 (12%)
	Rasio pengiriman paket (Y)	31 (14.4%)
	Mengoptimalkan Paket yang Diterima oleh BS (P)	35 (16.2%)
	Meningkatkan Konektivitas (C)	9 (4.1%)
	Meningkatkan Cakupan (O)	11 (5.1%)
	Toleransi kesalahan (F)	17 (7.9%)
	Stabilitas (B)	8 (4.6%)
	Skalabilitas (A)	37 (17.2%)
	Manajemen mobilitas (M)	2 (0.9%)
	Meningkatkan Keamanan (S)	5 (2.3%)
Dukungan Lapisan Fisik (U)	8 (3.7%)	
Mendukung Multi Sink (K)	4 (1.8%)	

Menggunakan node dengan sumber daya terbatas dalam tugas bersama seperti transmisi data dapat menyebabkan berbagai masalah seperti penipisan energi, masalah QoS, kegagalan node, dll. Heterogenitas dapat memberikan dampak yang tinggi pada efisiensi jaringan dengan berbagi sumber daya yang tersedia dari node yang berbeda untuk melakukan suatu tugas. Di sisi lain, jaringan heterogen menghadapi banyak tantangan dalam mengelola dan mengalokasikan sumber daya secara efisien. Dalam teknik clustering, heterogenitas node merupakan keuntungan dalam memilih CH, karena node yang memiliki lebih banyak sumber daya lebih tepat untuk menjadi CH. Di sisi lain, memilih node terbaik sebagai CH perlu mempertimbangkan heterogenitas node yang berbeda. parameter heterogenitas yang membuat prosedur menjadi lebih rumit dan memakan sumber daya karena adanya biaya tambahan. Umumnya, sumber daya energi dalam WSN dianggap sebagai parameter heterogenitas, tetapi daya pemrosesan, kecepatan transmisi, antarmuka jaringan, dll. Dapat dianggap sebagai jenis heterogenitas lain dalam jaringan.

Peran CH: Sebagai node yang paling penting dari setiap cluster, tugas CH dapat mempengaruhi kinerja teknik clustering. Teknik clustering yang berbeda menggunakan CH sebagai relay yang mengubah sifat metode yang diusulkan dari clustering ke teknik routing. Menilai peran CH dapat membantu membedakan teknik clustering yang merangkai routing. Hal ini menunjukkan apa peran utama dari CH dalam sebuah cluster dan juga dalam jaringan. Sebuah CH dapat memiliki peran yang berbeda seperti hanya merelay data ketika melakukan routing, atau menggabungkan data. Meskipun WSN sering menggunakan CH sebagai agregator data, fuser dan manajer cluster, tugas yang lebih rumit dapat ditugaskan ke CH dalam aplikasi jaringan yang berbeda. Oleh karena itu, menentukan peran CH dalam teknik clustering dapat membantu memilih teknik clustering yang lebih baik untuk digunakan di lingkungan dan aplikasi jaringan yang berbeda.

Perutean Antar Klaster: Menggunakan perutean antar-cluster dapat memungkinkan teknik pengelompokan untuk mendukung fusi data hirarkis, caching, kompresi dan penyeimbangan beban yang lebih baik, konsumsi energi, dll. Salah satu tujuan utama dari perutean Inter-cluster juga menyediakan infrastruktur jaringan yang terhubung yang dapat dihubungkan oleh anggota dari berbagai cluster tanpa menggunakan BS. Perutean inter-cluster memungkinkan CH untuk mengirim data melalui CH lain secara tidak langsung ke BS, daripada transmisi data langsung ke BS. Metode routing antar cluster dapat datang dengan metode routing bawaan mereka atau mereka dapat menggunakan metode umum seperti AODV. Menggunakan inter-cluster routing dapat memungkinkan jaringan untuk menghubungkan cluster yang menghasilkan menghubungkan anggota cluster sebagai jaringan ad-hoc untuk meningkatkan efisiensi dengan berbagi sumber daya dan menjalankan tugas-tugas yang terdistribusi. Kami tidak mempertimbangkan perutean Intra-cluster dalam evaluasi kami, karena ini terutama digunakan untuk meningkatkan konsumsi energi dibandingkan dengan perutean Inter-cluster yang menyediakan koneksi di antara cluster yang menghasilkan koneksi ke semua node jaringan. Dalam hal perutean, kami Fokusnya terletak pada teknik pengelompokan yang dapat menyediakan lebih banyak koneksi di antara node, tetapi tujuan utama dari Intra-cluster routing adalah meningkatkan konsumsi sumber daya

Mobilitas: Mobilitas adalah salah satu faktor yang paling penting untuk mengevaluasi kemampuan penerapan teknik pengelompokan dalam WSN karena sejumlah besar aplikasi WSN bersifat mobile [249]. Mobilitas dapat mempengaruhi kinerja jaringan dalam hal, misalnya, konektivitas dan QoS. Hal ini terkait dengan mendukung node yang bergerak dalam pengelompokan. Teknik clustering yang dapat menangani mobilitas lebih cocok dengan jaringan yang sangat dinamis. Dalam survei kami, teknik clustering mendukung mobilitas jika diterapkan pada jaringan di mana sebagian besar node bergerak. Jika satu-satunya node yang bergerak adalah (adalah) BS dalam sebuah metode, maka metode tersebut tidak dianggap sebagai metode pendukung mobilitas dalam survei kami karena BS bergerak, dalam skenario seperti itu, adalah untuk memudahkan pembuatan cluster dan pengumpulan data cluster. Dengan kata lain, ini adalah fitur tambahan dari teknik clustering agar lebih efisien, tetapi pada kenyataannya, tidak banyak aplikasi dunia nyata di mana BS adalah satu-satunya mobile node.

IV. RESULTS

Clustering telah dimanfaatkan sebagai teknik manajemen topologi yang umum di WSN. Meskipun pengelompokan terutama dikenal sebagai teknik untuk meningkatkan beberapa pendekatan clustering yang dapat menyelesaikan berbagai tantangan jaringan kerja, seperti load balancing, QoS, keamanan, dan manajemen mobilitas. Dalam makalah ini, kami mensurvei tujuan dari teknik clustering di WSN untuk menunjukkan arah teknik clustering saat ini, lebih dari 20 tahun setelah memperkenalkan teknik clustering yang penting. Kami juga meninjau karakteristik jaringan yang berbeda yang dapat didukung oleh clustering, misalnya heterogenitas dan mobilitas. Sebanyak 210 teknik pengelompokan ditinjau untuk menganalisis tujuan dan karakteristik jaringan secara statistik. Seperti yang kami harapkan, hasilnya menunjukkan bahwa tujuan terpenting dari penggunaan teknik clustering adalah konsumsi energi, tetapi juga digunakan untuk mencapai lebih dari 17 tujuan lainnya. Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar teknik clustering yang ada tidak dapat mendukung infrastruktur jaringan yang heterogen dan mobile. Mengingat bahwa beberapa aplikasi membutuhkan dukungan karakteristik jaringan seperti itu, diperlukan lebih banyak upaya untuk mengatasi tantangan heterogenitas dan mobilitas melalui pengelompokan. Sebagai tambahan, hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun teknik clustering berfokus pada konsumsi energi dan peningkatan load balancing, teknik ini dapat mengatasi tantangan yang lebih beragam. Kesempatan ini dapat mendorong para ilmuwan untuk menerapkan clustering dalam memecahkan tantangan jaringan lainnya

V. DISCUSSION

Parameter yang paling penting adalah tujuan desain dari teknik clustering. Tujuan menunjukkan bagaimana metode ini dapat meningkatkan efisiensi jaringan. Sebuah teknik clustering dapat dirancang untuk mendukung tujuan

yang berbeda secara bersamaan atau fokus pada satu tujuan. Kelompok tujuan dari teknik clustering tercantum di bawah ini. Selain itu, solusi umum yang diusulkan oleh teknik clustering untuk mencapai tujuan dan mengatasi tantangan jaringan dijelaskan untuk setiap tujuan bersama dengan beberapa contoh dari tabel 1. Perlu disebutkan bahwa daftar tujuan dan solusi di dalam daftar termasuk yang paling relevan, tetapi juga jika tujuan teknik clustering tidak ada dalam daftar tujuan yang paling umum, maka akan ditambahkan di depan teknik clustering.

1. **Konsumsi energi (E):** Sebagai tujuan yang paling penting dalam WSN, teknik clustering ditujukan untuk menyeimbangkan konsumsi energi dan meningkatkan masa pakai jaringan. Tugas yang paling banyak memakan energi dalam WSN adalah mentransfer data dari node ke BS [51]. Sebagai jaringan ad-hoc, WSN Node-node dapat menggunakan rute untuk mentransfer data (agregat) ke BS yang dapat menyebabkan konsumsi energi yang tidak seimbang, karena node-node perantara mengkonsumsi lebih banyak energi daripada yang lain dengan meneruskan dan / atau menggabungkan paket. Komunikasi langsung menyebabkan konsumsi energi yang tinggi karena Persamaan 1 yang membuat komunikasi langsung lebih menarik meskipun ada kerumitan dalam menentukan untuk mengoptimalkan rute. Untuk mengoptimalkan konsumsi energi dengan menggunakan teknik clustering.
2. **Penyeimbangan Beban (L):** Penyeimbangan beban adalah tujuan terpenting kedua dari teknik clustering di WSN berdasarkan Tabel 2. Umumnya, teknik clustering menggunakan jenis metode membagi dan menaklukkan untuk mentransfer data dari node ke BS. Beban data yang tinggi untuk ditransfer dalam WSN dapat mengakibatkan konsumsi energi yang tidak seimbang, kemacetan jaringan, kehilangan data, dan ketidakefisienan dalam mendukung aplikasi yang bersifat real-time dan intensif data. Dalam teknik clustering, load balancing juga dapat mengatasi "Hot spot problem" yang merupakan masalah umum pada WSN [13], [52]. Masalah Hot spot adalah situasi di mana beberapa node dalam jaringan mentransfer volume data yang lebih tinggi daripada yang lain. Load balancing akan menjadi tantangan untuk mendistribusikan aliran paket, yang dihasilkan di lapisan bawah di antara forwarder untuk ditransfer ke lapisan atas dan BS. Oleh karena itu, dalam komunikasi tidak langsung, setiap rute dari lapisan bawah ke BS dapat mentransfer jumlah data yang seimbang untuk mendukung penyeimbangan beban berdasarkan sumber daya yang digunakan bersama melalui rute tersebut. Mentransfer lebih banyak data dengan membantu node dengan lebih banyak sumber daya adalah solusi dalam jaringan heterogen, tetapi masih ada beberapa tantangan untuk mendukung penyeimbangan beban, terutama dalam komunikasi tidak langsung hirarkis antara CH dan BS. Sebagai contoh, menentukan rute terbaik berdasarkan jenis sumber daya bersama yang berbeda untuk mendukung tujuan tertentu.
3. **Kualitas Layanan:** Untuk mendukung QoS di WSN, berbagai aspek harus dipertimbangkan, seperti mengoptimalkan jitter, throughput, dan meminimalkan penundaan, dll. Mendukung QoS di WSN sebagai jaringan ad-hoc selalu menjadi masalah yang menantang. Berikut ini, kami akan membahas solusi yang ada terkait masing-masing parameter QoS.

Second Author: <https://orcid.org/0000-0xx2-8xx0-xx26>

Third Author: -

REFERENCES

- [1] M. Faris, M. N. Mahmud, M. F. M. Salleh, and A. Alnoor, "Wireless sensor network security: A recent review based on state-of-the-art works," *Int. J. Eng. Bus. Manag.*, vol. 15, 2023, doi: 10.1177/18479790231157220.
- [2] 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.
- [3] S. S. Vellela and R. Balamanigandan, "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.
- [4] M. Malik, V. K. Gahlawat, R. S. Mor, and A. Hosseinian-Far, "Towards white revolution 2.0: challenges and opportunities for the industry 4.0 technologies in Indian dairy industry," *Oper. Manag. Res.*, vol. 17, no. 3, pp. 811–832, 2024, doi: 10.1007/s12063-024-00482-4.
- [5] Y. Li, Q. Fan, H. Huang, Z. Han, and Q. Gu, "A Modified YOLOv8 Detection Network for UAV Aerial Image Recognition," *Drones*, vol. 7, no. 5, 2023, doi: 10.3390/drones7050304.
- [6] F. P. Eka Putra, Amir Hamzah, W. AgeI, and R. O. Firmansyah Kusuma, "Impelementasi Sistem Keamanan Jaringan Mikrotik Menggunakan Firewall Filtering dan Port Knocking," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 82–87, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.329.
- [7] M. Alipio and M. Bures, "A cache-aware congestion control mechanism using deep reinforcement learning for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 166, 2025, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103678.
- [8] F. P. Eka Putra, F. I. Maulana, N. M. Akbar, and W. Febriantoro, "Twitter sentiment analysis about economic recession in indonesia," 2023. doi: 10.31763/businta.v7i1.592.
- [9] W. Robert, M. Bounabi, and A. Badr, "Leveraging AI in Mixed Hierarchical Topologies to Improve WSN: A Survey," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.58496/bjn/2025/005.
- [10] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and S. N. R. Barokah, "Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [11] S. Arul Jothi, R. Venkatesan, and V. Santhi, "Rule-Based Outlier Detection with a Modified Variational AutoEncoder for Enhancing Data Accuracy in Wireless Sensor Networks," *Int. J. Fuzzy Syst.*, vol. 25, no. 6, pp. 2187–2202, 2023, doi: 10.1007/s40815-023-01496-z.
- [12] 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.
- [13] P. C. Shaker Reddy and Y. Sucharitha, "A Design and Challenges in Energy Optimizing CR-Wireless Sensor Networks," *Recent Adv. Comput. Sci. Commun.*, vol. 16, no. 5, 2022, doi: 10.2174/2666255816666221104115024.
- [14] R. Liang *et al.*, "Towards Effective Detection of Ponzi Schemes on Ethereum with Contract Runtime Behavior Graph," *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, vol. 34, no. 4, 2025, doi: 10.1145/3707458.
- [15] F. P. E. Putra, S. Syirofi, D. Wahid, and A. M. Syam, "Security Analysis And Data Recovery On Large-Scale Computer Networks," 2025. doi: 10.47709/brilliance.v5i1.6276.
- [16] F. P. Eka Putra, F. Muslim, N. Hasanah, Holipah, R. Paradina, and R. Alim, "Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 63–72, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.
- [17] Y. Tay, M. Dehghani, D. Bahri, and D. Metzler, "Efficient Transformers: A Survey," *ACM Comput. Surv.*, vol. 55, no. 6, 2023, doi: 10.1145/3530811.
- [18] S. Venkatasubramanian and R. Mohankumar, "DDoS attack detection in WSN using modified BGRU with MFO model," *Adv. Appl. Gener. AI Nat. Lang. Process. Model.*, pp. 286–305, 2023, doi: 10.4018/9798369305027.ch014.
- [19] N. Moussa, E. Nurellari, and A. El Belrhiti El Alaoui, "A novel energy-efficient and reliable ACO-based routing protocol for WSN-enabled forest fires detection," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 14, no. 9, pp. 11639–11655, 2023, doi: 10.1007/s12652-022-03727-x.
- [20] M. Dener, C. Okur, S. Al, and A. Orman, "WSN-BFSF: A New Data Set for Attacks Detection in Wireless Sensor Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 2, pp. 2109–2125, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3292209.
- [21] M. Faris, M. N. Mahmud, M. F. M. Salleh, and A. Alnoor, "Wireless sensor network security: A recent review based on state-of-the-art works," *Int. J. Eng. Bus. Manag.*, vol. 15, 2023, doi: 10.1177/18479790231157220.
- [22] O. A. Amodu, U. A. Bukar, R. A. Raja Mahmood, C. Jarray, and M. Othman, "Age of Information minimization in UAV-aided data collection for WSN and IoT applications: A systematic review," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 216, 2023, doi: 10.1016/j.jnca.2023.103652.
- [23] S. Tumula *et al.*, "An opportunistic energy-efficient dynamic self-configuration clustering algorithm in WSN-based IoT networks," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 37, no. 1, 2024, doi: 10.1002/dac.5633.
- [24] M. Gurupriya, C. S. Vasavi, G. Ramasamy, and B. Karthikeyan, "Combinatorial Bat Optimization for WSN with Hoover Index Clustering," 2023 *Int. Conf. Next Gener. Electron. NEleX 2023*, 2023, doi: 10.1109/NEleX59773.2023.10421682.
- [25] A. Islam, N. F. M. Zawawi, and S. A. Wahab, "Rethinking survival, renewal, and growth strategies of SMEs in Bangladesh: the role of spiritual leadership in crisis situation," *PSU Res. Rev.*, vol. 8, no. 1, pp. 19–40, 2024, doi: 10.1108/PRR-02-2021-0010.
- [26] 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.
- [27] S. Verma, S. Zeadally, S. Kaur, and A. K. Sharma, "Intelligent and Secure Clustering in Wireless Sensor Network (WSN)-Based Intelligent Transportation Systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 23, no. 8, pp. 13473–13481, 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3124730.
- [28] M. M. Azari *et al.*, "Evolution of Non-Terrestrial Networks from 5G to 6G: A Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 24, no. 4, pp. 2633–2672, 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3199901.
- [29] B. Saoud, I. Shayea, M. H. Azmi, and A. A. El-Saleh, "New scheme of WSN routing to ensure data communication between sensor nodes based on energy warning," 2023, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.aej.2023.08.058.
- [30] M. Almkaddad and R. Zentar, "Characterization of recycled dredged Sediments: Toward circular economy in road construction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 402, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132974.
- [31] M. K. Senapati, O. Al Zaabi, K. Al Hosani, K. Al Jaafari, C. Pradhan, and U. Ranjan Muduli, "Advancing Electric Vehicle Charging Ecosystems With Intelligent Control of DC Microgrid Stability," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 60, no. 5, pp. 7264–7278, 2024, doi: 10.1109/TIA.2024.3413052.

- [32] Y. D. Xue *et al.*, "Serviceability evaluation of highway tunnels based on data mining and machine learning: A case study of continental United States," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 142, 2023, doi: 10.1016/j.tust.2023.105418.
- [33] X. Zhou and J. Yang, "Status of the high-intensity heavy-ion accelerator facility in China," *AAPPS Bull.*, vol. 32, no. 1, 2022, doi: 10.1007/s43673-022-00064-1.
- [34] M. Chen and Y. Tan, "SF-FWA: A Self-Adaptive Fast Fireworks Algorithm for effective large-scale optimization," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 80, 2023, doi: 10.1016/j.swevo.2023.101314.
- [35] T. Srividya, P. R. Kannan Rajkumar, M. Sivasakthi, A. Sujitha, and R. Jeyalakshmi, "A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00812.
- [36] S. S. Vellela and R. Balamanigandan, "Optimized clustering routing framework to maintain the optimal energy status in the wsn mobile cloud environment," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 83, no. 3, pp. 7919–7938, 2024, doi: 10.1007/s11042-023-15926-5.
- [37] S. Kaviarasan and R. Srinivasan, "Developing a novel energy efficient routing protocol in WSN using adaptive remora optimization algorithm," *Expert Syst. Appl.*, vol. 244, 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.122873.
- [38] K. Anusha *et al.*, "HOEEACR: Hybrid Optimized Energy-Efficient Adaptive Clustered Routing for WSN," *IETE J. Res.*, vol. 70, no. 7, pp. 6027–6039, 2024, doi: 10.1080/03772063.2023.2298510.
- [39] A. V. Agrawal, L. P. Magalur, S. G. Priya, A. Kaur, G. Singh, and S. Boopathi, "Smart precision agriculture using IoT and WSN," *Handb. Res. Data Sci. Cybersecurity Innov. Ind. 4.0 Technol.*, pp. 524–541, 2023, doi: 10.4018/978-1-6684-8145-5.ch026.
- [40] S. Suma Christal Mary, K. Murugeswari, S. Jyothi Shri, and N. Senthamilarasi, "A secure and effective data aggregation in WSN for improved security and data privacy," *Rev. Comput. Eng. Res.*, vol. 10, no. 3, pp. 83–95, 2023, doi: 10.18488/76.v10i3.3494.
- [41] M. Karthikeyan, D. Manimegalai, and K. RajaGopal, "Firefly algorithm based WSN-IoT security enhancement with machine learning for intrusion detection," 2024, *nature.com*. doi: 10.1038/s41598-023-50554-x.
- [42] J. B. Fernandes, B. Gopi, M. A. Shariff, M. R. Pasha, S. Srinivasan, and S. P. Maniraj, "Reliable and Efficient Routing for Water Quality Monitoring in Underwater WSN," *2024 2nd Int. Conf. Comput. Commun. Control. IC4 2024*, 2024, doi: 10.1109/IC457434.2024.10486620.
- [43] M. Shahid *et al.*, "Link-Quality-Based Energy-Efficient Routing Protocol for WSN in IoT," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 70, no. 1, pp. 4645–4653, 2024, doi: 10.1109/TCE.2024.3356195.
- [44] M. Gurupriya, C. S. Vasavi, G. Ramasamy, and B. Karthikeyan, "Combinatorial Bat Optimization for WSN with Hoover Index Clustering," *2023 Int. Conf. Next Gener. Electron. NEleX 2023*, 2023, doi: 10.1109/NEleX59773.2023.10421682.
- [45] Á. Garcia, A. Bregon, and M. A. Martínez-Prieto, "Digital Twin Learning Ecosystem: A cyber-physical framework to integrate human-machine knowledge in traditional manufacturing," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 25, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101094.
- [46] F. P. E. Putra, D. A. Siswoyo, M. I. A. Yaqin, and R. Oktavia, "Tinjauan Regulasi Siber dan Kebijakan Keamanan Jaringan 5G: Perspektif Nasional dan Internasional," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.6141.
- [47] S. Jothi Lakshmi and M. Karishma, "A Modified DSR Protocol Using Deep Reinforced Learning for MANETS," *IETE J. Res.*, vol. 70, no. 5, pp. 4628–4639, 2024, doi: 10.1080/03772063.2023.2223168.
- [48] M. Y. Arafat and S. Moh, "A Q-Learning-Based Topology-Aware Routing Protocol for Flying Ad Hoc Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 3, pp. 1985–2000, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3089759.
- [49] L. Nie, X. Wang, Q. Zhao, Z. Shang, L. Feng, and G. Li, "Digital Twin for Transportation Big Data: A Reinforcement Learning-Based Network Traffic Prediction Approach," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 896–906, 2024, doi: 10.1109/TITS.2022.3232518.
- [50] Y. Shen, Y. Fu, and M. Song, "Digital finance promotes sustainable total factor eco-efficiency: evidence from China," *Appl. Econ.*, vol. 56, no. 36, pp. 4389–4403, 2024, doi: 10.1080/00036846.2023.2211337.
- [51] A. G. Fareed, F. De Felice, A. Forcina, and A. Petrillo, "Role and applications of advanced digital technologies in achieving sustainability in multimodal logistics operations: A systematic literature review," *Sustain. Futur.*, vol. 8, 2024, doi: 10.1016/j.sfr.2024.100278.
- [52] F. Prasetyo, M. N. Arifin, and A. Irmawan, "Optimization of Mobile Ad Hoc Network DSDV and OLSR Using Evolutionary Algorithm for Elearning induction mode," 2020, *core.ac.uk*. doi: 10.17977/um072v2i12020p1-8.

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