

## Sistem Cross Layer pada Protokol Zigbee untuk Peningkatan Efisiensi Energi dan QoS

Hariani Ma'tang Pakka<sup>1\*)</sup>

<sup>1</sup> Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia, Makassar, Indonesia

\*Penulis korespondensi, E-mail: [hariani.m@umi.ac.id](mailto:hariani.m@umi.ac.id)

### Abstrak

Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) telah mengubah sistem operasi Internet of Things (IoT), dengan melibatkan sejumlah node sensor yang terhubung. Tantangan signifikan dalam Jaringan Sensor Nirkabel meliputi efisiensi energi, daya tahan baterai, paket drop, kualitas layanan (QoS), pengelolaan memori, mobilitas, dan kapasitas komputasi. Mobilitas menyebabkan tingginya frekuensi data drop, dapat mempengaruhi kelengkapan dan kualitas Informasi. Hal ini dapat menyebabkan peningkatan delay, media access delay, dan beban yang menghambat kinerja jaringan. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengurangi paket drop, meningkatkan efisiensi energi, dan meningkatkan kinerja QoS dengan protokol Zigbee IEEE 802.15.4. Pendekatan lintas lapisan (Cross-Layer) digunakan dalam mengintegrasikan MAC dan lapisan fisik dengan desain yang mengoptimalkan semua parameter. Penelitian ini menggunakan OPNET Modeler 14.5 untuk proses simulasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konsep cross-layer yang diusulkan lebih efisien daripada pendekatan tradisional dalam hal Throughput, Delay, Media Access Delay, Load, dan data Drop.

*Kata kunci: Jaringan Sensor Nirkabel, Konsep Cross-layer, Zigbee, OPNET, Data drop, QoS, Efisiensi Energi*

### Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) have revolutionized the framework of the Internet of Things (IoT) by incorporating numerous interconnected sensor nodes. Key challenges in WSNs encompass energy efficiency, battery longevity, packet loss, Quality of Service (QoS), memory management, mobility, and computational capacity. Mobility introduces a heightened frequency of data loss, potentially compromising the integrity and quality of information, thereby leading to increased delays, media access delays, and loads that impede network performance. The primary aim of this study is to mitigate packet loss, enhance energy efficiency, and elevate QoS performance through the utilization of the Zigbee IEEE 802.15.4 protocol. This article presents a novel Cross-Layer methodology that integrates the MAC and physical layers, designed to optimize all parameters. The study employs OPNET Modeler 14.5 for simulation purposes. Simulation outcomes demonstrate that the proposed cross-layer approach outperforms traditional methods in terms of throughput, delay, media access delay, load, and data loss.

*Keywords Wireless Sensor Networks, Cross-layer Concept, Zigbee, OPNET, Data Drop, Quality of Service (QoS), Energy Efficiency.*

### 1. Pendahuluan

WSN merupakan jaringan nirkabel ad-hoc yang terdiri dari banyak sensor nirkabel yang digunakan untuk mengumpulkan dan memonitor sistem, fisik, atau factor lingkungan, serta diterapkan dalam berbagai aplikasi [1]. Perkembangan aplikasi IoT yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir, menyebabkan WSN digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi penting seperti bangunan pintar, perawatan kesehatan, keamanan dan pengawasan, hiburan, pelacakan lingkungan perkotaan, pemantauan konstruksi sipil, pemantauan lingkungan, pertanian, pengawasan hewan, aplikasi industri,

transportasi dan logistik, Smart Grid, dan sistem kontrol energi [2].

WSN memudahkan dalam pemrosesan data, analisis, penyimpanan, dan penambangan. Penelitian terdahulu telah mengatasi berbagai tantangan dalam WSN seperti efisiensi energi, daya tahan baterai, keamanan, perubahan topologi, QoS, dan mengembangkannya dengan konsep yang berbeda. Mobilitas node dapat menyebabkan data drop, yang dapat mempengaruhi kelengkapan dan kualitas

informasi yang diterima. Mobilitas node sensor menyebabkan peningkatan kebutuhan energi, paket kontrol, dan delay [3][4].

Mobilitas node sensor juga dapat menyebabkan perubahan topologi dalam jaringan, yang dapat mengakibatkan terputusnya tautan antara node. Hal ini mengakibatkan data drop sehingga paket data harus dikirim ulang. Akibatnya, konsumsi energi meningkat dan masa pakai jaringan dapat berkurang.

Konsep cross-layer digunakan untuk meminimalkan data drop, mengoptimalkan efisiensi energi, dan meningkatkan kualitas layanan (QoS) dalam jaringan sensor nirkabel (WSN). Informasi dari berbagai lapisan protokol dapat digunakan secara terintegrasi untuk mengambil keputusan yang lebih cerdas dalam manajemen jaringan, sehingga meningkatkan performa jaringan secara keseluruhan. Desain cross-layer diterapkan dalam jaringan sensor nirkabel (WSN) dengan protokol Zigbee IEEE 802.15.4. Metode ini digunakan dalam penelitian didasarkan pada lapisan MAC (Media Access Control) dan fisik, dengan tujuan mengoptimalkan parameter jaringan melalui pendekatan desain yang cermat.

Konsep cross-layer memungkinkan interaksi langsung antara protokol yang berada pada tingkat yang tidak berdekatan dalam lapisan jaringan.

Dalam jaringan sensor nirkabel (WSN), desain cross-layer bermanfaat untuk efisiensi energi, maksimalisasi masa pakai jaringan, kinerja yang optimal, deteksi peristiwa yang andal, dan transfer data yang efisien [5]. Cross-layer yang diusulkan dapat meminimalkan data drop dan meningkatkan efisiensi energi, kinerja QoS dibandingkan dengan metode tradisional WSN.

F. Lin et al. memberikan tiga strategi desain baru untuk meminimalkan latensi dan waktu transmisi secara bersamaan di WSN selain metode tradisional [5].

U. Bodakunta et al. membahas berbagai metodologi desain lintas lapisan dalam jaringan sensor nirkabel, beberapa pendekatan lintas lapisan yang dilakukan oleh para peneliti, serta beberapa tantangan yang dihadapi dalam menerapkan pendekatan lintas lapisan dalam WSN [6].

K. R. Rao et al. membahas formulasi ilmiah penggunaan energi dengan meneliti fading kanal skala kecil dan pengaruhnya terhadap efisiensi energi. Selanjutnya, dengan menggabungkan fading lokal dan yang berskala besar, penulis mempresentasikan strategi lintas lapisan berdasarkan jaringan kolaboratif dan lapisan fisik [7].

C. Y. Haw et al. memberikan pemeriksaan kualitatif terhadap dua teknik lintas lapisan dalam jaringan sensor nirkabel. Dengan memeriksa beberapa topologi jaringan yang diusulkan, fleksibilitas dan kinerja dari kedua sistem tersebut dapat dibandingkan [8].

D. Kafetzis et al. melakukan pemeriksaan menyeluruh terhadap beberapa metodologi desain lintas lapisan dalam jaringan Sensor Radio Kognitif (CR) [9].

S. He et al. mengimplementasikan pendekatan lintas lapisan pada protokol routing Dymo untuk meningkatkan kualitas layanan (QoS) pada Jaringan Nirkabel Bergerak (MANET) [10].

G. V. Subbaiah et al. menyarankan penggunaan protokol perutean CR-DYMO yang mengintegrasikan kerangka kerja CogNS untuk meningkatkan kualitas layanan (QoS) pada berbagai skala jaringan, dengan mengoptimalkan parameter yang dapat disesuaikan [11].

P. P. Bhat menggunakan metode cross-layer untuk meningkatkan throughput di WSN, dan mobile node F dimonitor dengan pendekatan Mobility Error Prediction [12].

B. Tiwari menggunakan kerangka kerja optimisasi untuk meminimalkan probabilitas packet dropping dan mengoptimalkan kinerja energy harvesting di jaringan sensor nirkabel (WSN) [13].

I. K. Shah et al. dan Y. Choi et al. mengusulkan protokol Mobile Sink-routing-Gi yang disempurnakan pada jaringan sensor nirkabel (WSN) untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi jumlah data drop [14][15].

## 2. Metode

Tumpukan protokol berlapis standar menghalangi interaksi antara lapisan yang tidak berdekatan, sehingga membatasi aplikasinya dalam WSN [5]. Karena mobilitas yang tinggi dan topologi jaringan ad-hoc yang berubah-ubah, metode berlapis tradisional tidak bekerja secara efektif.

Metode Desain Lapisan Silang (CLD) membantu mengubah paradigma tradisional tumpukan protokol berlapis air terjun yang biasa digunakan dalam protokol jaringan. CLD tidak menghapus struktur berlapis yang umum, tetapi memungkinkan interaksi antara lapisan yang tidak berdekatan. Metode ini memungkinkan lapisan yang berbeda berkomunikasi langsung satu sama lain melalui komunikasi antar lapisan, sehingga menghilangkan duplikasi dan meningkatkan efisiensi.

Dengan mengumpulkan dan menerima data dari beberapa lapisan, CLD juga membantu dalam mendefinisikan perilaku data. CLD meningkatkan fungsionalitas jaringan nirkabel, kualitas layanan, mobilitas, dan keamanan berbagi informasi di semua tingkatan.

Dalam sistem Cross-Layer Design (CLD), beberapa lapisan seperti MAC-fisik, MAC-jaringan, dan jaringan-transportasi digabungkan. Dengan mengintegrasikan fungsionalitas dari beberapa lapisan dalam tumpukan protokol, teknik CLD dapat meningkatkan efisiensi energi, kualitas layanan (QoS), masa pakai jaringan, dan faktor lainnya. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan CLD.

Idealnya, parameter Zigbee harus diperbarui menggunakan nilai yang diperoleh secara eksperimental atau melalui adaptasi dinamis untuk jaringan dengan perubahan topologi yang sering terjadi. Dalam pendekatan yang diusulkan, CLD diimplementasikan pada protokol Zigbee di OPNET Modeler. Lapisan fisik menggunakan daya yang ditransmisikan, sedangkan lapisan MAC menggunakan Durasi Tunggu ACK yang disetel menggunakan nilai yang diperoleh secara eksperimental untuk meningkatkan efisiensi energi, QoS, dan masa pakai jaringan, serta meminimalkan kehilangan data, penundaan, dan beban. Metode CLD ini mengubah model tradisional tumpukan protokol bertingkat menjadi lebih fleksibel. CLD memungkinkan interaksi langsung antara lapisan yang berbeda dalam jaringan, mengurangi duplikasi dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan. Proses CLD melibatkan integrasi lapisan untuk meningkatkan kualitas layanan dan efisiensi, memungkinkan komunikasi antar lapisan, dan meningkatkan fungsionalitas dengan menggabungkan fitur-fitur dari beberapa lapisan.

Dalam penelitian ini, penerapan CLD pada protokol Zigbee menunjukkan peningkatan dalam berbagai aspek seperti efisiensi energi, kualitas layanan, masa pakai jaringan, dan mengurangi data drop serta delay. Pendekatan ini memungkinkan sistem jaringan nirkabel untuk menyesuaikan diri dengan mobilitas tinggi dan topologi jaringan yang dinamis secara lebih efisien.

### SIMULASI DAN KONFIGURASI

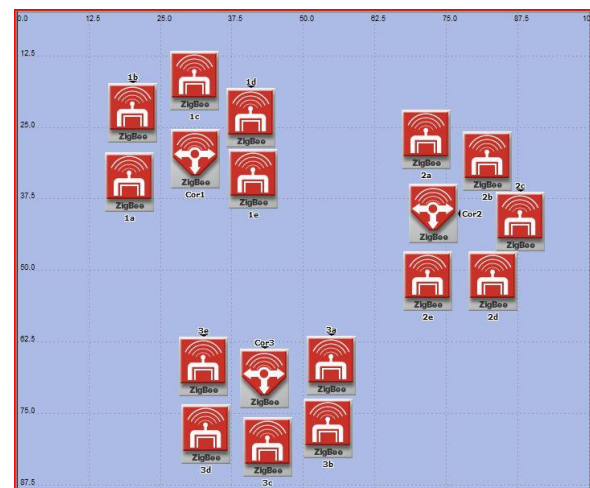
Skenario yang ditunjukkan pada gambar 2, menyelidiki fungsi mobile node Zigbee yang dijangkau melalui radius Personal Area Network (PAN) yang berbeda. ID PAN 1,2, dan 3 ditetapkan ke 3 PAN dalam jaringan. Sebuah mobile node juga ditambahkan ke jaringan, termasuk ID PAN-nya yang dipilih untuk ditugaskan secara otomatis dan pertama kali akan ditempatkan di sebelah PAN 1. Daya pancar dari ketiga PAN telah diatur ke 2 Mw untuk menghindari interferensi di antara zona cakupan mereka.

Mobile node\_1 diatur untuk melewati setiap zona cakupan dari tiga PAN dalam waktu 20 menit. Berdasarkan jalur ini, mobile\_node\_1 diproyeksikan pertama kali memasuki PAN\_1, kemudian beralih ke PAN\_2, dan akhirnya berada di PAN\_3. Node akan memilih node secara acak di dalam PAN mereka ketika mereka bergabung dengan jaringan dan mengirimkan trafik ke node tersebut selama percobaan berlangsung. Mobile node\_1 diatur untuk mengirimkan trafik ke node induk. Kecuali mobile\_node\_1, semua trafik dikirim ke tujuan secara acak. Saat memasuki jaringan, mereka akan memilih node acak dalam PAN mereka dan mengirimkan trafik ke node tersebut untuk diuji. Node induk siap menerima trafik dari mobile\_node\_1. Parameter simulasi diatur sesuai dengan Tabel 1 berikut.

Table 1. Parameter simulasi Opnet 14.5 Modeler

|    | Parameter                           | Nilai    |
|----|-------------------------------------|----------|
| 1  | Ukuran Paket                        | 1024     |
| 2  | Durasi waktu ACK (detik)            | 0.05     |
| 3  | Jumlah Transmisi ulang              | 5        |
| 4  | Jumlah minimum Backoffs eksponensia | 3        |
| 5  | Jumlah maksimum Backoffs            | 4        |
| 6  | Durasi Chanel Sensing               | 0.1      |
| 7  | Pita frekuensi Transmisi            | 2450 MHz |
| 8  | Kecepatan Transmisi Data            | 250 Kbps |
| 9  | Daya Pancar                         | 0.03     |
| 10 | Jumlah PANs                         | 3        |

### Topologi Skenario Simulasi

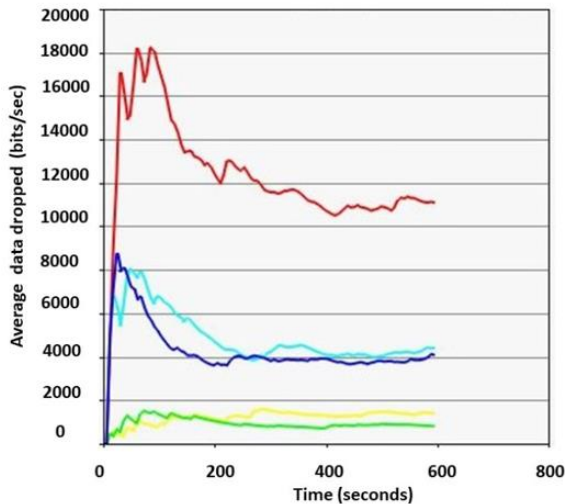


Gambar 2. Skenario Simulasi Perpindahan Node

Skenario simulasi perpindahan node dengan OPNET 14.5 untuk Sistem Cross Layer pada Protokol Zigbee melibatkan pengaturan awal yang mencakup parameter seperti daya transmisi dan Durasi Tunggu ACK sesuai dengan metode CLD. Selama simulasi, perpindahan node atau perubahan topologi jaringan yang dinamis diperhitungkan, termasuk pergerakan node, penambahan atau penghapusan node, dan perubahan koneksi antar node. Efisiensi energi dari setiap node dievaluasi dengan memperhitungkan penggunaan daya transmisi yang disesuaikan dengan kondisi jaringan yang berubah, sementara QoS dipantau untuk memastikan performa jaringan tetap optimal. Skenario ini memungkinkan evaluasi tentang bagaimana implementasi Sistem Cross Layer pada Protokol Zigbee dengan pendekatan CLD dapat meningkatkan efisiensi energi dan kualitas layanan dalam menghadapi dinamika jaringan nirkabel yang sering berubah.

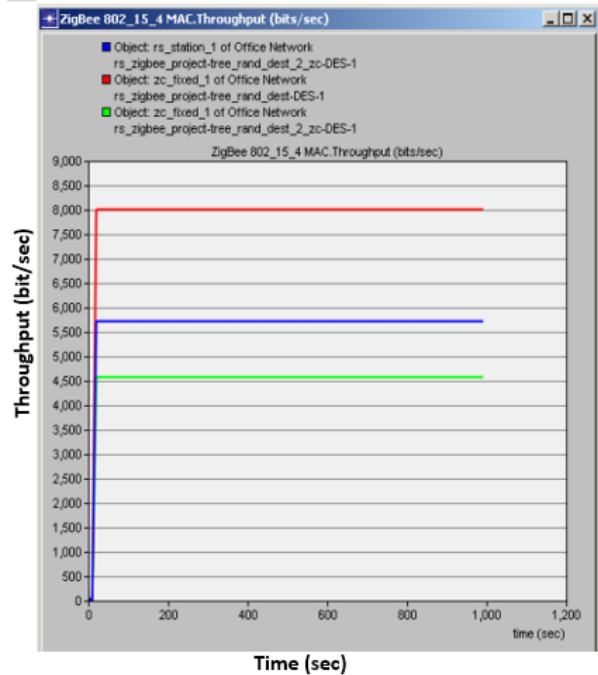
### 3. Hasil dan Pembahasan

- A. Data Drop - Ambang Batas Transmisi Ulang (bit/detik)  
Seperti yang terlihat pada Gambar 3, jumlah data drop lebih tinggi (430 bit/detik) dalam pendekatan tradisional daripada pendekatan lintas lapisan yang diusulkan (343 bit/detik). Karena jumlah data drop minimal dalam pendekatan lintas lapisan, energi dan kualitas layanan (QoS) dapat dioptimalkan.



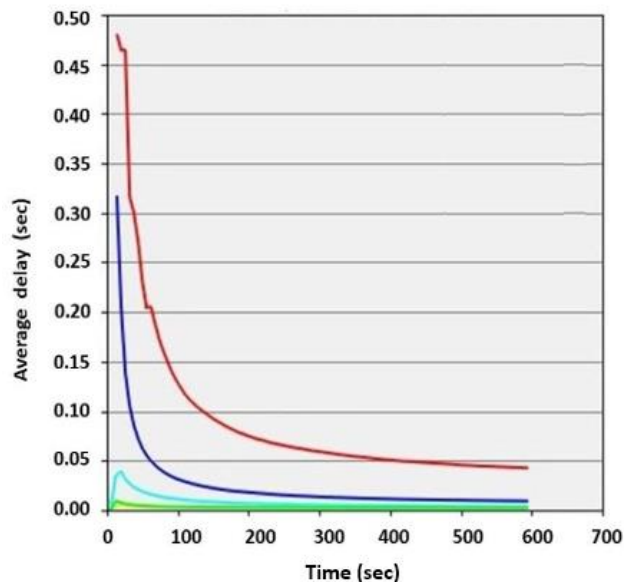
Gambar 3. Data Drop (bits/sec)

- B. Throughput (bits/sec)  
Seperti yang terlihat pada Gambar 4, Throughput meningkat secara signifikan (17.015 bit/detik) dalam pendekatan cross-layer yang diusulkan dibandingkan dengan pendekatan tradisional (15.785 bit/detik). Kinerja jaringan meningkat karena Throughput yang lebih tinggi pada metode cross-layer.



Gambar 4. Throughput (bit/sec)

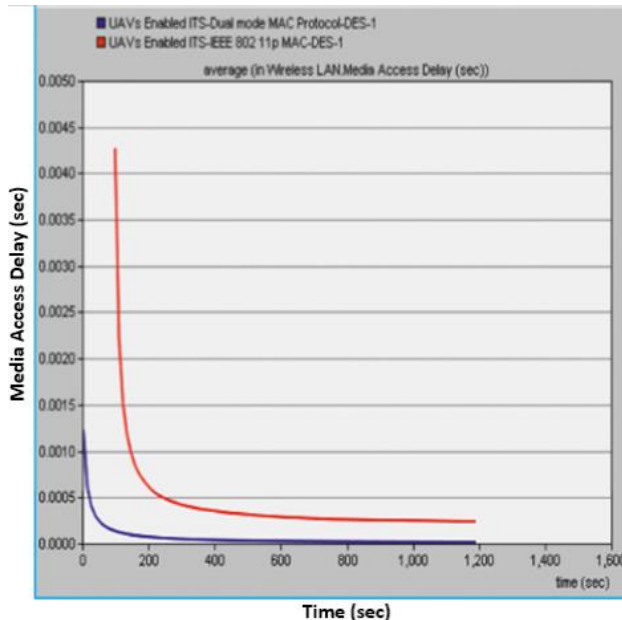
- C. Delay (sec)  
Seperti yang terlihat pada Gambar 5, jumlah delay jauh lebih rendah (0,012 detik) dalam pendekatan lintas lapisan yang diusulkan dibandingkan dengan pendekatan tradisional (0,016 detik). Penurunan delay ini menyebabkan peningkatan Efisiensi Energi dan Kualitas Layanan (QoS) dalam pendekatan lintas lapisan.



Gambar 5. Delay (second)

- D. Media Access Delay (sec)  
Seperti yang terlihat pada Gambar 6, jumlah media access delay jauh lebih rendah (0,035 detik) dalam pendekatan lintas lapisan yang diusulkan dibandingkan

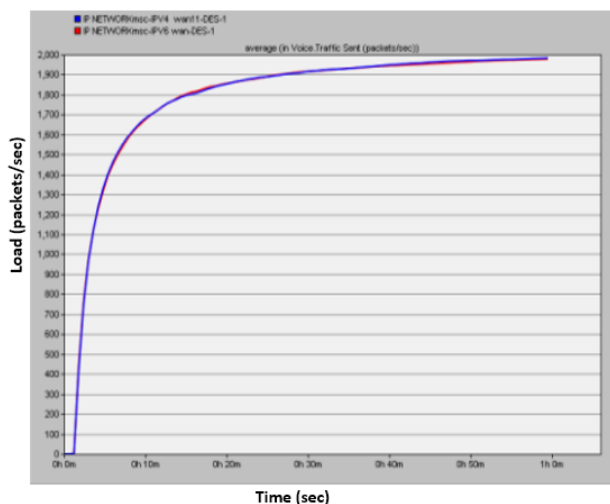
dengan metode tradisional (0,045 detik). Penurunan nilai ini mengakibatkan peningkatan Efisiensi Energi dan Kualitas Layanan (QoS) dalam pendekatan lintas lapisan.



Gambar 6. Medium Access Delay (second)

#### E. Load (packets/sec)

Seperti yang terlihat pada Gambar 7, beban jaringan (load) jauh lebih tinggi (16.351 packets /detik) dalam pendekatan lintas lapisan yang diusulkan dibandingkan dengan pendekatan tradisional (16.190 packets /detik).



Gambar 7. Beban Jaringan (Load)

## 4. Kesimpulan

Dalam Jaringan Sensor Nirkabel (WSN), putus sambungan terjadi karena mobilitas node, yang dapat menyebabkan data drop sehingga mempengaruhi kualitas informasi yang diterima.

Implementasi lintas lapisan yang diusulkan dalam Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) meningkatkan kinerja Kualitas Layanan (QoS), efisiensi energi, masa pakai jaringan, dan meminimalkan jumlah data drop selama mobilitas dengan mengoptimalkan parameter jaringan. Hasilnya menunjukkan bahwa jumlah data drop lebih sedikit dibandingkan dengan pendekatan tradisional, yang mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan kinerja Kualitas Layanan (QoS). Demikian pula, delay dan media access delay, yang meningkatkan performa secara keseluruhan. Jumlah throughput menunjukkan hasil yang lebih tinggi daripada pendekatan tradisional, sehingga secara keseluruhan dapat meningkatkan kinerja jaringan. Penelitian ini dapat dikembangkan dengan menerapkan pemodelan prediktif dan teknik komputasi lunak dalam Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) untuk mengoptimalkan kinerja jaringan, efisiensi energi, dan mengurangi jumlah data drop.

## Referensi

- [1] A. E. Osorio, E. A. G. Sánchez, G. F. García, S. F. H. Machuca, and P. S. L. Lozano, "Evaluation of Wireless Network Based on ZigBee Technology Using XBee Modules," 2019.
- [2] Y. Li, Y. Xu, T. Wang, Z. Yang, and A. Integrated, "Contact-Aware Dual-Layer CHORD for Peer-to-Peer Distribution in Integrated Satellite-Terrestrial Networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 1, pp. 790–804, 2022, doi: 10.1109/TVT.2021.3126799.
- [3] J. Feng, H. Chen, X. Deng, S. Member, L. T. Yang, and F. Tan, "Confident Information Coverage Hole Prediction and Repairing for Healthcare Big Data Collection in Large-Scale Hybrid Wireless Sensor Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 23, pp. 16801–16813, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2020.3045024.
- [4] S. Computing, B. D. Computing, and T. Congress, "A Survey of Key Issues in UAV Data Collection in the Internet of Things," pp. 410–413, 2020, doi: 10.1109/DASC-PICOM-CBDCom-CyberSciTech49142.2020.00079.
- [5] F. Lin, W. Dai, W. Li, Z. Xu, and L. Yuan, "A Framework of Priority-Aware Packet Transmission Scheduling in Cluster-Based Industrial Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 16, no. 8, pp. 5596–5606, 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2944980.
- [6] U. Bodakunta and A. R. Naseer, "Internet of Aquatic Powered by an Efficient Cross-Layer Technique in Underwater Wireless Sensor Networks," *2022 IEEE 2nd Int. Conf. Mob. Networks Wirel. Commun.*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/ICMNWC56175.2022.10031779.
- [7] K. R. Rao, M. Zia, U. Rahman, B. N. K. Reddy, and K. P. Satamraju, "Sensor signal processing Genetic Algorithm for Cross-Layer-Based Energy Hole Minimization in Wireless Sensor Networks," *IEEE Sensors Lett.*, vol. 6, no. 12, pp. 1–4, 2022, doi: 10.1109/LENS.2022.3219857.
- [8] C. Y. Haw and A. Awang, "A Performance Study on the Ad-hoc Routing Protocol Used in the Cross-Layer Design for Wireless Sensor Network," *2020 8th Int. Conf. Intell. Adv. Syst.*, pp. 1–6, doi:

- 10.1109/ICIAS49414.2021.9642695.
- [9] D. Kafetzis, S. Vassilaras, and S. Member, "Software-Defined Networking Meets Software-Defined Radio in Mobile ad hoc Networks : State of the Art and Future Directions," pp. 9989–10014, 2022.
- [10] S. He, Z. An, S. Member, J. Zhu, and S. Member, "Cross-Layer Optimization : Joint User Scheduling and Beamforming Design With QoS Support in," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 71, no. 2, pp. 792–807, 2023, doi: 10.1109/TCOMM.2022.3226487.
- [11] G. V. Subbaiah, B. V Subbayamma, M. Arun, B. Pavithra, and V. G. Krishnan, "Implementation of QoS-Improved Region Based Routing Protocol ( QoS-IRBRP ) to Enhance Energy Efficiency in MANET," *2022 8th Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Syst.*, vol. 1, pp. 1136–1140, 2022, doi: 10.1109/ICACCS54159.2022.9785148.
- [12] P. P. Bhat, "Node localization and performance analysis using Pelican Optimization Algorithm in WSN," *2023 14th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol.*, pp. 1–7, 2023, doi: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10308133.
- [13] B. Tiwari, "Load balancing Technique toward Congestion minimization in WSN-enabled-Healthcare," *2021 IEEE Int. Conf. Technol. Res. Innov. Betterment Soc.*, pp. 1–7, doi: 10.1109/TRIBES52498.2021.9751667.
- [14] I. K. Shah, T. Maity, Y. S. Dohare, D. Tyagi, D. Rathore, and D. S. Yadav, "ICIC : A Dual Mode Intra-Cluster and Inter-Cluster Energy Minimization Approach for Multihop WSN," *IEEE Access*, vol. 10, no. June, pp. 70581–70594, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3188684.
- [15] Y. Choi and S. Member, "A Review of Energy Hole Mitigating Techniques in Multi-Hop Many to One Communication and Its Significance in IoT Oriented Smart City Infrastructure," *IEEE Access*, vol. 11, no. October, pp. 121340–121367, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3327311.