

Pengembangan Sistem Telemetry Berbasis IoT Untuk Monitoring Suhu dan Turbiditas Air Tambak

Waliyur Rohman^{1)*} , Rafli Hidayatullah²⁾ 

¹⁾²⁾Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾waliyurrohman08@gmail.com, ²⁾raflypamekasan@gmail.com

Abstrak

Kualitas air merupakan aspek penting dalam keberhasilan pembudidayaan perikanan kolam, terutama parameter suhu serta kejernihan yang secara langsung memengaruhi kondisi fisiologis organisme budidaya. Monitoring kualitas air yang masih dilakukan secara manual mempunyai keterbatasan dalam hal kontinuitas dan kecepatan akses data. Penelitian ini ditujukan untuk mengembangkan sistem telemetry berbasis Internet of Things (IoT) sebagai solusi pemantauan parameter air kolam secara real-time dan jarak jauh. Sistem dirancang menggunakan sensor suhu dan sensor kekeruhan yang terintegrasi dengan pengendali mikro serta modul komunikasi nirkabel untuk pengiriman data ke server berbasis internet. Data hasil pengukuran ditampilkan melalui platform monitoring berbasis web sehingga dapat diakses kapan saja oleh pengguna. Metode penelitian meliputi perancangan perangkat keras, pembuatan piranti lunak, dan evaluasi performa sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pengukuran parameter air dengan tingkat akurasi yang baik serta transmisi data yang stabil. Sistem yang dikembangkan dapat memberikan informasi kondisi kualitas air secara berkelanjutan dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan tepat dalam pengelolaan kolam. Dengan demikian, sistem telemetry berbasis IoT ini berpotensi meningkatkan efisiensi dan produktivitas pembudidayaan perikanan kolam.

Kata Kunci: Internet of Things (IoT), sistem telemetry, temperatur air, kekeruhan air

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

I. PENDAHULUAN

Budidaya perikanan tambak merupakan salah satu subsektor yang memiliki peran strategis dalam mendukung ketahanan pangan serta peningkatan kesejahteraan komunitas pesisir. Keberhasilan kegiatan budidaya sangat dipengaruhi oleh efektivitas pengelolaan kualitas air, karena perubahan parameter fisik dan kimia perairan dapat memberikan dampak langsung terhadap pertumbuhan, kesehatan, dan kelangsungan hidup organisme budidaya [1], [2], [3], [4]. Di antara berbagai parameter kualitas air, suhu dan kekeruhan merupakan komponen fundamental yang wajib dipantau secara kontinu. Suhu air memengaruhi laju metabolisme, nafsu makan, serta sistem imun organisme akuatik, sehingga kekeruhan yang tinggi dapat menurunkan intensitas cahaya yang tertransmisikan ke dalam air, meningkatkan akumulasi partikel tersuspensi, serta menjadi indikator awal penurunan kualitas lingkungan tambak.

Pada praktiknya, pemantauan suhu dan turbiditas air tambak masih banyak dilakukan secara manual menggunakan alat ukur portabel dengan interval waktu tertentu. Metode ini memiliki sejumlah keterbatasan, seperti ketidakmampuan dalam menyediakan data secara real-time, tingginya ketergantungan pada kehadiran operator, serta potensi kesalahan pencatatan data [5], [6]. Selain itu, fluktuasi suhu dan turbiditas dapat terjadi secara cepat akibat perubahan cuaca, aktivitas pemberian pakan, maupun proses biologis di dalam tambak, sehingga pemantauan yang tidak kontinu berisiko menyebabkan keterlambatan dalam pengambilan tindakan korektif.

Evolusi teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan integrasi sensor, mikrokontroler, beserta jaringan komunikasi untuk membangun sistem pemantauan yang cerdas dan terotomatisasi [7], [8], [9], [10]. Sistem telemetry berbasis IoT mampu melakukan akuisisi data lingkungan secara periodik, mengirimkan data melalui jaringan internet, serta menyajikannya dalam bentuk informasi yang mudah diakses melalui platform berbasis web atau aplikasi. Penerapan teknologi ini pada sektor budidaya perikanan memberikan peluang potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi, pengelolaan tambak melalui pemantauan kondisi air secara real-time dan berkelanjutan.

Dengan mempertimbangkan permasalahan tersebut, penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem telemetry berbasis IoT untuk melakukan pemantauan suhu dan kekeruhan air tambak [11], [12], [13], [14]. Sistem yang dikembangkan dirancang untuk mampu melakukan pengukuran secara akurat, pengiriman data yang stabil, serta

*Waliyur Rohman

penyajian informasi yang informatif bagi pengguna. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi solusi teknologi yang aplikatif dalam mendukung pengelolaan kualitas air tambak yang lebih efektif dan berkelanjutan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kualitas Air pada Budidaya Tambak

Kualitas air adalah elemen penting yang menentukan keberhasilan budidaya perikanan tambak. Kondisi fisik, kimia, dan biologis perairan harus berada pada kisaran optimal agar organisme budidaya dapat bertumbuh dan berkembang secara optimal. Parameter kualitas air yang sering dijadikan indikator utama antara lain suhu, kekeruhan turbiditas, pH, oksigen terlarut, dan salinitas [15], [16], [17], [18]. Ketidaksesuaian salah satu parameter tersebut dapat menyebabkan stres, penurunan nafsu makan, hingga kematian organisme budidaya. Dengan demikian, pemantauan kualitas air secara berkala dan terus-menerus menjadi kebutuhan krusial dalam sistem pengelolaan tambak modern.

2.2 Suhu Air dalam Budidaya Perikanan

Suhu air berpengaruh langsung terhadap proses fisiologis organisme akuatik, seperti metabolisme, pertumbuhan, dan sistem kekebalan tubuh. Setiap jenis organisme budidaya memiliki kisaran suhu optimal yang berbeda. Perubahan suhu yang terlalu cepat atau berada di luar batas toleransi dapat menyebabkan stres termal dan menurunkan tingkat kelangsungan hidup [19], [20], [21], [22]. Selain itu, suhu air juga memengaruhi kelarutan oksigen terlarut serta aktivitas mikroorganisme di dalam tambak. Oleh sebab itu, pengukuran suhu air secara real-time sangat diperlukan untuk menjaga kestabilan lingkungan budidaya.

2.3 Turbiditas Air Tambak

Turbiditas merupakan ukuran tingkat kekeruhan air yang disebabkan oleh partikel tersuspensi, seperti lumpur, sisa pakan, dan mikroorganisme. Tingkat turbiditas yang tinggi dapat menghambat penetrasi cahaya matahari ke dalam air, yang pada akhirnya menghambat proses fotosintesis fitoplankton. Di samping itu, tingkat kekeruhan yang tinggi berpotensi menurunkan kualitas air dan menjadi indikator awal pencemaran atau ketidakseimbangan ekosistem tambak [23], [24], [25], [26]. Oleh karena itu, pemantauan turbiditas secara kontinu penting guna mengidentifikasi perubahan kondisi kualitas air dan mencegah dampak negatif terhadap organisme budidaya.

2.4 Sistem Telemetri

Sistem telemetri merupakan pemantauan jarak jauh yang memungkinkan data dari sensor dikumpulkan dan dikirimkan ke pusat pemantauan melalui media komunikasi tertentu. Dalam konteks monitoring lingkungan, sistem telemetri digunakan untuk memperoleh data secara otomatis dan kontinu tanpa memerlukan kehadiran langsung operator di lokasi pengukuran [27], [28], [29], [30], [31]. Penerapan sistem telemetri pada tambak menjadikan pemantauan kualitas air lebih efisien, presisi, dan berlangsung secara real-time.

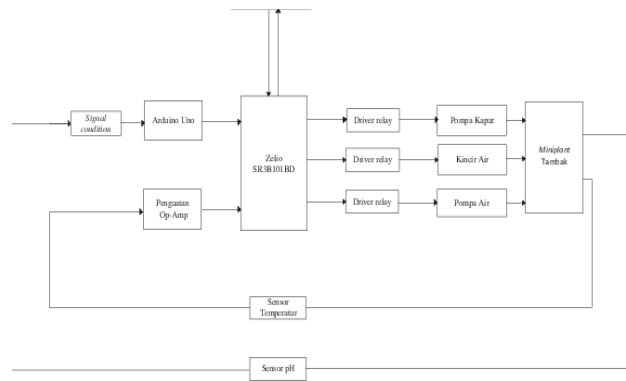
2.5 Internet of Things IoT dalam Monitoring Lingkungan

Internet of Things IoT merupakan konsep integrasi perangkat fisik berbasis sensor, aktuator, dan konektivitas jaringan untuk saling bertukar data melalui internet. Teknologi IoT banyak diterapkan dalam sistem monitoring lingkungan karena kemampuannya dalam mengumpulkan, mengirimkan, serta menyajikan data secara real-time [32], [33]. Dalam bidang perikanan, IoT memungkinkan pengelolaan tambak yang lebih cerdas dengan menyediakan informasi kondisi lingkungan secara berkelanjutan dan dapat diakses dari jarak jauh.

III. METODE

1. Desain Sistem

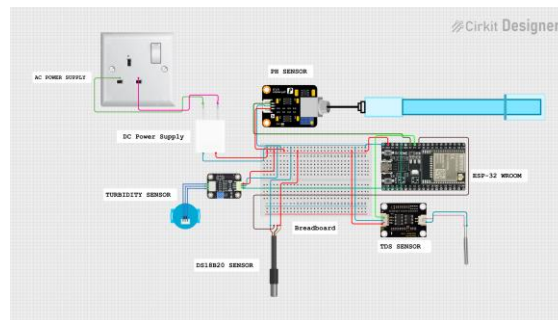
Tahap desain sistem meliputi perancangan struktur arsitektur sistem secara keseluruhan, yang terdiri dari sensor, mikrokontroler, modul komunikasi, server, dan antar muka pengguna. Sensor suhu dan sensor turbiditas digunakan sebagai perangkat input untuk mengukur parameter kualitas air [34], [35], [36]. Data hasil pengukuran diproses oleh mikrokontroler, kemudian dikirimkan ke server melalui jaringan internet menggunakan modul komunikasi nirkabel. Data yang diterima server selanjutnya ditampilkan dalam bentuk grafik dan informasi numerik pada platform monitoring berbasis web.



Gambar. 1 Blok Diagram

2. Desain Perangkat Keras

Komponen perangkat keras sistem meliputi sensor suhu air, sensor turbiditas, mikrokontroler seperti esp8266 atau esp32, serta modul komunikasi wifi. Sensor ditempatkan pada media air tambak untuk melakukan pengukuran secara langsung. Mikrokontroler berfungsi sebagai pusat pengolahan data dan pengendali komunikasi [37], [38], [39]. Seluruh komponen dirangkai dan diuji untuk memastikan sistem dapat bekerja secara stabil dan berkelanjutan.



Gambar. 2 Based Smart Water Quality Monitoring System

3. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan untuk mengatur proses pembacaan sensor, pengolahan data, serta pengiriman data ke server. Selain itu, dibuat antarmuka pengguna berbasis web yang berfungsi untuk menyajikan data suhu dan kekeruhan secara real-time dalam bentuk grafik dan tabel [40], [41], [42], [43]. Sistem juga dirancang untuk melakukan penyimpanan data ke dalam basis data sebagai arsip pemantauan.

4. Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk menilai performa sistem meliputi akurasi hasil sensor, stabilitas transmisi data, dan tampilan data pada antarmuka pengguna [44], [45], [46]. Hasil pengukuran sistem dibandingkan dengan alat ukur standar untuk mengetahui tingkat ketidakakuratan pengukuran. Selain itu, dilakukan pengujian konektivitas untuk memastikan sistem mampu mengirimkan data secara langsung dan terus-menerus [47], [48], [49], [50], [51].

IV. HASIL

A. Implementasi Sistem Telemetri Berbasis IoT

Sistem telemetri berbasis teknologi Internet of Things IoT yang dikembangkan berhasil diimplementasikan selaras dengan rancangan yang telah disusun. Sistem terdiri dari sensor suhu air dan sensor turbiditas yang terintegrasi dengan mikrokontroler dan modul komunikasi nirkabel. Seluruh komponen mampu bekerja secara sinkron untuk melakukan proses akuisisi data, proses pengolahan dan pengiriman data ke server melalui koneksi internet. Informasi yang dikirimkan selanjutnya ditampilkan pada platform monitoring berbasis web secara real-time.

B. Hasil Pengukuran Suhu Air

Pengujian sensor suhu dilakukan dengan membandingkan output sensor dengan alat ukur standar pada beberapa kondisi lingkungan air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor suhu mampu mengukur suhu air tambak dengan tingkat kestabilan yang memadai. Nilai temperature yang terpantau selama pengujian berada pada kisaran yang sesuai

untuk kegiatan budidaya tambak. Selisih pengukuran antara sensor dan alat ukur standar relatif kecil, sehingga sensor dinilai layak digunakan untuk pemantauan suhu air secara real-time.

C. Hasil Pengukuran Turbiditas Air

Pengujian sensor turbiditas dilakukan dengan mengamati perubahan nilai kekeruhan air pada beberapa kondisi yang bervariasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor turbiditas mampu mengidentifikasi perubahan tingkat kekeruhan air secara akurat. Peningkatan kekeruhan air ditunjukkan oleh kenaikan nilai turbiditas yang terbaca oleh sensor. Hal ini menunjukkan bahwa sensor dapat dimanfaatkan sebagai indikator awal terhadap perubahan kualitas air tambak akibat aktivitas biologis atau lingkungan.

D. Pengujian Pengiriman Data dan Monitoring

Pengujian sistem telemetri menunjukkan bahwa data suhu dan turbiditas berhasil dikirimkan ke server secara real-time dengan interval pengiriman yang konsisten. Tampilan data pada antarmuka web dapat diakses dengan baik dan menampilkan informasi dalam bentuk numerik dan grafik. Selama pengujian, sistem mampu beroperasi secara stabil tanpa gangguan komunikasi yang signifikan.

E. Evaluasi Kinerja Sistem

Berdasarkan hasil pengujian secara keseluruhan, sistem telemetri berbasis IoT yang dikembangkan mampu menjalankan fungsi monitoring suhu dan turbiditas air tambak secara real-time dan jarak jauh. Sistem ini dinilai efektif dalam memberikan informasi kondisi kualitas air secara cepat dan konsisten, sehingga dapat mendukung penggunaan dalam proses pengambilan keputusan terkait pengelolaan tambak.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem telemetri berbasis teknologi IoT yang dikembangkan berkapabilitas untuk melakukan monitoring parameter suhu serta turbiditas air tambak secara langsung real-time dan jarak jauh. Integrasi antara sensor, mikrokontroler, dan modul komunikasi nirkabel berjalan dengan baik, sehingga data kualitas air dapat diperoleh secara kontinu dan ditampilkan pada platform monitoring berbasis web. Hal ini membuktikan bahwa penerapan teknologi IoT dapat menjadi solusi efektif untuk mengatasi keterbatasan metode pemantauan kualitas air secara manual yang selama ini banyak digunakan pada budidaya tambak.

Pengukuran suhu air menunjukkan tingkat kestabilan dan konsistensi data yang baik. Selisih hasil pengukuran antara sensor dan alat ukur standar relatif kecil, sehingga sensor suhu yang digunakan dinilai cukup akurat untuk pemantauan lingkungan perairan. Kemampuan sistem dalam mendeteksi fluktuasi suhu secara cepat memberikan keuntungan bagi pengelola tambak dalam melakukan tindakan preventif apabila terjadi perubahan suhu yang berpotensi mengganggu kondisi organisme budidaya.

Pada pengukuran turbiditas, sistem mampu mendeteksi perubahan tingkat kekeruhan air secara responsif. Peningkatan nilai turbiditas yang terbaca oleh sensor mencerminkan adanya peningkatan partikel tersuspensi di dalam air, yang umumnya disebabkan oleh aktivitas pemberian pakan, pengadukan sedimen, atau pertumbuhan mikroorganisme. Dengan pemantauan turbiditas secara real-time, potensi penurunan kualitas air dapat diidentifikasi lebih awal, sehingga langkah pengelolaan seperti penggantian air atau pengaturan pakan dapat segera dilakukan.

Dari sisi komunikasi data, sistem telemetri menunjukkan kestabilan dalam pengiriman data ke server dengan interval yang telah ditentukan. Penyajian data dalam bentuk grafik dan nilai numerik membantu pengguna menganalisis pola perubahan kualitas air tambak. Dibandingkan dengan sistem konvensional, sistem yang dikembangkan memiliki kelebihan dalam aspek kecepatan, akurasi pemantauan, dan kemudahan akses informasi.

Meskipun demikian, sistem ini masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti ketergantungan pada kestabilan jaringan internet dan keterbatasan jumlah parameter yang dipantau. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya dapat diarahkan pada penambahan parameter kualitas air lainnya serta integrasi sistem peringatan dini untuk meningkatkan keandalan dan fungsionalitas sistem monitoring tambak.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan sistem telemetri berbasis teknologi IoT untuk monitoring parameter suhu serta turbiditas air tambak secara langsung real-time dan jarak jauh. Sistem yang dibangun mampu mengintegrasikan sensor suhu dan sensor turbiditas dengan mikrokontroler serta modul komunikasi nirkabel untuk melakukan akuisisi dan pengiriman data kualitas air secara kontinu. Hasil Pengujian membuktikan bahwa sistem menunjukkan tingkat akurasi pengukuran yang memadai dan kestabilan pengiriman data yang memadai, sehingga informasi kondisi air tambak dapat diakses secara cepat dan akurat melalui platform monitoring berbasis web. Penerapan sistem ini memberikan kemudahan dalam pemantauan kualitas air serta meningkatkan efisiensi pengelolaan tambak dibandingkan metode konvensional yang bersifat manual dan periodik. Dengan adanya pemantauan suhu dan

turbiditas secara real-time, potensi penurunan kualitas air dapat dideteksi lebih dini, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam kegiatan budidaya perikanan. Secara keseluruhan, sistem telemetri berbasis IoT yang dikembangkan berpotensi menjadi solusi teknologi yang aplikatif dan berkelanjutan untuk mendukung peningkatan produktivitas dan manajemen kualitas air tambak.

Kontribusi Penulis: Waliyur Rohman berperan dalam perancangan penelitian, pengumpulan dan analisis data, implementasi sistem, serta penulisan naskah jurnal. Rafli Hidayatullah berperan dalam supervisi penelitian dan penelaahan naskah jurnal.

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/0000-0001-9088-9088>

Penulis Kedua: <https://orcid.org/0000-0001-9088-9088>

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] N. Haidar Hari, F. P. Eka Putra, U. Hasanah, S. R. Sutarsih, and Riyan, "Transformasi Jaringan Telekomunikasi dengan Teknologi 5G: Tantangan, Potensi, dan Implikasi," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 146–150, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.357.
- [4] F. P. E. Putra, Y. Setiawan, S. Arifin, and W. Hidayatullah, "Peran VPN dalam Menjaga Privasi Pengguna Jaringan Pub-lik," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.5834.
- [5] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, and ..., "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus," 2023, *researchgate.net*. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3457.
- [6] F. P. Eka Putra, M. N. Arifin, K. Zulfana Imam, E. Saputra, and Sofiyullah, "Pengembangan Sistem Informasi Laboratorium Terintegrasi Sistem Akademik Menggunakan Agile Scrum," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 109–119, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.367.
- [7] 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.
- [8] F. P. E. Putra, D. E. Arissandi, A. Rofiqi, and M. F. Hidayat, "Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.5938.
- [9] F. P. E. Putra, M. Ghummah, M. Amrullah, and R. Hidayatullah, "Studi Kinerja Mesh Network untuk Penerapan Internet of Things (IoT) di Lingkungan Perkotaan," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.5895.
- [10] F. P. E. Putra, S. M. Dewi, Maugfiroh, and A. Hamzah, "Privasi dan Keamanan Penerapan IoT Dalam Kehidupan Sehari-Hari : Tantangan dan Implikasi," 2023. doi: 10.37034/jsisfotek.v5i2.232.
- [11] C. M. Coman, B. C. Toma, M. A. Constantiu, and A. Florescu, "Ground Level LiDAR as a Contributing Indicator in an Environmental Protection Application," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 106277–106288, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3319453.
- [12] R. Velmurugan, A. S. Mary, A. Pandikumar, P. Murugan, and B. Subramanian, "Pulsed Laser Ablation of Oxygen deficiency Enriched Superlattice Vanadium Pentoxide (V2O5) Ultrathin Nextrode aiming for Flexible Binder-less Tandem Energy Harvesting Devices," *Small*, vol. 20, no. 42, 2024, doi: 10.1002/sml.202403531.
- [13] A. A. Akhie and D. Joksimović, "Monitoring of a Productive Blue-Green Roof Using Low-Cost Sensors," *Sensors*, vol. 23, no. 24, 2023, doi: 10.3390/s23249788.
- [14] Y. Singh and T. Walingo, "Smart Water Quality Monitoring with IoT Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 24, no. 9, 2024, doi: 10.3390/s24092871.
- [15] M. Pettorali, F. Righetti, C. Vallati, S. K. Das, and G. Anastasi, "Mobility Management in TSCH-Based Industrial Wireless Networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 23, no. 9, pp. 8710–8728, 2024, doi: 10.1109/TMC.2024.3354798.
- [16] M. Zeng et al., "CellCircLoc: Deep Neural Network for Predicting and Explaining Cell Line-Specific CircRNA Subcellular Localization," *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 29, no. 2, pp. 1494–1503, 2025, doi: 10.1109/JBHI.2024.3491732.
- [17] A. C. Grilo, P. Oliveira, and R. Valadas, "Hard-state Protocol Independent Multicast—Source-Specific Multicast (HPIM-SSM)," *IET Networks*, vol. 13, no. 5–6, pp. 486–512, 2024, doi: 10.1049/ntw2.12133.
- [18] H. Issa, "Low-cost compact Wi-Fi energy harvesting rectifier using semi-lumped elements," *Eng. Res. Express*, vol. 7, no. 1, 2025, doi: 10.1088/2631-8695/adbb9d.

- [19] K. Abedi, R. Ansari, and M. K. Hassanzadeh-Aghdam, "Effects of aspect ratio and arrangement of PZT-7A piezoelectric fillers on energy harvesting performance of PVDF composite cantilevers," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 239, no. 17 Special Issue: Materials, processes, and procedures: looking for a more sustainable world, pp. 6968–6982, 2025, doi: 10.1177/09544062251343709.
- [20] N. A. Virts, T. Y. Karogodina, M. A. Panfilov, A. Y. Vorob'ev, and A. E. Moskalensky, "Prototype of Implant for Nitric Oxide Release Controlled by Infrared Radiation in Therapeutic Window," *J. Biophotonics*, vol. 18, no. 3, 2025, doi: 10.1002/jbio.202400455.
- [21] S.-P. Zhang, Y.-L. Wang, P. Huang, W.-J. Tang, T.-X. Gong, and X.-S. Zhang, "Mechanical-thermal hybrid rotational nanogenerator applied for self-powered sensing node," *Nano Energy*, vol. 136, 2025, doi: 10.1016/j.nanoen.2025.110756.
- [22] P. K. Pathak, D. G. Roy, A. K. Yadav, S. Padmanaban, F. Blaabjerg, and B. Khan, "A State-of-the-Art Review on Heat Extraction Methodologies of Photovoltaic/Thermal System," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 49738–49759, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3277728.
- [23] X. Zhou *et al.*, "Self-powered water condition monitoring system based on rotational electromagnetic generator," *Energy*, vol. 326, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.136124.
- [24] H. Benfatma, H. Khoudmi, and B. Bessedik, "Neural network and ACO algorithm-tuned PI controller for MPPT in a hybrid battery-supercapacitor energy storage system within DC micro-grid photovoltaic installations," *J. Energy Storage*, vol. 120, 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.116499.
- [25] W. M. Metwally and V. A. R. Ibrahim, "The Integration of Bio-Active Elements into Building Façades as a Sustainable Concept," *Buildings*, vol. 14, no. 10, 2024, doi: 10.3390/buildings14103086.
- [26] A. Rousseau *et al.*, "Exciton-Diffusion Enhanced Energy Capture in an Integrated Nanoscale Platform," *ACS Nano*, vol. 19, no. 15, pp. 14865–14872, 2025, doi: 10.1021/acsnano.4c18713.
- [27] S. Wang, Q. Ma, R. Wu, W. Ding, and J. Guo, "Transfer-Learning-Enabled 3D reconfigurable broadband solar metamaterial absorbers design," *Opt. Commun.*, vol. 564, 2024, doi: 10.1016/j.optcom.2024.130644.
- [28] I. N. Buang, K. Zen, and S. N. Junaini, "Optimising Connectivity and Energy: The Future of LoRaWAN Routing Protocols for Mobile IoT Applications," *Appl. Model. Simul.*, vol. 9, pp. 67–91, 2025, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-86000594480&partnerID=40&md5=da6acd9aa804b28d2514e17d7c0c5cb8>
- [29] Y. Huang *et al.*, "Edge Computing and Fault Diagnosis of Rotating Machinery Based on MobileNet in Wireless Sensor Networks for Mechanical Vibration," *Sensors*, vol. 24, no. 16, 2024, doi: 10.3390/s24165156.
- [30] N. Noprianto, T. W. Sulaiman, A. R. Alaudin, and R. B. Fitriansyah, "Perancangan Indoor Position System Berbasis Internet of Things dan Support Vector Machine," *J. Tek. Inform. dan Sist. Inf.*, vol. 10, no. 1, 2024, doi: 10.28932/jutisi.v10i1.7277.
- [31] K. Adaikalam, K. P. Marimuthu, S.-W. Lee, J.-S. Lee, and H. S. Kim, "A novel ZnO NRs/PVDF hybrid nanogenerator for wearable energy-harvesting and sensing applications," *J. Alloys Compd.*, vol. 1030, 2025, doi: 10.1016/j.jallcom.2025.180829.
- [32] T. Ma, Y. Xiao, X. Lei, and M. Xiao, "Integrated Sensing and Communication for Wireless Extended Reality (XR) with Reconfigurable Intelligent Surface," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 17, no. 5, pp. 980–994, 2023, doi: 10.1109/JSTSP.2023.3304846.
- [33] M. S. Arif, K. Abodayeah, and I. Abbas, "A machine learning-assisted computational study of heat transfer in magnetized non-Newtonian nanofluids through porous media," *Int. J. Thermofluids*, vol. 29, 2025, doi: 10.1016/j.ijft.2025.101358.
- [34] B. Mostafa and M. Molnár, "Offloaded Computation for QoS Routing in Wireless Sensor Networks," *Inf.*, vol. 16, no. 6, 2025, doi: 10.3390/info16060464.
- [35] J. Moosmann, H. Muller, N. Zimmerman, G. Rutishauser, L. Benini, and M. Magno, "Flexible and Fully Quantized Lightweight TinyissimoYOLO for Ultra-Low-Power Edge Systems," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 75093–75107, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3404878.
- [36] P. Liu, H. Xiang, and B. Zhao, "A graded E-shaped piezoelectric energy harvester for ultra-broadband and high-capability energy harvesting," *Eng. Struct.*, vol. 343, 2025, doi: 10.1016/j.engstruct.2025.121038.
- [37] O. Iqbal, V. I. T. Muro, S. Katoch, A. Spanias, and S. Jayasuriya, "Adaptive Subsampling for ROI-Based Visual Tracking: Algorithms and FPGA Implementation," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 90507–90522, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3200755.
- [38] E. Nagarathinam *et al.*, "Maximizing Solar Potential Using the Differential Grey Wolf Algorithm for PV System Optimization," *Energy Eng. J. Assoc. Energy Eng.*, vol. 121, no. 8, pp. 2129–2142, 2024, doi: 10.32604/ee.2024.052280.
- [39] S. Virumandi and P. Kumar, "Performance and Reliability Assessment of Schottky Complementary Multi-FinFET Inverter for Advanced Scaling Nodes," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 116094–116103, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3581940.
- [40] S. Boyineni, K. Kavitha, and M. Sreenivasulu, "Rapidly-exploring random tree-based obstacle-aware mobile sink trajectory for data collection in wireless sensor networks," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 15, no. 1, pp. 607–621, 2024, doi: 10.1007/s12652-023-04717-3.
- [41] S. D. Okegbile, J. Cai, J. Wu, J. Chen, and C. Yi, "A Prediction-Enhanced Physical-to-Virtual Twin Connectivity Framework for Human Digital Twin," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 11, no. 4, pp. 2440–2455, 2025, doi: 10.1109/TCCN.2024.3519331.
- [42] S. K. Chittibabu, A. Chandrasekhar, and K. Krishnamoorthi, "Smart Nb₃C MXene/Ecoflex triboelectric nanogenerator for energy harvesting and IoT-assisted visualization of color-induced behavioral responses in autism," *Chem. Eng. J.*, vol. 524, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.169292.
- [43] R. Shi *et al.*, "Research on a self-powered rolling bearing fault diagnosis method with a piezoelectric generator for self-sensing," *Appl. Energy*, vol. 376, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124206.
- [44] M. A. Taher, M. Behnamfar, A. I. I Sarwat, and M. Tariq, "Wavelet and Signal Analyzer Based High-Frequency Ripple Extraction in the Context of MPPT Algorithm in Solar PV Systems," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 113726–113740, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3426289.
- [45] X. Guan, J. Xue, H. Jiang, and G. Tian, "Multiobjective Optimization of Wireless Powered Communication Networks Assisted by Intelligent Reflecting Surface Based on Multiagent Reinforcement Learning," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 72, no. 4, pp. 3274–3281, 2024, doi: 10.1109/TAP.2024.3370195.
- [46] Y. Song, Q. Zheng, B. Liu, and X. Gao, "EEG Conformer: Convolutional Transformer for EEG Decoding and Visualization," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 31, pp. 710–719, 2023, doi: 10.1109/TNSRE.2022.3230250.
- [47] N. Gholami, N. Moghim, M. Ghazvini, and S. Haghani, "Utilizing Non-Orthogonal Multiple Access for Both Latency and Energy Efficiency Improvement in TSCH-Based WSNs," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 28922–28937, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3158225.
- [48] E. W. Ayaburi, F. K. Andoh-Baidoo, J. Lee, and M. Siponen, "Investigating the use of protective technologies after data breach: The roles of psychological distance, technological service type and organizational justice," *Comput. Secur.*, vol. 143, 2024, doi: 10.1016/j.cose.2024.103900.
- [49] O. A. Mahdi, Y. R. B. Al-Mayouf, S. S. H. Al-Obaidi, B. Alattar, H. Balogun, and S. Khan, "Hotspot Issue Handling and Reliable Data

- Forwarding Technique for Ocean Underwater Sensor Networks,” *Iraqi J. Comput. Sci. Math.*, vol. 6, no. 3, pp. 578–593, 2025, doi: 10.52866/2788-7421.1307.
- [50] S. R. Eftekhari, A. Mosallanejad, H. Pairo, and J. Rodríguez, “Efficiency Enhancement in Synchronous Reluctance Motors by Active Flux Adjustment Based on Robust Model-Based Approaches,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 127731–127748, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3440037.
- [51] F. P. E. Putra, F. Muslim, N. Hasanah, R. Paradina, and ..., “Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification,” *J. Sistim Inf.* ..., 2023, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.