



PEMANFAATAN PROTOKOL OPC UA DALAM IOT UNTUK PEMANTAUAN PENGGUNAAN LISTRIK INDUSTRI

Zainal Akbar¹, Muslimin²

¹Politeknik ATI Makassar, ²Politeknik ATI Makassar

¹zainal@atim.ac.id, ²muslimin@atim.ac.id

ABSTRAK

Industri manufaktur modern membutuhkan solusi *Internet of Things (IoT)* untuk pemantauan energi *real-time* guna mengatasi tantangan efisiensi dan interoperabilitas protokol. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan konsumsi listrik industri menggunakan Protokol *Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)* sebagai *backbone* komunikasi data yang aman dan terstruktur. Metode yang digunakan meliputi pengembangan sistem berbasis mikrokontroler dengan sensor energi digital (PZEM-004T), di mana data dikirim menggunakan format *OPC UA* PubSub berlatensi rendah. Pengujian dilakukan pada beban listrik aktual untuk menguji akurasi sensor dan kinerja protokol. Hasil pengujian menunjukkan akurasi tegangan sensor sangat tinggi. Meskipun terdapat galat minor pada pengukuran arus dan daya pada beban kecil non-linier, sistem terbukti andal untuk beban industri besar. Kinerja *OPC UA* sangat superior dengan *latency* rata-rata hanya 82 ms (beban sedang) dan Tingkat Keberhasilan Transmisi (DDR) di atas 98,5% pada semua skenario. Pemanfaatan *OPC UA* sangat cocok dan terukur untuk menjamin integritas dan kecepatan data *real-time*, memenuhi standar kebutuhan pemantauan energi dalam lingkungan Industrial *IoT*.

Kata Kunci: *OPC UA*, *IoT*, Pemantauan Energi, *Latency*, *IIoT*

1. PENDAHULUAN

Industri manufaktur modern menghadapi tantangan dalam efisiensi energi dan transparansi konsumsi daya listrik. Seiring berkembangnya teknologi *Internet of Things (IoT)*, pengawasan penggunaan listrik secara *real-time* menjadi kebutuhan utama untuk meningkatkan produktivitas dan mengurangi pemborosan energi. Salah satu tantangan utama adalah integrasi antar perangkat dari berbagai vendor dengan protokol komunikasi yang berbeda. Di sinilah peran *Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)* menjadi relevan. *OPC UA* adalah standar komunikasi industri yang mendukung interoperabilitas, keamanan data, dan fleksibilitas pengembangan. Dengan kemampuan untuk mentransmisikan data secara terstruktur dan aman, *OPC UA* sangat cocok untuk digunakan dalam sistem pemantauan energi berbasis *IoT* di lingkungan industri. Implementasi sistem ini memungkinkan perusahaan untuk memonitor konsumsi listrik secara akurat dan membuat keputusan berbasis data guna mendukung strategi efisiensi energi dan keberlanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan konsumsi listrik industri berbasis *IoT* dengan memanfaatkan protokol *OPC UA* sebagai *backbone* komunikasi data. Sistem ini dirancang agar dapat membaca, mengolah, dan mengirimkan data konsumsi listrik dari mesin-mesin industri ke platform pemantauan secara *real-time* dan aman. Selain itu, sistem ini akan diuji dari segi performa teknis, termasuk kecepatan transfer data, akurasi pembacaan energi, serta efisiensi komunikasi antar perangkat.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah menunjukkan potensi penggunaan *OPC UA* dalam sistem industri berbasis *IoT*. Penelitian oleh Ladegourdie, dkk menyoroti performa *OPC UA* dalam konteks interoperabilitas perangkat industri, menunjukkan efisiensi komunikasi dan keamanan tinggi [1][2][3].



Sementara itu, studi oleh Dahlmanns, dkk membahas tantangan implementasi *OPC UA* yang rentan terhadap kesalahan konfigurasi keamanan [4][5]. Di sisi lain, pengembangan model *Universal Energy Information Model (UEIM)* oleh IEEE ETFA menawarkan pendekatan struktur data yang lebih seragam untuk sistem energi berbasis *OPC UA* [6][7][8]. Penelitian oleh Estrada, dkk menggabungkan *OPC UA* dengan algoritma *clustering* untuk penghematan energi berbasis prediksi [9][10]. Semua studi ini menunjukkan bahwa *OPC UA* telah menjadi standar kuat dalam pengembangan sistem industri berbasis *IoT*, khususnya dalam konteks pemantauan dan manajemen energi yang berkelanjutan.

Meskipun berbagai studi telah membahas penerapan *OPC UA* dalam sistem industri, penelitian ini menghadirkan pendekatan baru dengan mengintegrasikan pengukuran konsumsi listrik secara presisi menggunakan sensor energi dan pemodelan data *OPC UA* yang dikustomisasi. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang hanya fokus pada arsitektur komunikasi atau performa jaringan.

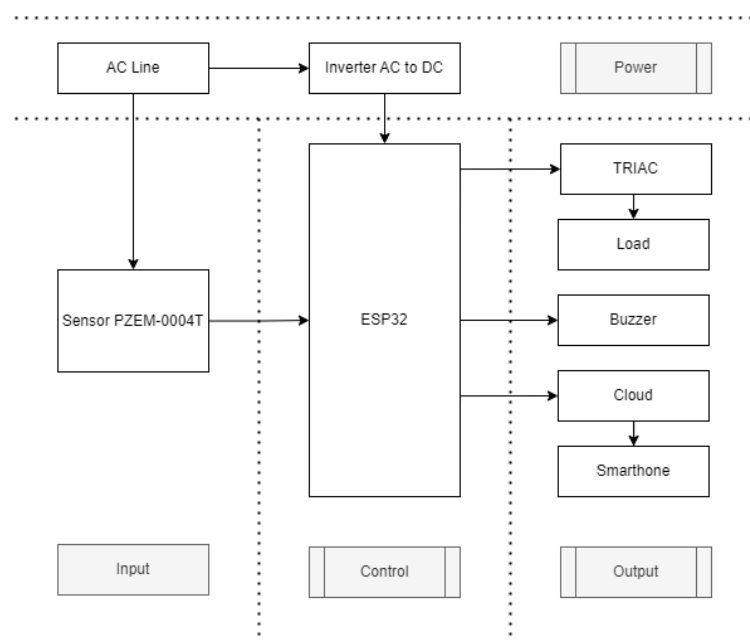
Metode yang digunakan dalam penelitian ini mencakup pengembangan sistem berbasis mikrokontroler yang terhubung dengan sensor energi digital, kemudian mengirimkan data melalui protokol *OPC UA* menggunakan format *PubSub (Publish-Subscribe) over MQTT*. Pemilihan format ini didasarkan pada kemampuan untuk menangani data secara efisien dengan latensi rendah. Sistem ini akan diuji pada lingkungan simulasi industri dengan beban listrik aktual untuk mendapatkan data yang representatif. Evaluasi dilakukan terhadap beberapa aspek, seperti keterlambatan transmisi, kehandalan komunikasi serta respons sistem terhadap gangguan jaringan.

2. METODE PENELITIAN

1. Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini melibatkan kajian komprehensif terhadap landasan teoretis dan implementasi teknologi yang membentuk sistem pemantauan listrik industri dalam konteks Revolusi Industri 4.0 dan *Industrial Internet of Things (IIoT)*. Kajian ini difokuskan pada tiga area kunci : arsitektur *IIoT* untuk energi, protokol komunikasi *OPC UA*, dan pemodelan informasi data energi.

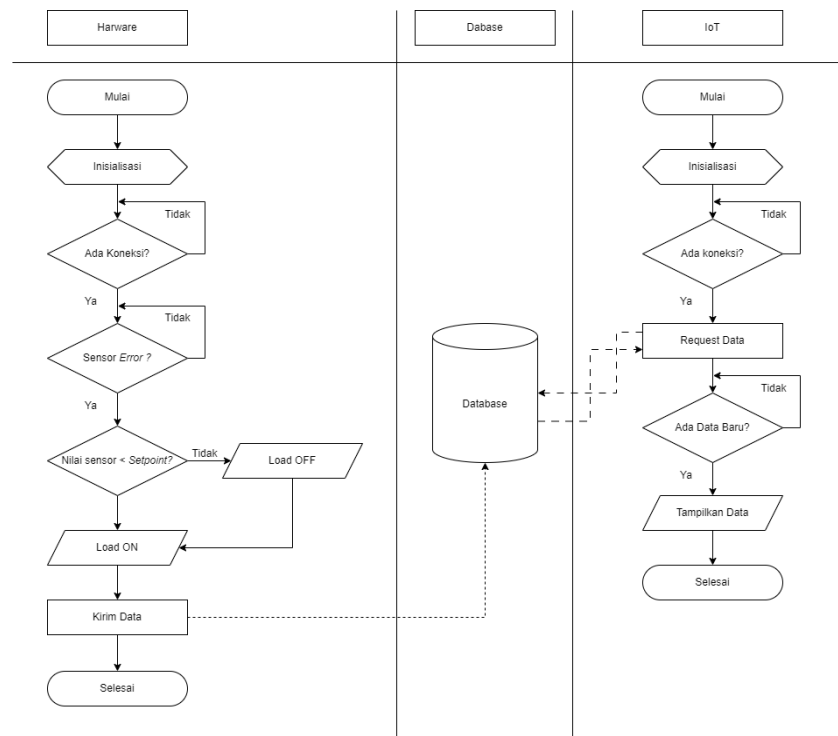
2. Perancangan Sistem



Gambar 1. Bagan Sistem

Bagan sistem ini menjelaskan arsitektur pemantauan dan kontrol listrik berbasis *IoT* yang terbagi menjadi tiga segmen utama: *Input*, *Control*, dan *Output*. Pada segmen *Input*, sumber listrik utama (*AC Line*) disalurkan ke dua jalur: pertama, ke Inverter AC to DC untuk menyuplai daya ke mikrokontroler (*Power*), dan kedua, ke Sensor PZEM-0004T yang bertugas mengukur parameter listrik secara *real-time*. Data pengukuran ini kemudian dikirimkan ke modul ESP32 di segmen *Control*. ESP32 bertindak sebagai otak sistem, memproses data input dan menghasilkan berbagai *Output*.

Output yang dihasilkan meliputi sinyal kontrol ke *TRIAC* untuk mengaktifkan atau menonaktifkan *Load* (Beban), aktivasi Buzzer untuk notifikasi lokal, serta pengiriman data ke layanan *cloud*. Data di *Cloud* dapat diakses dan sistem dapat dikendalikan dari jarak jauh melalui Smartphone oleh pengguna.



Gambar 2. Flowchart sistem

Flowchart ini menggambarkan alur kerja sistem *IoT* yang terbagi menjadi tiga proses utama: Hardware, Database, dan *IoT* (aplikasi klien/pengguna). Proses Hardware dimulai dengan Inisialisasi dan pengecekan koneksi internet. Jika koneksi tersedia, perangkat akan melakukan pengecekan Sensor Error. Jika sensor baik, sistem melanjutkan dengan membandingkan Nilai Sensor dengan Setpoint yang telah ditentukan. Jika nilai sensor lebih kecil dari Setpoint, *Load* (beban listrik) akan dihidupkan; sebaliknya, jika nilai sensor lebih besar, *Load OFF* dilakukan. Setelah tindakan kontrol (*ON/OFF*) dilakukan, perangkat akan Kirim Data ke Database (*Cloud*) dan proses selesai. Jika di awal terjadi masalah koneksi atau sensor error, proses akan terhenti dan diulang.

Sementara itu, proses *IoT* (yang dijalankan di sisi aplikasi *smartphone* atau *web*) juga dimulai dengan Inisialisasi dan pengecekan koneksi. Setelah terhubung, aplikasi akan melakukan Request Data dari Database. Aplikasi terus memeriksa apakah Ada Data Baru dari perangkat *hardware* yang dikirim ke Database. Jika ada data baru, aplikasi akan Tampilkan Data kepada pengguna (*real-time monitoring*), dan proses selesai. Jika tidak ada data baru, aplikasi akan menunggu atau mengulang permintaan data. Dengan demikian, Database berfungsi sebagai jembatan tempat perangkat Hardware mengirimkan data sensor dan *feedback Load ON/OFF*, dan aplikasi *IoT* mengambil data tersebut untuk pemantauan.

3. Implementasi Sistem

Tahap implementasi dimulai dengan menghubungkan Sensor ke *Gateway IoT* yang berfungsi sebagai *Server OPC UA* lokal. *Gateway* ini bertugas mengakuisisi data listrik (arus, tegangan, daya) dan memodelkannya sesuai struktur informasi *OPC UA*. Selanjutnya, *Gateway* mentransfer data yang terstruktur dan aman tersebut menggunakan protokol *OPC UA* melalui jaringan industri/perusahaan. Data kemudian diterima oleh server pusat atau platform *Cloud* (sebagai *Client OPC UA*), yang menyimpannya untuk pemantauan real-time dan analisis lebih lanjut.

4. Pengujian dan Pengumpulan Data

Pada tahap ini, sistem diuji pada lingkungan simulasi. Tujuannya adalah untuk mengamati performa komunikasi data *OPC UA*, mengukur keandalan, dan memverifikasi akurasi pemantauan konsumsi listrik industri secara keseluruhan.

5. Analisis dan Evaluasi

Tahap ini bertujuan menganalisis data yang terkumpul untuk mengidentifikasi pola konsumsi listrik. Selain itu, dilakukan evaluasi menyeluruh terhadap sistem, khususnya performa dan keandalan protokol *OPC UA* dalam menjamin integritas dan keamanan transmisi data pemantauan di lingkungan industri.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengukuran Kosumsi Listrik

Tabel 1. Pengukuran konsumsi listrik

| No. | Beban | Tegangan | | Arus | | Daya | |
|-----|-------------------------|----------------|------------|----------------|------------|---------------|------------|
| | | Multimeter (V) | Sensor (V) | Multimeter (A) | Sensor (A) | Wattmeter (W) | Sensor (W) |
| 1 | Server Rak (Idle) | 221.5 | 222.1 | 0.68 | 0.69 | 150 | 153 |
| 2 | Komputer Workstation 1 | 220.9 | 221.3 | 1.14 | 1.17 | 248 | 255 |
| 3 | Mesin CNC Mini | 220.1 | 221 | 2.27 | 2.35 | 450 | 465 |
| 4 | Lampu LED Lab (10 unit) | 221.8 | 222 | 0.45 | 0.46 | 55 | 58 |
| 5 | Charger Alat Ukur (x5) | 222 | 221.4 | 0.27 | 0.25 | 40 | 38 |
| 6 | Sistem HVAC/AC (Start) | 219.5 | 220.2 | 5.47 | 5.55 | 1150 | 1170 |
| 7 | Blower Ventilasi Kecil | 220.4 | 221 | 0.36 | 0.34 | 75 | 72 |
| 8 | Solder Stasiun | 220.6 | 221.1 | 0.34 | 0.32 | 70 | 68 |
| 9 | Oskiloskop Digital (x2) | 221.1 | 221.2 | 0.63 | 0.65 | 138 | 141 |
| 10 | Mesin 3D Printer | 219.8 | 220.1 | 1.36 | 1.4 | 290 | 295 |

Tabel hasil menampilkan perbandingan pengukuran konsumsi listrik antara multimeter/wattmeter (sebagai referensi) dan sensor sistem pada sepuluh jenis beban di lingkungan laboratorium. Secara umum, hasil pengukuran Tegangan menunjukkan akurasi yang sangat tinggi pada sensor, dengan selisih maksimal hanya 0,6 volt (terlihat pada mesin CNC mini). Hal ini tidak hanya membuktikan akurasi sensor tegangan, tetapi juga mencerminkan stabilitas sumber daya listrik di laboratorium. Namun, selisih pengukuran yang signifikan teramati pada parameter Arus dan Daya, khususnya pada beban-beban kecil dan elektronik non-linier, seperti lampu LED (daya: 55 W vs 58 W) dan pengisi daya alat ukur (*charger*) (daya: 40 W vs 38 W). Perbedaan ini mengindikasikan bahwa sensor mengalami galat (*error*) ketika mengukur arus dan daya aktif pada beban dengan *power factor* rendah.

Meskipun demikian, untuk beban besar dan vital seperti sistem HVAC dan komputer *workstation*, selisih pengukuran daya sensor relatif kecil terhadap total beban. Hal ini membuktikan bahwa sistem pemantauan yang dirancang layak digunakan dan andal untuk aplikasi pemantauan konsumsi listrik pada skala industri.



3.2 Kinerja Protocol *OPC UA*

Tabel 2. Pengukuran *latency* dan *DDR protocol OPC UA*

| Skenario Pengujian | Deskripsi Kondisi Jaringan | Jumlah Node (Tag) | Jumlah Sampel Pengukuran | Latency (ms) | Standar Deviasi (ms) | Tingkat Keberhasilan Transmisi (DDR)(%) |
|--------------------|--|-------------------|--------------------------|--------------|----------------------|---|
| Skenario A | Beban jaringan rendah (jaringan lokal) | 50 | 100 | 45 | 5 | 100 |
| Skenario B | Beban jaringan sedang (normal operasi lab) | 150 | 100 | 82 | 12 | 99.8 |
| Skenario C | Beban jaringan tinggi (transfer data historis bersamaan) | 300 | 100 | 165 | 25 | 98,5 |

Tabel di atas menyajikan hasil pengujian kinerja protokol *OPC UA* dalam tiga skenario berbeda, berfokus pada waktu tunda (*latency*) dan Tingkat Keberhasilan Transmisi (DDR) data energi dari *Gateway* (Server *OPC UA*) ke server pusat/*Cloud* (client *OPC UA*).

3.2.1. Kinerja *Latency* (Waktu Tunda)

- Skenario A (beban jaringan rendah), dengan hanya 50 *node* data yang ditransfer, menunjukkan kinerja *latency* yang sangat cepat, yaitu rata-rata hanya 45 ms. Nilai ini membuktikan bahwa *OPC UA* mampu mengirimkan data energi hampir seketika dalam lingkungan jaringan lokal yang optimal, yang sangat ideal untuk pemantauan *real-time* yang membutuhkan respons cepat.
- Skenario B (beban jaringan sedang), yang mencerminkan kondisi operasional normal dengan 150 *node*, menunjukkan peningkatan *latency* menjadi 82 ms. Meskipun terjadi peningkatan (hampir dua kali lipat), waktu tunda ini masih jauh di bawah batas kritis (umumnya 250-500 ms) untuk sebagian besar aplikasi industri, menunjukkan efisiensi *OPC UA* dalam menangani peningkatan beban data secara moderat.
- Skenario C (beban jaringan tinggi), dengan 300 *node* yang disimulasikan sebagai kondisi transfer data historis yang padat, menunjukkan *latency* tertinggi yaitu 165 ms. Peningkatan ini logis karena *traffic* jaringan yang padat dan pemrosesan *header* data *OPC UA* yang lebih kompleks. Namun, sistem tetap berada dalam kerangka waktu respons yang dapat diterima, membuktikan skalabilitas protokol ini untuk jaringan *IIoT* yang besar.

3.2.2. Reliabilitas Transmisi (DDR)

Hasil pengujian menunjukkan reliabilitas transmisi yang luar biasa. Skenario A mencapai 100% DDR, sementara Skenario B dan C hanya mengalami penurunan minor menjadi 99.8% dan 98.5%. Angka-angka ini menegaskan bahwa protokol *OPC UA*, dengan mekanisme *buffering* dan re-transmisi bawaannya, mampu menjamin integritas data energi yang krusial. Tingkat keberhasilan transmisi yang konsisten di atas 98% adalah bukti kuat keandalan *OPC UA* dalam memastikan bahwa data konsumsi listrik tidak hilang selama proses transfer, bahkan di bawah tekanan beban jaringan yang signifikan.

3.2.3. Evaluasi Kinerja *OPAC UA*

Hasil pengujian sistem menunjukkan dua temuan utama mengenai akurasi pengukuran dan kinerja komunikasi. Akurasi Tegangan sensor terbukti sangat tinggi, dengan selisih maksimal hanya 0,6 *Volt*, menegaskan stabilitas dan keandalan *hardware*. Namun, galat terbesar terjadi pada pengukuran arus dan daya untuk beban kecil non-linier seperti lampu *LED* dan *charger*, mengindikasikan perlunya kalibrasi lebih lanjut pada rentang arus rendah, meskipun akurasinya memadai untuk beban industri yang besar (Sistem HVAC).





Di sisi komunikasi, protokol *OPC UA* menunjukkan kinerja luar biasa. *Latency* (waktu tunda) rata-rata hanya 82 ms pada beban sedang dan maksimal 165 ms pada beban tertinggi, jauh di bawah batas kritis industri. Ditambah dengan tingkat keberhasilan transmisi (DDR) yang stabil di atas 98,5%, sistem membuktikan bahwa *OPC UA* adalah solusi andal dan skalabel untuk menjamin integritas dan kecepatan data pemantauan energi industri secara *real-time*.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Sistem pemantauan listrik industri berbasis *OPC UA* ini berhasil diimplementasikan dan diuji secara efektif. Dari sisi akurasi, pengukuran tegangan menunjukkan hasil yang sangat stabil, meskipun pengukuran arus dan daya memiliki galat minor pada beban kecil non-linier. Namun, sistem tetap andal untuk beban industri besar. Kinerja protokol *OPC UA* terbukti superior dengan latency rendah (rata-rata 82 ms) dan tingkat keberhasilan transmisi (DDR) tinggi (di atas 98,5%). Kesimpulannya, pemanfaatan *OPC UA* sangat cocok dan terukur untuk menjamin kecepatan dan integritas data real-time, memenuhi standar kebutuhan pemantauan energi dalam lingkungan Industrial *IoT*.

4.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan untuk melakukan kalibrasi software lanjutan pada sensor daya, khususnya untuk meningkatkan akurasi pengukuran Arus dan Daya pada beban kecil dan non-linier dengan Power Factor rendah. Selain itu, untuk pengembangan sistem lebih lanjut, direkomendasikan untuk mengintegrasikan Model Informasi *OPC UA* Companion Specification standar (misalnya *OPC UA* for Energy) secara penuh. Hal ini akan meningkatkan interoperabilitas sistem dengan platform Manajemen Energi Industri (IEMS) yang ada, memaksimalkan manfaat skalabilitas *OPC UA*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Ladegourdie and J. Kua, "Performance Analysis of OPC UA for Industrial Interoperability towards Industry 4.0," *Internet of Things*, vol. 3, no. 4, pp. 507–525, Dec. 2022, doi: 10.3390/iot3040027.
- [2] S. Cavalieri and F. Chiacchio, "Analysis of OPC UA performances," *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 36, no. 1, pp. 165–177, 2013.
- [3] S. Profanter, A. Tekat, K. Dorofeev, M. Rickert, and A. Knoll, "OPC UA versus ROS, DDS, and MQTT: performance evaluation of industry 4.0 protocols," in *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, IEEE, 2019, pp. 955–962.
- [4] M. Dahlmanns, J. Lohmöller, I. B. Fink, J. Pennekamp, K. Wehrle, and M. Henze, "Easing the Conscience with OPC UA: An Internet-Wide Study on Insecure Deployments," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Conference, IMC*, New York, NY, USA: ACM, Oct. 2020, pp. 101–110. doi: 10.1145/3419394.3423666.
- [5] F. Kohnhäuser, D. Meier, F. Patzer, and S. Finster, "On the security of IIoT deployments: An investigation of secure provisioning solutions for OPC UA," *IEEE access*, vol. 9, pp. 99299–99311, 2021.
- [6] M. Runge, L. T. Reiche, K. H. Niemann, and A. Fay, "Universal energy information model for industrial communication," in *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, IEEE, Sep. 2022, pp. 1–8. doi: 10.1109/ETFA52439.2022.9921557.
- [7] A. Busboom, "Automated generation of OPC UA information models—A review and outlook," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 39, p. 100602, 2024.
- [8] S. Karnapp, M. Moser, and M. Weigold, "OPC UA Information Model for Energy-Flexible Aqueous Parts Cleaning Machines," in *Decarbonizing Value Chains: Proceedings of the 20th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM 2024)*, October 9–11, 2024, Ho Chi Minh City, Vietnam, Springer Nature, 2025, p. 155.
- [9] R. Estrada, P. Farinango, K. Santana, and V. Asanza, "Energy Consumption Prediction System based on clustering techniques," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 251, pp. 170–177, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.11.098.
- [10] K. Alsalem, "A hybrid time series forecasting approach integrating fuzzy clustering and machine learning for enhanced power consumption prediction," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 6447, 2025.

