

Perancangan Arsitektur Smart Waste Management Berbasis IoT Menggunakan Pendekatan Sistem Terdistribusi untuk Mendukung Konsep Smart Campus

Muhammad Irsyad^{1*}, Muhammad Rijal Febriyanton², Billy Rafaelandri³, Nurdin Dwi⁴, Ezra Bagus⁵, Agustina Sri Rahayu⁶

¹Teknik Informatika/Fakultas Ilmu Komputer

Universitas Duta Bangsa

^{1*}imuhammadirsyad88@gmail.com

²Teknik Informatika/Fakultas Ilmu Komputer

Universitas Duta Bangsa

²Muhammadrija

lfebriyantonol5@gmail.com

³Teknik Informatika/Fakultas Ilmu Komputer

Universitas Duta Bangsa

³b0669907@gmail.com

⁴Teknik Informatika/Fakultas Ilmu Komputer

Universitas Duta Bangsa

⁴Nurdindwi20605@gmail.com

⁵Teknik Informatika/Fakultas Ilmu Komputer

Universitas Duta Bangsa

⁵ezraweb2ti24a5@gmail.com

⁶Fakultas Ilmu Komputer

Universitas Duta Bangsa

⁶agustina@udb.ac.id

Abstrak— Pengelolaan sampah di lingkungan kampus masih menjadi tantangan, seperti kurangnya pemantauan kondisi tempat sampah secara real-time, keterlambatan pengangkutan sampah, dan belum terintegrasinya informasi tentang pengelolaan sampah dalam satu sistem. Seiring dengan berkembangnya konsep Smart Campus, diperlukan suatu solusi yang mampu mendukung pengelolaan sampah secara efektif dan efisien. Penelitian ini bertujuan untuk merancang arsitektur Smart Waste Management berbasis IoT Menggunakan pendekatan sistem terdistribusi guna mendukung pengelolaan sampah di lingkungan kampus. Metode yang digunakan adalah Design Science Research (DSR) yang meliputi tahapan identifikasi masalah, analisis kebutuhan, perancangan arsitektur sistem, demonstrasi rancangan, dan evaluasi. Hasil penelitian berupa rancangan arsitektur sistem yang terdiri dari beberapa node tempat sampah berbasis IoT yang terhubung melalui jaringan komunikasi ke server pusat, basis data, dan dashboard monitoring. Arsitektur yang diusulkan memungkinkan proses pemantauan kondisi tempat sampah secara real-time, pengelolaan data yang terintegrasi, serta penyampaian notifikasi ketika tempat sampah mencapai batas tertentu. Berdasarkan hasil perancangan, pendekatan sistem terdistribusi dapat mendukung pengelolaan sampah lebih efektif, meningkatkan efisiensi operasional, dan mendukung implementasi konsep Smart Campus.

Kata kunci— Smart Waste Management, Internet of Things, Sistem Terdistribusi, Smart Campus, Monitoring Sampah.

Abstract— Waste management within the campus environment remains a challenge, characterized by issues such as the lack of real-time monitoring of bin status, delays in waste collection, and the absence of an integrated waste management information system. With the evolution of the Smart Campus concept, a solution capable of supporting effective and efficient waste management is required. This research aims to design an IoT-based Smart Waste Management architecture using a distributed systems approach to support waste management on campus. The study employs the Design Science Research (DSR) methodology, comprising stages such as problem identification, requirements analysis, system architecture design, design demonstration, and evaluation. The research outcome is a system architecture consisting of multiple IoT-enabled waste bin nodes connected via a communication network to a central server, a database, and a monitoring dashboard. The proposed architecture enables real-time monitoring of bin status, integrated data management, and the delivery of notifications when bins reach specific fill levels. The design results indicate that a distributed systems approach can facilitate more effective waste management, enhance operational efficiency, and support the implementation of the Smart Campus concept.

Keywords— Smart Waste Management, Internet of Things, Distributed System, Smart Campus, Waste Monitoring.

I. PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah merupakan salah satu aspek yang sangat penting dalam menjaga kebersihan dan keberlanjutan dalam lingkungan kampus. Namun, saat ini proses pengelolaan sampah diberbagai perguruan tinggi masih menghadapi sejumlah kendala, seperti contohnya

yaitu keterlambatan pengangkutan sampah, kurangnya pemantauan kapasitas tempat sampah secara *real-time*, dan belum terintegrasinya data pengelolaan sampah dalam satu sistem yang terpusat. Kondisi tersebut dapat menyebabkan penumpukan sampah yang dapat berdampak pada kenyamanan, kesehatan, dan kualitas

lingkungan kampus. Perkembangan teknologi digital mendorong perlunya penerapan sistem pengelolaan sampah yang lebih cerdas dan terintegrasi untuk mendukung konsep Smart Campus [1].

Internet of Things (IoT) merupakan teknologi yang dapat memungkinkan berbagai perangkat fisik untuk saling terhubung dan dapat bertukar data melalui jaringan internet. Teknologi ini telah banyak diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk bidang pengelolaan lingkungan dan monitoring fasilitas publik. Melalui pemanfaatan sensor dan jaringan komunikasi, kondisi tempat sampah dapat dipantau secara *real-time* sehingga informasi mengenai tingkat kapasitas sampah dapat dipantau dan diketahui dengan lebih cepat dan lebih akurat [2].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem Smart Waste Management berbasis IoT untuk meningkatkan tingkat efektivitas pengelolaan sampah. Penelitian yang telah dilakukan oleh Longo dkk mengusulkan sistem Smart Waste Management pada lingkungan kampus yang dapat meningkatkan proses pengelolaan sampah dan daur ulang sampah melalui integrasi teknologi IoT dan layanan digital [3]. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa penerapan sistem pengelolaan sampah berbasis IoT dapat mendukung pemantauan kondisi tempat sampah secara *real-time* dan membantu optimalisasi proses pengangkutan sampah [4]. Selain itu, implementasi IoT pada lingkungan Smart Campus telah terbukti mampu mendukung integrasi berbagai layanan kampus melalui pengelolaan data yang terpusat dan skalabel [5].

Meskipun berbagai penelitian telah berhasil mengembangkan sistem monitoring tempat sampah berbasis IoT, sebagian besar masih berfokus pada pemantauan perangkat secara individual dan belum secara khusus membahas rancangan arsitektur sistem terdistribusi yang dapat mampu mengintegrasikan banyak node tempat sampah dalam sebuah platform pengelolaan yang terpusat. Namun, lingkungan kampus umumnya memiliki banyak titik lokasi tempat sampah yang terbesar sehingga harus membutuhkan mekanisme komunikasi dan

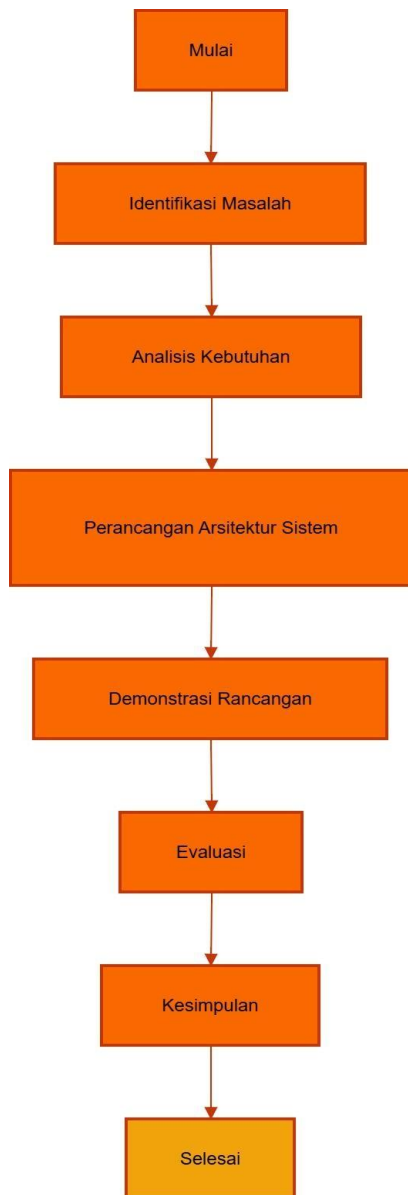
pengelolaan data yang lebih efisien. Oleh karena itu, pendekatan sistem terdistribusi menjadi salah satu faktor penting untuk mendukung proses pengumpulan, penyimpanan, dan pemrosesan data dari berbagai node secara terintegrasi [6].

Bedasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah arsitektur Smart Waste Management berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan pendekatan sistem terdistribusi untuk mendukung konsep Smart Campus. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu model arsitektur yang dapat mampu mendukung monitoring sampah secara *real-time*, meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah, dan memberikan dasar pengembangan sistem Smart Campus yang lebih terintegrasi.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Design Science Research (DSR). Metode tersebut merupakan pendekatan penelitian yang berfokus pada rancangan dan pengembangan artefak berupa model, metode, atau sistem untuk menyelesaikan sebuah permasalahan tertentu secara sistematis [7]. Menurut Peffers dkk., DSR ini terdiri dari tahapan identifikasi masalah, penentuan tujuan solusi, perancangan dan pengembangan artefak, demonstrasi, evaluasi, dan komunikasi hasil penelitian [8]. Metode ini dipilih karena sesuai dengan tujuan penelitian yang berfokus pada perancangan arsitektur Smart Waste Management berbasis IoT menggunakan pendekatan sistem terdistribusi.

Tahapan penelitian yang dilakukan terdiri dari identifikasi masalah, analisis kebutuhan, perancangan arsitektur sistem. Demonstrasi rancangan, dan evaluasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Tahapan Penelitian Menggunakan Metode DSR.

2.1 Identifikasi Masalah

Tahap pertama yang dilakukan adalah mengidentifikasi masalah pengelolaan sampah di lingkungan kampus. Permasalahan yang telah ditemukan meliputi kurangnya pemantauan kondisi tempat sampah secara *real-time*, keterlambatan pengangkutan sampah, serta belum tersedianya sistem integrasi yang dapat mampu mengelola data dari berbagai lokasi tempat sampah. Hasil dari identifikasi ini menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan sistem yang akan dirancang. Permasalahan

serupa juga ditemukan pada penelitian Smart Waste Management yang telah menunjukkan bahwa keterbatasan monitoring dapat menyebabkan penumpukan sampah dan efisiensi pengelolaan lingkungan [9].

2.2 Analisis Kebutuhan

Pada tahap ini dilakukan analisis kebutuhan sistem berdasarkan hasil identifikasi masalah. Sistem yang dirancang harus mampu melakukan pemantauan terhadap kapasitas tempat sampah secara *real-time*, mengintegrasikan data dari berbagai node tempat sampah, menyimpan data pada basis data terpusat, dan menyediakan dashboard monitoring bagi petugas pengelolaan sampah. Selain itu, sistem juga harus mendukung komunikasi data yang efisien antar komponen melalui proses pendekatan sistem terdistribusi. Pemanfaatan teknologi Internet of Things atau IoT dapat memungkinkan proses pengumpulan dan pengiriman data yang dilakukan secara otomatis sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat [10].

2.3 Perancangan Arsitektur Sistem

Tahap perancangan ini dilakukan dengan cara menyusun arsitektur Smart Waste Management berbasis IoT. Sistem ini terdiri dari beberapa node tempat sampah yang dapat berfungsi sebagai sumber data, server pusat sebagai pengelola informasi, basis data untuk menyimpan data, dan dashboard monitoring sebagai antarmuka pengguna. Pendekatan ini menggunakan sistem terdistribusi untuk mengintegrasikan seluruh komponen sehingga dapat bekerja secara terkoordinasi dalam mendukung pengelolaan sampah kampus. Arsitektur sistem terdistribusi dinilai dapat meningkatkan skalabilitas, fleksibilitas, dan juga efisiensi pengelolaan data pada lingkungan yang memiliki jumlah yang banyak dari node perangkat IoT [11].

2.4 Demonstrasi Rancangan

Tahap ini dilakukan dengan memvisualisasikan rancangan sistem Smart Waste Management menggunakan diagram

arsitektur dan alur komunikasi data. Demonstrasi bertujuan untuk menunjukkan bagaimana proses pengiriman data dari node tempat sampah menuju server pusat, penyimpanan data pada basis data sehingga penyajian informasi melalui dashboard monitoring. Visualisasi arsitektur sistem digunakan untuk mempermudah pemahaman akan interaksi antar komponen dalam sistem yang sudah diusulkan [12].

2.5 Evaluasi

Tahap evaluasi dilakukan dengan menganalisis kesesuaian rancangan terhadap kebutuhan sistem yang telah ditetapkan. Evaluasi mencakup aspek dari integrasi data, kemampuan monitoring secara *real-time*, skalabilitas sistem, dan dukungan terhadap konsep Smart Campus. Hasil evaluasi ini dapat digunakan untuk menilai efektivitas rancangan arsitektur yang diusulkan dalam mendukung pengelolaan sampah berbasis IoT dan pendekatan sistem terdistribusi. Dalam metode DSR ini evaluasi merupakan tahapan sangat penting untuk memastikan bahwa artefak

yang dirancang mampu menyelesaikan permasalahan yang telah diidentifikasi secara lebih efektif [8].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Kebutuhan Sistem

Bedasarkan hasil dari identifikasi masalah dan analisis kebutuhan sistem, sistem Smart Waste Management dirancang agar dapat mendukung proses pemantauan dari kondisi tempat sampah secara *real-time* pada lingkungan kampus. Sistem ini harus mampu mengumpulkan data dari berbagai node tempat sampah, mengirimkan data ke server pusat, menyimpan data pada basis data, dan menyajikan informasi kepada petugas sampah melalui dashboard monitoring. Pendekatan IoT dapat memungkinkan proses pengumpulan data yang dilakukan secara otomatis, sedangkan sistem terdistribusi dapat mendukung pengelolaan data dari berbagai lokasi secara terintegrasi [13].

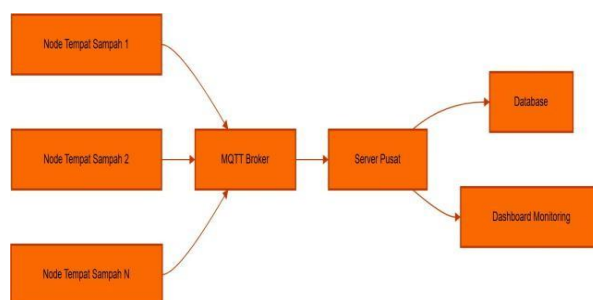
Tabel 1. Kebutuhan Sistem

No.	Kebutuhan Sistem	Deskripsi
1	Monitoring Real-time	Memantau kapasitas tempat sampah secara <i>real-time</i>
2	Integrasi Data	Menggabungkan data dari berbagai node tempat sampah
3	Basis Data Terpusat	Menyimpan data monitoring secara terpusat
4	Dashboard Monitoring	Menampilkan informasi kondisi tempat sampah
5	Notifikasi	Memberikan peringatan ketika kapasitas mencapai batas tertentu

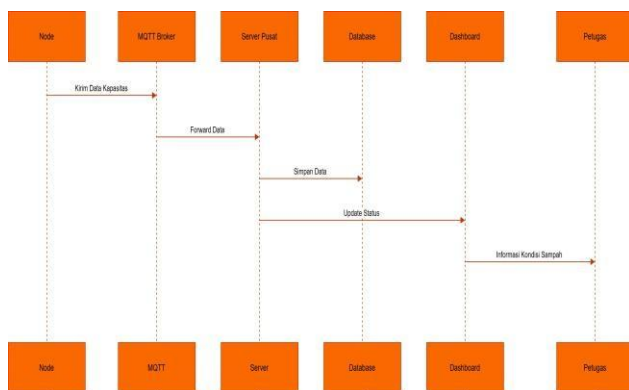
3.2 Arsitektur Sistem yang Diusulkan

Arsitektur Smart Waste Management yang diusulkan terdiri dari beberapa komponen utama, komponen utama tersebut meliputi node tempat sampah berbasis IoT, jaringan komunikasi, server pusat, basis data, dan dashboard monitoring. Setiap node bertugas mengumpulkan data kapasitas sampah menggunakan peran dari sensor. Data tersebut nantinya akan dikirimkan melalui jaringan komunikasi menuju server pusat untuk diproses dan disimpan pada basis data, informasi yang telah tersimpan dapat

diakses oleh petugas melalui dashboard monitoring secara *real-time* [14].



Gambar 2. Arsitektur Sistem Smart Waste Management.



Gambar 3. Alur Komunikasi Data.

3.3 Hasil Demonstrasi Rancangan

Pada sistem yang telah diusulkan, setiap node memiliki fungsi sebagai publisher yang mengirimkan data kapasitas sampah ke MQTT Broker. Kemudian MQTT Broker meneruskan data ke server pusat untuk dilakukan pemrosesan dan penyimpanan ke basis data. Dashboard monitoring berperan sebagai subscriber yang menampilkan informasi kondisi tempat sampah kepada pengguna secara *real-time*. Penggunaan protokol MQTT dipilih karena ringan dan dapat sesuai untuk komunikasi perangkat IoT dengan jumlah node yang banyak [15].

3.4 Evaluasi Rancangan

Evaluasi ini dilakukan terhadap rancangan arsitektur yang telah diusulkan berdasarkan aspek fungsionalitas, integrasi data, skalabilitas, dan dukungan terhadap konsep Smart Campus. Hasil dari evaluasi ini menunjukkan bahwa pendekatan sistem terdistribusi dapat memungkinkan integrasi data dari berbagai node tempat sampah secara lebih efisien. Selain itu, penggunaan server pusat dan basis data terpusat dapat mempermudah proses pengelolaan informasi dan pemantauan kondisi tempat sampah secara *real-time* [15].

Tabel 2. Hasil Evaluasi Rancangan

No.	Aspek	Hasil
1	Monitoring <i>Real-time</i>	Terpenuhi
2	Integrasi Data	Terpenuhi
3	Skalabilitas Sistem	Terpenuhi
4	Dashboard Monitoring	Terpenuhi

5

Dukungan Smart Campus

Terpenuhi

3.5 Hasil Identifikasi Masalah

Berdasarkan hasil identifikasi masalah yang dilakukan pada lingkungan kampus, ditemukan beberapa kendala dalam proses pengelolaan sampah. Permasalahan utama yang ditemukan meliputi belum adanya sistem pemantauan kondisi tempat sampah secara *real-time*, keterlambatan petugas dalam mengetahui kapasitas tempat sampah yang telah penuh, serta belum terintegrasinya data pengelolaan sampah dari berbagai lokasi dalam satu sistem monitoring. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan efisiensi pengelolaan lingkungan kampus. Temuan ini menunjukkan bahwa perlunya suatu sistem yang mampu melakukan pemantauan secara otomatis dan terintegrasi guna mendukung pengelolaan sampah yang lebih efektif dan mendukung implementasi konsep Smart Campus [13].

Tabel 3. Hasil Identifikasi Masalah

No.	Permasalahan	Dampak
1	Tidak adanya monitoring <i>Real-time</i>	Tempat sampah penuh terlambat diketahui
2	Pengangkutan sampah masih manual	Penumpukan sampah
3	Data tidak terintegrasi	Sulit melakukan pemantauan menyeluruh
4	Tidak ada notifikasi otomatis	Respon petugas menjadi terlambat

3.6 Pembahasan

Rancangan Smart Waste Management yang telah diusulkan memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan sistem monitoring konvensional. Pertama, sistem mampu melakukan pemantauan kondisi tempat sampah secara *real-time*. Kedua, pendekatan sistem terdistribusi dapat memungkinkan integrasi data dari berbagai lokasi tempat sampah dalam satu platform monitoring. Ketiga, penggunaan dashboard monitoring dapat membantu petugas sampah dalam mengambil keputusan terkait pengangkutan sampah secara lebih cepat dan efisien. Dengan demikian, rancangan sistem yang

diusulkan dapat berpotensi mendukung implementasi Smart Campus melalui pengelolaan sampah yang lebih efektif dan terintegrasi [13]-[16].

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang arsitektur Smart Waste Management berbasis IoT dengan melalui pendekatan sistem terdistribusi untuk mendukung konsep Smart Campus. Rancangan ini terdiri dari atas beberapa node tempat sampah berbasis IoT yang terhubung dengan server pusat, basis data, dan dashboard monitoring melalui jaringan komunikasi. Arsitektur yang diusulkan dapat memungkinkan proses pemantauan kondisi tempat sampah secara *real-time*, pengelolaan data yang telah terintegrasi, serta penyampaian informasi kepada petugas secara lebih cepat dan efektif.

Selain itu, penerapan dari pendekatan sistem terdistribusi mampu mendukung skalabilitas sistem dalam mengelola data dari berbagai lokasi tempat sampah di lingkungan kampus. Berdasarkan hasil perancangan dan evaluasi yang telah dilakukan, sistem yang diusulkan dapat berpotensi meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah serta mendukung implementasi konsep Smart Campus yang lebih cerdas, terintegrasi, dan berkelanjutan. Penelitian ini selanjutnya dapat difokuskan pada implementasi dan pengujian sistem secara langsung pada lingkup kampus untuk mengukur kinerja dan efektivitasnya secara langsung dan nyata.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, dan bantuan selama proses penyusunan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pengampu mata kuliah Sistem Terdistribusi yang

telah memberikan arahan dan bimbingan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan konsep Smart Campus dan pengelolaan sampah berbasis teknologi di lingkungan perguruan tinggi.

REFERENSI

- [1] M. A. Al-Hagery, "Smart Campus IoT System: Recent Trends and Future Directions," *Internet of Things*, vol. 27, 2024.
- [2] M. A. Al-Hagery, "Smart Campus IoT System: Recent Trends and Future Directions," *Internet of Things*, vol. 27, 2024.
- [3] M. Longo, M. Ferraro, G. Raciti, and S. Pulvirenti, "A 5G-Enabled Smart Waste Management System for University Campus," *Sensors*, vol. 21, no. 24, 2021.
- [4] A. Alshahrani et al., "A Sustainable Smart IoT-Based Solid Waste Management System," *Future Generation Computer Systems*, 2024.
- [5] R. A. Ferreira, J. P. Rodrigues, and A. M. Alberti, "Design and Implementation of a Smart Campus Flexible Internet of Things Architecture," 2024..
- [6] M. Centenaro, L. Vangelista, M. Zanella, and M. Zorzi, "A Multi-Layer LoRaWAN Infrastructure for Smart Waste Management," *Sensors*, vol. 21, no. 8, 2021.
- [7] A. R. Hevner, S. T. March, J. Park, and S. Ram, "Design Science in Information Systems Research," *MIS Quarterly*, vol. 28, no. 1, pp. 75–105, Mar. 2004, doi: 10.2307/25148625.
- [8] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger, and S. Chatterjee, "A Design Science Research Methodology for Information Systems Research," *Journal of Management Information Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 45–77, 2007, doi: 10.2753/MIS0742-1222240302.
- [9] M. Longo, M. Ferraro, G. Raciti, and S. Pulvirenti, "Smart Waste Management System for University Campus," *Sensors*, 2021..
- [10] S. R. S. Prabaharan and K. R. Kumar, "Smart Waste Management for Smart City using Internet of Things (IoT)," *Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 1–8, 2021.
- [11] M. Centenaro, L. Vangelista, M. Zanella, and M. Zorzi, "A Multi-Layer LoRaWAN Infrastructure for Smart Waste Management," *Sensors*, vol. 21, no. 8, 2021.
- [12] R. A. Ferreira, J. P. Rodrigues, and A. M. Alberti, "Design and Implementation of a Smart Campus Flexible Internet of Things Architecture," 2024.
- [13] M. Longo, M. Ferraro, G. Raciti, and S. Pulvirenti, "A 5G-Enabled Smart Waste Management System for University Campus," *Sensors*, vol. 21, no. 24, 2021.
- [14] R. A. Ferreira, J. P. Rodrigues, and A. M. Alberti, "Design and Implementation of a Smart Campus Flexible Internet of Things Architecture," 2024.
- [15] A. M. Al-Qerem, M. Alauthman, B. B. Gupta, and A. Almomani, "IoT Message Protocols for Smart Environments: A Comparative Study," *IEEE Access*, 2023.
- [16] A. Alshahrani et al., "A Sustainable Smart IoT-Based Solid Waste Management System," *Future Generation Computer Systems*, 2