

Smart Waste Management Design for Higher Education: Case Study of Al-Azhar University of Indonesia

Aditya Ananta¹⁾, Yekti Wirani^{ID2)}, dan Yudho Giri Sucayyo^{ID3)}

^{1,2,3}Magister Teknologi Informasi, Universitas Indonesia

^{1,2,3}Jl. Salemba Raya No.4, Jakarta, Indonesia. 10430.

E-mail: aditya.ananta@office.ui.ac.id¹⁾, yektiwirani@cs.ui.ac.id²⁾, yudho@cs.ui.ac.id³⁾

ABSTRACT

Al-Azhar University of Indonesia (UAI) has faced significant challenges in waste management. This has caused the UI GreenMetric ranking to be lower. After conducting observations and interviews with the Technical Implementation Unit for Facilities and Infrastructure (SarPras), several major problems found included the absence of waste sorting, excessive waste accumulation, and large waste generation at temporary disposal sites. To improve UAI's ranking in UI Greenmetric and achieve the Sustainable Development Goals target, this study produced a smart waste management system based on the Internet of Things (IoT), Embedded Systems, and Machine Learning (ML). Some of the main components of the design results include a smart bin that uses ultrasonic sensors to reduce accumulation; a web application for monitoring and reward systems; and automatic waste sorting for recycling using Raspberry Pi, infrared sensors, and the ML FOMO (Faster Objects, More Objects) algorithm secured through a CCTV system. In addition, this system is supported by digital education for waste reuse and collection route optimization using ML predictions of the Linear Regression model. With the cooperation of third party sorted waste transportation, this design improves waste management and UAI GreenMetric UI ranking with validation and approval by SarPras and Information Technology Center (PTI).

Keywords: Smart Waste Management, Al-Azhar University of Indonesia, UI Greenmetric, IoT, Machine Learning

Rancangan Pengelolaan Sampah Cerdas Untuk Perguruan Tinggi: Studi Kasus Universitas Al-Azhar Indonesia

ABSTRAK

Universitas Al-Azhar Indonesia (UAI) menghadapi tantangan yang cukup besar dalam pengelolaan sampah. Hal ini menyebabkan peringkat UI GreenMetric menjadi lebih rendah. Setelah melakukan observasi dan wawancara dengan Unit Pelaksana Teknis Sarana dan Prasarana (SarPras), ditemukan beberapa permasalahan utama, antara lain belum adanya pemilahan sampah, penumpukan sampah yang berlebihan, dan besarnya timbunan sampah di tempat pembuangan sementara. Untuk meningkatkan peringkat UAI di UI Greenmetric dan mencapai target *Sustainable Development Goals*, penelitian ini telah menemukan sistem pengelolaan sampah cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT), *Embedded Systems*, dan *Machine Learning* (ML). Beberapa komponen utama hasil perancangan tersebut antara lain *smart bin* yang menggunakan sensor ultrasonik untuk mengurangi penumpukan; aplikasi web untuk sistem *monitoring* dan *reward*; serta pemilahan sampah otomatis untuk didaur ulang menggunakan Raspberry Pi, sensor inframerah, dan algoritma ML FOMO (*Faster Objects, More Objects*) yang diamankan melalui sistem CCTV. Selain itu, sistem ini didukung dengan edukasi digital untuk pemanfaatan kembali sampah dan optimasi rute pengumpulan menggunakan prediksi ML model *Linear Regression*. Dengan kerja sama pengangkutan sampah yang dipilah oleh pihak ketiga, rancangan ini meningkatkan pengelolaan sampah dan peringkat UAI GreenMetric UI dengan validasi dan persetujuan oleh SarPras dan Pusat Teknologi Informasi (PTI).

Kata Kunci: Pengelolaan Sampah Cerdas, Universitas Al-Azhar Indonesia, UI Greenmetric, IoT, Machine Learning

1. PENDAHULUAN

Kesadaran akan keberlanjutan dan efisiensi lingkungan dalam institusi pendidikan tinggi merupakan masalah yang kritis dan terus berkembang. Universitas memiliki tanggung jawab yang signifikan dalam menerapkan prinsip-prinsip keberlanjutan dan

mendukung *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang lebih luas (Puertas et al., 2023). Inisiatif utama yang mendorong hal ini adalah UI GreenMetric World University Rankings, yang mengevaluasi dan mempromosikan program keberlanjutan di universitas, dengan pengelolaan sampah yang efisien sebagai



komponen inti. Dalam sistem penilaian ini, aspek pengelolaan sampah merupakan faktor utama yang menentukan kedudukan universitas secara global.

Pada tahun 2024, Universitas Al-Azhar Indonesia (UAI) menduduki peringkat ke-173 di Indonesia dan peringkat ke-1451 di dunia versi UI GreenMetric, dengan skor 1640. Skor ini menunjukkan kesenjangan yang signifikan dibandingkan dengan universitas terkemuka lainnya seperti Universitas Indonesia (UI) dengan skor 9050 dan Institut Pertanian Bogor (IPB) dengan skor 8950, yang masing-masing menduduki peringkat pertama dan keempat pada tahun yang sama (Atici et al., 2021). Kesenjangan ini menunjukkan kebutuhan mendesak bagi UAI untuk mengintensifkan upayanya dalam mencapai SDGs. Penelitian ini berfokus secara khusus pada kategori sampah (WS), yang telah menerima skor nol dalam penilaian terbaru, menyoroti hal ini sebagai area yang menjadi perhatian mendesak.

Tantangan pengelolaan sampah di UAI saat ini diidentifikasi melalui pengamatan di lokasi dan wawancara dengan Unit Pelaksana Teknis Sarana dan Prasarana (SarPras). Hasil pengamatan menunjukkan beberapa masalah utama: tempat sampah di seluruh kampus tidak dipisahkan berdasarkan jenis sampah; pengangkutan sampah oleh petugas kebersihan dilakukan dua kali sehari untuk semua tempat sampah; dan pengangkutan sampah yang ditangani oleh Yayasan Pondok Pesantren Al-Azhar (YPI) rata-rata 20 karung per perjalanan, dua kali sehari. Selama acara-acara besar universitas, volume ini dapat meningkat hingga 30 karung, sehingga tidak mungkin diangkut pada hari yang sama dan menyebabkan luapan sampah.

Wawancara dengan SarPras lebih jauh menyoroti masalah-masalah ini. Pertama, sampah plastik menghabiskan banyak ruang, dan SarPras menyatakan keinginannya agar sampah tersebut dihancurkan atau dipadatkan. Kedua, potongan pohon yang dihasilkan setiap minggu tidak dapat diangkut bersama sampah biasa tanpa menimbulkan biaya tambahan. SarPras berharap jenis sampah ini dapat diolah menjadi kompos. Ketiga, sampah dari kantin universitas diharapkan dapat diolah dengan bakteri atau larva (*maggot*) untuk digunakan sebagai pakan ikan.

Ketidakefisienan operasional dan kurangnya integrasi teknologi ini secara langsung berkontribusi terhadap rendahnya peringkat UI GreenMetric UAI. Masalah inti dapat dianalisis menggunakan kerangka *Fishbone* yang dikelompokkan menjadi *Process*, *People*, dan *Technology* (Olawade et al., 2024).

2. RUANG LINGKUP

Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang sistem pengelolaan sampah cerdas untuk Universitas Al-Azhar Indonesia. Ini dimulai dengan menemukan kondisi saat ini dalam pengelolaan sampah. Fokus penelitian dibatasi pada aktivitas pengurangan sampah (pembatasan, pendauran, pemanfaatan) dan penanganan sampah (pemilihan, pengumpulan, pengangkutan). Proses

pengolahan dan pemrosesan akhir tidak dimasukkan dalam penelitian ini. Hasil akhir akan berbentuk sistem yang komprehensif dan aplikatif bagi universitas untuk menerapkan pengelolaan sampah secara cerdas.

3. BAHAN DAN METODE

Beberapa konsep yang digunakan dalam penelitian ini meliputi sebagai berikut :

3.1 Smart Waste Management

Pengelolaan sampah telah menjadi tantangan global di era modern. Volume sampah yang terus meningkat seringkali tidak diimbangi oleh kapasitas infrastruktur yang ada untuk pengumpulan dan pengangkutan. Konsekuensi dari ketidakseimbangan ini sangat parah di negara-negara berkembang, yang menyebabkan pembuangan sampah ilegal, degradasi lingkungan, dan pencemaran tanah, air, dan udara, yang pada gilirannya menimbulkan risiko kesehatan langsung dan tidak langsung (Kannan et al., 2024).

Praktik pengelolaan sampah tradisional, yang seringkali reaktif dan kurang terintegrasi, tidak lagi memadai. Hal ini memerlukan solusi yang inovatif dan komprehensif. Pengelolaan Sampah Cerdas (*Smart Waste Management*) muncul sebagai respons terhadap tantangan ini (Kannan et al., 2024). Pengelolaan sampah cerdas didefinisikan sebagai pendekatan inovatif yang secara strategis memanfaatkan kemajuan teknologi untuk mengelola timbulan sampah secara lebih efisien dan efektif (Moni et al., 2022). Tujuan mendasar dari Pengelolaan sampah cerdas adalah untuk mengurangi beban pengelolaan sampah di setiap tahap, mulai dari pengumpulan dan pemilihan hingga pengangkutan dan pembuangan akhir, menciptakan sistem yang terstruktur, terkelola dengan baik, dan responsif terhadap dinamika timbulan sampah (Afolalu et al., 2024).

3.2 Sustainable Development Goals (SDGs)

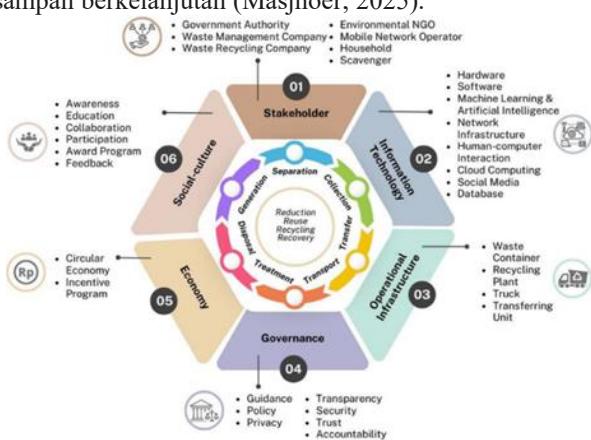
Penerapan sistem pengelolaan sampah cerdas di lingkungan universitas berperan penting dalam memajukan berbagai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) (Afolalu et al., 2024), yang berkontribusi pada lingkungan kampus yang lebih bersih dan lebih sehat bagi mahasiswa dan staf. Inisiatif ini mendukung SDG 6 dengan membantu meningkatkan kualitas air melalui pengurangan polusi dan pembatasan pembuangan zat berbahaya, yang sejalan dengan Target 6.3 (Iswanto et al., 2025). Inisiatif ini juga sejalan dengan SDG 9, khususnya Target 9.4, dengan mendorong modernisasi infrastruktur agar lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Selain itu, sistem ini berkontribusi pada SDG 11 dengan mengatasi tantangan lingkungan perkotaan, dengan Target 11.6 menekankan pengurangan sampah kota dan jejak lingkungan kota secara keseluruhan. Terakhir, sistem ini mendukung SDG 12 dengan mendorong konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab, yang secara langsung berkontribusi pada Target 12.5, yang berupaya

meminimalkan sampah melalui strategi seperti pengurangan, daur ulang, dan penggunaan kembali.

3.3 Kerangka Kerja Sistem Pengelolaan Sampah Cerdas dan Terintegrasi

Kerangka kerja yang dikembangkan oleh Wirani, (2024) menyediakan struktur holistik untuk pengelolaan sampah berkelanjutan, yang didukung oleh lima dimensi utama: Teknologi Informasi, Infrastruktur Operasional, Tata Kelola, Ekonomi, dan Sosial-budaya. Kerangka kerja ini, yang divalidasi oleh perwakilan dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Indonesia, mendukung seluruh siklus pengelolaan sampah (Pemisahan, Pengumpulan, Pemindahan, Pengangkutan, Pengolahan, Pembuangan) dan mendukung prinsip-prinsip inti Pengurangan, Penggunaan Kembali, Daur Ulang, dan Pemulihian. Kerangka kerja tersebut diilustrasikan dalam Gambar 1.

Penelitian ini membahas empat dimensi utama yang disesuaikan dengan kebutuhan spesifik UAI dalam mengembangkan sistem pengelolaan sampah cerdas (*Smart Waste Management*). Yang pertama adalah Teknologi Informasi, yang mencakup komponen-komponen penting seperti sensor, kamera, aplikasi web, *Machine Learning*, infrastruktur jaringan, dan basis data yang memungkinkan fungsionalitas sistem. Dimensi kedua, Infrastruktur Operasional, mengacu pada elemen fisik seperti tempat sampah cerdas, fasilitas daur ulang, dan kendaraan pengangkut yang diperlukan untuk pengumpulan dan pemrosesan sampah yang efisien. Dimensi Ekonomi berfokus pada memotivasi praktik pengelolaan sampah yang tepat dengan memperkenalkan insentif finansial, seperti skema hadiah, untuk mendorong keterlibatan pengguna secara aktif. Terakhir, dimensi Sosial-budaya menekankan pentingnya pendidikan, keterlibatan masyarakat, dan umpan balik, yang difasilitasi melalui platform digital untuk meningkatkan kesadaran dan partisipasi dalam praktik sampah berkelanjutan (Masjhoer, 2025).



Gambar 1. Kerangka Kerja Sistem Pengelolaan Sampah Cerdas dan Terintegrasi

Figure 1. Structure of The Smart And Integrated Waste Management System.

3.4 UI Green Metric

UI GreenMetric merupakan inisiatif global yang menilai keberlanjutan universitas berdasarkan berbagai indikator, termasuk pengelolaan sampah (Atici et al., 2021). Tabel 1 menunjukkan peringkat UAI selama lima tahun terakhir. Fokus penelitian ini adalah pada kategori Sampah (Waste - WS), yang ditandai dengan warna hijau pada Tabel 1. UAI mendapat skor nol pada tahun 2023 dan 2024, turun jauh dari tahun sebelumnya. Dengan demikian, WS pada dua tahun terakhir diidentifikasi sebagai area paling kritis untuk perbaikan dalam hal pengelolaan sampah.

Tabel 1. Peringkat UI GreenMetric UAI Lima Tahun Terakhir

Table 1. UAI's UI GreenMetric Ranking (Last Five Years)

Year	Rank ID - World	Total Score	SI	EC	WS	WR	TR	ED
2020	78 - 868	2200	125	600	75	0	125	1275
2021	97 - 941	1600	75	500	75	0	125	825
2022	118 - 1028	1950	145	585	75	10	235	900
2023	137 - 1166	1675	145	585	0	10	235	700
2024	173 - 1451	1640	125	585	0	20	235	675

3.5 Teknologi yang Mendukung *Smart Waste Management*

Sistem pengelolaan sampah cerdas (*Smart Waste Management*) menggabungkan beberapa teknologi canggih untuk meningkatkan efisiensi dan meminimalkan dampak lingkungan. Salah satu komponen utamanya adalah Smart Bin, solusi cerdas yang mampu memantau tingkat pengisian dan mengidentifikasi berbagai jenis sampah, yang memungkinkan pengelolaan sumber daya yang lebih baik dan pengumpulan tepat waktu. Hal ini didukung oleh *Internet of Things* (IoT), yang menghubungkan perangkat fisik yang tertanam dengan sensor dan perangkat lunak ke internet, yang memungkinkan pengumpulan dan kontrol data otomatis (Munawar et al., 2025). Alat pengembangan IoT yang umum meliputi Raspberry Pi, komputer papan tunggal yang hemat biaya, dan Arduino Uno, mikrokontroler open-source, yang keduanya sering digunakan dalam sistem Pengelolaan Sampah Cerdas (Arifandi, 2020).

Selain IoT, *Embedded System* memainkan peran penting dengan menyediakan daya komputasi khusus untuk tugas-tugas tertentu dalam infrastruktur pengelolaan sampah, sehingga menjadikannya efisien dan hemat sumber daya dibandingkan dengan komputer tujuan umum (Arifandi, 2020). *Machine Learning* (ML) semakin meningkatkan kemampuan sistem dengan memungkinkannya belajar dari data dan membuat keputusan cerdas (Adhy et al., 2025). Misalnya, teknik pembelajaran terbimbing dapat diterapkan untuk deteksi objek menggunakan algoritme seperti FOMO (*Faster Objects, More Objects*), yang dioptimalkan untuk perangkat berdaya rendah dan jauh lebih cepat daripada



alternatif seperti *MobileNet SSD* (Iliev & Marinov, 2024). ML juga dapat digunakan dalam analisis prediktif, menggunakan model seperti *Linear Regression* untuk memperkirakan kapan tempat sampah akan mencapai kapasitas berdasarkan data masa lalu, sehingga meningkatkan perencanaan pengumpulan sampah dan mengurangi perjalanan yang tidak perlu.

Berbagai penelitian telah menyelidiki integrasi teknologi ke dalam pengelolaan sampah, membentuk landasan yang kokoh bagi pengembangan sistem cerdas. Misalnya, (Catacutan et al., 2024) memperkenalkan BINSIGHT, sistem pemilahan sampah bertenaga ML yang diterapkan di sebuah universitas di Filipina. Dengan memanfaatkan Raspberry Pi dan algoritma FOMO, sistem ini mengidentifikasi berbagai jenis sampah seperti kertas, plastik, dan kemasan makanan, sekaligus mendorong pembuangan yang tepat melalui insentif berbasis hadiah. Demikian pula, Sirawattananon, (2021) merancang tempat sampah cerdas berkemampuan IoT menggunakan Raspberry Pi dan model pembelajaran mendalam ResNet-50 untuk secara otomatis menangkap dan mengklasifikasikan sampah ke dalam kategori seperti PET, plastik, logam, dan lainnya, mencapai akurasi klasifikasi sebesar 98,81%.

Menurut Ramasawmy & Nagowah, (2023) mengembangkan sistem pemantauan di kampus universitas menggunakan sensor IoT termasuk ultrasonik, PIR, dan RFID untuk melacak tingkat pengisian tempat sampah. Sistem mereka menggunakan ML untuk memprediksi kapan tempat sampah akan penuh dan mengoptimalkan rute pengumpulan melalui aplikasi web. (Tsonkov & Petrov, 2023) mengeksplorasi potensi platform pengelolaan sampah berbasis IoT di kota-kota Bulgaria, mengusulkan sistem terpusat untuk memantau tingkat sampah, melacak polusi udara dan air, dan meningkatkan keterlibatan warga melalui peningkatan transparansi. Sementara itu, (Yusuf et al., 2024) menerapkan solusi otomatis berbiaya rendah menggunakan Arduino Uno, sensor ultrasonik, dan modul SIM800L untuk mengirim pemberitahuan SMS ke petugas kebersihan setelah tempat sampah terisi 80%, membantu mencegah luapan. Studi-studi ini secara kolektif menyoroti efektivitas menggabungkan IoT, ML, dan strategi motivasi untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah dan keterlibatan pengguna.

3.6 Metodologi

Penelitian ini menggunakan metodologi studi kasus kualitatif untuk mengembangkan rancangan Pengelolaan Sampah Cerdas yang disesuaikan untuk UAI. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa fase yang berbeda:

Identifikasi Masalah: Tahap awal yang dilakukan adalah menganalisis kondisi pengelolaan sampah yang ada di UAI melalui observasi langsung dan telaah pustaka untuk mengetahui inti permasalahan dan merumuskan pertanyaan penelitian.

Studi Literatur: Tinjauan mendalam terhadap penelitian sebelumnya, kerangka kerja yang relevan

(Wirani et al., 2024) dan teknologi pendukung dilakukan untuk mengidentifikasi solusi potensial dan praktik terbaik. Pengumpulan Data dilakukan dengan data Primer: Wawancara mendalam dan semi-terstruktur dilakukan dengan Kepala Unit Pelaksana Teknis Sarana dan Prasarana (SarPras) untuk memahami tantangan operasional, kebutuhan, dan harapan untuk sistem Pengelolaan Sampah Cerdas.

Data Sekunder: Analisis dokumen dilakukan pada dokumen Rencana Strategis UAI 2021 – 2025 (UAI, 2021) dan Peraturan Nasional (Nurikah et al., 2022), , dan Peraturan Presiden No. 97 Tahun 2017 Tentang Kebijakan Dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga untuk memastikan rancangan yang diusulkan selaras dengan kebijakan organisasi dan nasional.

Analisis Data: Data kualitatif dari wawancara diolah menggunakan analisis tematik, yang melibatkan kodifikasi dan kategorisasi untuk mengekstrak tema-tema utama yang terkait dengan masalah, kebutuhan, dan solusi potensial.

Perancangan: Berdasarkan analisis data dan kajian pustaka, dibuatlah rancangan Pengelolaan Sampah Cerdas yang komprehensif, dengan menjawab tantangan spesifik yang ada di UAI.

Validasi: Rancangan yang diusulkan dipresentasikan kepada Kepala SarPras dan Kepala Pusat Teknologi Informasi (PTI) untuk divalidasi. Langkah ini penting untuk memastikan kelayakan, kepraktisan, dan penerimaan solusi yang diusulkan baik dari perspektif operasional maupun teknologi.

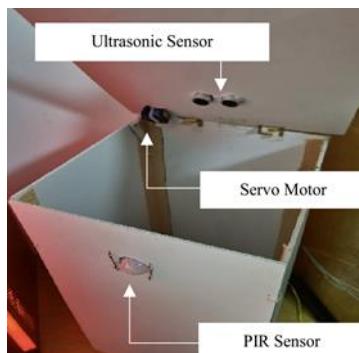
4 PEMBAHASAN

Menampilkan aplikasi yang dibagun, baik dalam Rancangan usulan sistem pengelolaan sampah cerdas untuk UAI disusun berdasarkan dua kegiatan utama yang diamanatkan oleh Undang-Undang No. 18/2008, yaitu pengurangan sampah dan penanganan sampah. Kegiatan pertama, pengurangan sampah, dicapai melalui strategi yang mencakup pembatasan sampah, daur ulang sampah, dan pemanfaatan kembali sampah. Setelah itu, kegiatan penanganan sampah dilaksanakan melalui pemilahan sampah, pengumpulan sampah, dan pengangkutan sampah.

4.1 Pengurangan Sampah

Strategi ini diawali dengan pengurangan sampah, yang difokuskan pada pencegahan dan minimalisasi timbulan sampah di sumbernya. Salah satu elemen kunci dalam pembatasan timbulan sampah adalah upaya pengendalian volume sampah yang dihasilkan sejak awal, yang melibatkan beberapa dimensi dalam proses tersebut, seperti dimensi teknologi, infrastruktur operasional, dan dimensi sosial budaya. Pada dimensi teknologi, untuk mengelola volume sampah yang dihasilkan, sistem ini menggabungkan tempat sampah cerdas yang terinspirasi dari rancangan (Ramasawmy & Nagowah, 2023) dan (Yusuf et al., 2024). Tempat sampah ini dilengkapi

dengan sensor ultrasonik untuk memantau tingkat pengisian, sensor PIR untuk mendeteksi keberadaan pengguna, dan motor servo untuk membuka tutup secara otomatis. Layar LCD kecil menampilkan persentase pengisian saat ini, yang memberikan umpan balik visual secara langsung. Setelah tempat sampah mencapai kapasitas 95%, tutupnya otomatis terkunci untuk mencegah pembuangan lebih lanjut dan menghindari luapan. Pengaturan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga memberikan informasi waktu nyata kepada pengguna dan petugas kebersihan yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Usulan Rancangan Smart Bin
Figure 2. Proposed Smart Bin Design

Sebuah penelitian oleh (Yusuf et al., 2024) menyoroti bahwa jadwal pengumpulan sampah yang tidak selaras dengan pola produksi sampah yang sebenarnya dapat menyebabkan polusi udara, tanah, dan air. Untuk mengatasi masalah ini, mereka mengembangkan prototipe pengelolaan sampah cerdas yang dirancang untuk mencegah luapan. Mirip dengan penelitian sebelumnya, sistem ini menggunakan sensor ultrasonik yang terhubung ke Arduino Uno untuk pemantauan waktu nyata, dan modul SIM800L untuk komunikasi nirkabel. Ketika tempat sampah mencapai kapasitas 50–80%, peringatan SMS dikirim ke pengelola sampah, dengan peringatan lain dipicu jika level melebihi 80%, menandakan perlunya pengosongan segera. Layar LCD yang terpasang pada tempat sampah menampilkan level pengisian dalam persentase, memberikan umpan balik visual kepada pengguna dan staf kebersihan yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Tampilan LCD pada Smart Bin yang menunjukkan Persentase Tingkat Pengisian

Figure 3. LCD Display on Smart Bin showing Fill Level Percentage

Untuk dimensi sosial budaya, dalam upaya mengurangi timbulan sampah, diperlukan dorongan yang tepat bagi para pembuang sampah agar lebih bijak dalam mengelola sampah. Sebuah aplikasi web, mirip dengan sistem "Pantau Semar" akan berfungsi sebagai dashboard pemantauan seperti yang terlihat pada Gambar 4. Dashboard ini akan menampilkan status semua tempat sampah di kampus. Untuk menumbuhkan budaya kebersihan, dashboard ini juga akan menampilkan leaderboard yang menunjukkan fakultas atau unit mana yang memiliki kinerja pengelolaan sampah terbaik, sehingga tercipta lingkungan persaingan yang positif. Untuk mengatasi masalah keamanan yang diangkat oleh SarPras, kamera CCTV pada Gambar 4 akan dipasang untuk memantau tempat sampah cerdas, mencegah pencurian dan vandalisme.



Gambar 4. Tampilan Dashboard "Pantau Semar"

Figure 4. View of the "Pantau Semar"



Gambar 5. Tampilan CCTV untuk Pengawasan

Figure 5. CCTV View for Security Monitoring Source

Untuk meningkatkan tingkat daur ulang, sistem akan mengotomatiskan proses pemilahan sampah awal, mengacu pada temuan (Afolalu et al., 2024) dan (Iliev & Marinov, 2024) yang menunjukkan potensi IoT dalam mendukung upaya daur ulang. Setiap tempat sampah cerdas akan dilengkapi dengan modul kamera berbiaya rendah dan sistem tertanam, seperti Arduino atau Raspberry Pi, yang menjalankan model ML. Pengaturan

ini akan secara otomatis mengidentifikasi dan mengklasifikasikan bahan yang dapat didaur ulang seperti kertas, plastik, kaca, dan logam di titik pembuangan, membantu mengurangi kontaminasi dalam aliran daur ulang sejak awal.

Untuk mempromosikan praktik penggunaan kembali, sistem akan menggabungkan kampanye pendidikan digital melalui aplikasi web. Platform ini akan secara berkala menampilkan pesan dan infografis yang mendorong penggunaan kembali sampah sehari-hari seperti botol air dan wadah makanan. Untuk memastikan visibilitas maksimum, edukasi digital ini akan muncul secara mencolok di halaman *Login StudentDesk* untuk mahasiswa dan Sistem Informasi Akademik (SIA) untuk dosen dengan mengintegrasikan kesadaran keberlanjutan ke dalam interaksi digital sehari-hari.

4.2 Penanganan Sampah

Penanganan sampah melibatkan aktivitas pemilahan, pengumpulan, dan pengangkutan sampah setelah sampah tersebut dihasilkan. Dalam aktivitas pemilahan, pemilahan otomatis merupakan landasan dari rancangan yang diusulkan, yang bertujuan untuk memecahkan masalah kritis sampah campuran. Rancangan ini banyak mengambil inspirasi dari sistem BINSIGHT (Catacutan et al., 2024) dan tempat sampah otomatis oleh (Sirawattananon et al., 2021). Sistem ini menggunakan Raspberry Pi sebagai unit pemrosesan pusatnya, yang mengoordinasikan berbagai komponen perangkat keras yang terlibat dalam proses pemilahan sampah. Sensor inframerah (IR) mendeteksi keberadaan pengguna, yang memicu kamera untuk mengambil gambar sampah. Gambar ini kemudian diproses oleh model ML yang memanfaatkan algoritma FOMO, yang mengklasifikasikan sampah ke dalam kategori seperti kertas, plastik, atau kemasan makanan. Berdasarkan hasil klasifikasi, motor servo mengarahkan sampah ke kompartemen internal yang benar. Arsitektur keseluruhan sistem diilustrasikan pada Gambar 6, dengan contoh deteksi objek ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 6. Arsitektur Sistem BINSIGHT
Figure 6. BINSIGHT's System Architecture



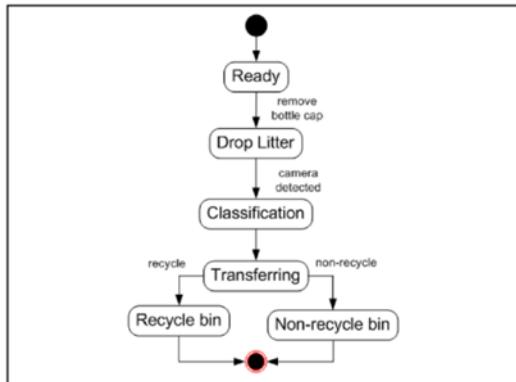
Gambar 7. Contoh Deteksi Sampah Kertas, Plastik, dan Kemasan Makanan

Figure 7. Detection Examples of Paper, Plastic, and Food Wrapping

Untuk mendorong perilaku membuat sampah yang baik, sistem BINSIGHT dilengkapi dengan sistem *reward*. Pengguna yang membuat sampah pada jenis yang sesuai akan diberikan *reward*. Begitu pula dengan pengguna yang membuat sampah pada jenis yang tidak sesuai akan diberikan penalti (Catacutan et al., 2024). Penelitian ini tidak menyebutkan secara spesifik bentuk *reward* yang diberikan oleh sistem BINSIGHT. Namun, jika sistem ini diterapkan pada UAI misalnya, *reward* yang diberikan dapat berupa kupon digital yang dapat ditukarkan di kantin.

Penerapan penggunaan algoritma FOMO juga terjadi pada penelitian (Iliev & Marinov, 2024) dalam optimasi *embedded system* untuk pendekripsi *e-waste*. Menurut peneliti, algoritma FOMO memberikan solusi pendekripsi objek yang efisien untuk perangkat dan sumber daya yang terbatas seperti mikrokontroler. Dilaporkan bahwa FOMO 30 kali lebih cepat dari MobileNet SSD dan penggunaan RAM rendah yang tidak melebihi 200KB.

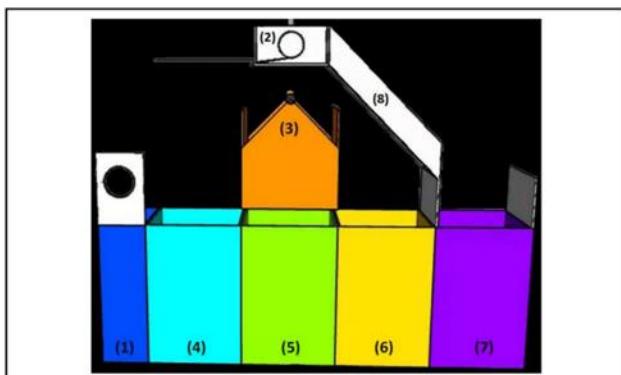
Pada penelitian yang dilakukan oleh (Sirawattananon et al., 2021), permasalahan yang dihadapi oleh Kasetsart University Thailand adalah perilaku pembuang sampah yang kurang efektif dalam memilah sampah. Hal ini terjadi padahal diketahui bahwa 40% sampah yang dihasilkan memiliki potensi yang tinggi untuk didaur ulang. Pihak universitas sendiri mengetahui pentingnya pemilahan sampah dan menyediakan tempat sampah terpisah untuk meminimalisir tercampurnya sampah. Namun belum seefektif yang diharapkan. Maka dengan permasalahan yang telah disebutkan, maka dirancanglah suatu sistem dengan alur pada Gambar 8 untuk pemilahan sampah cerdas berbasis IoT yang dapat bekerja secara otomatis dalam memisahkan sampah ke dalam kategori yang sesuai.



Gambar 8. Alur Sistem Pemilahan Sampah Cerdas

Figure 8. System Flow for Automated Waste Sorting

Setelah terdeteksi, kamera Raspberry Pi akan mengambil beberapa gambar dari sampah yang terdeteksi. Gambar tersebut akan dikirim ke model *Deep Learning* dengan ResNet-50 yang telah dilatih menggunakan kumpulan data gambar untuk mengenali berbagai jenis sampah. Model ini mampu mengklasifikasikan empat jenis sampah yang terdiri dari PET, plastik, logam, dan sampah lainnya. Setelah identifikasi selesai, hasil klasifikasi dikirim kembali ke Raspberry Pi. Bergantung pada jenis sampah, motor akan memindahkan sampah ke wadah yang sesuai untuk jenis tersebut. Gambar 9 mengilustrasikan model *smart bin* untuk pemilahan sampah otomatis (Sirawattananon et al., 2021).

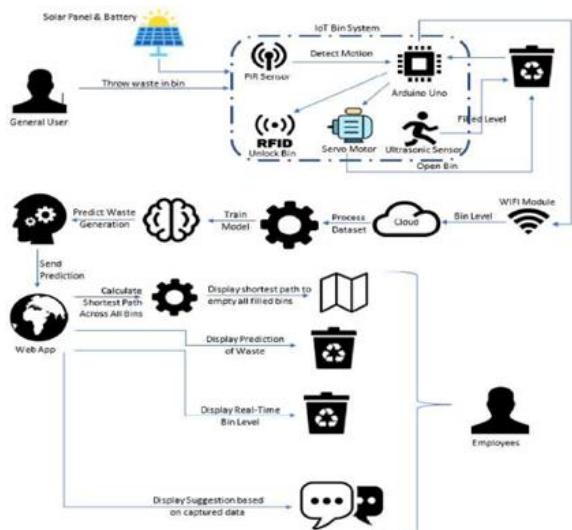


Gambar 9. Model Tempat pemilahan Otomatis Multi-Kompartemen.

Figure 9. Model of a Multi-Compartment Automated Sorting Bin

Model *smart bin* dibagi menjadi delapan bagian yang terdiri dari: wadah tutup botol, wadah pembuangan sampah, pipa yang mengalirkan sampah ke wadah yang sesuai, wadah plastik PET, wadah botol plastik, kaleng logam, sampah sisa yang tidak dapat didaur ulang, motor pemindah sampah. Keseluruhan sistem ini dirancang untuk mengurangi kesalahan pengguna dalam memilah sampah dan meningkatkan efisiensi daur ulang. Sistem ini juga memiliki sistem *reward* berupa poin yang diperoleh mahasiswa untuk setiap sampah yang dimasukkan (Sirawattananon et al., 2021).

Dalam pengumpulan sampah, proses ini dilakukan dengan mengumpulkan sampah dari sumbernya seperti titik-titik yang tersebar di seluruh wilayah UAI. Berdasarkan penelitian sebelumnya, SarPras dapat mempertimbangkan implementasi berikut untuk mengefisiensikan pengeluaran dan biaya sumber daya manusia dengan dimensi yang terlibat dalam proses ini adalah teknologi dan infrastruktur operasional. Melanjutkan penelitian yang dilakukan oleh (Ramasawmy & Nagowah, 2023), selain manfaatnya dalam membatasi timbulan sampah, sistem *smart bin* yang diimplementasikan memiliki peran dalam meningkatkan proses pengumpulan sampah. Sistem ini memprediksi pengisian sampah dengan mengumpulkan data tingkat kepuaan semua tempat sampah untuk dianalisis menggunakan teknik ML. Hasil prediksi ML kemudian dapat digunakan untuk memprediksi kapan tempat sampah penuh sekaligus memberikan rute terpendek yang diambil untuk mengosongkan sampah yang penuh. Gambar 10 menunjukkan area atas arsitektur sistem *smart bin* yang menunjukkan alur kerja *smart bin* fisik. Proses ML dimulai dari modul WIFI yang terhubung ke Arduino Uno untuk menyiaran data tingkat kepuaan sampah yang digunakan untuk pemantauan *real-time* dan kebutuhan ML (Ramasawmy & Nagowah, 2023).



Gambar 10. Arsitektur Sistem Smart Bin

Figure 10. System Architecture of Smart Bin

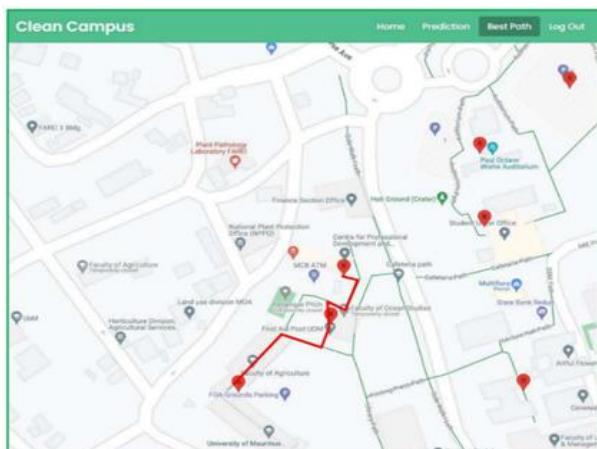
Prediksi akan dilakukan untuk mendapatkan berapa lama tempat sampah akan penuh. Untuk mewujudkan prediksi tersebut, akan digunakan model dengan membandingkan empat algoritma yang terdiri dari *Linear Regression*, *Decision Tree*, *Random Forest*, dan *Support Vector Regression*. Data latih dibagi menjadi 2 bagian dengan 80% sebagai model latih dan 20% sebagai model uji. Evaluasi dan perbandingan model dilakukan dengan menggunakan *Mean Absolute Error*

(MEA) dan waktu prediksi yang dibutuhkan untuk setiap tempat sampah (Ramasawmy & Nagowah, 2023). Tabel 2 menunjukkan bahwa *Linear Regression* merupakan yang paling efisien, dengan MEA terendah (22,86 menit) dan waktu prediksi tercepat (0,0060 detik).

Tabel 2. Komparasi Performa Algoritma ML
Table 2. Comparison of ML Algorithm Performance

Algorithm	Mean Absolute Error (In Minute)	Time Required (In Second)
Linear Regression	22.86	0.0060
Decision Tree	24.3	0.0067
Random Forest	25.08	0.2769
Support Vector Regression	23.82	0.0102

Berdasarkan prediksi ini, aplikasi web akan menghasilkan rute pengumpulan sampah terpendek yang mungkin bagi staf kebersihan, yang ditampilkan pada peta menggunakan Google Maps API terlihat pada Gambar 11. Hal ini memastikan bahwa staf hanya mengunjungi tempat sampah yang penuh atau hampir penuh, sehingga tidak ada perjalanan yang sia-sia



Gambar 11. Peta yang Menunjukkan Rute Terpendek Pengumpulan Sampah.

Figure 11. Map Displaying the Shortest Collection Route

Untuk tahap akhir pengangkutan, rancangan ini merekomendasikan kerja sama dengan layanan pengelolaan sampah pihak ketiga yang profesional yang menangani sampah yang telah dipilah. Hal ini memastikan bahwa upaya yang dilakukan dalam pemilihan dan daur ulang di kampus ditindaklanjuti hingga tahap pemrosesan akhir. Mitra potensial di wilayah Jakarta meliputi *Waste4Change*, Duitin, Rekosistem, dan Armada Kemasan. Perusahaan-perusahaan ini menyediakan layanan pengumpulan khusus untuk berbagai jenis bahan yang dapat didaur ulang, mengangkutnya ke fasilitas pemulihian material

(MRF) yang sesuai, dan memastikan bahwa hanya sampah sisa yang berakhir di tempat pembuangan akhir.

4.3 Rekomendasi Rancangan Smart Waste Management

Berdasarkan pembahasan di atas, maka dapat direkomendasikan agar implementasi dilakukan untuk mendukung pengelolaan sampah secara cerdas. Semua penerapan tersebut diperoleh dari beberapa penelitian sebelumnya. Penerapan ini juga dilakukan di lingkungan universitas dan non-universitas serta opsi dari kerja sama pihak ketiga terkait.

Sistem Pengelolaan Sampah Cerdas yang diusulkan mencakup serangkaian rekomendasi komprehensif yang dikategorikan berdasarkan proses, dimensi, implementasi, dan lokasi. Untuk pengurangan sampah, komponen teknologi dan operasional utama seperti sensor ultrasonik, motor gerak, sensor PIR, dan LCD digunakan untuk mendukung mekanisme tutup tempat sampah otomatis. Dari perspektif sosial-budaya, aplikasi web akan menampilkan kinerja pengelolaan sampah menurut fakultas atau unit, yang mendorong terciptanya lingkungan kompetitif yang mendorong kebersihan. Selain itu, keamanan ditingkatkan melalui pemasangan kamera CCTV di sekitar tempat sampah cerdas. Upaya daur ulang didukung oleh perangkat IoT, ML, dan modul kamera yang memungkinkan klasifikasi otomatis bahan yang dapat didaur ulang.

Untuk mendorong penggunaan kembali, sistem ini menawarkan pemantauan langsung terhadap tingkat isi tempat sampah dan jenis sampah, yang mendorong pengguna untuk menggunakan kembali barang-barang. Hal ini diperkuat oleh kampanye edukasi digital yang ditayangkan melalui platform web, yang mendorong penggunaan kembali sampah seperti wadah makanan dan botol air. Pemilihan sampah difasilitasi oleh integrasi Raspberry Pi, sensor inframerah, modul kamera, dan algoritma FOMO untuk mengidentifikasi jenis sampah, dengan motor servo yang mengarahkan sampah ke kompartemen yang sesuai. Sistem reward juga memotivasi pengguna untuk membuang sampah dengan benar. Untuk pengumpulan sampah, sistem ini menggunakan ML Model *Linear Regression*, aplikasi web, Google Maps API, modul Wi-Fi, dan Arduino Uno untuk menentukan rute pengumpulan terpendek. Terakhir, kemitraan dengan organisasi pihak ketiga seperti *Waste4Change*, Duitin, Rekosistem, dan Armada Kemasan direkomendasikan untuk transportasi dan pemrosesan sampah yang telah dipilah di fasilitas yang ditunjuk.

4.4 Validasi Hasil Rancangan Smart Waste Management

Rancangan pengelolaan sampah cerdas memerlukan proses validasi oleh pihak-pihak yang memiliki pengalaman dan pengetahuan yang relevan, baik dari segi pengelolaan sampah maupun pemanfaatan teknologi. dengan pengelolaan sampah dan sisi teknologi

pelaksanaannya. Kepala SarPras dan Kepala PTI bertanggung jawab atas validasi ini. Mereka bertugas untuk menentukan rancangan yang layak disetujui. Manfaat utama dari validasi ini adalah untuk memastikan bahwa rancangan pengelolaan sampah cerdas tersebut sesuai dan layak untuk dilaksanakan di UAI.

Proses validasi mencakup beberapa aspek penting yang telah dinilai sebagai pengakuan formal atas kelayakan rancangan. Aspek-aspek ini meliputi:

Sistem *reward* untuk mendorong perilaku membuat sampah dengan benar, mengintegrasikan deteksi pemilahan sampah otomatis, sensor level sampah, dan tutup tempat sampah otomatis, mengembangkan aplikasi web untuk memantau level sampah dan menentukan rute pengumpulan sampah terpendek, sistem keamanan melalui penggunaan CCTV, pendidikan digital yang terintegrasi dengan sistem informasi akademik, kerja sama dengan pihak ketiga untuk pengangkutan sampah terpisah.

Rancangan ini, yang mencakup semua elemen yang dijelaskan di atas, dipresentasikan kepada Kepala SarPras dan Kepala Pusat Teknologi Informasi (PTI) di UAI. Kedua pemangku kepentingan memvalidasi rancangan tersebut, mengonfirmasi bahwa keenam aspek utama tersebut layak dan sesuai untuk diterapkan di universitas. Mereka sepakat bahwa sistem yang diusulkan mengatasi tantangan inti pengelolaan sampah di UAI dan menyediakan jalur yang layak menuju peningkatan efisiensi operasional dan mencapai peringkat UI GreenMetric yang lebih tinggi.

5 KESIMPULAN

Universitas Al-Azhar Indonesia menghadapi tantangan yang signifikan dalam pengelolaan sampah, terutama karena volume sampah yang tidak terkendali dan kurangnya pemilahan, yang berdampak buruk pada peringkat UI GreenMetric-nya. Penelitian ini telah menghasilkan rancangan komprehensif untuk sistem pengelolaan sampah cerdas yang dirancang untuk mengatasi masalah-masalah khusus ini. Rancangan yang diusulkan mengintegrasikan IoT, ML, dan *Embedded System* di seluruh siklus hidup pengelolaan sampah. Untuk mengurangi sampah, rancangan ini mengusulkan tempat sampah cerdas dengan sensor ultrasonik, tutup otomatis, dan aplikasi web terintegrasi untuk pemantauan kinerja dan keamanan melalui CCTV. Daur ulang ditingkatkan melalui klasifikasi otomatis menggunakan ML, sementara penggunaan kembali dipromosikan melalui kampanye pendidikan digital. Untuk penanganan sampah, sistem ini dilengkapi fitur penyortiran otomatis dengan Raspberry Pi dan algoritma FOMO, ditambah dengan sistem *reward* untuk memberi insentif atas partisipasi pengguna. Pengumpulan sampah dioptimalkan melalui prediksi berbasis ML dan perencanaan rute dinamis. Terakhir, pengangkutan sampah yang telah dipilah disederhanakan melalui kemitraan dengan layanan pihak ketiga yang profesional. Seluruh rancangan telah divalidasi dan disetujui oleh

para pemangku kepentingan utama di UAI, yang telah menganggapnya sebagai solusi yang layak dan tepat. Penerapan sistem pengelolaan sampah cerdas ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah secara signifikan, mendorong lingkungan kampus yang berkelanjutan, dan secara substansial meningkatkan skor UAI dalam pemeringkatan UI GreenMetric, yang menyelaraskan universitas dengan tujuan keberlanjutan nasional dan global.

6 SARAN

Penelitian ini memiliki dua hal penting yang tidak dilakukan pada penelitian ini, namun dianggap krusial untuk diimplementasikan. Pertama, Pengembangan sistem pengelolaan yang spesifik untuk sampah organik dari pohon dan taman untuk diolah menjadi kompos sehingga dapat dimanfaatkan kembali. Kedua, Penanganan Sampah dapur kantin dapat dioptimalkan dengan memanfaatkan Larva (*Maggot*) sehingga menghasilkan produk bernilai ekonomis seperti pakan ternak atau pupuk organik.

7 REFERENSI

- Adhy, D. R., Anwar, N., Maesaroh, S., & Hermawan, R. (2025). Machine Learning Dan Internet Of Things (IoT): Implementasi Machine Learning Dalam Internet of Things. PT. Star Digital Publishing, Yogyakarta-Indonesia.
- Afolalu, S. A., Ogedengbe, T. S., Ikumapayi, O. M., Adediran, A. A., & Yussouff, A. A. (2024). Wastewater And Its Management—A Review. *2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG)*, 1–7.
- Arifandi, M. W. (2020). Pengembangan Sistem Tempat Sampah Pintar Berbasis Internet of Things (IoT). Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Atici, K. B., Yasayacak, G., Yildiz, Y., & Ulucan, A. (2021). Green University and academic performance: An empirical study on UI GreenMetric and World University Rankings. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125289.
- Catacutan, I. N. T., Lee, S. S., Legarda, M. G. P., Abando, D. S., Agustin, V. A., & Sison, A. A. R. C. (2024). BINSIGHT: Waste Sorting Enhanced with Machine Learning and Reward System. *2024 8th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS)*, 1–6.
- Iliev, D. I., & Marinov, M. B. (2024). Optimizing an Embedded System for e-Waste Object Detection. *2024 XXXIII International Scientific Conference Electronics (ET)*, 1–6.
- Iswanto, R., Sofiyawati, N., Wibowo, Y. R. P., Wirawan, J., Indriati, L., Utomo, P. R., Pratomo, E. R., Saniscara, P., Wardaya, M., & Anggrianto, C. (2025). Desain Berdampak: Strategi Human-Centered Untuk Mewujudkan SDGs. Penerbit Universitas Ciputra.



- Kannan, D., Khademolqorani, S., Janatyan, N., & Alavi, S. (2024). Smart Waste Management 4.0: The Transition From A Systematic Review To An Integrated Framework. *Waste Management*, 174, 1–14.
- Masjhoer, J. M. (2025). Konsep Dan Teori: Partisipasi Masyarakat Perdesaan Dalam Pengurangan Sampah. Jussac M Masjhoer.
- Moni, J., Jacob, P. M., Pawar, S., Varghese, R. R., Mani, P., & KK, G. (2022). An Intelligent Smart Bin System For Solid Waste Management In Smart Cities. *2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA)*, 1083–1087.
- Munawar, Z., Soerjono, H., Komalasari, R., Putri, N. I., Assegaf, M. M., & Fudsyi, M. I. (2025). Pemanfaatan Pengelolaan Sampah Padat Berbasis IoT Untuk Kemandirian Desa. *Darma Abdi Karya*, 4(1), 39–53.
- Nurikah, N., Jazuli, E. R., & Furqon, E. (2022). Tata Kelola Pengelolaan Sampah Berdasarkan Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah Terhadap Pengelolaan Sampah Berbasis Partisipasi Masyarakat Di Kota Serang. *Gorontalo Law Review*, 5(2), 434–442.
- Olawade, D. B., Fapohunda, O., Wada, O. Z., Usman, S. O., Ige, A. O., Ajisafe, O., & Oladapo, B. I. (2024). Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2(2), 244–263.
- Puertas, R., Guaita-Martinez, J. M., & Marti, L. (2023). Analysis of the impact of university policies on society's environmental perception. *Socio-Economic Planning Sciences*, 88, 101672.
- Ramasawmy, K., & Nagowah, S. D. (2023). Smart waste monitoring system using machine learning for IoT-enabled smart green campus. *2023 11th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, 505–510.
- Sirawattananon, C., Muangnak, N., & Pukdee, W. (2021). Designing of IoT-based Smart Waste Sorting System With Image-Based Deep Learning Applications. *2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 383–387.
- Tsonkov, N., & Petrov, K. (2023). Opportunities For IoT-Based Smart Platforms For Intelligent Management Of Waste Systems In Bulgarian Municipalities. *2023 International Conference on Information Technologies (InfoTech)*, 1–4.
- UAI, T. R. (2021). Rencana strategis Universitas Al Azhar Indonesia 2021-2025.
- Wirani, Y., Eitiveni, I., & Sucahyo, Y. G. (2024). Framework Of Smart And Integrated Household Waste Management System: A Systematic Literature Review Using PRISMA. *Sustainability*, 16(12), 4898.
- Yusuf, I. O., Ariba, F., Onyemenam, J., Adebanji, B., Adedayo, B., Ijagbemi, A., & Samuel, I. O. (2024). A Smart and Automated Waste Management System. *2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG)*, 1–6.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Kepala Unit Pelaksana Teknis Sarana dan Prasarana serta Kepala Pusat Teknologi Informasi UAI yang telah memberikan pandangan berharga terhadap topik penelitian dan dukungan data-data krusial yang dijalani penulis.