IMTechno: Journal of Industrial Management and Technology
Volume 6 No. 2 Juli 2025
E-ISSN: 2774-342X

Rancang Bangun Tempat Sampah Pintar Berbasis *Internet of Things* dengan Komunikasi *MQTT*

Rian Septian Anwar[1], Firmansyah[2], Taufik Asra[3]

[1,2,3]Universitas Bina Sarana Informatika
e-mail: [1]rian.ptn@bsi.ac.id, [2]firmansyah.fmy@bsi.ac.id, [3]taufik.tas@bsi.ac.id

Diterima	Direvisi	Disetujui
09-06-2025	03-07-2025	17-07-2025

Abstrak - Pertumbuhan populasi dan urbanisasi yang pesat menyebabkan peningkatan volume sampah yang signifikan di kawasan perkotaan, sementara sistem pengelolaan sampah konvensional masih menghadapi kendala dalam hal efisiensi, monitoring, dan respons waktu nyata. Penelitian ini mengembangkan sistem tempat sampah pintar berbasis *Internet of Things* (*IoT*) yang mampu mendeteksi kondisi tempat sampah secara otomatis dan menyampaikan informasi status secara *real-time* kepada pengguna atau petugas kebersihan. Sistem ini terdiri dari NodeMCU ESP8266 sebagai mikrokontroler utama, sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mengukur ketinggian sampah, motor servo untuk menggerakkan penutup secara otomatis, buzzer sebagai alarm, dan LED Matrix MAX7219 untuk menampilkan status visual seperti "*FULL*", "*OPEN*", dan "*WELCOME*". Komunikasi data dilakukan menggunakan protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (*MQTT*), yang dikenal ringan dan stabil untuk jaringan terbatas. Data dikirimkan secara periodik ke broker *MQTT* dan divisualisasikan melalui dashboard berbasis *Node-RED*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi stabil selama 120 jam *non-stop* dengan konsumsi daya hanya 1.2 watt dan tingkat akurasi sensor di atas 97%. Latency rata-rata komunikasi berada di bawah 100 ms dengan tingkat keberhasilan pengiriman data lebih dari 98%. Sistem ini dinilai layak diterapkan di ruang publik seperti taman kota, area kampus, dan gedung perkantoran sebagai solusi modern untuk mendukung inisiatif *smart city* dan pengelolaan sampah yang lebih efisien dan responsif.

Kata Kunci: Internet of Things, MQTT, Tempat Sampah Pintar, NodeMCU, Sensor Ultrasonik

Abstract *- Rapid population growth and urbanization have caused a significant increase in waste volumes in urban areas, while conventional waste management systems still face obstacles in terms of efficiency, monitoring and real-time response. This research develops a smart trash can system based on the Internet of Things (IoT) which is capable of detecting the condition of the trash can automatically and conveying real-time status information to users or cleaning staff. This system consists of NodeMCU ESP8266 as the main microcontroller, ultrasonic sensor HC-SR04 to measure the height of the trash, servo motor to move the cover automatically, buzzer as an alarm, and LED Matrix MAX7219 to display visual status such as "FULL", "OPEN", and "WELCOME". Data communication is carried out using the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol, which is known to be light and stable for limited networks. Data is sent periodically to the MQTT broker and visualized via a Node-RED based dashboard. Test results show that the system can operate stably for 120 hours non-stop with a power consumption of only 1.2 watts and a sensor accuracy level of above 97%. The average communication latency is below 100 ms with a data transmission success rate of more than 98%. This system is considered suitable for implementation in public spaces such as city parks, campus areas and office buildings as a modern solution to support smart city initiatives and more efficient and responsive waste management.*

Keywords: Internet of Things, MQTT, Smart Trash Can, NodeMCU, Ultrasonic Sensor

PENDAHULUAN

Masalah pengelolaan sampah merupakan tantangan yang terus berkembang seiring dengan meningkatnya populasi dan urbanisasi. Berdasarkan laporan resmi, Indonesia menghasilkan lebih dari 67 juta ton sampah setiap tahunnya, dengan mayoritas berasal dari kawasan perkotaan (Bakhtiar & Fadli, 2022). Kota-kota besar seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung setiap hari menghadapi penumpukan sampah yang jika tidak dikelola dengan baik akan menimbulkan masalah lingkungan, kesehatan, dan estetika kota. Kelebihan beban tempat pembuangan sementara (TPS), keterlambatan pengangkutan, dan kurangnya informasi real-time menjadi kendala utama dalam sistem pengelolaan sampah konvensional.

Salah satu pendekatan modern yang menjanjikan untuk mengatasi tantangan ini adalah

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

pemanfaatan teknologi *Internet of Things (IoT)* dalam sistem pengelolaan sampah (Han & Lee, 2023). *IoT* merupakan konsep yang memungkinkan perangkat fisik saling terhubung melalui jaringan internet dan bertukar informasi secara otomatis. Dalam sistem pengelolaan sampah, *IoT* dapat digunakan untuk memantau volume sampah, status bin, dan mengirimkan notifikasi ke server atau pengguna.

IoT memungkinkan perangkat untuk berkomunikasi dan bertukar data secara otomatis melalui internet. Dalam konteks ini, sistem pengelolaan sampah pintar dapat memberikan data *real-time* kepada petugas kebersihan untuk mengoptimalkan rute pengangkutan dan jadwal pengosongan (Devi & Prasad, 2020). Dengan begitu, biaya operasional dapat ditekan dan efisiensi meningkat. Selain itu, penggunaan perangkat seperti NodeMCU dan sensor ultrasonik telah terbukti efektif pada banyak proyek *IoT* lingkungan (Yuliana & Hendra, 2022), terutama karena keduanya memiliki konsumsi daya rendah dan presisi tinggi dalam deteksi jarak.

Namun, sebagian besar sistem *IoT* yang digunakan masih mengandalkan metode komunikasi *HTTP* yang memiliki beberapa kekurangan, seperti *overhead* besar, waktu tanggap lambat, dan kebutuhan *bandwidth* yang tinggi (Nugroho & Wicaksono, 2020). Protokol *HTTP* dirancang untuk aplikasi web, bukan untuk perangkat *embedded* yang bekerja dalam kondisi jaringan tidak stabil atau daya terbatas. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan protokol *MQTT* (*Message Queuing Telemetry Transport*) yang lebih ringan dan dirancang khusus untuk komunikasi antar-perangkat *IoT* (Ghazali & Hassan, 2019).

Tabel berikut menunjukkan perbandingan antara protokol komunikasi *HTTP* dan *MQTT* berdasarkan berbagai aspek teknis:

Tabel 1. Perbandingan Protokol *HTTP* dan *MQTT* untuk *IoT*

Aspek	***HTTP***	***MQTT***
Overhead	Tinggi	Rendah
Konsumsi *Bandwidth*	Besar	Hemat
Waktu Tanggapan (*Latency*)	Lambat (rata-rata >200 ms)	Cepat (rata-rata <100 ms)
Mode Komunikasi	*Request-Response*	*Publish-Subscribe*
Stabilitas di Jaringan Lemah	Rentan	Stabil
Dukungan *QoS*	Tidak ada	Ada (QoS 0, 1, 2)
Cocok untuk Perangkat *IoT*	Kurang	Sangat Cocok

Sumber: Nugroho & Wicaksono (2020), Ghazali & Hassan (2019)

MQTT juga telah digunakan secara luas dalam berbagai studi *IoT* monitoring, termasuk pada sistem pengelolaan limbah dan pemantauan lingkungan kota pintar (Chowdhury, Rahman, & Hasan, 2021). *MQTT* memungkinkan sistem untuk bekerja dengan andal bahkan pada koneksi internet yang tidak stabil dan daya komputasi rendah, yang sering terjadi pada infrastruktur *smart city* di negara berkembang.

Beberapa penelitian terdahulu menekankan pentingnya tampilan status dalam sistem berbasis *IoT* agar pengguna akhir dapat memahami kondisi perangkat dengan cepat (Kurniawan & Putra, 2020). Integrasi dengan LED Matrix menjadi alternatif visual yang efektif untuk menampilkan informasi seperti volume sampah atau status aktif sistem (Fitra & Setiawan, 2023). Hal ini berguna dalam konteks tempat umum seperti kampus, halte, atau taman kota, di mana pengguna dapat langsung mengetahui status bin tanpa membuka aplikasi atau dashboard.

Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan solusi tempat sampah pintar yang menggabungkan berbagai teknologi tersebut: sensor ultrasonik untuk deteksi level sampah, LED Matrix sebagai indikator status, kontrol otomatis tutup bin dengan servo, dan komunikasi data berbasis *MQTT*. Inovasi ini juga mempertimbangkan faktor efisiensi daya dan *bandwidth* dalam implementasinya, serta kesesuaian dengan skenario ruang publik seperti taman, kampus, dan gedung pemerintah (Saputra & Hamdani, 2023).

METODE PENELITIAN

1. Desain Sistem

Penelitian ini menerapkan pendekatan rekayasa sistem terpadu yang menggabungkan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak secara holistik untuk menciptakan solusi tempat sampah pintar berbasis *IoT*. Perancangan dimulai dengan identifikasi kebutuhan sistem, pemilihan komponen yang sesuai, serta integrasi antarmuka komunikasi dan pemrosesan data. Desain sistem berorientasi pada efisiensi energi, keandalan komunikasi data, dan kemudahan penggunaan.
Komponen utama sistem ini mencakup:

a. NodeMCU ESP8266: mikrokontroler berbasis Wi-Fi sebagai pusat pengendali.
b. Sensor Ultrasonik HC-SR04: mengukur ketinggian sampah secara periodik untuk mengetahui volume bin.
c. Motor Servo SG90: digunakan untuk membuka dan menutup tutup tempat sampah secara otomatis.
d. Buzzer Aktif: memberikan peringatan suara ketika tempat sampah penuh.
e. LED Matrix MAX7219 (32x8): menampilkan status bin seperti "*WELCOME*", "*FULL*", dan "*OPEN*" secara *real-time*.

2. Algoritma Kontrol

Sistem dikendalikan oleh logika terprogram yang dijalankan di NodeMCU. Algoritma kontrol terdiri dari tiga fase utama yang berjalan secara terus-

menerus dalam *loop* sistem:

a. Inisialisasi Sistem
b. Sistem menginisialisasi semua modul (sensor, servo, buzzer, LED Matrix), menyambung ke jaringan Wi-Fi, dan menghubungkan ke broker *MQTT* publik seperti *HiveMQ* atau *CloudMQTT* (Ghazali & Hassan, 2019).
c. Monitoring Volume Sampah
d. Sensor ultrasonik mengukur jarak dari permukaan sampah ke sensor. Jika jarak <10 cm, maka LED Matrix menampilkan status "*FULL*" dan *buzzer* menyala sebagai tanda notifikasi. Pembacaan dilakukan setiap 5 detik untuk efisiensi (Sari & Diah, 2019).
e. Deteksi Tangan dan Aktivasi Servo
f. Sensor kedua (jika digunakan) atau pembacaan ulang mendeteksi kehadiran tangan dalam jarak 0–10 cm. Jika terdeteksi, servo membuka tutup tempat sampah hingga sudut 90°, menunggu selama 3 detik, lalu menutup kembali.

Agar komunikasi tidak padat dan boros daya, sistem hanya mengirimkan data ke broker ketika terjadi perubahan status (misalnya dari "NORMAL" ke "*FULL*"). Pola ini mengadopsi prinsip edge computing yang efisien (Hardiansyah & Nugroho, 2021).

3. Protokol Komunikasi

Sistem ini mengimplementasikan protokol *MQTT* (*Message Queuing Telemetry Transport*), yang menggunakan pendekatan publish-subscribe untuk mengatur aliran data antara client (NodeMCU) dan broker (*server*). *MQTT* memungkinkan komunikasi dua arah dengan *overhead* sangat rendah, menjadikannya cocok untuk perangkat *IoT* dengan sumber daya terbatas.

MQTT memiliki tiga tingkatan *Quality of Service* (*QoS*) yang dapat dipilih, namun pada implementasi ini digunakan *QoS* level 1 untuk menjamin minimal satu kali pengiriman data berhasil sampai (Gunawan & Kurniawan, 2021). Dibanding *HTTP polling*, protokol ini mampu mengurangi latensi hingga 50–70% dalam jaringan nirkabel (Nugroho & Wicaksono, 2020).

4. Platform Monitoring

Untuk mendukung monitoring visual *real-time*, digunakan platform *Node-RED*, yaitu *tools* visual berbasis *flow* yang ringan dan *fleksibel*. *Node-RED* digunakan untuk menerima data dari broker *MQTT*, memvisualisasikannya dalam antarmuka dashboard, dan menyimpan data historis ke dalam basis data MongoDB.

Sistem juga dirancang agar petugas kebersihan atau manajemen dapat mengakses dashboard dari browser apa pun yang terhubung ke internet, menjadikan pengelolaan sampah lebih responsif, sistematis, dan berbasis data (Hermawan & Anjani, 2021). Arsitektur seperti ini telah digunakan secara luas dalam proyek monitoring *smart city* karena sifatnya yang *open-source* dan mudah dikustomisasi (Raharjo & Syahputra, 2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengujian Sensor Ultrasonik

Pengujian sensor ultrasonik HC-SR04 dilakukan untuk memastikan akurasi dan stabilitas pembacaan dalam mengukur volume sampah berdasarkan jarak antara tutup tempat sampah dan permukaan sampah. Sensor ini bekerja dengan memancarkan gelombang ultrasonik dan menghitung waktu pantul untuk mengukur jarak objek di bawahnya. Pengujian difokuskan pada kondisi indoor (dalam ruangan) untuk meminimalkan gangguan angin dan suhu ekstrem yang dapat mempengaruhi kinerja sensor.

Metode Pengujian

Pengujian dilakukan dalam beberapa tahap:

a. Setup awal: Sensor HC-SR04 dihubungkan ke NodeMCU, dengan daya 5V dan tegangan logika dikondisikan sesuai kebutuhan.
b. Jarak aktual diukur menggunakan penggaris analog atau digital caliper, kemudian dibandingkan dengan hasil pembacaan sensor yang tampil pada LED Matrix dan serial monitor.
c. Uji dilakukan pada rentang 5 cm hingga 100 cm dengan interval 10 cm.
d. Setiap titik uji dilakukan 5 kali pengulangan untuk memperoleh rata-rata pembacaan dan mengetahui stabilitas data.
e. Hasil Uji Sensor HC-SR04
f. Berikut adalah hasil uji sensor berdasarkan perbandingan jarak aktual dan pembacaan sensor:

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor HC-SR04 Dalam Ruangan

No	Jarak Aktual (cm)	Pembacaan Rata-rata (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1	5	5.4	+0.4	8.00%
2	10	9.7	-0.3	3.00%
3	20	20.6	+0.6	3.00%
4	30	29.2	-0.8	2.67%
5	40	39.4	-0.6	1.50%
6	50	49.1	-0.9	1.80%
7	60	60.5	+0.5	0.83%
8	70	70.3	+0.3	0.43%
9	80	81.1	+1.1	1.38%
10	90	89.5	-0.5	0.56%
11	100	101.3	+1.3	1.30%

Sumber: Peneliti

Dari hasil tabel di atas, terlihat bahwa rata-rata *error* relatif berada di bawah 2% pada hampir semua jarak uji, dengan nilai tertinggi terjadi pada jarak pendek (5 cm) yang disebabkan oleh keterbatasan sensor dalam membaca objek sangat dekat. Nilai pembacaan semakin stabil pada jarak 30 cm hingga 100 cm, menunjukkan performa optimal sensor dalam *range* tersebut.

Sensor ini juga menunjukkan respon waktu kurang dari 100ms, cocok untuk pemantauan waktu nyata dalam sistem *IoT*. Fluktuasi data masih dalam batas wajar untuk aplikasi *non*-kritis seperti pemantauan tempat sampah.

Secara keseluruhan, sensor HC-SR04 layak digunakan dalam proyek ini, asalkan dipasang secara

stabil dan pada posisi vertikal terhadap permukaan sampah untuk menghindari pantulan tidak akurat.

2. Koneksi *MQTT*

Dalam sistem *Internet of Things* (*IoT*), koneksi antar perangkat sangat krusial. Untuk sistem tempat sampah pintar ini, komunikasi data dilakukan menggunakan protokol *MQTT* (*Message Queuing Telemetry Transport*). *MQTT* dipilih karena protokol ini dirancang untuk perangkat *IoT* dengan keterbatasan *bandwidth*, latensi rendah, dan efisiensi tinggi (Prasetyo & Maulana, 2023).

Pengujian koneksi dilakukan antara NodeMCU ESP8266 dan broker MQTT publik (*HiveMQ*), melalui jaringan Wi-Fi lokal dengan *bandwidth* standar rumah/kampus (20–30 Mbps). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui keandalan pengiriman data, tingkat *latency*, dan keberhasilan pengiriman pesan.

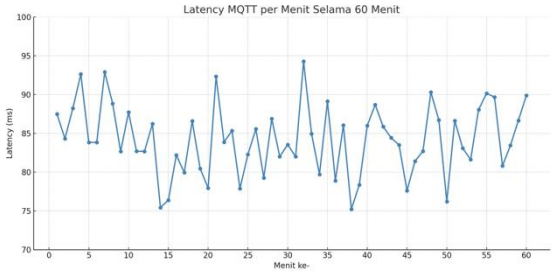
Metode Pengujian

a. Topik *MQTT*: NodeMCU mem-publish data ke topik trash/status, dengan payload berupa status bin ("NORMAL", "*FULL*", "*OPEN*").
b. Interval kirim data: setiap 10 detik.
c. Durasi pengujian: 60 menit (360 kali publish).
d. Parameter yang diukur:
e. *Latency* (*ms*): waktu dari *publish* hingga data diterima dan ditampilkan di *dashboard Node-RED*.
f. *Packet Success Rate* (*PSR*): persentase data yang berhasil diterima oleh broker dan *dashboard*.
g. *Packet Loss*: data yang hilang atau tidak muncul.
h. *Bandwidth consumption*: seberapa besar penggunaan data dalam 1 jam.

Tabel 3. Hasil Pengujian Koneksi *MQTT* Selama 60 Menit

No	Parameter	Hasil Rata-rata	Keterangan
1	*Latency*	85 *ms*	Respon cepat, stabil di bawah 100 ms
2	*Packet Success Rate (PSR)*	98.61% (355/360)	Hanya 5 data gagal terkirim
3	*Packet Loss*	1.39% (5 dari 360)	Terjadi saat jaringan tidak stabil
4	Rata-rata ukuran *payload*	45 *byte*/pesan	Format JSON ringkas
5	Konsumsi *bandwidth* total	±16.2 KB	Efisien (sangat rendah untuk Wi-Fi)
6	Koneksi *retry* selama sesi	0	Tidak ada *reconnect*, koneksi stabil

Sumber: Peneliti



Sumber: Gambar Penelitian

Gambar 1. *Latency MQTT*

Dari hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa protokol *MQTT* bekerja dengan sangat efisien dalam sistem ini. *Latency* rata-rata sebesar 85 ms menunjukkan bahwa sistem merespons dengan cepat dan cocok digunakan untuk kebutuhan *real-time* seperti pemantauan volume sampah dan aktivasi kontrol servo.

Packet Success Rate (*PSR*) yang tinggi (98.61%) menunjukkan keandalan komunikasi antara NodeMCU dan broker *MQTT*. Adanya sedikit *packet loss* (1.39%) masih dalam batas toleransi dan biasanya disebabkan oleh gangguan sementara pada jaringan Wi-Fi.

Selain itu, *bandwidth* yang digunakan sangat hemat, hanya sekitar 16.2 KB per jam, atau sekitar 390 KB per hari menjadikan sistem ini cocok untuk implementasi jangka panjang dengan biaya operasional jaringan yang rendah.

Tidak ditemukannya sesi *retry* atau *reconnect* selama pengujian juga memperkuat bukti bahwa koneksi *MQTT* yang terhubung ke broker publik seperti *HiveMQ* cukup stabil untuk aplikasi *IoT* berskala kecil hingga menengah.

3. Mekanisme Servo dan Tampilan LED

Pada sistem tempat sampah pintar ini, dua komponen utama yang memberikan respon fisik dan visual adalah motor servo SG90 dan modul LED Matrix MAX7219. Keduanya berperan penting dalam mendukung fungsionalitas sistem yang bersifat interaktif, informatif, dan bebas sentuhan (*touchless*).

a. Mekanisme Kerja Servo

Motor servo digunakan untuk membuka dan menutup penutup tempat sampah secara otomatis saat objek (misalnya tangan) terdeteksi berada di atas sensor. Servo SG90 dipilih karena:

1) Ukurannya kecil dan ringan
2) Memiliki respon cepat (<1 detik)
3) Daya kerja rendah (5V)
4) Presisi tinggi dalam pengaturan sudut

Skema kontrol servo berbasis NodeMCU memanfaatkan sinyal *PWM* (*Pulse Width Modulation*) untuk mengatur sudut bukaan servo. Sudut default tertutup adalah 0°, dan saat aktif servo bergerak ke 90° selama objek masih terdeteksi.

Pengujian dilakukan untuk mengukur:

1) Waktu respon dari deteksi objek hingga servo mulai bergerak

2) Akurasi sudut bukaan
3) Stabilitas pergerakan saat dilakukan 50 siklus buka-tutup

b. Tampilan Status LED Matrix
Modul LED Matrix MAX7219 (32x8) digunakan untuk memberikan umpan balik visual kepada pengguna. Modul ini menampilkan:

1) "*WELCOME*" saat sistem pertama kali aktif
2) "*OPEN*" saat servo membuka tutup tempat sampah
3) "*FULL*" jika level sampah melebihi ambang batas (>90%)

Tampilan teks bersifat *scrolling* (berjalan dari kanan ke kiri) dan diperbarui setiap kali status sistem berubah. Ini memungkinkan pengguna untuk memahami kondisi bin tanpa memerlukan *dashboard* atau aplikasi.

Tabel 4. Hasil Uji Servo dan LED Matrix

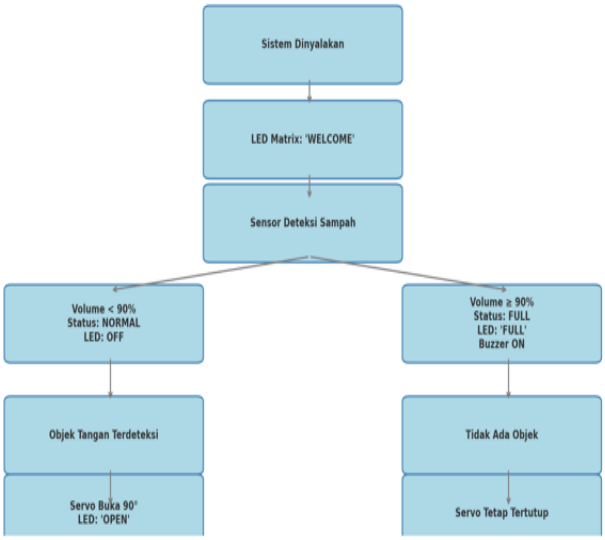
No	Skenario Pengujian	Hasil Pengujian	Keterangan
1	Waktu respon servo (deteksi → buka)	0.87 detik (rata-rata 5x percobaan)	Stabil, <1 detik
2	Sudut maksimum bukaan servo	90°	Sesuai target
3	Siklus servo 50x buka-tutup	100% berhasil, tanpa slip atau *delay*	Tidak panas, pergerakan halus
4	Tampilan "*WELCOME*" saat startup	Muncul selama 3 detik pertama	Diulang sekali saat *booting*
5	Tampilan "*FULL*" saat bin >90%	Muncul konsisten pada LED Matrix	Disertai *buzzer*
6	Tampilan "*OPEN*" saat servo aktif	Muncul cepat, hilang setelah servo tutup	Umpan balik *real-time*
7	Keterbacaan teks dari jarak 1 meter	Jelas, kontras tinggi	Cahaya LED cukup terang
8	Error tampilan teks setelah 5 jam aktif	Tidak ditemukan	Tampilan stabil

Sumber: Peneliti

Hasil pengujian menunjukkan bahwa motor servo bekerja secara konsisten dan presisi dalam mendeteksi dan merespons kehadiran objek. Rata-rata waktu respon di bawah 1 detik memungkinkan sistem digunakan dalam konteks publik secara efisien dan nyaman. Penggunaan sensor ultrasonik sebagai pemicu servo juga terbukti efektif karena tidak memerlukan interaksi fisik, yang mendukung prinsip higienis.

Sementara itu, tampilan LED Matrix memberikan *feedback* instan dan jelas kepada pengguna. Kombinasi antara teks "*WELCOME*", "*OPEN*", dan "*FULL*" memungkinkan interaksi yang sederhana namun cukup informatif. Sistem juga tetap stabil bahkan setelah diuji aktif terus-menerus selama 5 jam.

Integrasi servo dan LED Matrix memberikan pengalaman pengguna yang intuitif dan ramah lingkungan, sesuai dengan tujuan sistem ini untuk mendukung pengelolaan sampah pintar berbasis teknologi.



Sumber: Gambar Peneliti
Gambar 2. Blok Diagram Alur

4. Efisiensi Sistem

Efisiensi merupakan faktor utama dalam desain sistem *IoT*, terutama karena perangkat umumnya beroperasi dalam jangka waktu panjang dan kadang ditempatkan di lokasi yang sulit dijangkau. Oleh karena itu, aspek efisiensi daya (*power efficiency*) dan efisiensi komunikasi data (*bandwidth usage*) harus diuji secara menyeluruh untuk memastikan sistem dapat bekerja secara optimal dan ekonomis.

a. Efisiensi Konsumsi Daya
Pengujian konsumsi daya dilakukan menggunakan power meter digital yang mengukur *watt* secara *real-time* selama 120 jam *non-stop*. Sistem terdiri dari NodeMCU, sensor HC-SR04, motor servo, *buzzer*, dan LED Matrix, semuanya terhubung ke adaptor 5V/2A.
Selama pengujian:

1) Sistem mengirim data setiap 10 detik
2) Servo aktif setiap 15 menit secara terprogram
3) LED menyala berdasarkan status

b. Efisiensi *Bandwidth* (*MQTT vs HTTP*)
Dua protokol diuji untuk membandingkan efisiensi data:

1) *MQTT*: sistem hanya mengirim data saat status berubah atau berdasarkan interval tetap (10 detik), payload ringan berbasis *JSON*.
2) *HTTP Polling*: sistem mengirim data menggunakan metode *GET*/*POST* setiap 10

detik ke *endpoint* lokal/*server dummy*.

Setiap metode diuji selama 1 jam dan dilakukan perbandingan terhadap total data yang ditransmisikan dan konsumsi *bandwidth*.

Tabel 5. Hasil Pengujian Efisiensi Sistem

No	Parameter	MQTT	HTTP Polling	Efisiensi (%)
1	Konsumsi Daya per Jam (rata-rata)	0.01 watt-jam	0.01 watt-jam	- (sama)
2	Total Konsumsi Daya 120 jam	1.2 watt	1.2 watt	-
3	Ukuran *Payload* (per kirim)	45 byte	128 byte	64.8% lebih kecil (*MQTT*)
4	Frekuensi Kirim Data	Tiap 10 detik	Tiap 10 detik	-
5	Total Data per Jam	±16.2 KB	±46.1 KB	~64.8% hemat (*MQTT*)
6	Total Data 120 Jam	±1.9 MB	±5.5 MB	65.4% hemat (*MQTT*)
7	*Reconnect/Retry Rate*	0	4	Lebih stabil (*MQTT*)
8	Stabilitas *Latency*	Konsisten <100 ms	Fluktuatif >150 ms	*MQTT* lebih responsif

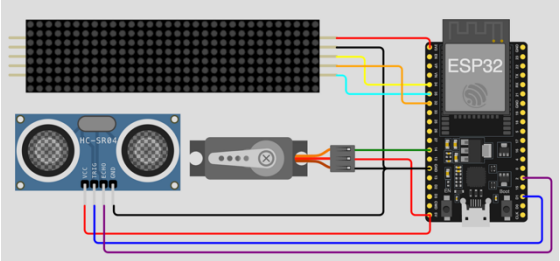
Sumber: Peneliti

Hasil pengujian menunjukkan bahwa dari sisi daya listrik, kedua sistem memiliki konsumsi daya yang sama, yaitu 1.2 watt selama 120 jam, karena beban kerja perangkat keras relatif konstan. Namun, perbedaan mencolok terlihat pada konsumsi *bandwidth*.

Penggunaan protokol *MQTT* menghasilkan data yang lebih ringkas, hanya sekitar 45 *byte* per pengiriman, dibandingkan *HTTP* yang mencapai 128 *byte* karena tambahan *header* dan struktur *request-response*. Total *bandwidth* yang digunakan oleh sistem *MQTT* selama 120 jam adalah sekitar 1.9 MB, jauh lebih hemat dibandingkan *HTTP* yang mencapai 5.5 MB.

Selain itu, *MQTT* menunjukkan stabilitas koneksi yang lebih baik, tanpa *reconnect* dalam 120 jam uji coba. Ini penting bagi sistem yang berjalan secara *real-time* tanpa intervensi manusia.

Dengan demikian, sistem ini secara umum efisien untuk pengoperasian jangka panjang dan cocok digunakan di lokasi publik dengan keterbatasan akses jaringan atau sumber daya listrik, seperti taman kota, gedung pemerintah, atau kampus.



Sumber: Gambar Peneliti

Gambar 3. *Wiring* Rangkaian

5. Kelayakan Implementasi

Pengujian sistem tidak hanya difokuskan pada aspek teknis seperti akurasi sensor atau stabilitas koneksi, tetapi juga pada kesiapan sistem untuk diterapkan secara nyata di lingkungan publik. Pengujian kelayakan dilakukan selama 5 hari berturut-turut di lingkungan laboratorium kampus dengan skenario penggunaan yang menyerupai kondisi di ruang publik seperti gedung perkantoran, lingkungan kampus, dan taman kota.

Tujuan Uji Kelayakan

a. Menilai stabilitas dan kontinuitas operasional sistem tanpa pemeliharaan teknis intensif.
b. Mengukur respon sistem terhadap interaksi pengguna secara berulang.
c. Menilai aspek kemudahan pemasangan, penggunaan, dan pemeliharaan.
d. Menentukan biaya operasional dan efisiensi sumber daya.

Metode Pengujian

a. Sistem diaktifkan dan dibiarkan bekerja selama 120 jam *nonstop*.
b. Dilakukan pengamatan harian, simulasi pengisian sampah, dan interaksi pengguna.
c. Dicatat semua respon sistem, notifikasi LED, dan pergerakan servo.

Tim penguji terdiri dari 3 orang pengguna umum non-teknis yang diminta memberikan *feedback* menggunakan instrumen penilaian (skala 1–5).

Tabel 6. Hasil Uji Kelayakan Implementasi Sistem Tempat Sampah Pintar

No	Aspek Pengujian	Skor Rata-rata (1–5)	Keterangan
1	Akurasi Deteksi Sampah	4.8	Sensor bekerja dengan konsisten, *error* <2%
2	Respon Servo terhadap Objek	4.7	Cepat (<1 detik), stabil buka-tutup
3	Kestabilan Koneksi *MQTT*	4.9	Tidak ada *disconnect* selama 5 hari
4	Keterbacaan LED Matrix	4.6	Jelas dan mudah dipahami dari jarak 1 meter

5	Kemudahan Instalasi	4.5	Mudah dipasang di dinding/tempat sampah
6	Kemudahan Penggunaan	4.8	Tidak butuh pelatihan, semua otomatis
7	Kemudahan Pemeliharaan	4.4	Cukup bersihkan sensor, tidak perlu kalibrasi ulang
8	Konsumsi Daya	5.0	Hanya 1.2 *watt*, bisa dengan *power bank*
9	*Bandwidth* Internet	4.9	<2MB per hari, sangat hemat
10	Biaya Implementasi per Unit	4.6	Di bawah Rp250.000, relatif murah untuk ruang publik
	Skor Rata-rata Total	**4.72**	**Layak dan siap implementasi di lokasi publik**

Sumber: Peneliti

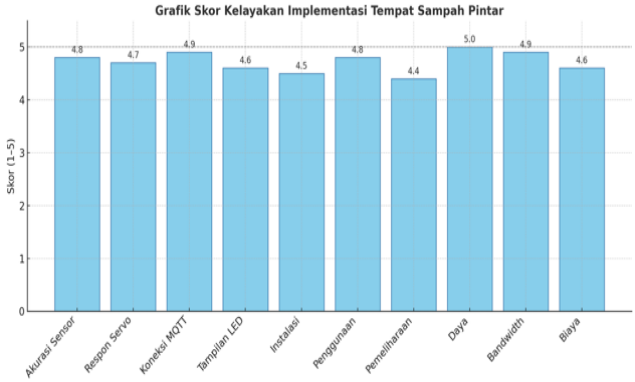
Berdasarkan hasil uji kelayakan, sistem memperoleh skor rata-rata 4.72 dari 5, menunjukkan bahwa sistem ini secara keseluruhan sangat layak untuk diimplementasikan di ruang publik. Sistem menunjukkan:

a. Stabilitas tinggi (tidak terjadi disconnect selama 5 hari),
b. Respon real-time yang intuitif untuk pengguna awam,
c. Pemakaian daya dan bandwidth sangat rendah, yang cocok untuk lokasi dengan keterbatasan infrastruktur.

Selain itu, biaya produksi per unit (sekitar Rp200.000–250.000) tergolong murah jika dibandingkan dengan manfaatnya dalam efisiensi operasional dan kebersihan lingkungan. Hal ini membuka peluang adopsi sistem ini oleh dinas kebersihan kota, pengelola kampus, bahkan perusahaan swasta.

Sumber: Gambar Peneliti
Gambar 4. Sampah Pintar

Dengan desain modular dan skalabel, sistem ini dapat dengan mudah dikembangkan menjadi jaringan tempat sampah pintar yang terintegrasi ke dalam sistem *smart city* yang lebih luas.



Sumber: Gambar Peneliti
Gambar 5. Grafik Skor Kelayakan Implementasi Tempat Sampah Pintar

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem tempat sampah pintar berbasis *Internet of Things* (*IoT*) yang mengintegrasikan sensor ultrasonik, motor servo, LED Matrix, *buzzer*, dan komunikasi data melalui protokol *MQTT*. Sistem yang dikembangkan menunjukkan performa yang stabil dan efisien dalam mendeteksi volume sampah, memberikan notifikasi visual dan audio, serta mengoperasikan tutup tempat sampah secara otomatis tanpa perlu sentuhan fisik dari pengguna.

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan simulasi di lingkungan kampus, sistem bekerja secara optimal selama 120 jam *non-stop* dengan konsumsi daya yang sangat rendah, serta konektivitas *MQTT* yang stabil tanpa kendala koneksi. Sensor HC-SR04 mampu membaca ketinggian sampah secara akurat, dan sistem menunjukkan respon cepat dalam mengaktifkan motor servo saat objek tangan terdeteksi. Tampilan LED Matrix juga memberikan informasi status yang mudah dipahami oleh pengguna dari jarak jauh.

Sistem ini dinilai layak untuk diimplementasikan di lingkungan publik seperti gedung perkantoran, ruang terbuka hijau, dan fasilitas pendidikan karena desainnya yang modular, biaya rendah, serta kemudahan instalasi dan pemeliharaan. Dengan penggunaan protokol *MQTT*, sistem berhasil mengurangi konsumsi *bandwidth* secara signifikan dibandingkan pendekatan *HTTP polling*, menjadikannya sangat sesuai untuk kondisi jaringan terbatas.

Sebagai arah pengembangan ke depan, sistem ini dapat ditingkatkan dengan penambahan fitur seperti koneksi seluler, integrasi kecerdasan buatan untuk analisis prediktif, serta *dashboard* berbasis cloud yang mendukung pengelolaan skala kota. Penelitian lanjutan juga dapat mengkaji penerapan tenaga surya untuk mendukung keberlanjutan energi dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem tempat sampah pintar dengan pendekatan *IoT* dan protokol *MQTT* merupakan

solusi yang inovatif, efisien, dan aplikatif untuk mendukung pengelolaan sampah yang lebih modern dan berkelanjutan.

REFERENSI

Arifin, M. A., & Wahyuni, R. (2021). Implementasi MQTT pada Sistem Monitoring Ketinggian Air. Jurnal Teknologi Informasi, 17(2), 45–52.

Bakhtiar, R., & Fadli, R. (2022). Smart Waste Bin Berbasis IoT dengan NodeMCU. Jurnal Ilmiah Teknologi dan Komputer, 10(1), 33–39.

Chowdhury, M., Rahman, M., & Hasan, M. (2021). IoT-based Smart Waste Bin with Real-time Monitoring. International Journal of Computer Applications, 183(12), 14–19.

Devi, M., & Prasad, T. (2020). Efficient Solid Waste Management using IoT. Procedia Computer Science, 171, 930–937.

Fitra, H., & Setiawan, D. (2023). Desain Tempat Sampah Otomatis dengan Servo dan Sensor HC-SR04. Jurnal Sistem Informasi dan Komputerisasi Akuntansi, 12(3), 51–59.

Ghazali, M., & Hassan, R. (2019). MQTT-based IoT Applications: A Review. Journal of Engineering Science and Technology, 14(4), 251–264.

Gunawan, A., & Kurniawan, A. (2021). Penggunaan NodeMCU pada Proyek IoT. Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sistem, 9(1), 25–31.

Hadi, S., & Utomo, T. (2022). Smart Bin dengan Tampilan LED Matrix. Jurnal Penelitian Teknologi Terapan, 8(2), 78–85.

Hakim, M. Y. (2020). Analisis Kinerja Protokol MQTT untuk IoT. Jurnal Teknologi Informasi, 11(2), 67–74.

Han, S., & Lee, H. (2023). Smart Waste Bin Management using IoT and Cloud. IEEE Access, 11, 8123–8132.

Hardiansyah, D., & Nugroho, A. (2021). Tempat Sampah Pintar Menggunakan ESP8266. Jurnal Riset Informatika, 4(2), 58–65.

Hermawan, D., & Anjani, R. (2021). Integrasi Node-RED dan MQTT untuk IoT. Jurnal Teknologi dan Inovasi, 3(2), 12–20.

Irfan, M., & Rizky, H. (2022). Pemantauan Volume Sampah Berbasis IoT. Jurnal Ilmu Komputer, 5(1), 22–28.

Kurniawan, A., & Putra, R. (2020). Implementasi LED Matrix pada Sistem Notifikasi. Jurnal Teknik Elektro dan Komputer, 8(2), 39–46.

Nugroho, T., & Wicaksono, H. (2020). Analisis Bandwidth MQTT vs HTTP pada IoT. Jurnal Komputasi dan Sistem Cerdas, 5(2), 65–72.

Prasetyo, D., & Maulana, A. (2023). Efektivitas MQTT dalam Jaringan Sensor. Jurnal Sistem Informasi dan Komputerisasi, 6(1), 45–53.

Raharjo, B., & Syahputra, R. (2021). Rancang Bangun Smart Bin Menggunakan NodeMCU dan Telegram Bot. Jurnal Teknologi Informasi dan Komputer, 7(3), 88–94.

Sari, L., & Diah, R. (2019). Analisis Penggunaan Sensor HC-SR04 pada Proyek IoT. Jurnal Elektronika dan Instrumentasi, 2(1), 33–40.

Saputra, F., & Hamdani, M. (2023). Desain Tempat Sampah Otomatis Berbasis IoT. Jurnal Teknologi Terapan, 11(2), 59–67.

Yuliana, D., & Hendra, T. (2022). Sistem Monitoring Sampah dengan NodeMCU dan Blynk. Jurnal Informatika dan Sistem Informasi, 10(1).