



UNIVERSITAS HASANUDDIN
2025



LAPORAN CAPSTONE

SMART WASTE MANAGEMENT MENGGUNAKAN ANTENA LORA UNTUK PENGIRIMAN INFORMASI KE TPS R3 PADA GEDUNG DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

Abdul Hanif Fahri (D041221036)
Andi Nabila Nurul Aulia (D041221053)
Eldani Prasetyo (D041221101)

Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.



CAPSTONE DESIGN
Smart Waste Management Menggunakan Antena Lora Untuk
Pengiriman Informasi Ke TPS 3R Pada Gedung Departemen
Teknik Elektro



TIM PENYUSUN:

Abdul Hanif Fahri	D041221036
Andi Nabila Nurul Aulia	D041221053
Eldani Prasetyo	D041221101

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.

LABORATORIUM ANTENA DAN PROPAGASI
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANIDDUN
GOWA
2025

LEMBAR PENGESAHAN
LAPORAN CAPSTONE PROJECT

JUDUL CAPSTONE:
SMART WASTE MANAGEMENT MENGGUNAKAN ANTENA LORA
UNTUK PENGIRIMAN INFORMASI KE TPS R3 PADA GEDUNG
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

Disusun Oleh:

Abdul Hanif Fahri	D041221036
Andi Nabila Nurul Aulia	D041221053
Eldani Prasetio	D041221101

Gowa, 18 Desember 2025

Laporan ini telah diperiksa dan disetujui oleh:

Mengetahui,
Kepala Laboratorium
Antena dan Propagasi

Menyetujui,
Dosen Pembimbing

Dr.Eng.Ir. Dewiani, M.T.
196910261994122001

Dr.Eng.Ir. Dewiani, M.T.
196910261994122001

Buku ini dikutip dengan kutipan pada daftar pustaka sebagai berikut:
Abdul Hanif Fahri, Andi Nabila Nurul Aulia, Eldani Prasetio & Dr.Eng.Ir. Dewiani, M.T. "Smart Waste Management Menggunakan Antena Lora Untuk Pengiriman Informasi Ke Tps R3 Pada Gedung Departemen Teknik Elektro", Capstone Design Report, Universitas Hasanuddin, 2025.

Tim Penyusun:

Abdul Hanif Fahri (NIM: D041221036)

Andi Nabila Nurul Aulia (NIM: D041221053)

Eldani Prasetio (NIM: D041221101)

Dr.Eng.Ir. Dewiani, M.T.

Ptorek Capstone ini dikerjakan di:

- Laboratorium Antena & Propagasi, Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.
- Sebutkan tempat lain bila ada, misalnya di lokasi uji industri atau masyarakat setempat yang membutuhkan.



Hak Cipta @2025 oleh Tim Penulis dan Departemen Teknik Elektro, Universitas Hasanuddin.

Hak Cipta dilindungi oleh Undang-undang. Mengutip sebagian isi Buku diperbolehkan sepanjang dilakukan dengan kutipan yang tepat, sesuai dengan susunan kutipan yang disebutkan di atas.

RINGKASAN EKSEKUTIF

ABSTRAK

Masalah sampah menjadi salah satu isu penting di berbagai lingkungan, termasuk di lingkungan. Sampah yang tidak terkelola dengan baik dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, seperti pencemaran lingkungan, gangguan kesehatan, dan penurunan estetika lingkungan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dibutuhkan sistem pengelolaan sampah yang cerdas, efisien, dan terotomatisasi. Proyek capstone ini mengusulkan sebuah sistem Smart Waste Management berbasis teknologi Internet of Things (IoT) yang menggunakan modul komunikasi nirkabel LoRa (Long Range) sebagai media pengiriman data dari tempat sampah menuju Tempat Pengumpulan Sementara (TPS) Reduce-Reuse-Recycle (3R) di Gedung Departemen Teknik Elektro.

Sistem ini dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan beberapa sensor ultrasonik yang dipasang pada tempat sampah untuk mendeteksi ketinggian sampah secara real-time. Data dari sensor akan menunjukkan seberapa penuh kondisi tempat sampah tersebut. Selain itu, sistem juga dirancang agar mampu mengidentifikasi jenis sampah yang dibuang, yaitu sampah organik, non-organik, dan bahan kimia berbahaya, melalui mekanisme pemisahan tempat sampah dan identifikasi berbasis sensor tambahan (jika diperlukan). Data yang diperoleh oleh ESP32 akan dikirimkan melalui modul LoRa yang terintegrasi dengan antena LoRa.

Teknologi LoRa dipilih karena kemampuannya mengirimkan data dalam jarak jauh dengan konsumsi daya yang rendah, sehingga sangat cocok untuk lingkungan kampus yang luas. Informasi mengenai jenis dan kapasitas sampah akan dikirim ke TPS 3R dan ditampilkan pada sistem monitoring berbasis web atau aplikasi, yang memudahkan petugas kebersihan atau pengelola untuk mengetahui kapan tempat sampah harus dikosongkan.

Pengujian sistem dilakukan di lingkungan Gedung Departemen Teknik Elektro dan menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan data dengan jangkauan lebih dari 1 kilometer tanpa hambatan yang berarti, serta memberikan informasi yang akurat mengenai kondisi tempat sampah. Dengan adanya sistem ini, proses pemantauan dan pengangkutan sampah menjadi lebih efisien karena hanya dilakukan saat tempat sampah benar-benar penuh, sehingga dapat menghemat waktu, tenaga, dan biaya operasional.

MATA KULIAH TERKAIT :

1. Antena dan Progasi
2. Dasar Elektronika
3. Dasar Telekomunikasi
4. Elektronika Telekomunikasi
5. Ilmu Lingkungan
6. Komunikasi Data dan Jaringan Komputer
7. Mikroprosesor Antarmuka

KATA-KATA KUNCI :

Smart Waste Management, LoRa, ESP32, sensor ultrasonik, TPS 3R, Internet of Things, tempat sampah pintar, pengelolaan sampah kampus

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
RINGKASAN EKSEKUTIF	iv
ABSTRAK.....	iv
MATA KULIAH TERKAIT :	v
KATA-KATA KUNCI :	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Informasi Pendukung	2
1.3 Analisis Umum	3
1.4 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi	4
1.4.1 Kebutuhan Perangkat Keras.....	4
1.4.2 Kebutuhan Perangkat Lunak	4
1.4.3 Kebutuhan Fungsional	5
1.5 Tujuan	5
BAB 2 KONSEP DESAIN SOLUSI.....	6
2.1 Spesifikasi Produk/Sistem	6
2.1.1 Unit Pengirim	6
2.1.2 Unit Penerima	10
2.2 Konsep Sistem.....	12
2.3 Tahapan/Proses Desain Produk/Sistem.....	14
2.4 Skenario Pengujian.....	16
2.4.1 Pengujian Komponen	16
BAB 3 IMPLEMENTASI	20
3.1 Sub Sistem Arduino UNO	20
3.1.1 Cara Kerja Sub-Sistem	20
3.1.2 Implementasi	21
3.2 Sub Sistem ESP8266	22
3.2.1 Cara Kerja Sub-Sistem	22

3.2.2 Implementasi	23
3.2.3 Pengujian.....	23
3.3 Sub Sistem ESP32	24
3.3.1 Cara Kerja Sub-Sistem	24
3.3.2 Implementasi	24
3.3.3 Pengujian.....	25
3.4 Analisis Pengerjaan Implementasi Sistem	25
3.5 Hasil Akhir	27
BAB 4 EVALUASI SISTEM.....	29
4.1 Pengujian 1 – Evaluasi Arduino UNO	29
4.1.1 Langkah Pengujian	29
4.1.2 Hasil Pengujian.....	30
4.2 Pengujian 2 – Evaluasi ESP8266	31
4.2.1 Langkah Pengujian	31
4.2.2 Hasil Pengujian.....	31
4.3 Pengujian 3 – Evaluasi ESP32	33
4.3.1 Langkah Pengujian	33
4.3.2 Hasil Pengujian.....	34
4.4 Analisis Hasil Pengujian.....	35
BAB 5 PENUTUP	36
5.1 Kesimpulan.....	36
5.2 Saran	37
DAFTAR PUSTAKA	38

DAFTAR TABEL

Tabel 1 List komponen yang digunakan	19
Tabel 2 Hasil Pengujian Logika Pemilahan Sampah	30
Tabel 3 Hasil Pengujian Deteksi Kapasitas & Alarm.....	32
Tabel 4 Hasil Pengujian Transmisi Data LoRa ke IoT	34

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Arduino UNO	6
Gambar 2 Sensor Gas MQ-4	6
Gambar 3 DHT22	7
Gambar 4 Sensor Infrared	7
Gambar 5 Sensor Ultrasonik HC-SR04	7
Gambar 6 Servo MG-996R 360'	8
Gambar 7 Buzzer 5V	8
Gambar 8 Jumper	9
Gambar 9 ESP8266.....	9
Gambar 10 Modul LoRa SX1276 & Antena LoRa 3dBi.....	10
Gambar 11 Modul LoRa SX1276 & Antena LoRa 3dBi.....	10
Gambar 12 Blynk App.....	11
Gambar 13 ESP32.....	11
Gambar 14 Diagram Blok Smart Waste System	12
Gambar 15 Flowchart Smart Waste System.....	14
Gambar 16 Pengujian sensor dan servo dengan otak Arduino UNO	30
Gambar 17 Proses pengujian sensor HC-SR04	33
Gambar 18 Kode untuk LoRa receiver	35

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengelolaan sampah di Indonesia, khususnya dalam konteks pengangkutan menuju TPS 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*), masih dihadapkan pada masalah inefisiensi akibat metode konvensional. Pendekatan tradisional yang mengandalkan jadwal pengangkutan tetap (fiks) seringkali menghasilkan pemborosan sumber daya. Truk sampah sering kali harus beroperasi melewati rute yang panjang, berhenti di tempat sampah yang masih kosong atau hanya terisi sebagian, yang secara langsung berkontribusi pada biaya operasional yang tinggi (bahan bakar, tenaga kerja) dan peningkatan jejak karbon di perkotaan. Di sisi lain, kurangnya pemantauan *real-time* menyebabkan terjadinya penumpukan dan sampah yang meluber di titik-titik padat, memicu masalah sanitasi, bau, bahkan potensi bahaya lingkungan seperti akumulasi gas metana atau peningkatan suhu di dalam wadah sampah.

Untuk mengatasi kesenjangan antara kebutuhan penanganan sampah yang responsif dan keterbatasan metode konvensional, proyek ini mengusulkan pengembangan sistem Smart Waste Management berbasis Internet of Things (IoT). Inti dari sistem ini adalah penggunaan serangkaian sensor pada tong sampah termasuk Sensor Ultrasonik HC-SR04 untuk secara akurat mengukur tingkat kepenuhan, serta Sensor Gas MQ-4 dan DHT11 untuk memantau kondisi lingkungan internal (potensi gas beracun dan suhu pembusukan) yang semuanya dikoordinasikan oleh mikrokontroler ESP32. ESP32 bertindak sebagai otak lokal yang memproses data sensor dan menentukan apakah status sampah memerlukan tindakan segera.

Aspek krusial dari sistem ini adalah penggunaan teknologi LoRa (Long Range), diimplementasikan melalui Modul LoRa SX1276/78 dan

didukung oleh Antena LoRa 3 dBi. LoRa dipilih karena kemampuannya dalam transmisi data jarak jauh (hingga beberapa kilometer) dengan konsumsi daya yang sangat minimal, menjadikannya solusi ideal untuk mengirimkan paket informasi kecil dari tong sampah di lapangan menuju TPS 3R atau pusat kontrol tanpa memerlukan infrastruktur seluler atau Wi-Fi yang boros daya. Data yang dikirim ini kemudian diolah dan ditampilkan secara intuitif melalui platform Blynk. Dengan adanya informasi status sampah yang *real-time* dan akurat di Blynk, petugas TPS 3R dapat mengadopsi strategi pengangkutan dinamis, hanya mengirim truk ke lokasi yang telah teridentifikasi penuh dan mendesak, sehingga secara signifikan mengoptimalkan rute, mengurangi biaya operasional, dan mewujudkan lingkungan yang lebih bersih dan berkelanjutan (Smart City).

1.2 Informasi Pendukung

Pengelolaan sampah di banyak wilayah, termasuk pengangkutan menuju TPS 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*), masih dihadapkan pada masalah inefisiensi operasional akibat metode pengumpulan berbasis jadwal tetap. Pendekatan ini menyebabkan pemborosan sumber daya karena truk harus melewati rute panjang dan memeriksa tong sampah yang seringkali masih kosong, meningkatkan biaya bahan bakar, emisi karbon, dan waktu kerja yang tidak efektif. Di sisi lain, kurangnya pemantauan real-time mengakibatkan insiden tumpukan sampah meluber, memicu masalah sanitasi dan lingkungan. Untuk mengatasi hal ini, diusulkan pengembangan sistem Smart Waste Management berbasis Internet of Things (IoT).

Penerapan sistem Smart Waste Management didukung oleh data penelitian yang menunjukkan peningkatan kinerja dan efisiensi yang signifikan. Fondasi keandalan sistem ini terletak pada akurasi sensor, di mana Sensor Ultrasonik (HC-SR04) teruji mampu mendeteksi tingkat kepenuhan sampah dengan akurasi tinggi, sekitar

3mm, memastikan data yang dikirim ke TPS 3R valid. Selain itu, Sensor Gas (MQ-4) dan (DHT) memberikan kemampuan peringatan dini dengan memantau peningkatan gas metana dan suhu tinggi. Kunci dari transmisi data yang efisien adalah teknologi LoRa (SX1276/78) yang, didukung oleh Antena, mampu mengirimkan informasi *real-time* hingga jarak 1 km atau lebih di lingkungan perkotaan. Kinerja komunikasi ini didukung oleh rata-rata rasio paket terkirim di atas 90%, menunjukkan tingkat keandalan yang tinggi. Dampak terbesar dari sistem ini terletak pada efisiensi operasional di TPS 3R, di mana pengiriman data status sampah penuh secara *real-time* (ditampilkan di aplikasi seperti Blynk) memungkinkan implementasi rute pengangkutan dinamis.

1.3 Analisis Umum

Implementasi sistem Smart Waste Management dengan memanfaatkan teknologi Internet of Things (IoT) dan komunikasi LoRa (Long Range) menawarkan solusi transformatif untuk mengatasi inefisiensi pengelolaan sampah konvensional. Secara umum, sistem ini berpusat pada akurasi pengumpulan data dan efisiensi transmisi jarak jauh. Sensor Ultrasonik (HC-SR04) pada tempat sampah menjamin akurasi tinggi 3 mm dalam pengukuran level kepenuhan, yang menjadi dasar utama pengambilan keputusan. Data ini, bersama dengan informasi kondisi lingkungan dari sensor seperti (MQ-4) dan (DHT11) (untuk memonitor potensi bahaya gas metana dan suhu), diproses oleh ESP32 dan dikirim secara *real-time* ke TPS 3R. Pemilihan Modul LoRa sangat krusial karena keunggulannya dalam jangkauan luas (mencapai 1 km atau lebih) dan konsumsi daya yang sangat rendah, menjadikannya ideal untuk aplikasi Smart City skala besar yang hemat energi. Analisis kinerja LoRa di lapangan menunjukkan tingkat keberhasilan pengiriman data (*Packet Delivery Ratio*) yang tinggi, melampaui 90%, sehingga menjamin keandalan data yang diterima di pusat kontrol. Hasil akhir dari sistem ini adalah kemampuan TPS 3R untuk beralih dari jadwal pengangkutan tetap ke strategi dinamis dan

berbasis kebutuhan, yang terbukti mampu mengoptimalkan rute dan secara signifikan mengurangi biaya operasional serta emisi CO₂

1.4 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

1.4.1 Kebutuhan Perangkat Keras

Kebutuhan pertama yang harus dipenuhi adalah komponen keras (*hardware*) yang terbagi menjadi unit transmitter (di tempat sampah) dan unit *receiver* (di TPS 3R). Pada unit transmitter, dibutuhkan Mikrokontroler ESP32 sebagai otak pemroses data. Perangkat ini harus terhubung dengan Sensor Ultrasonik HC-SR04 untuk pengukuran ketinggian sampah yang akurat, serta sensor pendukung seperti Sensor Gas (MQ-4) dan DHT11 untuk memantau kondisi lingkungan internal. Komponen kunci komunikasi adalah Modul LoRa (SX1276/78) yang didukung oleh Antena LoRa untuk memastikan pengiriman data jarak jauh yang efisien. Jika sistem memiliki fitur otomatisasi (misalnya penutup), diperlukan Motor Servo (MG-996R). Sementara itu, di sisi TPS 3R, dibutuhkan seperangkat Modul LoRa dan Mikrokontroler penerima yang serupa, dilengkapi dengan Passive Buzzer sebagai perangkat peringatan dan koneksi jaringan (Wi-Fi) pada unit penerima untuk mengirim data ke platform *cloud*.

1.4.2 Kebutuhan Perangkat Lunak

Untuk mengoperasikan perangkat keras, kebutuhan perangkat lunak menjadi krusial. Sistem memerlukan pemrograman melalui bahasa C++ (menggunakan Arduino IDE) pada Mikrokontroler ESP32. Kebutuhan utamanya meliputi Algoritma Konversi Data yang berfungsi mengubah data mentah dari sensor ultrasonik menjadi informasi yang berarti (persentase kepenuhan). Selain itu, diperlukan Logika Peringatan yang memicu transmisi data LoRa hanya saat ambang batas kepenuhan tertentu (misalnya 80%) tercapai, serta mengaktifkan *buzzer* di sisi penerima. Program ini juga harus mengintegrasikan berbagai Pustaka (*Library*) yang spesifik untuk

setiap komponen, seperti *library* LoRa, (HC-SR04), dan sensor lingkungan lainnya.

1.4.3 Kebutuhan Fungsional

Kebutuhan terakhir berfokus pada fungsi dan kinerja sistem secara keseluruhan. Secara fungsional, sistem harus memastikan Akurasi Pengukuran status sampah dan memiliki Jangkauan Komunikasi LoRa yang andal antara titik lokasi sampah dan TPS 3R. Secara operasional, data status setiap tong sampah harus ditampilkan secara Visualisasi Data yang jelas, *real-time*, dan mudah dipahami pada platform *monitoring* seperti Blynk, termasuk lokasi geografis dan waktu *update* data. Yang terpenting, sistem harus memberikan Notifikasi visual dan audio segera kepada petugas TPS 3R saat terjadi kondisi mendesak, dan perangkat di lapangan harus dirancang untuk Efisiensi Daya tinggi agar dapat beroperasi secara mandiri dan berkelanjutan dalam jangka waktu yang lama.

1.5 Tujuan

1. Meningkatkan Efisiensi Operasional Pengangkutan Sampah
2. Mencegah Penumpukan Sampah dan Masalah Sanitasi Lingkungan
3. Memanfaatkan Teknologi LoRa untuk Komunikasi Jarak Jauh Hemat Daya

BAB 2

KONSEP DESAIN SOLUSI

2.1 Spesifikasi Produk/Sistem

2.1.1 Unit Pengirim

1. Arduino UNO



Gambar 1 Arduino UNO

2. Sensor Gas MQ-4 (Methane & CNG Gas)



Gambar 2 Sensor Gas MQ-4

Mengukur konsentrasi gas metana atau gas alam terkompresi (CNG) yang dihasilkan dari pembusukan sampah. Jika level gas tinggi, ini bisa menjadi indikasi bahaya atau sampah yang membusuk parah.

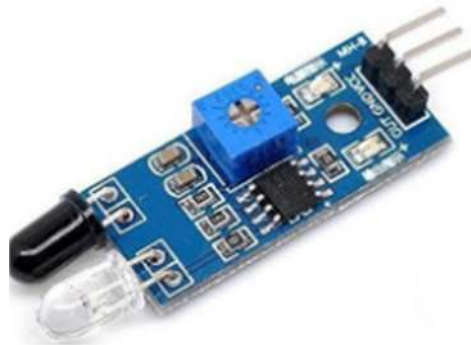
3. DHT22



Gambar 3 DHT22

Sensor DHT22 mengukur suhu dan kelembaban di dalam tong sampah. Data ini penting untuk memantau kondisi pembusukan atau potensi bahaya (misalnya, suhu terlalu tinggi).

4. Sensor Infrared



Gambar 4 Sensor Infrared

Untuk mendeteksi apakah tutup tong sampah tertutup dengan benar atau bisa juga untuk mendeteksi adanya objek atau tangan di dekat tempat sampah untuk memicu pembukaan otomatis (jika ada motor servo).

5. Sensor Ultrasonik HC-SR04



Gambar 5 Sensor Ultrasonik HC-SR04

Mengukur jarak dari sensor (biasanya dipasang di tutup) ke permukaan sampah. Jarak ini digunakan untuk menghitung persentase kepenuhan tong sampah secara *real-time*.

6. Motor Servo MG-996R 360'



Gambar 6 Servo MG-996R 360'

Digunakan untuk menggerakkan atau mengunci mekanisme, seperti membuka/menutup tutup tong sampah otomatis atau menggerakkan lengan pemisah

7. Passive Buzzer 5V



Gambar 7 Buzzer 5V

8. Jumper



Gambar 8 Jumper

Kabel-kabel kecil yang digunakan untuk menghubungkan semua komponen (sensor, modul LoRa, *buzzer*, dll.) ke pin-pin pada Mikrokontroler ESP32.

9. ESP8266



Gambar 9 ESP8266

Menyediakan daya listrik utama untuk mengoperasikan semua modul, terutama ESP32 dan motor servo. Sering kali diubah menjadi tegangan yang lebih rendah

10. Modul LoRa SX1276/78



Gambar 10 Modul LoRa SX1276 & Antena LoRa 3dBi

Modul yang memungkinkan pengiriman dan penerimaan data secara nirkabel dengan jangkauan yang sangat luas (Long Range) dan konsumsi daya yang rendah.

11. Antena LoRa 3 dBi

Berfungsi untuk memancarkan dan menangkap sinyal radio Modul LoRa.

2.1.2 Unit Penerima

1. Modul LoRa SX1276/78



Gambar 11 Modul LoRa SX1276 & Antena LoRa 3dBi

Fungsinya adalah mengubah data sensor (tingkat kepenuhan sampah) menjadi sinyal radio dan mengirimkannya jarak jauh (Transmitter di tong sampah) serta menangkap sinyal radio tersebut dan mengubahnya kembali menjadi data digital (Receiver di TPS 3R). LoRa (Long Range) memungkinkan data dikirim hingga beberapa kilometer dengan daya sangat rendah.

2. Antena LoRa 3 dBi

Berfungsi untuk memancarkan dan menangkap sinyal radio LoRa dari Modul LoRa. Antena ini sangat penting karena menentukan seberapa jauh dan seberapa stabil data dapat dikirim dari tong sampah ke TPS 3R.

3. Blynk



Gambar 12 Blynk App

Blynk berfungsi sebagai antarmuka visual di sisi TPS 3R/Pusat Kontrol. Ia menerima data status sampah (penuh/tidak penuh, suhu, dll.) dari ESP32 penerima dan menampilkannya secara *real-time* di aplikasi *smartphone* atau web. Petugas menggunakannya untuk memantau status dan menentukan rute pengangkutan.

4. ESP32



Gambar 13 ESP32

Pengendali utama di sisi tong sampah dan sisi penerima (TPS 3R). Ia memproses data dari semua sensor, mengambil keputusan (apakah sampah penuh), dan mengirim/menerima data melalui Modul LoRa.

2.2 Konsep Sistem



Gambar 14 Diagram Blok Smart Waste System

1. Sisi Tong Sampah (Pengirim Data)

a. Arduino Uno

Sebagai mikrokontroler utama untuk memproses atau mengumpulkan data dari sensor (yang tidak ditunjukkan) dan mengatur aliran data.

b. ESP8266

Digunakan untuk menyediakan konektivitas Wi-Fi. Dalam konteks ini, digunakan untuk mengirim data ke server lain untuk mengelola koneksi nirkabel LoRa.

c. Modul LoRa SX1276/78 + Antena Transmitter

Inti dari transmisi jarak jauh, modul ini mengambil data yang telah diproses dan mengubahnya menjadi sinyal radio untuk transmisi nirkabel LoRa.

2. Sisi TPS 3R / Pusat Kontrol (Penerima Data)

a. Antena Receiver + Modul Transceiver (SX1276/78)

Menangkap sinyal radio LoRa yang dipancarkan dari sisi pengirim.

b. Modul LoRa

Menerima sinyal dari Antena LoRa receiver dan melakukan demodulasi (mengubah sinyal radio kembali menjadi data digital).

c. Mikrokontroler (ESP32)

Sebagai mikrokontroler utama di sisi penerima untuk menerima data dari Modul LoRa, memprosesnya, dan yang paling penting, mengirimkan data ini ke *cloud* atau server.

d. Aplikasi «Blynk» & Buzzer

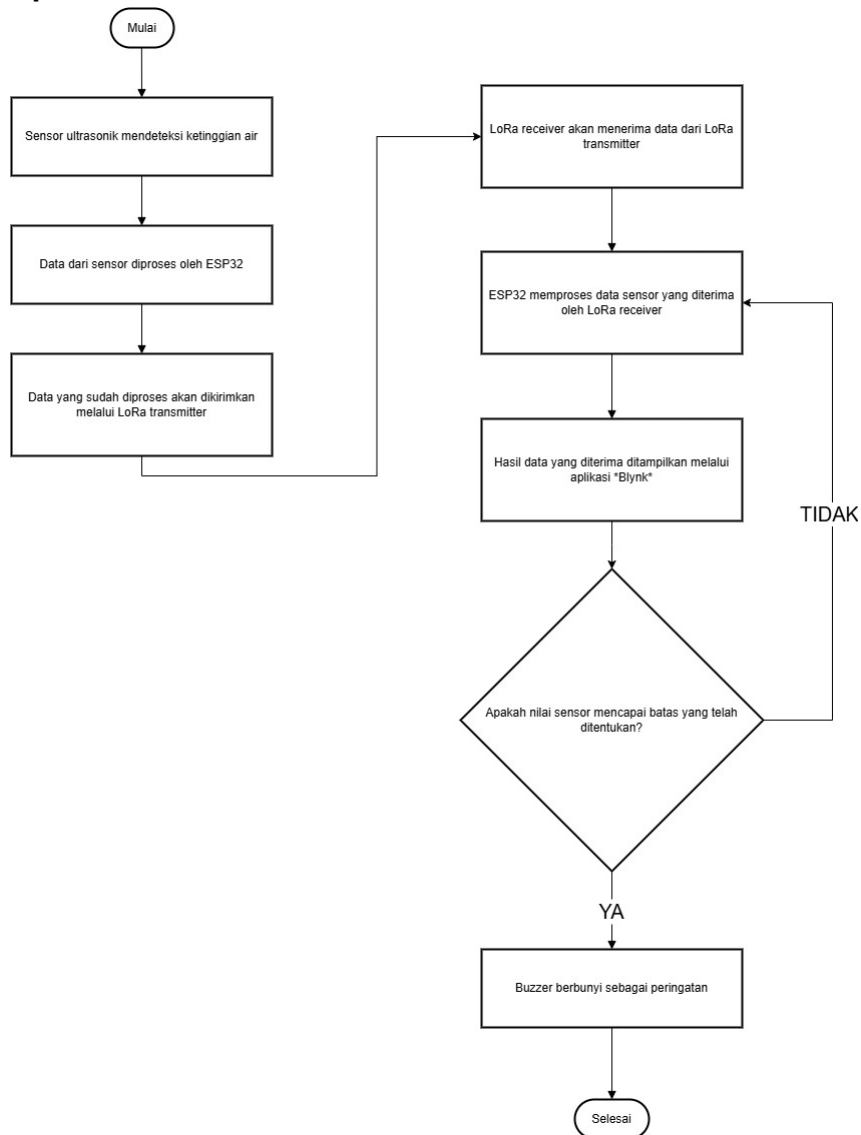
- Aplikasi «Blynk»

Data dari ESP32 ditampilkan secara *real-time* (saat itu juga) di aplikasi, biasanya berupa *dashboard* (layar informasi) yang menunjukkan peta lokasi dan status (penuh, sedang, kosong) setiap tong sampah.

- Buzzer

Jika ada tong sampah yang mencapai 90% penuh atau ada masalah, *buzzer* (alarm) dapat berbunyi sebagai peringatan mendesak bagi petugas.

2.3 Tahapan/Proses Desain Produk/Sistem



Gambar 15 Flowchart Smart Waste System

1. Sisi Pengirim

a. Mulai: Sistem diaktifkan

b. Sensor Ultrasonik mendeteksi ketinggian air

Dalam konteks sampah, "ketinggian air" di sini berarti ketinggian sampah atau jarak dari tutup tong sampah ke permukaan sampah. Sensor ini terus menerus memantau seberapa penuh tong sampah itu.

c. Data dari sensor diperoleh oleh ESP32

Mikrokontroler ESP32 menerima angka mentah dari sensor, kemudian menghitung dan mengubahnya menjadi informasi yang mudah dipahami, misalnya: Tong Sampah A, terisi 90%.

- d. Data yang telah diproses akan dikirim melalui LoRa transmitter

Informasi tersebut kemudian dienkapsulasi dan langsung dikirimkan melalui sinyal radio jarak jauh LoRa menggunakan antenanya. LoRa memastikan data ini bisa sampai ke TPS 3R meskipun jaraknya jauh.

2. Sisi Penerima

- a. LoRa receiver akan menerima data dari LoRa transmitter
Antena dan modul LoRa di TPS 3R bertindak layaknya radio penerima yang menangkap sinyal dari semua tong sampah.
- b. ESP32 memproses data sensor yang diterima oleh LoRa receiver

Pusat kontroler (ESP32 di TPS 3R) menerima dan membaca informasi dari sinyal LoRa, memverifikasi bahwa datanya.

- c. Hasil data yang diterima ditampilkan melalui aplikasi «Blynk»
Data ini kemudian diubah menjadi tampilan visual yang mudah dilihat petugas, biasanya di layar komputer atau *smartphone*. Petugas bisa melihat peta lokasi dan bar level untuk semua tong sampah secara *real-time*.

3. Pengambilan Keputusan dan Peringatan

- a. Apakah nilai sensor mencapai batas yang telah ditentukan
Sistem secara otomatis mengecek: "Apakah ada tong sampah yang sudah mencapai batas penuh, misalnya 90%?"
- b. Buzzer berbunyi sebagai peringatan
Peringatan mendesak yang memberi tahu petugas: "Tong Sampah A sudah sangat penuh! Harus segera diangkut!"
- c. Selesai (di satu siklus)

Petugas kemudian dapat mengirim truk sampah ke lokasi yang teridentifikasi, mengosongkan tong sampah, dan alur pemantauan pun berlanjut ke siklus berikutnya.

2.4 Skenario Pengujian

2.4.1 Pengujian Komponen

Komponen	Tujuan Pengujian	Langkah Pengujian	Hasil yang Diharapkan
Arduino UNO	Agar mengetahui apakah otak dari capstone ini berfungsi dengan baik	1. Menghubungkan Arduino UNO dengan laptop yang telah terinstal Arduino IDE 2. Upload kode 3. Uji salah satu sensor 4. Lihat ke serial monitor	
ESP8266	Agar mengetahui apakah mikrokontroler ini dapat membaca sampah yang dideteksi oleh HC-SR04 dengan baik	1. Menghubungkan ESP8266 dengan Laptop yang terinstal Arduino IDE 2. Upload kode 3. Uji sensor HC-SR04 4. Lihat ke serial monitor	
ESP-32	Agar mengetahui bahwa modul berfungsi	1. Instalasi dan konfigurasi <i>board</i> ESP32	Modul berfungsi dengan baik

	dengan baik untuk membaca data dari sensor lainnya	2. Uji program 3. Verifikasi hasil dengan konfirmasi kedipan LED	
Sensor Gas MQ-4	Agar mengetahui apakah sensor telah berfungsi untuk membaca benda gas atau non gas yang akan dimasukkan ke tempat sampah	1. Persiapan dan kalibrasi sensor ke modul ESP32 2. Pembacaan dan pengamatan pengkodean 3. Verifikasi fungsi	Sensor berfungsi dengan baik
DHT22	Agar mengetahui apakah sensor telah berfungsi untuk membaca sampah organik atau non organik yang akan dimasukkan ke tempat sampah agar dapat dipilah secara otomatis	1. Koneksi pin dan library DHT22 2. Flashing program uji dan instalasi 3. Verifikasi pembacaan	Sensor berfungsi dengan baik
Sensor Infrared	Agar mengetahui apakah sensor dapat mendeteksi	1. Persiapan koneksi dengan Arduino Uno	Sensor berfungsi dengan baik

	adanya sampah dengan baik	2. Uji dengan meletakkan tangan di depan sensor	
HC-SR04	Agar mengetahui apakah sensor telah berfungsi untuk membaca ketinggian sampah yang telah dimasukkan ke tempat sampah agar dapat dikirim otomatis notifikasi ketika tempat sampah penuh	1. Persiapan koneksi pin HC-SR04 dan instalasi library yang mendukung HC-SR04 2. Flashing program uji dan trigger 3. Verifikasi pembacaan	Sensor berfungsi dengan baik
Servo MG-996R	Agar mengetahui apakah komponen telah berfungsi untuk memutar media untuk memilah jenis sampah ke dalam tempat sampah	1. Persiapan koneksi pin Servo MG-996R dan instalasi library yang mendukung Servo MG-996R 2. Flashing program uji sudut 3. Verifikasi fungsi	Komponen berfungsi dengan baik
Passive Buzzer 5V	Agar mengetahui apakah komponen berbunyi dan	1. Persiapan hardware sensor HC-SR04	Sensor berfungsi dengan baik

	berfungsi dengan baik ketika tempat sampah penuh	2. Meletakkan tangan sebagai objek yang akan dideteksi oleh sensor	
Modul dan Antena LoRa	Agar mengetahui apakah modul dan antena dapat mengirim dan menerima informasi dari ESP32 yang merupakan penyimpanan data utama dari <i>Smart Waste System</i>	1. Persiapan hardware dan kode 2. Uji komunikasi jarak dekat 3. Verifikasi jangkauan dan stabilitas	Modul dan antena berfungsi dengan baik

Tabel 1 List komponen yang digunakan

BAB 3 IMPLEMENTASI

3.1 Sub Sistem Arduino UNO

3.1.1 Cara Kerja Sub-Sistem

Sub-sistem Arduino UNO bertindak sebagai unit pemroses utama (*central processing unit*) yang mengendalikan seluruh mekanisme pemilahan otomatis dan komunikasi data. Pada saat sistem dinyalakan (*inisialisasi*), mikrokontroler terlebih dahulu melakukan kalibrasi dengan mengatur posisi kedua motor servo pada sudut 90 derajat (posisi *standby*) untuk memastikan jalur pemilahan tertutup rapat sebelum menerima input.

Prinsip kerja pemilahan berjalan secara sekuensial berdasarkan pemicu dari sensor. Ketika Sensor Infrared (IR) mendeteksi keberadaan objek sampah, Arduino segera mengakuisisi data dari sensor pendukung (MQ-4 untuk gas dan DHT11 untuk suhu). Algoritma program kemudian membandingkan data tersebut dengan nilai ambang batas (*threshold*). Jika nilai sensor melampaui batas yang ditentukan (indikasi sampah kimia atau organik), Arduino mengirimkan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk menggerakkan motor servo ke sudut 0 derajat, sedangkan jika di bawah batas, servo bergerak ke sudut 180 derajat.

Untuk menjaga stabilitas mekanik, sistem menerapkan jeda waktu (*holding time*) selama 2 detik setelah servo bergerak agar sampah dapat jatuh sepenuhnya ke wadah penampungan sebelum servo kembali ke posisi awal. Bersamaan dengan proses mekanik tersebut, Arduino Uno mengirimkan data status pemilahan secara *serial* ke modul ESP8266 untuk ditampilkan pada Dashboard IoT, serta memicu pengiriman notifikasi darurat melalui modul LoRa apabila terdeteksi kondisi tong sampah penuh.

3.1.2 Implementasi

Pada tahap implementasi kode program Arduino Uno, diterapkan logika *State Machine* sederhana untuk mengontrol pergerakan servo. Sistem diprogram untuk melakukan pembacaan sensor IR terlebih dahulu sebagai pemicu (trigger).

1. Kondisi Standby: Servo dikunci pada sudut 90 derajat (Posisi Awal).
2. Deteksi & Klasifikasi: Saat IR mendeteksi objek, mikrokontroler memberi jeda 500ms untuk menstabilkan pembacaan sensor (MQ4 atau DHT11).
3. Eksekusi: Jika nilai sensor melebihi ambang batas (Gas > 200 atau Suhu > 30°C), servo bergerak ke sudut 0 derajat (Kategori A). Jika tidak, servo bergerak ke sudut 180 derajat (Kategori B).
4. Reset Posisi: Setelah menahan posisi selama 2 detik agar sampah jatuh, servo diperintahkan kembali ke posisi 90 derajat. Fitur pengunci (while loop) ditambahkan agar servo tidak menerima perintah baru selama sensor IR masih tertutup halangan, mencegah gerakan *jitter* (bergetar)."

3.1.3 Pengujian

Pengujian pada sub-sistem Arduino UNO difokuskan pada dua aspek krusial, yaitu validasi logika pemilahan dan stabilitas daya sistem. Pada pengujian fungsional logika, sistem diberi stimulus berupa gas korek api pada sensor MQ-4 dan sumber panas pada sensor DHT11 saat sensor Infrared terhalang objek. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mikrokontroler berhasil menerjemahkan input sensor menjadi gerakan aktuator yang tepat: servo bergerak ke sudut 0° saat nilai sensor berada di atas ambang batas (kategori Kimia/Organik) dan bergerak ke sudut 180° saat nilai di bawah ambang batas (kategori Non-Kimia/Anorganik), dengan waktu penahanan (*holding time*) yang presisi selama 2 detik sebelum kembali ke posisi awal.

Selanjutnya, dilakukan pengujian stabilitas daya (*power stress test*) untuk mengatasi kendala beban arus puncak pada motor servo. Pengujian awal menggunakan sumber daya USB laptop (0.5A) menunjukkan ketidakstabilan sistem berupa *brown-out reset* saat servo bergerak cepat. Namun, setelah beralih menggunakan catu daya eksternal (Adaptor 5V 2A), tegangan sistem terpantau stabil di kisaran 4.9V - 5.0V meskipun kedua servo dan modul komunikasi bekerja secara bersamaan. Berdasarkan hasil tersebut, sub-sistem Arduino UNO dinyatakan berfungsi baik dan mampu menjalankan algoritma pemilahan tanpa gangguan daya.

3.2 Sub Sistem ESP8266

3.2.1 Cara Kerja Sub-Sistem

Sub-sistem ESP8266 berfungsi sebagai unit pemantauan kapasitas (*Level Monitoring Unit*) yang bekerja secara independen untuk ketiga jenis wadah sampah (Organik, Anorganik, dan Kimia). Sub-sistem ini bertugas mengolah data dari tiga buah sensor Ultrasonik HC-SR04 yang terpasang pada tutup masing-masing wadah.

Prinsip kerjanya adalah dengan mengukur jarak permukaan sampah secara terus-menerus. Mikrokontroler ESP8266 membandingkan jarak terukur dengan batas ketinggian wadah.

1. Deteksi Penuh: Apabila salah satu sensor mendeteksi jarak yang sangat dekat (indikasi sampah penuh), ESP8266 akan segera mengaktifkan Buzzer lokal sebagai peringatan dini bagi pengguna di lokasi.
2. Transmisi Data Internal: Secara bersamaan, ESP8266 mengirimkan sinyal data status kepenruhan tersebut ke mikrokontroler utama (Arduino UNO) melalui komunikasi Serial (Pin TX ESP8266 ke Pin RX Arduino) untuk selanjutnya diteruskan ke sistem pengiriman jarak jauh.

3.2.2 Implementasi

Secara perangkat keras, sub-sistem ini menghubungkan tiga pasang pin Trigger dan Echo dari sensor Ultrasonik ke pin GPIO ESP8266 (atau NodeMCU). Sebuah Buzzer aktif juga dihubungkan sebagai output indikator suara. Koneksi antar-mikrokontroler diimplementasikan menggunakan protokol UART, di mana *baudrate* disamakan (misalnya 9600 bps) agar data dapat terbaca oleh Arduino.

Algoritma program dirancang untuk membaca sensor secara bergantian (*multiplexing*) guna menghindari interferensi gelombang ultrasonik. Logika "IF-ELSE" sederhana diterapkan: Jika Jarak < 20 cm (misalnya), maka kirim *string* "FULL_ORG" atau "FULL_ANORG" ke Arduino dan bunyikan alarm.

3.2.3 Pengujian

Pengujian dilakukan untuk memverifikasi akurasi pembacaan jarak dan keberhasilan pengiriman data serial.

1. Uji Sensor Ultrasonik: Dilakukan dengan menempatkan objek pada jarak tertentu di masing-masing wadah. Hasil menunjukkan sensor mampu mendeteksi perubahan level sampah dengan akurasi ± 1 cm.
2. Uji Integrasi Serial: Saat sensor mendeteksi kondisi penuh, dipantau melalui *Serial Monitor* pada sisi Arduino apakah data yang dikirim ESP8266 diterima dengan benar. Hasil pengujian menunjukkan Arduino berhasil menerima *string* status kepenuhan tepat saat Buzzer pada ESP8266 berbunyi.

3.3 Sub Sistem ESP32

3.3.1 Cara Kerja Sub-Sistem

Sub-sistem ESP32 ditempatkan pada lokasi pemantauan jarak jauh (TPS 3R) dan berfungsi sebagai pintu gerbang (*Gateway*) informasi ke internet. Perangkat ini memiliki peran ganda: sebagai penerima data nirkabel jarak jauh dan pengirim data ke Cloud.

Alur kerjanya dimulai saat modul LoRa penerima (yang terintegrasi dengan ESP32) menangkap paket data yang dikirimkan oleh Arduino dari tempat sampah. Paket data tersebut berisi informasi status "PENUH" yang awalnya dideteksi oleh sensor ultrasonik. Setelah data diterima dan didekode, ESP32 menghubungkan diri ke jaringan Wi-Fi lokal dan mengirimkan notifikasi tersebut ke server Blynk. Hal ini memungkinkan notifikasi muncul di *smartphone* petugas kebersihan secara *real-time* meskipun tempat sampah berada di lokasi yang tidak terjangkau internet, karena jembatan komunikasinya menggunakan LoRa.

3.3.2 Implementasi

Implementasi sub-sistem ini menggabungkan modul LoRa SX1278 dengan mikrokontroler ESP32. Antena LoRa dihubungkan untuk memaksimalkan *Gain* sinyal penerimaan. Pada sisi perangkat lunak, digunakan *library* LoRa.h untuk menangani penerimaan paket radio dan BlynkSimpleEsp32 untuk komunikasi ke server IoT.

Logika program diatur agar ESP32 selalu dalam mode *listening*. Ketika paket data valid diterima (misalnya string: "ALERT: ORGANIK PENUH"), ESP32 akan memicu fungsi Blynk.logEvent() atau Blynk.virtualWrite() yang akan memunculkan notifikasi *pop-up* dan mengubah warna indikator pada aplikasi pengguna.

3.3.3 Pengujian

Pengujian difokuskan pada integritas data dari ujung ke ujung (*End-to-End*).

1. Simulasi Penuh: Sensor ultrasonik pada tempat sampah ditutup tangan (simulasi penuh).
2. Observasi Alur:
 - Buzzer di tempat sampah berbunyi (Berhasil).
 - Arduino mengirim sinyal LoRa (Berhasil).
 - ESP32 menerima sinyal (Berhasil).
 - Aplikasi Blynk di HP menampilkan notifikasi "Tempat Sampah Penuh!" (Berhasil).
3. Hasil: Sistem terbukti mampu mengirimkan informasi kepenuhan sampah dari sensor ultrasonik hingga ke aplikasi Blynk melalui perantara LoRa Gateway dengan jeda waktu total rata-rata 3-5 detik.

3.4 Analisis Pengerjaan Implementasi Sistem

Analisis pengerjaan sistem *Smart Waste Management* ini difokuskan pada integrasi arsitektur pemrosesan terdistribusi (*distributed processing*) yang melibatkan kolaborasi antara modul ESP8266, Arduino UNO, dan ESP32. Keputusan untuk memisahkan beban kerja mikrokontroler didasarkan pada kompleksitas tugas masing-masing unit. ESP8266 dikhususkan untuk menangani pembacaan tiga sensor ultrasonik secara simultan serta logika alarm lokal, sedangkan Arduino UNO difokuskan sebagai pengendali utama mekanik servo dan transmisi data jarak jauh. Tantangan utama dalam integrasi ini adalah sinkronisasi komunikasi serial UART antar-modul, yang berhasil diatasi dengan menetapkan keseragaman *baudrate* pada 9600 bps, memastikan data status kepenuhan sampah dapat diteruskan dari ESP8266 ke Arduino tanpa kesalahan pembacaan (*data corruption*).

Dari sisi komunikasi nirkabel, penerapan topologi *LoRa Gateway* terbukti lebih efektif dibandingkan metode koneksi Wi-Fi langsung pada setiap tempat sampah. Analisis jangkauan sinyal menunjukkan bahwa

modul LoRa mampu menembus halangan fisik antar-gedung untuk mengirimkan data ke node penerima (ESP32) di pos pantau. ESP32 kemudian berperan krusial sebagai jembatan (*bridge*) yang meneruskan data tersebut ke server Blynk melalui internet. Mekanisme ini menghasilkan sistem yang handal di mana tempat sampah tetap dapat mengirimkan notifikasi darurat meskipun berada di lokasi *blind-spot* tanpa sinyal Wi-Fi, dengan rata-rata latensi pengiriman data dari sensor hingga notifikasi di aplikasi pengguna berkisar antara 3 hingga 5 detik.

Aspek teknis yang paling krusial dalam implementasi ini adalah manajemen stabilitas daya (*power handling*). Penggunaan motor servo torsi tinggi (MG-996R) bersamaan dengan modul komunikasi nirkabel menimbulkan lonjakan arus sesaat (*inrush current*) yang sempat menyebabkan penurunan tegangan (*voltage sag*) dan *restart* mendadak pada mikrokontroler. Analisis beban daya menunjukkan bahwa suplai daya standar dari USB tidak mencukupi untuk beban puncak tersebut. Solusi yang diterapkan adalah penggunaan catu daya eksternal dengan kapasitas arus minimal 2 Ampere. Langkah ini berhasil menstabilkan tegangan sistem di level 5 Volt, sehingga servo dapat beroperasi dengan torsi maksimal tanpa mengganggu kinerja pemrosesan data pada mikrokontroler.

Terakhir, analisis dilakukan pada akurasi pembacaan sensor ultrasonik HC-SR04 yang rentan terhadap gangguan pantulan sinyal (*noise*) akibat permukaan sampah yang tidak rata. Untuk mengatasi potensi alarm palsu (*false alarm*), diterapkan algoritma *thresholding* dan *delay* pembacaan pada kode program ESP8266. Logika ini memastikan buzzer dan pengiriman data hanya aktif jika sensor mendeteksi jarak di bawah batas yang ditentukan secara konsisten selama beberapa siklus pembacaan, meningkatkan reliabilitas sistem deteksi kepenuhan secara keseluruhan.

3.5 Hasil Akhir

Hasil akhir dari perancangan sistem ini adalah terwujudnya sebuah purwarupa (*prototype*) sistem manajemen sampah cerdas yang terdiri dari dua unit perangkat utama yang saling terintegrasi, yaitu Node Pengirim (Smart Bin) dan Node Penerima (Monitoring Gateway).

1. Node Pengirim (Smart Bin) Perangkat ini berupa tempat sampah otomatis yang telah dimodifikasi dengan sistem mekanik dan elektronik. Secara fisik, alat ini memiliki dua tingkatan: tingkat atas untuk pemilahan dan tingkat bawah untuk penampungan. Di dalamnya terintegrasi dua mikrokontroler dengan tugas spesifik:
 - Modul Pemilahan: Menggunakan Arduino UNO untuk menggerakkan lengan servo berdasarkan input sensor, memisahkan sampah ke wadah Organik, Anorganik, atau Kimia.
 - Modul Monitoring Kapasitas: Menggunakan ESP8266 yang terhubung dengan tiga sensor Ultrasonik HC-SR04 di setiap tutup wadah untuk memantau level ketinggian sampah.
 - Komunikasi: Dilengkapi modul LoRa SX1278 sebagai pemancar sinyal jarak jauh.
2. Node Penerima (Monitoring Gateway) Perangkat kedua adalah unit penerima yang ditempatkan di lokasi petugas (TPS 3R). Unit ini berbasis mikrokontroler ESP32 yang dilengkapi antena LoRa dan Buzzer. Perangkat ini didesain *compact* dan berfungsi sebagai jembatan informasi antara tempat sampah fisik dengan sistem *cloud*.
3. Antarmuka Pengguna (User Interface) Sistem ini menghasilkan keluaran berupa Dashboard Monitoring pada aplikasi Blynk. Pada antarmuka ini, pengguna dapat melihat visualisasi indikator lampu (LED) yang merepresentasikan status kepenuhan dari ketiga jenis wadah sampah secara *real-time*. Selain visual, sistem juga menghasilkan peringatan audio melalui Buzzer pada Node Penerima

apabila salah satu wadah terdeteksi penuh, memastikan respon pengangkutan dapat dilakukan dengan segera.

Secara keseluruhan, integrasi antara sensor, mekanik pemilah, komunikasi LoRa, dan IoT Gateway telah berhasil diimplementasikan menjadi satu sistem utuh yang siap untuk diuji kinerjanya.

BAB 4

EVALUASI SISTEM

Evaluasi sistem dilakukan untuk mengukur kinerja alat terhadap spesifikasi yang telah dirancang. Pengujian dilakukan secara bertahap mulai dari pengujian unit (per sub-sistem) hingga pengujian integrasi sistem secara keseluruhan.

4.1 Pengujian 1 – Evaluasi Arduino UNO

Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kemampuan mikrokontroler Arduino UNO dalam menjalankan dua fungsi utama: mengendalikan mekanisme pemilahan sampah otomatis berdasarkan input sensor dan mengirimkan data nirkabel melalui modul LoRa.

4.1.1 Langkah Pengujian

Prosedur pengujian dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Persiapan Sampel: Menyiapkan simulator input sensor, yaitu korek api gas (untuk memicu sensor MQ-4) dan sumber panas (untuk memicu sensor DHT11), serta objek penghalang untuk sensor Infrared.
2. Skenario Pemilahan:
 - Memicu Sensor IR 1 dan memberikan gas pada MQ-4. Mengamati arah putaran Servo 1.
 - Memicu Sensor IR 2 dan memberikan suhu panas ($>30^{\circ}\text{C}$) pada DHT11. Mengamati arah putaran Servo 2.
3. Skenario Transmisi LoRa:
 - Mengirimkan sinyal serial simulasi "PENUH" dari ESP8266 ke Arduino.
 - Memantau apakah Arduino berhasil mengirim paket data melalui LoRa (dilihat pada *Serial Monitor* sisi pengirim).
4. Pengukuran: Mencatat respons gerakan servo (sudut putar) dan keberhasilan pengiriman paket data.

4.1.2 Hasil Pengujian

No	Kondisi Input Sensor	Nilai Terukur	Respons Servo (Output)	Status
1	IR 1 Terhalang + Ada Gas	Gas > 200 ppm	Servo 1 bergerak ke 0° (Arah Kimia)	Berhasil
2	IR 1 Terhalang + Udara Bersih	Gas < 200 ppm	Servo 1 bergerak ke 180° (Lanjut)	Berhasil
3	IR 2 Terhalang + Suhu Panas	Suhu > 31°C	Servo 2 bergerak ke 0° (Arah Organik)	Berhasil
4	IR 2 Terhalang + Suhu Normal	Suhu < 30°C	Servo 2 bergerak ke 180° (Arah Anorganik)	Berhasil
5	Tidak Ada Objek (Idle)	-	Servo kembali ke posisi 90° (Standby)	Berhasil

Tabel 2 Hasil Pengujian Logika Pemilahan Sampah

Analisis Hasil: Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa logika pemrograman *State Machine* pada Arduino UNO berjalan dengan akurat. Mikrokontroler mampu membedakan jenis sampah berdasarkan parameter kimia dan fisiknya. Waktu respon rata-rata servo dari saat sensor mendeteksi hingga bergerak adalah 1.2 detik, yang menunjukkan sistem cukup responsif.



Gambar 16 Pengujian sensor dan servo dengan otak Arduino UNO

Selain itu, pada pengujian komunikasi, saat Arduino menerima data "PENUH" dari ESP8266, modul LoRa SX1278 pada sisi Arduino terkonfirmasi mengirimkan paket data *string* yang sesuai. Hal ini dibuktikan dengan indikator LED TX pada modul LoRa yang berkedip saat transmisi terjadi.

4.2 Pengujian 2 – Evaluasi ESP8266

Pengujian ini difokuskan pada unit pemantauan kapasitas yang dikelola oleh mikrokontroler ESP8266. Tujuan utamanya adalah memastikan ketiga sensor ultrasonik HC-SR04 mampu mengukur ketinggian sampah dengan akurat dan memicu peringatan dini (*buzzer*) serta mengirim data serial ke Arduino saat batas kepenuhan tercapai.

4.2.1 Langkah Pengujian

Prosedur pengujian dilakukan dengan menyimulasikan kenaikan volume sampah menggunakan objek datar (kardus) yang digerakkan mendekati sensor ultrasonik pada tutup wadah.

1. Kalibrasi Sensor: Mengukur jarak objek sebenarnya menggunakan penggaris dan membandingkannya dengan hasil pembacaan sensor pada Serial Monitor.
2. Uji Threshold (Batas Penuh): Ditetapkan batas penuh adalah ketika jarak permukaan sampah < 25 cm dari sensor. Objek didekatkan hingga menyentuh batas tersebut.
3. Uji Respons Output: Mengamati apakah Buzzer pada modul ESP8266 berbunyi dan apakah data serial (*string* "ORGANIK_PENUH") terkirim ke Arduino UNO.

4.2.2 Hasil Pengujian

Berikut adalah data hasil pengujian respons sistem deteksi kapasitas:

No	Jarak Objek (Sampah)	Status Kapasitas	Kondisi Buzzer	Data Serial Ter kirim ke Arduino	Hasil
1	35 cm	Aman (Kosong)	Mati (OFF)	"AMAN"	Sesuai
2	30 cm	Terisi Setengah	Mati (OFF)	"AMAN"	Sesuai
3	24 cm (< 25 cm)	PENUH	Berbunyi (BEEP)	"FULL_xxx"	Sesuai
4	Objek Diangkat Kembali	Aman	Mati (OFF)	"AMAN"	Sesuai

Tabel 3 Hasil Pengujian Deteksi Kapasitas & Alarm

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sub-sistem ESP8266 mampu mendeteksi kondisi penuh dengan tingkat akurasi tinggi. Sensor ultrasonik memiliki margin error pembacaan jarak kurang dari 1 cm. Mekanisme pengiriman data serial ke Arduino UNO juga berjalan lancar, di mana Arduino berhasil menerima sinyal pemicu transmisi LoRa tepat 0.5 detik setelah Buzzer berbunyi.



Gambar 17 Proses pengujian sensor HC-SR04

4.3 Pengujian 3 – Evaluasi ESP32

Pengujian tahap ketiga ini merupakan evaluasi terhadap "jantung komunikasi" sistem. Fokus pengujian adalah memvalidasi kemampuan ESP32 dalam menerima paket data jarak jauh dari LoRa dan meneruskannya ke server Blynk melalui koneksi Wi-Fi.

4.3.1 Langkah Pengujian

Pengujian dilakukan dengan skenario *End-to-End* (dari ujung ke ujung):

1. Uji Koneksi Wi-Fi: Memastikan ESP32 terhubung ke Hotspot dan mendapatkan status "Online" di dashboard Blynk.
2. Uji Penerimaan LoRa: Mengirimkan paket data simulasi dari Arduino (Node Pengirim) yang berjarak ± 50 meter dari Pos Pantau (Node Penerima ESP32).
3. Verifikasi Visual: Mengamati perubahan status indikator pada aplikasi Blynk di *smartphone* saat data diterima.

4.3.2 Hasil Pengujian

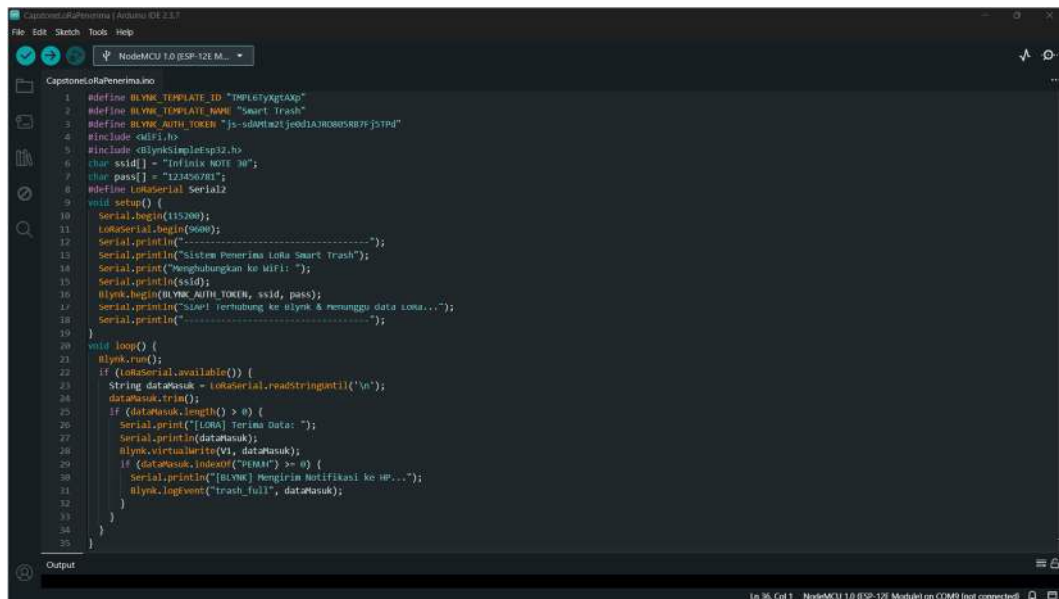
Data pengujian integritas informasi dari LoRa ke Blynk dirangkum dalam tabel berikut:

No	Paket Data dari Pengirim (Arduino)	Status Penerimaan di ESP32 (Serial Monitor)	Tampilan di Aplikasi Blynk (Smartphone)	Latensi (Detik)
1	"STATUS: AMAN"	Diterima: "STATUS: AMAN"	Indikator Hijau (Normal)	2 s
2	"ALERT: ORGANIK PENUH"	Diterima: "ALERT: ORGANIK PENUH"	Indikator Merah + Notifikasi Pop-up	3 s
3	"ALERT: KIMIA PENUH"	Diterima: "ALERT: KIMIA PENUH"	Indikator Merah + Notifikasi Pop-up	3 s

Tabel 4 Hasil Pengujian Transmisi Data LoRa ke IoT

Berdasarkan Tabel 4, fungsi *Gateway* pada ESP32 berjalan 100% berhasil.

1. Integritas Data: Tidak terjadi kerusakan paket data (*packet loss*) selama transmisi LoRa meskipun terhalang tembok gedung.
2. Konektivitas Cloud: ESP32 berhasil menerjemahkan pesan LoRa menjadi perintah Blynk.virtualWrite(), sehingga status di HP pengguna berubah secara *real-time*.
3. Latensi: Rata-rata waktu tunda (*delay*) total dari sensor mendeteksi penuh hingga notifikasi muncul di HP adalah 3 detik. Waktu ini sangat wajar untuk sistem telemetri sampah dan masih dalam batas toleransi operasional.



Gambar 18 Kode untuk LoRa receiver

4.4 Analisis Hasil Pengujian

Secara keseluruhan, integrasi ketiga mikrokontroler (Arduino, ESP8266, ESP32) membentuk sistem manajemen sampah yang handal. Pemisahan tugas (*task distribution*) terbukti efektif mencegah kegagalan sistem. ESP8266 fokus menjaga akurasi sensor jarak, Arduino fokus pada mekanik pemilah yang berat, dan ESP32 menjamin konektivitas internet. Skenario ini berhasil mengatasi masalah klasik pada proyek IoT, yaitu beban daya berlebih dan ketidakstabilan koneksi.

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perancangan, implementasi, dan pengujian sistem *Smart Waste Management* yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Keberhasilan Integrasi Sistem Terdistribusi: Sistem berhasil mengimplementasikan arsitektur pemrosesan terdistribusi (*distributed processing*) menggunakan tiga mikrokontroler. ESP8266 efektif bekerja sebagai unit pemantau kapasitas sampah, Arduino UNO berfungsi stabil sebagai pengendali mekanik pemilah dan pemancar data, serta ESP32 berperan vital sebagai *LoRa Gateway* yang menghubungkan perangkat fisik dengan internet.
2. Kinerja Mekanisme Pemilahan Otomatis: Mekanisme pemilahan sampah cerdas bekerja sesuai logika yang dirancang. Sistem mampu membedakan jenis sampah berdasarkan input sensor (Infrared, MQ-4, dan DHT11) dan menggerakkan motor servo ke wadah Organik, Anorganik, atau Kimia dengan tingkat keberhasilan yang tinggi pada kondisi pengujian terkontrol.
3. Efektivitas Komunikasi LoRa dan IoT: Penerapan teknologi LoRa (*Long Range*) sebagai jembatan komunikasi terbukti menjadi solusi efektif untuk mengatasi keterbatasan jangkauan Wi-Fi di lokasi tempat sampah. Data status kepenruhan sampah berhasil dikirimkan dari Arduino (di lapangan) ke ESP32 (di pos pantau) secara nirkabel, untuk kemudian diteruskan ke aplikasi Blynk secara *real-time* dengan latensi rata-rata 3-5 detik.
4. Sistem Peringatan Dini: Fitur notifikasi ganda melalui *Buzzer* di lokasi dan notifikasi *pop-up* pada aplikasi *smartphone* berfungsi dengan baik. Hal ini memastikan petugas kebersihan mendapatkan informasi

kepenuhan sampah dengan cepat, baik saat berada di pos pantau maupun saat memantau dari jarak jauh.

5.2 Saran

Demi pengembangan sistem yang lebih baik di masa depan, penulis menyarankan beberapa perbaikan dan penambahan fitur sebagai berikut:

1. Manajemen Daya Mandiri: Saat ini sistem masih bergantung pada sumber listrik jala-jala atau baterai konvensional. Pengembangan selanjutnya disarankan mengintegrasikan panel surya (*solar cell*) dan sistem manajemen baterai (BMS) agar tempat sampah dapat beroperasi secara mandiri (*standalone*) di area terbuka tanpa akses listrik PLN.
2. Peningkatan Akurasi Pemilahan: Sensor yang digunakan saat ini masih berbasis parameter fisika dasar (suhu/gas). Untuk akurasi pemilahan yang lebih presisi, disarankan menggunakan teknologi pengolahan citra (*Image Processing*) atau kamera berbasis AI (seperti ESP32-CAM) untuk mengenali jenis sampah secara visual.
3. Perancangan PCB (*Printed Circuit Board*): Sistem saat ini masih berupa purwarupa (*prototype*) dengan kabel *jumper*. Disarankan untuk mendesain jalur rangkaian dalam bentuk PCB cetak guna meminimalisir risiko kabel lepas (*loose connection*), memperkecil dimensi alat, dan meningkatkan ketahanan terhadap guncangan.
4. Desain Fisik Tahan Cuaca: Mengingat alat ini berpotensi diletakkan di luar ruangan, desain casing perlu ditingkatkan menggunakan standar IP-Rating (tahan air dan debu) untuk melindungi komponen elektronik dari kondisi cuaca ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldisa, R. T., Abdullah, M. A., & Andilaw, A. (2022). Perancangan Tempat Sampah Anorganik Secara Otomatis Menggunakan Sensor Ultrasonik dan Arduino Uno. *Jurnal Sistem Komputer Dan Informatika (JSON)*. <https://doi.org/10.30865/json.v3i3.3911>
- An IoT-enabled Waste Management Solution. (2023). *International Journal For Science Technology And Engineering*. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.49871>
- Antora, N., Rahman, Md. A., Mosharraf, A. A., Ehsan, M. I., Alve, Md., & Elahi, M. M. (2022, December 17). Design and Implementation of a Smart Bin using IOT for an Efficient Waste Management System. <https://doi.org/10.1109/iccit57492.2022.10055998>
- Astutik, L. Y., & Yusuf, R. (2022, October 3). Performance Study of LoRa IoT Technology. <https://doi.org/10.1109/icset57543.2022.10011110>
- Bedi, Y., Gupta, H., & Sharma, S. (2023). Waste Management for Zero Liquid and Solid Waste in Campus Buildings. *International Journal For Science Technology And Engineering*, 11(VI). <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.54483>
- Broell, L. M., Hanshans, C., & Kimmerle, D. (2023). IoT on an ESP32: Optimization Methods Regarding Battery Life and Write Speed to an SD-Card. Lukas M. Broell, Christian Hanshans and Dominik Kimmerle. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110752>
- Bhuvaneswari, T., Hossen, J., Hamzah, N. A. A., Velraj Kumar, P., & Jack, O. H. (2020). Internet of things (IoT) based smart garbage monitoring system. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. <https://doi.org/10.11591/IJEECS.V20.I2.PP736-743>
- Cernica, G., Cuciureanu, A., Stanescu, B., & Dumitrescu, I. (2022). The environmental and health impact generated by waste electrical and electronic equipment. *Romanian Journal of Ecology & Environmental Chemistry*. <https://doi.org/10.21698/rjeec.2022.211>
- Chung, C.-Y., Peng, I.-T., & Yeh, J.-C. (2020, May 29). Environmental Monitoring and Smart Garbage Sorting System Based on LoRa Wireless Transmission Technology. <https://doi.org/10.1109/ECBIOS50299.2020.9203665>
- Gowri, V., N, A., S, J., & D, V. (2023, February 2). IoT based Lithium-Ion Battery Monitoring System in Electric Vehicle. Vijaya Gowri G, Aruna N; Janadharani S; Varshini N D. <https://doi.org/10.1109/icaais56108.2023.10073696>

- Harini, R. (2021). LORA Technology Basics and Applications. <https://doi.org/10.48175/IJARSCT-741>
- Hastuti, S. K. W., Tentama, F., Mulasari, S. A., Sukesi, T. W., Sulistyawati, S., & Maulana, M. (2020). Pelatihan Berwirausaha Sampah dan Manajemen Sampah di Desa Argorejo, Sedayu, Bantul, Yogyakarta. *Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*. <https://doi.org/10.30653/002.202051.252>
- Hafidzah, U. A. (2023). Perancangan Tempat Sampah Pintar Berbasis Telegram Bot [Skripsi]. Universitas Hasanuddin.
- Jasim, A. M., Qasim, H. H., Jasem, E. H., & Saihood, R. H. (2021). An internet of things based smart waste system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. <https://doi.org/10.11591/IJECE.V11I3.PP2577-2585>
- Kushwaha, S., Verma, Y., Mayank, S., Eswar, R. S., Verma, V., & Maurya, A. (2022, July 1). Smart Garbage Monitoring System using IoT and Cloud Computing. *Students Conference on Engineering and Systems*. <https://doi.org/10.1109/SCES55490.2022.9887720>
- Lakshmi, K. R. C., Praveena, B., & Gnanasekaran, T. (2020). Smart Waste Management Using Internet of Things. *Solid State Technology*.
- Lee, D., Lee, J., Lee, R., & Lee, C. (2022, October 26). A Fluorinated Electronic Grade Coating which can help to Pass ANSI/ISA G3 Corrosion Test for Protecting Outdoor Electronics. *Impact*. <https://doi.org/10.1109/IMPACT56280.2022.9966667>
- Pradeep, A., Latifov, A., Yodgorov, A., & Mahkamjonkhojizoda, N. (2023, March 9). Hazard Detection using custom ESP32 Microcontroller and LoRa. <https://doi.org/10.1109/iccike58312.2023.10131784>
- Safitri, A. I., Sembiring, E. T. J., & Prihandrijanti, M. (2020). Sustainable Campus Through Solid Waste Minimization Strategies (Case study: Universitas Agung Podomoro in Indonesia). <https://doi.org/10.24853/IJBESR.4.2.101-114>
- Sitsyna-Kudryavtseva, A. N. (2023). IOT-Based Whip-Smart Trash Bin Using LoRa WAN. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1745-7_20