

PERANCANGAN SISTEM TEMPAT SAMPAH CERDAS BERBASIS *INTERNET OF THINGS* (IOT)



Disusun Oleh:

N a m a : Tian Nugraha Pratama
NIM : 21523243

**PROGRAM STUDI INFORMATIKA – PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

2026

HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**PERANCANGAN SISTEM TEMPAT SAMPAH CERDAS
BERBASIS *INTERNET OF THINGS* (IOT)**

TUGAS AKHIR



N a m a : Tian Nugraha Pratama
NIM : 21523243

Yogyakarta, 18 April 2026

Pembimbing,



(Ir. Kurniawan Dwi Irianto, S.T., M.Sc.)

HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**PERANCANGAN SISTEM TEMPAT SAMPAH CERDAS
BERBASIS *INTERNET OF THINGS* (IOT)****TUGAS AKHIR**

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer dari Program Studi Informatika – Program Sarjana di Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 13 Mei 2026

Tim Penguji

Ir. Kurniawan Dwi Irianto, S.T., M.Sc.

Anggota 1

Dr. Yudi Prayudi, S.Si., M.Kom.

Anggota 2

Moh. Idris, S.Kom., M.Kom.

Mengetahui,

Ketua Program Studi Informatika – Program Sarjana

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia



(Dhomas Hatta Fudholi, S.T., M.Eng., Ph.D.)

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Tian Nugraha Pratama

NIM : 21523243

Tugas akhir dengan judul:

PERANCANGAN SISTEM TEMPAT SAMPAH CERDAS BERBASIS *INTERNET OF THINGS* (IOT)

Menyatakan bahwa seluruh komponen dan isi dalam tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri. Apabila di kemudian hari terbukti ada beberapa bagian dari karya ini adalah bukan hasil karya sendiri, tugas akhir yang diajukan sebagai hasil karya sendiri ini siap ditarik kembali dan siap menanggung risiko dan konsekuensi apapun.

Demikian surat pernyataan ini dibuat, semoga dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, 18 April 2026


(Tian Nugraha Pratama)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan syukur Alhamdulillah kepada Allah SWT, pemilik segala ilmu dan takdir. Atas izin-Nya, saya mampu menyelesaikan perjalanan yang panjang ini. Skripsi ini adalah sebuah tanda bakti yang saya persembahkan sepenuh hati untuk:

- a. **Allah SWT**, yang tak pernah membiarkan hamba-Nya berjalan sendirian. Terima kasih atas rahmat, hidayah, dan ketegaran hari yang Engkau tiupkan di setiap langkah penulis yang sempat goyah.
- b. **Kedua Orang Tua tercinta**, Terima kasih telah menjadi rumah paling nyaman untuk pulang, menjadi penyemangat yang tak pernah lelah mendoakan, dan alasan terbesar penulis untuk menyelesaikan pendidikan ini.
- c. **Adikku tercinta**, meski takdir memisahkan kita di tahun 2021, namun namamu tetap hidup dalam setiap lembar perjuangan ini. Terima kasih pernah menjadi adik terbaik. Persembahan ini adalah rindu yang mewujudkan menjadi prestasi.

Semoga karya sederhana ini dapat menjadi amal jariyah dan bermanfaat bagi ilmu pengetahuan. Semoga Allah SWT senantiasa merahmati kita semua.

HALAMAN MOTO

“Be thirsty, be hungry, fill up your curiosity”

(Tian Nugraha Pratama)

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan nikmat, taufiq dan hidayah-Nya berupa keimanan, kekuatan, kesabaran, kelancaran, serta keselamatan sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tugas akhir ini. Shalawat serta salam tak lupa penulis haturkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan para pengikutnya.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer Program Studi Informatika Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia. Tugas akhir yang berjudul “Perancangan Sistem Tempat Sampah Cerdas Berbasis IoT” harapannya dapat memberikan wawasan dan mengenalkan penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dalam hal pengelolaan kebersihan lingkungan.

Meskipun penulis sempat dihadapkan pada kendala dalam proses pengumpulan data dan penyesuaian jadwal wawancara, namun tantangan tersebut dapat teratasi hingga laporan ini selesai. Penyelesaian tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan, arahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis bermaksud menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak DThomas Hatta Fudholi, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Informatika.
2. Bapak Ir. Kurniawan Dwi Irianto, S.T., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan serta arahan pada penulis.
3. Kedua Orang Tua tercinta, yang senantiasa menjadi sumber kekuatan, doa, dan dukungan terbesar bagi penulis.
4. Rekan seperjuangan penulis Raden, Martino, Adhisty, Yaza, Salsabila, yang telah menemani penulis selama 10 tahun di jenjang pendidikan, terima kasih atas kebersamaan dan dukungannya hingga saat ini.
5. Keluarga besar kontrakan Sehat Tentrem Adem Ayem yang telah menemani masa kuliah penulis.
6. Teman-teman seperjuangan Informatika UII angkatan 2021.
7. Serta semua pihak yang telah membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharap ketulusan maaf dari pembaca. Penulis sangat mengharapkan masukan yang membangun berupa saran serta kritik yang positif untuk membuat tugas akhir ini menjadi

lebih bermanfaat. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis itu sendiri maupun pembaca.

Yogyakarta, 18 April 2026

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Tian Nugraha Pratama', written in a cursive style.

(Tian Nugraha Pratama)

SARI

Pengelolaan sampah yang tidak efisien di lingkungan Fakultas Teknologi Industri (FTI) Universitas Islam Indonesia masih mengandalkan pengecekan manual, yang kerap memicu masalah inefisiensi waktu bagi petugas kebersihan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menerapkan teknologi *Internet of Things* (IoT) pada sistem tempat sampah cerdas guna mengatasi permasalahan tersebut. Pengembangan sistem ini menggunakan metode *Waterfall* yang terdiri dari empat tahapan sistematis, yaitu analisis kebutuhan (*Requirements definition*), perancangan sistem dan perangkat lunak (*System and software design*), implementasi dan pengujian unit (*Implementation and unit testing*), serta integrasi dan pengujian sistem (*Integration and system testing*). Purwarupa perangkat keras dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama, dua buah sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mendeteksi gerakan dan kapasitas sampah, motor servo MG996R sebagai aktuator pembuka tutup, layar LCD 16x2 dengan modul I2C sebagai indikator visual, serta layanan *Firebase Realtime Database* untuk pemantauan jarak jauh. Hasil pengujian fungsional (*Black Box Testing*) menunjukkan bahwa mekanisme tanpa sentuhan (*touchless*) berhasil beroperasi, sensor luar secara konsisten merespons pergerakan tangan pada jarak ≤ 15 cm untuk membuka penutup tempat sampah selama 4 detik. Sensor bagian dalam juga mampu mengukur persentase kepenuhan secara akurat, dan data tersebut berhasil ditransmisikan secara langsung (*real-time*) menuju antarmuka *Firebase* dengan tingkat keberhasilan 100%. Selanjutnya, evaluasi penerimaan infrastruktur fisik perangkat keras menggunakan kuesioner skala Likert memperoleh persentase kelayakan sebesar 87,2%, membuktikan bahwa desain fisik purwarupa ini tangguh, fungsional, sangat ramah guna, dan dapat diterima dengan baik oleh pengguna akhir di lapangan.

Kata kunci: *Firebase, Internet of Things, Mikrokontroler ESP32, Tempat Sampah Cerdas, Waterfall.*

GLOSARIUM

Aktuator	Perangkat mekanik seperti motor servo yang bertugas sebagai komponen penggerak dalam suatu sistem elektronik.
Arduino IDE	Perangkat lunak <i>open-source</i> untuk menulis, mengompilasi, dan mengunggah kode program ke dalam mikrokontroler.
<i>Black Box</i>	Pengujian fungsionalitas sistem berdasarkan kesesuaian masukan (<i>input</i>) dan keluaran (<i>output</i>) tanpa perlu meninjau struktur baris kode program.
<i>Brownout</i>	Fenomena penurunan tegangan listrik drastis yang dapat memicu sistem mikrokontroler melakukan <i>restart</i> berulang.
<i>Compile</i>	Proses untuk mengubah berkas kode program dengan berkas lain yang terkait menjadi berkas yang siap untuk dieksekusi oleh sistem operasi secara langsung.
Firebase	Layanan basis data <i>cloud</i> dari Google untuk menyimpan dan menyinkronkan pertukaran data dengan latensi sangat rendah.
Fluktuatif	Kondisi naik-turun atau tidak tetap, biasanya merujuk pada lonjakan penarikan arus listrik saat motor servo menahan beban.
GPIO	Singkatan dari <i>General Purpose Input Output</i> , yakni pin pada mikrokontroler yang dapat diatur sebagai penerima atau pengirim sinyal.
I2C	Modul antarmuka komunikasi serial untuk mengubah komunikasi paralel menjadi serial guna menghemat penggunaan pin.
LCD	Modul tampilan visual elektronik yang berfungsi untuk menampilkan informasi berupa teks alfanumerik.
Mikrokontroler	Sistem dalam cip yang berfungsi sebagai otak pemroses utama untuk mengendalikan seluruh komponen dalam rangkaian elektronik.
<i>Platform</i>	Perangkat lunak, sistem, atau infrastruktur dasar pendukung yang digunakan untuk menjalankan suatu layanan.
<i>Real-time</i>	Kemampuan sistem untuk menyinkronkan, memproses, dan mengirimkan data seketika dengan waktu jeda (<i>latency</i>) yang sangat rendah.

<i>Serial Monitor</i>	Fitur pada antarmuka Arduino IDE untuk memantau data hasil keluaran sensor dan melacak kesalahan logika program secara langsung.
<i>Standalone</i>	Kondisi di mana sebuah alat atau sistem beroperasi secara mandiri tanpa terhubung dengan sistem kolaboratif lainnya.
Transmitter	Komponen pemancar pada sensor ultrasonik yang bertugas memancarkan gelombang suara ke arah objek.
Ultrasonik	Sensor yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek dan mengukur jarak menggunakan prinsip pantulan gelombang suara.
<i>Upload</i>	Proses mentransfer atau mengunggah fail kode program yang telah dikompilasi ke dalam memori mikrokontroler.
<i>Waterfall</i>	Metode pengembangan perangkat lunak yang dikerjakan secara sistematis dan berurutan dari atas ke bawah seperti air terjun.
Wi-Fi	Teknologi jaringan nirkabel yang digunakan oleh sistem untuk terhubung ke internet dan mentransmisikan data alat ke pangkalan data.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	iii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
HALAMAN MOTO	vi
KATA PENGANTAR	vii
SARI.....	ix
GLOSARIUM.....	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Metodologi Penelitian	3
1.7 Sistematika Penulisan	4
1.7.1 Pendahuluan	4
1.7.2 Landasan Teori.....	5
1.7.3 Metodologi Penelitian.....	5
1.7.4 Hasil dan Pembahasan	5
1.7.5 Kesimpulan dan Saran	5
BAB II LANDASAN TEORI	6
2.1 Tinjauan Pustaka	6
2.2 Landasan Teori.....	10
2.2.1 Tempat Sampah Cerdas	10
2.2.2 <i>Internet of Things</i> (IoT).....	10
2.2.3 Mikrokontroler ESP32	12
2.2.4 <i>ESP32 Expansion Board</i>	13
2.2.5 Sensor Ultrasonik HC-SR04	14
2.2.6 Motor Servo MG996R	15
2.2.7 LCD (<i>Liquid Crystal Display</i>) 16x2 dengan Modul I2C	17
2.2.8 Catu Daya (<i>Power Supply</i>) <i>Switching</i> 5V 3A	18
2.2.9 <i>Firestore Realtime Database</i>	19
2.2.10 Arduino IDE.....	20
2.2.11 <i>Waterfall</i>	21
2.2.12 <i>Black Box Testing</i>	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Metode Pengembangan Sistem	23
3.2 Metode Pengumpulan Data.....	24
3.3 Analisis Kebutuhan Sistem (<i>Requirements Definition</i>)	25
3.3.1 Kebutuhan Fungsional	25
3.3.2 Kebutuhan Perangkat Keras.....	25
3.3.3 Kebutuhan Perangkat Lunak	26

3.4	Perancangan Sistem dan Perangkat Lunak (<i>System and Software Design</i>).....	27
3.4.1	Diagram Blok Sistem.....	27
3.4.2	Diagram Arsitektur	28
3.4.3	Alur Kerja Sistem (<i>Flowchart System</i>)	29
3.5	Perancangan Perangkat Keras.....	32
3.5.1	Rangkaian Sistem Perangkat Keras	33
3.5.2	Konfigurasi Pin dan Koneksi Antar Perangkat	35
3.6	Implementasi dan Pengujian Unit (<i>Implementation and Unit Testing</i>)	37
3.7	Integrasi dan Pengujian Sistem (<i>Integration and System Testing</i>)	37
	BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1	Implementasi dan Sintaks Program.....	41
4.1.1	Implementasi <i>Hardware</i>	41
4.1.2	Implementasi <i>Software</i>	42
4.2	Pengujian.....	44
4.2.1	Pengujian Sensor Ultrasonik (Deteksi Gerakan)	45
4.2.2	Pengujian Sensor Ultrasonik (Kapasitas Sampah).....	46
4.2.3	Pengujian Pengiriman Data Ke Firebase	47
4.2.4	Pengujian Kondisi <i>Offline</i>	48
4.2.5	Pengujian Penerimaan Infrastruktur Perangkat Keras	49
4.2.6	Hasil Observasi Pengujian Lapangan	50
4.3	Pembahasan.....	51
	BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	53
5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran.....	53
	DAFTAR PUSTAKA	55
	LAMPIRAN	59

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan penelitian terdahulu.....	8
Tabel 3.1 Kebutuhan perangkat keras.....	25
Tabel 3.2 Kebutuhan perangkat lunak	26
Tabel 3.3 Konfigurasi pin dan koneksi sensor Ultrasonik	36
Tabel 3.4 Konfigurasi pin dan koneksi Servo.....	36
Tabel 3.5 Konfigurasi pin dan koneksi LCD	36
Tabel 3.6 Skala Likert.....	38
Tabel 3.7 Pertanyaan Kuisisioner	39
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Deteksi Gerakan	45
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Akurasi Kapasitas Sampah.....	46
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Pengiriman Data	47
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Dalam Kondisi <i>Offline</i>	48
Tabel 4. 5 Rekapitulasi Hasil Kuisisioner Infrastruktur Perangkat Keras.....	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Arsitektur Tiga Lapis <i>Internet of Things</i> (IoT)	12
Gambar 2.2 <i>Pinout</i> ESP32 DevKit V1	13
Gambar 2.3 ESP32 <i>Expansion Board</i>	14
Gambar 2.4 Sensor Ultrasonik HC-SR04	15
Gambar 2.5 Motor Servo MG996R	17
Gambar 2.6 LCD 16x2 dengan Modul I2C	18
Gambar 2.7 <i>Power Supply Switching</i> 5V 3A	19
Gambar 2.8 Implementasi Struktur Data JSON pada <i>Firebase</i>	20
Gambar 2.9 Tampilan Antarmuka Arduino IDE	21
Gambar 3.1 Tahapan Metode <i>Waterfall</i>	24
Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem	28
Gambar 3.3 Diagram Arsitektur	28
Gambar 3.4 <i>Flowchart</i> Sistem	31
Gambar 3.5 Rancangan <i>Hardware</i>	34
Gambar 4.1 Rancangan Sistem Tempat Sampah Cerdas	42
Gambar 4.2 Sintaks Konfigurasi Jaringan dan Pin Mikrokontroler	43
Gambar 4.3 Sintaks Fungsi Perhitungan Kapasitas Sampah	43
Gambar 4.4 Sintaks Logika Pergerakan Motor Servo	44
Gambar 4.5 Sintaks Logika Pengiriman Data ke <i>Firebase</i>	44
Gambar 4.6 Pengujian Sensor Deteksi Gerakan	45
Gambar 4.7 Pengujian Akurasi Pengukuran Kapasitas Sampah	46
Gambar 4.8 Antarmuka Penerimaan Data Pada <i>Firebase Realtime Database</i>	47
Gambar 4.9 Pengujian Tempat Sampah Cerdas	51

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sampah didefinisikan sebagai sesuatu yang tidak lagi digunakan, tidak disenangi, atau sesuatu yang dibuang yang berasal dari kegiatan manusia dan tidak terjadi dengan sendirinya. Permasalahan ini menjadi isu kompleks yang dihadapi berbagai wilayah, termasuk Indonesia. Diperkirakan setiap penduduk memproduksi sampah sekitar 0,68 kilogram per hari, sehingga volume timbunan sampah terus mengalami peningkatan signifikan seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk setiap tahunnya (Andini & Nur Fazria, 2022).

Peningkatan volume sampah ini juga menjadi tantangan serius bagi institusi pendidikan atau kampus. Semakin banyak jumlah sivitas akademika yang beraktivitas di lingkungan kampus, maka akan semakin banyak pula volume dan jenis sampah yang dihasilkan (Rohyani et al., 2022). Apabila tidak dikelola dengan baik, penumpukan sampah ini akan menimbulkan dampak negatif yang serius, seperti bau tidak sedap, berkurangnya estetika lingkungan, serta berpotensi menjadi sarang vektor penyakit berbahaya seperti kolera, tifus, dan demam berdarah (Marlina et al., 2023).

Kendala utama dalam penanganan sampah konvensional saat ini adalah keterbatasan dalam pemantauan kondisi tempat sampah. Minimnya informasi mengenai kepenuhan sampah seringkali menyebabkan keterlambatan pengangkutan atau sebaliknya, petugas melakukan pengecekan pada tempat sampah yang belum penuh sehingga terjadi inefisiensi tenaga dan biaya operasional (Rohyani et al., 2022).

Untuk mengatasi kendala operasional dan keterbatasan informasi dalam sistem konvensional tersebut, integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) hadir sebagai solusi yang efektif. Penerapan sistem pemantauan cerdas berbasis IoT memungkinkan petugas kebersihan mendapatkan informasi kapasitas sampah secara *real-time* tanpa harus mendatangi lokasi secara fisik. Sebagaimana dijelaskan dalam penelitian Pratama et al. (2024), sistem monitoring cerdas mampu mengatasi masalah penumpukan sampah akibat keterlambatan informasi, sekaligus meningkatkan efisiensi waktu kerja petugas kebersihan.

Keandalan teknologi ini didukung oleh penggunaan komponen yang tepat. Studi terbaru oleh Priyansah et al. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan mikrokontroler ESP32 yang dikombinasikan dengan sensor ultrasonik mampu mendeteksi ketinggian sampah dengan

akurasi yang baik. Data yang diperoleh dari sensor tersebut dapat diolah untuk menentukan status tempat sampah (kosong, sedang, atau penuh), sehingga penanganan sampah dapat dilakukan berdasarkan prioritas kebutuhan aktual di lapangan, bukan sekadar perkiraan jadwal (Ayutantri et al., 2021).

Selain aspek pemantauan volume, penerapan teknologi pada tempat sampah juga dapat meningkatkan aspek kesehatan dan kenyamanan pengguna. Penambahan fitur buka-tutup otomatis menggunakan motor servo memungkinkan pengguna membuang sampah tanpa menyentuh tutup tempat sampah secara langsung, sehingga dapat meminimalisir penyebaran bakteri dan menjaga kebersihan tangan (Pratama et al., 2024).

Sejalan dengan urgensi penerapan teknologi tersebut, kebutuhan akan modernisasi sistem pengelolaan sampah juga dirasakan di lingkungan Fakultas Teknologi Industri (FTI), Universitas Islam Indonesia. Berdasarkan hasil wawancara yang dilakukan penulis dengan petugas kebersihan di FTI UII, sistem pengelolaan sampah saat ini dinilai sudah berjalan cukup baik namun masih bersifat konvensional atau manual. Petugas kebersihan melakukan pengecekan tempat sampah berdasarkan jadwal rutin tanpa mengetahui kondisi aktual tempat sampah tersebut. Hal ini seringkali menyebabkan inefisiensi, terkadang petugas mendatangi tempat sampah yang masih kosong, atau sebaliknya, terjadi penumpukan sampah yang berlebihan di luar jadwal pengecekan.

Para petugas kebersihan menyatakan bahwa meskipun mereka belum familiar dengan konsep IoT, mereka merasa penerapan teknologi ini akan sangat membantu pekerjaan operasional mereka. Berdasarkan hasil wawancara, responden mengharapkan adanya fitur pemantauan volume sampah secara *real-time* melalui perangkat *mobile* dan adanya notifikasi otomatis ketika tempat sampah penuh. Selain itu, terdapat masukan mengenai pentingnya indikator visual pada fisik tempat sampah (seperti LCD) untuk memudahkan pengecekan manual, serta mekanisme buka-tutup otomatis. Implementasi sistem ini diyakini tidak hanya membantu meringankan beban kerja petugas, tetapi juga dapat mendorong mahasiswa untuk lebih tertib dalam membuang sampah pada tempatnya.

Berdasarkan permasalahan dan potensi solusi tersebut, penulis bermaksud melakukan penelitian dengan judul "Perancangan Sistem Tempat Sampah Cerdas Berbasis IoT". Penelitian ini akan berfokus pada pengembangan perangkat keras (*hardware*) menggunakan ESP32 dan sensor ultrasonik yang terintegrasi dengan Firebase Realtime Database. Penggunaan platform Firebase ini sangat krusial agar informasi kapasitas sampah dapat direkam di cloud secara

persisten, sehingga data riwayat kepenuhan tetap aman dan dapat disinkronkan secara otomatis meskipun perangkat fisik sempat mengalami kendala jaringan (*offline*) sementara.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana cara menerapkan teknologi *Internet of Things* pada sistem tempat sampah cerdas.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus pada tujuan utama, maka penulis menetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Luaran penelitian ini hanya berupa purwarupa.
2. Sensor tidak dapat mengenali jenis sampah apa yang ada di dalamnya.
3. Sensor tidak dapat mengenali jenis objek apa yang ada di depannya.
4. Penelitian ini hanya berfokus pada perancangan sistem *hardware* dan pengiriman data dari sensor ke *database*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah menerapkan sistem *Internet of Things* pada sistem tempat sampah cerdas.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan penulis:

1. Menambah pengetahuan penulis tentang perangkat dan penerapan *Internet of Things*.
2. Ikut serta membantu pengelolaan sampah yang ada di FTI.

Manfaat yang didapatkan pengguna:

1. Memudahkan Pengguna untuk mengelola sampah di lingkungan FTI.
2. Meningkatkan efisiensi waktu dan tenaga kerja.

1.6 Metodologi Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini mengacu pada pengembangan sistem, yaitu:

1. Identifikasi masalah dan pengumpulan data

Melakukan wawancara dengan petugas kebersihan dan mahasiswa FTI UII untuk mengetahui kendala pengelolaan sampah saat ini dan kebutuhan fitur yang diharapkan.

2. Analisis kebutuhan

Menganalisis kebutuhan *hardware* dan *software* yang diperlukan berdasarkan hasil wawancara.

3. Perancangan sistem

Merancang skema rangkaian elektronik, alur kerja sistem (*flowchart*), dan desain *prototype* tempat sampah.

4. Implementasi

Merakit komponen *hardware* dan memprogram mikrokontroler agar dapat membaca sensor dan mengirim data ke *Firebase*.

5. Pengujian

Melakukan pengujian fungsionalitas sensor, keberhasilan pengiriman data, dan mekanisme servo untuk memastikan sistem berjalan sesuai kebutuhan pengguna.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan ini disusun secara sistematis ke dalam beberapa bagian yang saling berkaitan, yaitu Pendahuluan, Landasan Teori, Metodologi Penelitian, Hasil dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran. Pembagian tersebut dirancang agar alur penyajian informasi menjadi lebih runtut dan mudah dipahami oleh pembaca.

1.7.1 Pendahuluan

Bab ini memberikan gambaran umum mengenai keseluruhan penelitian yang dilakukan. Di dalamnya mencakup pemaparan mengenai latar belakang masalah terkait kendala pengelolaan sampah dan urgensi penerapan sistem cerdas, rumusan masalah mengenai penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT), serta batasan masalah agar penelitian lebih terarah pada perancangan perangkat keras (*hardware*) dan pengiriman data ke *database*. Bab ini juga menjelaskan tujuan yang ingin dicapai, manfaat penelitian bagi penulis dan pengguna, tahapan metodologi penelitian, hingga sistematika penulisan laporan.

1.7.2 Landasan Teori

Bab ini menguraikan berbagai tinjauan pustaka dan dasar teori yang menjadi landasan referensi dalam penyusunan penelitian. Pembahasan di dalamnya difokuskan pada konsep dasar *Internet of Things* (IoT) dan cara kerjanya, serta penjelasan komprehensif mengenai komponen-komponen yang digunakan, seperti mikrokontroler ESP32, sensor ultrasonik, motor servo, dan *Firestore Realtime Database*. Di bab ini pula dijelaskan teori mengenai metode-metode pengujian sistem (seperti pengujian *Black Box* dan kuesioner pengujian penerimaan perangkat keras) yang akan digunakan.

1.7.3 Metodologi Penelitian

Bab ini membahas langkah-langkah dan tahapan sistematis yang dilakukan oleh penulis untuk mengembangkan sistem Tempat Sampah Cerdas dari awal hingga akhir. Rincian pada bab ini mencakup proses identifikasi masalah dan pengumpulan data, analisis kebutuhan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*), perancangan sistem dan rangkaian elektronik, pembuatan arsitektur dan alur kerja sistem (*flowchart*), hingga rencana implementasi perakitan komponen dan skenario pengujian.

1.7.4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini memaparkan hasil akhir dari implementasi purwarupa (*prototype*) tempat sampah cerdas yang telah berhasil dirakit dan diprogram. Selain itu, bab ini juga menguraikan hasil dari seluruh skenario pengujian yang telah dirancang sebelumnya, meliputi pengujian fungsionalitas sensor ultrasonik, respons pergerakan motor servo, kelancaran pengiriman data ke *Firestore*, hingga evaluasi kepuasan pengguna akhir untuk memastikan sistem dapat berjalan sesuai dengan kebutuhan.

1.7.5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini merupakan bagian penutup yang memuat kesimpulan akhir dari seluruh rangkaian perancangan, implementasi, dan pengujian sistem. Kesimpulan disusun secara ringkas untuk menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian yang telah ditetapkan di awal. Selain memuat hasil akhir, bagian ini umumnya juga memberikan saran-saran konstruktif bagi peneliti selanjutnya yang bermaksud untuk mengembangkan atau menyempurnakan fitur dari purwarupa tempat sampah cerdas ini di masa mendatang.

BAB II

LANDASAN TEORI

Bab ini membahas tinjauan pustaka dari beberapa penelitian terdahulu yang relevan, dengan tujuan untuk memetakan posisi kebaruan (*novelty*) dari sistem tempat sampah cerdas yang dikembangkan. Selain itu, bab ini juga menguraikan landasan teori yang digunakan sebagai dasar komprehensif dalam merancang sistem. Pembahasan teori tersebut mencakup konsep dasar *Internet of Things (IoT)*, spesifikasi perangkat keras seperti mikrokontroler ESP32, sensor ultrasonik HC-SR04, motor servo MG996R, dan LCD 16x2, perangkat lunak pendukung seperti Arduino IDE dan *platform Firebase Realtime Database*, hingga metode pengembangan dan pengujian sistem yang meliputi *Waterfall*, *Black Box Testing*, serta pengujian penerimaan infrastruktur perangkat keras.

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam penyusunan penelitian ini, penulis melakukan kajian terhadap beberapa penelitian terdahulu yang memiliki relevansi dengan topik pengembangan sistem tempat sampah cerdas dan penerapan *Internet of Things (IoT)*. Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk mengidentifikasi metode yang telah diterapkan sebelumnya serta memetakan posisi kebaruan (*novelty*) dari penelitian yang dilakukan.

Penelitian pertama dilakukan oleh Hanafie et al. (2021) dengan judul "Pengembangan Tempat Sampah Cerdas Berbasis *Internet of Things (IoT)* Studi Kasus Fakultas Teknik UIM". Penelitian ini merancang purwarupa tempat sampah yang memiliki kemampuan memilah jenis sampah (logam, kering, dan basah) secara otomatis menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. Meskipun memiliki fitur pemilahan yang canggih, sistem ini masih menggunakan Arduino Uno sebagai pengendali utama yang memerlukan modul tambahan untuk konektivitas internet, berbeda dengan ESP32 yang sudah memiliki fitur Wi-Fi terintegrasi.

Penelitian kedua dilakukan oleh Trisudarmo et al. (2024) berjudul "Tempat Sampah Pintar Berbasis IoT dengan Menggunakan Arduino Uno R3". Fokus penelitian ini adalah pada efisiensi pembuangan sampah dengan menerapkan mekanisme buka-tutup otomatis menggunakan sensor ultrasonik dan motor servo. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan kesadaran masyarakat dalam membuang sampah. Namun, penggunaan Arduino Uno R3 pada

sistem ini memiliki keterbatasan dalam hal pemrosesan data nirkabel dibandingkan dengan mikrokontroler berbasis ESP yang lebih dikhususkan untuk aplikasi IoT.

Penelitian ketiga adalah karya Yama (2025) dengan judul "Monitoring Volume Tempat Sampah di Kelurahan Wosi Madu Raja Menggunakan Mikrokontroler NodeMCU ESP8266 Berbasis *Internet of Things*". Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring volume sampah untuk mengatasi keterlambatan pengangkutan di kawasan padat penduduk. Sistem ini menggunakan NodeMCU ESP8266 dan fitur notifikasi otomatis melalui aplikasi pesan instan Telegram. Perbedaan dengan penelitian penulis terletak pada platform komunikasi data penelitian ini menggunakan Telegram Bot, sedangkan penulis menggunakan Firebase *Realtime Database* untuk integrasi yang lebih luas dengan aplikasi *mobile*.

Penelitian keempat dilakukan oleh Fitriani et al. (2025) dengan judul "Implementasi IoT untuk Pengelolaan Sampah Cerdas Berbasis Sensor di Kawasan Perumahan". Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan rute pengangkutan sampah di kawasan perumahan dengan memonitor tingkat kepenuhan sampah secara *real-time*. Sistem yang dibangun memanfaatkan aplikasi Blynk sebagai antarmuka pemantauan. Meskipun efektif, penggunaan platform pihak ketiga seperti Blynk memiliki keterbatasan dalam kustomisasi antarmuka dibandingkan dengan membangun aplikasi sendiri yang terhubung melalui *database* kustom seperti Firebase.

Penelitian kelima yang menjadi rujukan utama adalah Priyansah et al. (2025) dengan judul "Kotak Sampah Pintar Berbasis IoT Menggunakan ESP32 dan Sensor Ultrasonik". Penelitian ini menguji stabilitas pembacaan sensor ultrasonik dan kinerja mikrokontroler ESP32 dalam mengirimkan data kapasitas sampah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ESP32 memiliki performa yang sangat stabil dan akurat. Penelitian ini menjadi landasan penulis dalam pemilihan komponen, namun penelitian tersebut masih bersifat *standalone*.

Berbeda dengan penelitian-penelitian terdahulu, penelitian yang diusulkan penulis memiliki kebaruan pada stabilitas arsitektur perangkat keras mandiri (*standalone*) untuk transmisi data jarak jauh. Penulis merancang perangkat keras berbasis ESP32 yang terhubung penuh dengan Firebase Realtime Database. Berbeda dengan penelitian Priyansah et al. (2025) yang pemantauannya masih bersifat lokal, sistem ini memadukan ESP32 dengan *Power Supply Switching* 5V 3A eksternal untuk mencegah penurunan tegangan (*brownout*) saat aktuator bekerja. Selain itu, penggunaan Firebase di sini sangat esensial untuk memastikan data dapat direkam di cloud secara persisten, sehingga sistem tetap andal dan data tidak hilang meskipun perangkat sempat mengalami kondisi offline. Perbandingan mendetail disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan penelitian terdahulu

No	Penelitian dan Tahun	Judul Penelitian	Teknologi	Hasil dan Perbedaan
1	Hanafie et al. (2021)	Pengembangan Tempat Sampah Cerdas Berbasis IoT Studi Kasus Fakultas Teknik UIM.	- Arduino UNO - Sensor Proximity - Sensor Hujan	Hasil: Tempat sampah pemilah 3 jenis sampah (logam, kering, basah) Perbedaan: Penulis menggunakan ESP32 dan fokus pada Monitoring data IoT secara <i>Real-Time</i>, bukan mekanisme pemilahan fisik
2	Trisudarmo et al. (2024)	Tempat Sampah Pintar Berbasis IoT Dengan Menggunakan Arduino UNO R3	- Arduino UNO R3 - Sensor Ultrasonik HC-SR04 - Motor Servo SG90	Hasil: Sistem buka-tutup otomatis untuk efisiensi. Perbedaan: Penulis menggunakan mikrokontroler yang mendukung Wi-Fi (ESP32) untuk fitur IoT jarak jauh, yang tidak dimiliki Arduino UNO R3.
3	Yama (2025)	Monitoring Volume Tempat Sampah di Kelurahan Wosi Madu Raja Menggunakan Mikrokontroler	- NodeMCU ESP8266 - Sensor Ultrasonik HC-SR04	Hasil: Notifikasi kepenuhan sampah via Telegram. Perbedaan: Penulis menggunakan <i>Firestore</i>

		NodeMCU ESP8266 Berbasis <i>Internet of Things</i>	- Notifikasi Telegram	<i>Realtime Database</i> untuk integrasi data ke aplikasi Android, bukan sekedar notifikasi chat (Telegram).
4	Fitriani et al. (2025)	Implementasi IoT Untuk Pengelolaan Sampah Cerdas Berbasis Sensor di Kawasan Perumahan	- NodeMCU ESP8266 - Sensor Ultrasonik HC-SR04 - Motor Servo SG90	Hasil: Optimasi rute angkut sampah berbasis monitoring Blynk. Perbedaan: Penulis tidak menggunakan <i>platform</i> Blynk, melainkan Firebase <i>Realtime Database</i> untuk fleksibilitas data tim.
5	Priyansah et al. (2025)	Kotak Sampah Pintar Berbasis IoT Menggunakan ESP32 dan Sensor Ultrasonik	- ESP32 DevKit V1 - Sensor Ultrasonik HC-SR04	Hasil: Analisis akurasi sensor dan stabilitas ESP32 Perbedaan: Alat penulis dirancang sebagai sistem mandiri (<i>standalone</i>) yang memadukan stabilitas kelistrikan eksternal dan transmisi data jarak jauh berbasis <i>cloud</i> menggunakan Firebase.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Tempat Sampah Cerdas

Tempat Sampah Cerdas atau sering disebut *Smart Trash Bin* merupakan inovasi teknologi pengelolaan limbah yang mengintegrasikan sistem mekanik dengan perangkat elektronik untuk meningkatkan efisiensi dan kebersihan lingkungan. Menurut Maulani et al. (2025), *Smart Trash Bin* didefinisikan sebagai solusi teknologi yang dirancang untuk mengatasi permasalahan manajemen sampah konvensional melalui penerapan sensor cerdas yang mampu mendeteksi keberadaan objek dan volume sampah secara otomatis.

Berbeda dengan tempat sampah tradisional yang bersifat pasif, tempat sampah cerdas memiliki kemampuan untuk berinteraksi dengan pengguna dan petugas kebersihan. Prabowo & Setiawan (2025) menjelaskan bahwa tujuan utama pengembangan tempat sampah pintar adalah untuk meminimalkan kontak fisik langsung (*touchless*) guna menjaga higienitas, serta memberikan informasi status kepenruhan sampah secara *real-time* untuk mencegah penumpukan yang berlebihan.

Secara umum, arsitektur sebuah sistem tempat sampah cerdas terdiri dari tiga subsistem utama, yaitu:

- a. Sistem Sensor (*Input*): Berfungsi sebagai “mata” untuk mendeteksi objek atau mengukur jarak sampah (contoh: Sensor Ultrasonik dan Inframerah).
- b. Unit Pemroses (*Process*): Mikrokontroler yang bertugas mengolah data dari sensor dan memberikan perintah (contoh: ESP32, Arduino).
- c. Aktuator dan Komunikasi (*Output*): Perangkat yang bergerak seperti motor servo untuk membuka tutup, serta modul komunikasi untuk mengirim data ke *cloud* server.

Penerapan teknologi ini diharapkan dapat merubah paradigma pengelolaan sampah dari yang semua berbasis jadwal (*schedule-based*) menjadi berbasis kondisi (*condition-based*), di mana pengangkutan sampah hanya dilakukan saat tempat sampah benar-benar penuh.

2.2.2 Internet of Things (IoT)

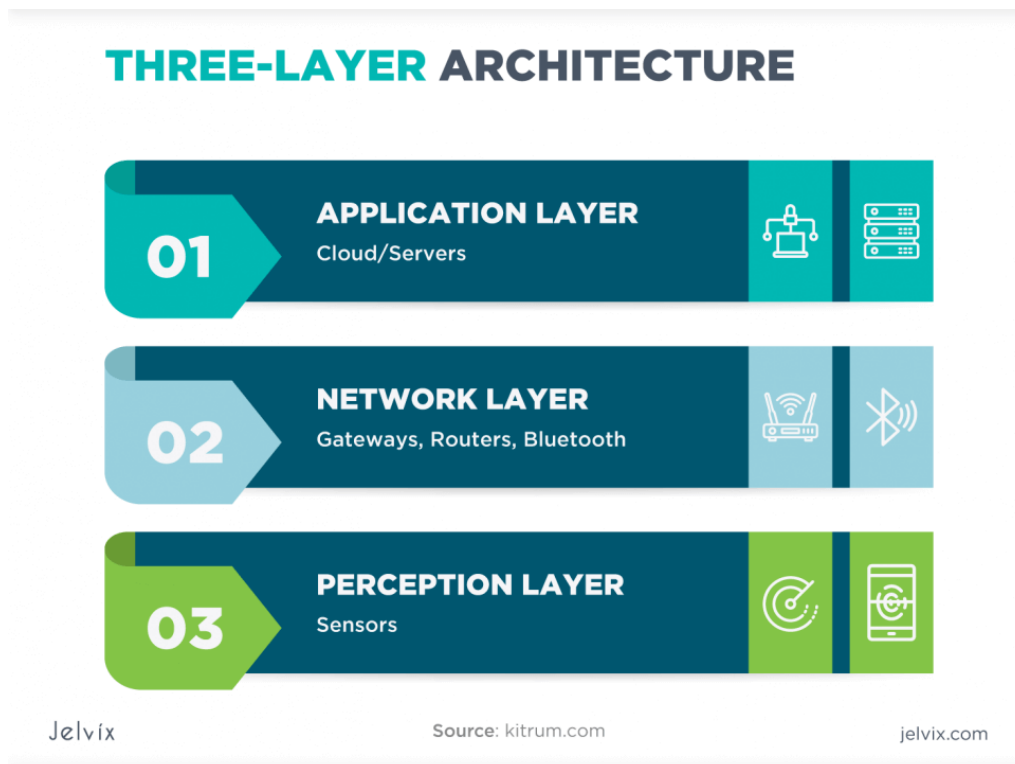
Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi modern yang menghubungkan perangkat fisik ke dalam jaringan internet global. Konsep ini memungkinkan objek-objek

tersebut untuk saling berkomunikasi, mengumpulkan, dan bertukar data secara otomatis tanpa memerlukan interaksi manusia-ke-manusia atau manusia-ke-komputer yang intensif.

Menurut Baharuddin et al. (2024), esensi utama dari IoT adalah memperluas konektivitas internet yang sebelumnya hanya terbatas pada komputer dan *smartphone*, kini mencakup berbagai benda fisik seperti peralatan rumah tangga, mesin industri, hingga infrastruktur kota. Dengan adanya identitas unik (seperti *IP Address*) pada setiap benda, perangkat tersebut dapat dipantau, dikendalikan, dan dianalisis kinerjanya dari jarak jauh secara *real-time*.

Untuk memahami bagaimana data bergerak dari tempat sampah ke aplikasi, perlu dipahami komponen pembangun IoT. Adianto et al. (2024) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa sistem IoT bekerja melalui integrasi tiga elemen utama, yaitu:

- a. Perangkat Fisik: Merupakan objek yang memiliki kemampuan komputasi dan sensor untuk menangkap data dari lingkungan. Dalam penelitian ini, perangkat fisik yang digunakan adalah modul ESP32 yang terhubung dengan Sensor Ultrasonik HC-SR04 untuk mendeteksi ketinggian sampah.
- b. Jaringan Internet: Merupakan media transmisi yang menghubungkan perangkat fisik dengan sistem pengolah data. Adianto et al. (2024) menekankan bahwa koneksi internet yang stabil adalah kunci utama keberhasilan sistem IoT dalam mengirimkan data sensor ke server.
- c. Aplikasi dan *Cloud*: Merupakan pusat penyimpanan dan antarmuka pengguna. Data yang dikirim oleh perangkat akan disimpan di *database cloud* (Firebase) dan kemudian ditampilkan dalam bentuk informasi visual pada aplikasi mobile agar mudah dipantau oleh pengguna.



Gambar 2.1 Arsitektur Tiga Lapis *Internet of Things* (IoT) (Sumber: <https://jelvix.com/blog/iot-architecture-layers>)

Penerapan IoT dalam sistem manajemen sampah (*Smart Waste Management*) bertujuan untuk mengubah pola operasional yang bersifat statis menjadi dinamis. Melalui implementasi ini, petugas kebersihan tidak perlu lagi mengecek setiap tong sampah secara manual. Data volume sampah akan dikirimkan secara otomatis, memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision*) untuk efisiensi waktu dan tenaga (Baharuddin et al., 2024).

2.2.3 Mikrokontroler ESP32

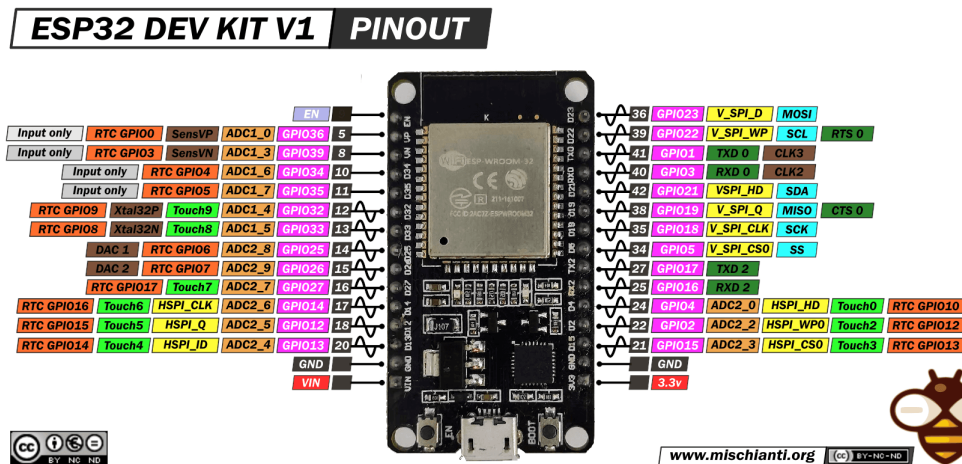
Mikrokontroler ESP32 adalah sebuah sistem dalam cip (*System on Chip* atau *SoC*) berbiaya rendah dan hemat daya yang dikembangkan oleh *Espressif Systems*. Modul ini dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan *Internet of Things* (IoT) yang menuntut kinerja tinggi namun dengan konsumsi energi yang efisien.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Pramuditya et al. (2023), ESP32 DevKit V1 memiliki keunggulan utama pada arsitektur prosesor yang menggunakan Xtensa Dual-Core 32-bit LX6. Keberadaan dua inti prosesor ini memungkinkan ESP32 untuk melakukan *multitasking*, seperti menjaga stabilitas koneksi Wi-Fi di satu inti sambil memproses data

sensor di inti lainnya secara bersamaan, dengan kecepatan *clock* yang dapat diatur hingga 240 MHz.

Selain performa prosesor, Pramuditya et al. (2023) juga memaparkan bahwa ESP32 dilengkapi dengan fitur konektivitas nirkabel ganda, yaitu Wi-Fi 802.11 b/g/n dan Bluetooth v4.2 / BLE (*Bluetooth Low Energy*). Fitur ini sangat krusial dalam penelitian ini karena memungkinkan perangkat untuk terhubung langsung ke *router* dan mengirimkan data ke *Firestore Realtime Database* tanpa memerlukan modul tambahan.

Secara fisik, modul ESP32 DevKit V1 memiliki 30 hingga 38 pin (tergantung varian), di mana sebagian besar merupakan pin GPIO (*General Purpose Input Output*) yang dapat dikonfigurasi untuk berbagai fungsi seperti ADC (*Analog to Digital Converter*), DAC (*Digital to Analog Converter*), serta komunikasi serial (UART, SPI, I2C). Konfigurasi pin atau pinout dari ESP32 DevKit V1 dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Pinout ESP32 DevKit V1 (Sumber: <https://mischianti.org/doit-esp32-dev-kit-v1-high-resolution-pinout-and-specs/>)

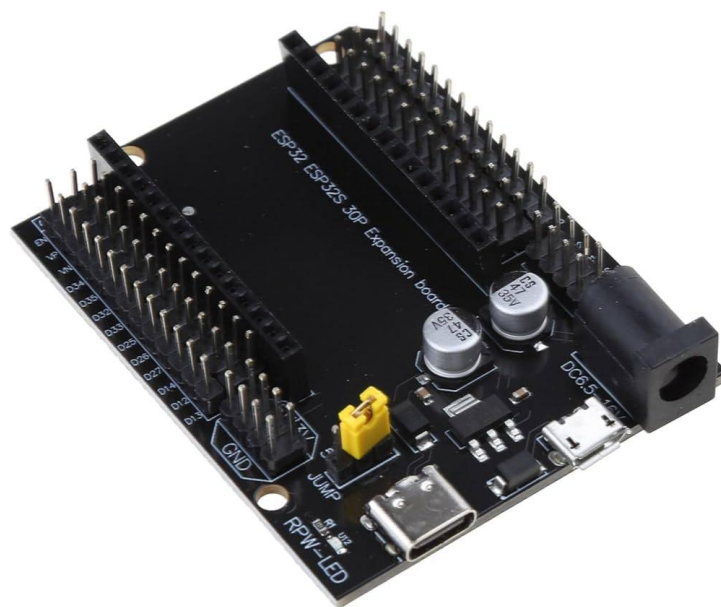
2.2.4 ESP32 Expansion Board

Dalam pengembangan purwarupa perangkat keras (*hardware prototyping*), manajemen pengkabelan sering kali menjadi faktor penentu keandalan sistem. Penelitian ini mengimplementasikan ESP32 *Expansion Board* atau *Base Shield 30-Pin* sebagai media interkoneksi utama antara mikrokontroler ESP32 DevKit V1 dengan periferal eksternal.

Priyansah et al. (2025) menekankan bahwa desain perangkat keras yang terorganisir sangat penting untuk meminimalkan kesalahan sambungan (*wiring error*) dan gangguan sinyal. *Expansion board* ini bekerja dengan memecah (*breakout*) setiap pin GPIO dari ESP32 menjadi konfigurasi konektor "G-V-S" (*Ground - Voltage - Signal*). Konfigurasi ini memungkinkan

setiap sensor dan aktuator dihubungkan menggunakan kabel jumper standar 3-pin secara *plug-and-play*, menghilangkan kebutuhan akan papan *breadboard* yang sering kali memiliki masalah konektivitas tidak stabil (*intermittent connection*) akibat pegas kontak yang longgar.

Lebih jauh lagi, *expansion board* ini dilengkapi dengan terminal input *DC barrel jack* (6V-12V) dan regulator tegangan terintegrasi. Fitur ini memungkinkan pemisahan jalur daya (*power rail isolation*) antara beban daya tinggi (motor servo) yang mengambil arus langsung dari *input* eksternal, dengan beban daya rendah (mikrokontroler) yang melalui regulator. Isolasi ini sangat efektif untuk melindungi inti prosesor ESP32 dari gangguan sinyal balik (*back EMF*) yang dihasilkan oleh putaran motor servo.



Gambar 2.3 ESP32 *Expansion Board* (Sumber: <https://www.amazon.de/-/en/Expansion-Development-ESP32-DevKitC-32-Integrated-Compatible/dp/B0CTG3W4P9>)

2.2.5 Sensor Ultrasonik HC-SR04

Sensor ultrasonik HC-SR04 adalah komponen elektronika yang dirancang untuk mengukur jarak menggunakan prinsip pantulan gelombang suara. Mekanisme kerjanya melibatkan pemancaran gelombang dari transmitter, kemudian menghitung durasi waktu tempuh gelombang tersebut saat memantul dari objek dan kembali ke *receiver*.

Bentuk fisik dari sensor HC-SR04 yang memiliki dua komponen utama (pemancar dan penerima) dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Sensor Ultrasonik HC-SR04 (Sumber:

<https://dennydarlis.staff.telkomuniversity.ac.id/empat-point-nol/limapointdua/4-2-2-sensor/4-2-2-2-modul-ultrasonik-hcsr04/>)

Prinsip kerja ini dikenal dengan metode *Time of Flight*. Muhtar et al. (2025) memaparkan bahwa akurasi pengukuran sensor ini sangat bergantung pada kalkulasi waktu tempuh pulsa dari saat dipancarkan hingga diterima kembali. Faktor-faktor lingkungan seperti suhu udara, kecepatan suara, dan permukaan objek pantul juga dapat memengaruhi presisi hasil pembacaan sensor.

Secara matematis, jarak objek ditentukan berdasarkan durasi waktu pantulan gelombang. Sesuai dengan prinsip kerja yang dijelaskan dalam jurnal Muhtar et al. (2025), jarak dapat dihitung karena kecepatan suara di udara adalah konstanta yang diketahui. Rumus dasar yang digunakan adalah:

$$S = \frac{v \times t}{2}$$

Keterangan:

S = Jarak objek yang diukur

v = Kecepatan suara (340 m/s)

t = Waktu tempuh gelombang (bolak-balik).

Angka 2 = Pembagi kompensasi karena gelombang menempuh perjalanan pergi-pulang.

2.2.6 Motor Servo MG996R

Motor servo adalah perangkat elektromekanik yang berfungsi sebagai aktuator putar (*rotary actuator*) yang dirancang untuk pergerakan presisi. Berbeda dengan motor DC biasa yang berputar terus-menerus tanpa kendali posisi, motor servo memiliki kemampuan untuk

mengatur posisi sudut porosnya, kecepatan, dan akselerasi dengan sangat akurat. Kemampuan ini dimungkinkan karena di dalam motor servo terdapat sistem kontrol umpan balik (*closed-loop system*) yang terdiri dari motor DC, serangkaian roda gigi (*gearbox*), potensiometer, dan rangkaian kontrol elektronik. Potensiometer berfungsi sebagai sensor posisi yang terus-menerus memberikan informasi sudut poros saat ini ke rangkaian kontrol, sehingga motor dapat mengoreksi posisinya jika terjadi pergeseran akibat beban luar.

Prinsip kerja pengendalian motor servo didasarkan pada sinyal Modulasi Lebar Pulsa atau *Pulse Width Modulation* (PWM). Sinyal ini dikirimkan melalui kabel kontrol dengan periode tertentu, umumnya 20 milidetik. Lebar pulsa dari sinyal inilah yang diterjemahkan oleh servo menjadi posisi sudut target. Sebagai contoh, pulsa dengan durasi 1,5 ms akan menempatkan servo pada posisi netral (90 derajat), sedangkan pulsa yang lebih pendek atau lebih panjang akan menggerakkan poros ke arah 0 derajat atau 180 derajat.

Dalam perancangan sistem tempat sampah pintar ini, komponen penggerak yang dipilih adalah motor servo tipe MG996R. Menurut studi teknis yang dilakukan oleh Astawa et al. (2025), servo MG996R memiliki keunggulan konstruksi yang signifikan dibandingkan servo mikro standar seperti tipe SG90. Perbedaan utamanya terletak pada material roda gigi (*gear*) yang digunakan. MG996R telah dilengkapi dengan roda gigi berbahan logam (*metal gear*), yang memberikan ketahanan mekanis jauh lebih baik dibandingkan roda gigi plastik yang rentan mengalami keausan (*wear*) saat menangani beban dinamis.

Selain faktor durabilitas, pemilihan MG996R juga didasarkan pada spesifikasi torsi yang dihasilkan. Astawa et al. (2025) dalam penelitiannya memaparkan bahwa servo MG996R mampu menghasilkan torsi diam (*stall torque*) yang tinggi, mencapai kisaran 10-12 kg·cm pada tegangan operasional standar. Torsi sebesar ini dinilai sangat memadai untuk mengatasi beban mekanis tutup tempat sampah, memastikan proses buka-tutup dapat berjalan stabil tanpa membebani kinerja mikrokontroler atau menyebabkan kerusakan pada gigi motor.



Gambar 2.5 Motor Servo MG996R (Sumber: <https://digiwarestore.com/id/servo/tower-pro-mg996r-high-torque-digital-servo-motor-713579.html>)

2.2.7 LCD (*Liquid Crystal Display*) 16x2 dengan Modul I2C

LCD (*Liquid Crystal Display*) adalah modul tampilan elektronik yang berfungsi sebagai antarmuka visual (*Human-Machine Interface*) untuk menampilkan informasi berupa karakter alfanumerik. Dalam penelitian ini, digunakan varian LCD 16x2 yang memiliki kemampuan menampilkan 32 karakter yang terbagi dalam dua baris, masing-masing terdiri dari 16 kolom matriks dot 5x7 atau 5x8.

Menurut Priyansah et al. (2025), keberadaan layar LCD pada perangkat tempat sampah pintar sangat krusial untuk memberikan umpan balik (*feedback*) langsung kepada pengguna atau petugas kebersihan mengenai status kapasitas sampah tanpa ketergantungan penuh pada aplikasi seluler. Namun, penggunaan modul LCD standar secara paralel memiliki kelemahan utama, yaitu borosnya penggunaan pin General Purpose Input Output (GPIO) pada mikrokontroler, yang membutuhkan setidaknya 6 hingga 10 jalur kabel data.

Untuk mengatasi inefisiensi tersebut, modul LCD dalam penelitian ini diintegrasikan dengan modul backpack I2C (*Inter-Integrated Circuit*) berbasis cip PCF8574. Modul ini berfungsi sebagai I/O *expander* yang mengubah komunikasi data paralel menjadi serial. Dengan antarmuka I2C, komunikasi antara ESP32 dan LCD dapat dilakukan hanya melalui dua jalur sinyal, yaitu SDA (*Serial Data*) dan SCL (*Serial Clock*). Efisiensi ini memungkinkan

sisia pin GPIO pada ESP32 dapat dimaksimalkan untuk kebutuhan sensor ultrasonik dan aktuator servo tanpa mengorbankan fungsionalitas tampilan.



Gambar 2.6 LCD 16x2 dengan Modul I2C (Sumber: <https://jogjarobotika.com/blog/cara-mengetahui-alamat-pada-lcd-i2c-b146.html>)

2.2.8 Catu Daya (*Power Supply*) *Switching 5V 3A*

Catu daya atau *Power Supply Unit* (PSU) merupakan subsistem vital yang bertugas mengonversi tegangan listrik dari sumber jala-jala (AC) atau baterai menjadi tegangan searah (DC) yang stabil untuk menyuplai seluruh komponen elektronik. Dalam perancangan sistem tempat sampah otomatis, stabilitas catu daya menjadi tantangan utama karena keberadaan beban induktif yang dinamis.

Berdasarkan analisis kebutuhan daya pada sistem otomasi pemilah sampah, Laksmiati & Fariansyah (2025) memaparkan bahwa komponen elektromekanik seperti motor servo membutuhkan suplai arus yang besar untuk mempertahankan torsi. Motor servo MG996R yang digunakan dalam penelitian ini memiliki karakteristik penarikan arus (*current draw*) yang fluktuatif pada kondisi menahan beban, arus dapat melonjak hingga 1.2 Ampere hingga 2.5 Ampere. Jika sistem hanya mengandalkan daya dari regulator internal mikrokontroler atau port USB (maksimal 500mA), akan terjadi fenomena *voltage sag* atau penurunan tegangan drastis yang memicu fitur *Brownout Detector* pada ESP32, menyebabkan sistem mengalami *restart* berulang.

Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan Catu Daya Mode Peralihan atau *Switching Mode Power Supply* (SMPS) eksternal dengan spesifikasi keluaran 5 Volt dan arus maksimal

3 Ampere. Teknologi *switching* dipilih karena memiliki efisiensi konversi daya yang tinggi dan disipasi panas yang rendah dibandingkan regulator linear konvensional. Kapasitas arus 3A memberikan *headroom* daya yang cukup untuk melayani lonjakan beban motor servo sekaligus menjaga kestabilan tegangan logika 3.3V bagi mikrokontroler ESP32 dan sensor ultrasonik.



Gambar 2.7 *Power Supply Switching 5V 3A* (Sumber: <https://ecadio.com/power-supply-switching-5v-3a>)

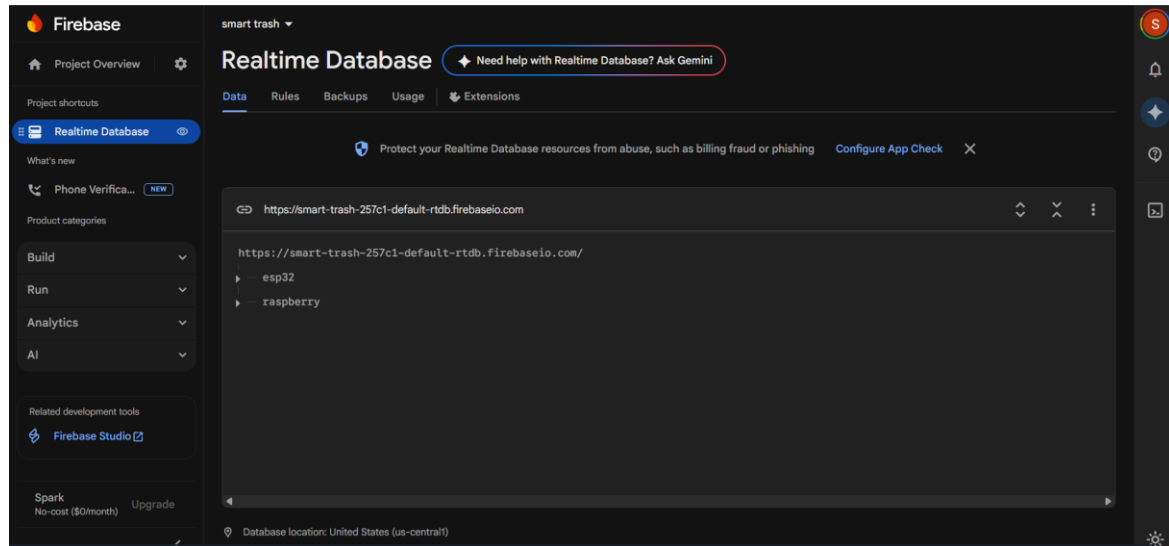
2.2.9 *Firestore Realtime Database*

Firestore *Realtime Database* adalah layanan basis data berbasis *cloud* (NoSQL) yang dikembangkan oleh Google untuk menyimpan dan menyinkronkan data antar pengguna secara *real-time*. Berbeda dengan basis data relasional (SQL) yang menggunakan tabel, Firestore menyimpan data dalam format JSON (*JavaScript Object Notation*).

Menurut Maulida et al. (2025), penggunaan *Firestore* dalam sistem pemantauan tempat sampah pintar sangat efektif karena kemampuannya menangani data sensor yang dinamis. Dalam penelitian mereka, data dari mikrokontroler ESP32 (seperti level ketinggian sampah dan status tutup) dikirim dan disimpan dalam struktur pohon JSON (*JSON Tree*). Struktur ini memungkinkan aplikasi mobile untuk "mendengarkan" (*listen*) perubahan data secara langsung.

Keunggulan utama yang ditekankan oleh Maulida et al. (2025) adalah latensi yang rendah. Ketika sensor ultrasonik mendeteksi perubahan volume sampah, data di Firestore akan

diperbarui seketika, dan perubahan tersebut langsung terlihat di aplikasi pemantauan petugas tanpa perlu memuat ulang (*refresh*) halaman. Mekanisme sinkronisasi otomatis ini sangat krusial untuk memastikan petugas kebersihan mendapatkan informasi yang akurat dan tepat waktu.



Gambar 2.8 Implementasi Struktur Data JSON pada *Firebase*

2.2.10 Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) adalah perangkat lunak sumber terbuka (*open-source software*) yang digunakan untuk menulis, mengompilasi, dan mengunggah kode program ke dalam mikrokontroler. Perangkat lunak ini dirancang untuk memudahkan proses pengembangan sistem tertanam (*embedded system*) dengan menyediakan antarmuka pengguna yang intuitif dan serangkaian *library* yang lengkap.

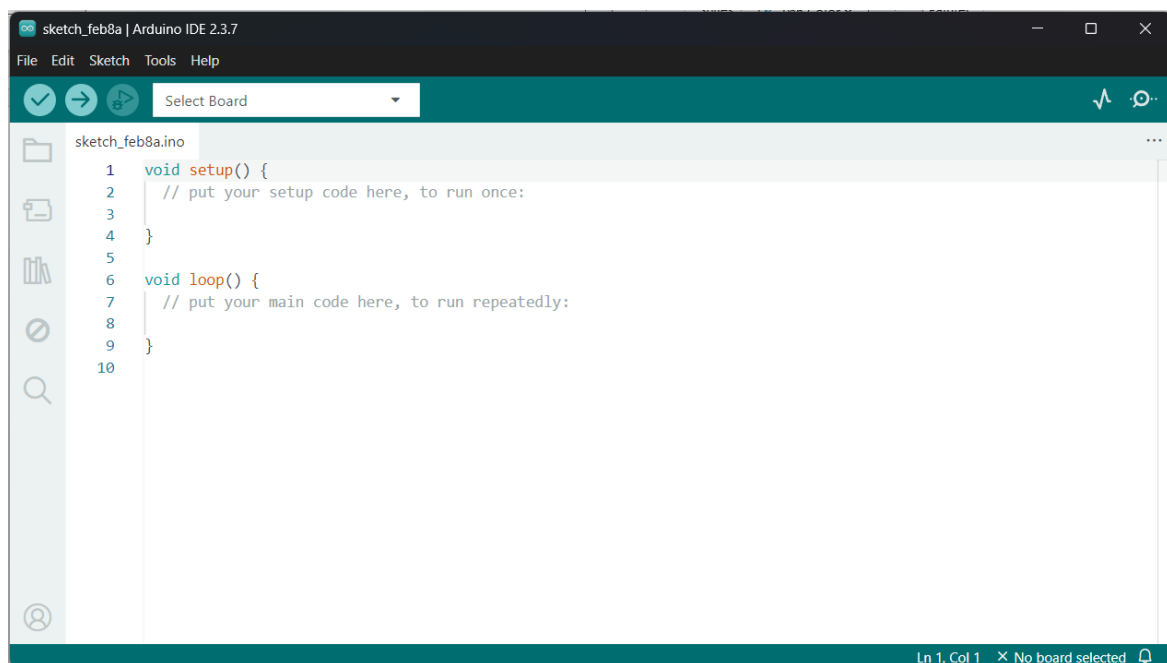
Menurut Farandy et al. (2024), Arduino IDE berfungsi sebagai editor teks khusus yang memungkinkan pengguna untuk menulis kode program dalam bahasa C atau C++ yang telah disederhanakan. Kode program yang ditulis di lingkungan ini disebut sebagai *sketch*. Salah satu keunggulan utama Arduino IDE adalah fitur *cross-platform* yang memungkinkannya dijalankan pada berbagai sistem operasi komputer, termasuk Windows, macOS, dan Linux.

Dalam penelitian ini, Arduino IDE digunakan sebagai *platform* utama untuk memprogram modul ESP32. Meskipun ESP32 bukan produk resmi Arduino, komunitas pengembang telah menyediakan dukungan *Board Manager* yang memungkinkan Arduino IDE untuk mengenali dan memprogram cip ESP32 dengan mudah. Proses kompilasi (*verify*) pada Arduino IDE bertugas menerjemahkan kode program *sketch* menjadi bahasa mesin yang dapat dipahami oleh

mikrokontroler, sedangkan proses pengunggahan (*upload*) bertugas mentransfer file biner tersebut ke dalam memori flash ESP32 melalui kabel data USB.

Selain fitur dasar pemrograman, Farandy et al. (2024) juga menyoroti keberadaan fitur *Serial Monitor* dan *Serial Plotter* yang sangat membantu dalam proses *debugging*. Fitur ini memungkinkan pengembang untuk memantau data sensor secara *real-time* atau melacak kesalahan logika program dengan menampilkan pesan teks langsung dari mikrokontroler ke layar komputer.

Visualisasi antarmuka pengguna dari perangkat lunak Arduino IDE dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 Tampilan Antarmuka Arduino IDE

2.2.11 Waterfall

Metode *Waterfall* adalah salah satu pendekatan pengembangan sistem yang bersifat *plan-driven* atau dikendalikan oleh rencana. Menurut Sommerville (2011), metode ini memodelkan proses pengembangan perangkat lunak sebagai serangkaian tahapan yang dilakukan secara logis, berurutan, dan mengalir ke bawah seperti air terjun. Karakteristik utama dari metode ini adalah seluruh perencanaan dan penjadwalan aktivitas pengembangan harus dipetakan serta ditetapkan secara detail sebelum proses pengerjaan sistem tersebut dimulai.

Dalam praktiknya, metode *Waterfall* sangat terstruktur dan cocok digunakan untuk merancang purwarupa (*prototype*) maupun sistem yang kebutuhannya sudah jelas sejak awal. Sebagai contoh, dalam penelitian perancangan sistem yang dilakukan oleh Lukman et al.

(2023), metode *Waterfall* dari Sommerville diadaptasi ke dalam empat tahapan operasional utama yang berurutan, yaitu analisis, desain, *coding* (implementasi kode), dan *testing* (pengujian sistem).

2.2.12 Black Box Testing

Pengujian *Black Box* (*Black Box Testing*) merupakan metode pengujian yang bertujuan untuk mengetahui apakah fungsi-fungsi dari setiap fitur yang ada pada sistem aplikasi maupun perangkat keras telah berjalan sesuai dengan rancangan. Karakteristik utama dari metode ini adalah pengujian dilakukan tanpa harus memperhatikan atau meninjau struktur detail dari baris kode program (*source code*) di dalamnya (Fathoni & Oktawati, 2021). Pengujian ini murni berfokus pada kesesuaian antara masukan (*input*) dan keluaran (*output*) untuk memastikan sistem dapat beroperasi secara fungsional demi kenyamanan pengguna akhir.

Dalam ruang lingkup pengembangan sistem berbasis *Internet of Things* (IoT), pengujian *Black Box* diterapkan untuk mengevaluasi fungsionalitas integrasi antara perangkat keras (*hardware*) dan *platform* pemantauan secara *real-time*. Pengujian difokuskan pada pengamatan langsung terhadap respons fisik alat, seperti menguji apakah layar LCD mampu menampilkan teks informasi dan pembacaan sensor dengan benar, apakah aktuator memberikan respon saat menerima perintah, serta apakah platform IoT dapat menampilkan data secara presisi sesuai dengan parameter yang telah ditentukan sebelumnya (Fathoni & Oktawati, 2021).

Proses pengujian *Black Box* pada purwarupa IoT dilakukan dengan menyusun daftar skenario pengujian yang spesifik. Setiap skenario mendefinisikan suatu tindakan pengujian beserta hasil yang diharapkan (*expected result*). Hasil aktual yang diberikan oleh purwarupa kemudian diamati secara langsung. Apabila sistem berhasil menunjukkan respons yang sesuai dengan hasil yang diharapkan pada skenario tersebut, maka fitur dinyatakan "Valid", sedangkan jika gagal menunjukkan respons yang tepat maka dinyatakan "Tidak Valid" (Fathoni & Oktawati, 2021). Pengujian fungsionalitas yang menyeluruh ini sangat penting untuk memastikan bahwa sistem IoT telah siap untuk dioperasikan secara nyata.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menguraikan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam pengembangan Sistem Tempat Sampah Cerdas Berbasis *Internet of Things* (IoT). Tahapan ini disusun secara sistematis agar penelitian berjalan terarah, mulai dari metode pengembangan, pengumpulan data, analisis kebutuhan, perancangan arsitektur, hingga metode pengujian sistem.

3.1 Metode Pengembangan Sistem

Pengembangan Sistem Tempat Sampah Cerdas Berbasis IoT ini dilakukan menggunakan pendekatan metode *Waterfall*. Menurut Sommerville (2011), metode *Waterfall* menggambarkan proses pengembangan perangkat lunak dan sistem sebagai serangkaian tahapan yang dilakukan secara berurutan, di mana keluaran dari setiap tahap menjadi masukan bagi tahap berikutnya. Tahapan pengerjaan pada penelitian ini meliputi:

1. Analisis Kebutuhan (*Requirements definition*)

Langkah awal yang bertujuan untuk mengidentifikasi dan mendefinisikan seluruh kebutuhan yang harus dipenuhi oleh sistem. Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan informasi dari pengguna (petugas kebersihan dan mahasiswa FTI UII) untuk merumuskan kebutuhan fungsional (seperti mekanisme *touchless* dan pengiriman data IoT) serta kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak.

2. Perancangan Sistem dan Perangkat Lunak (*System and software design*)

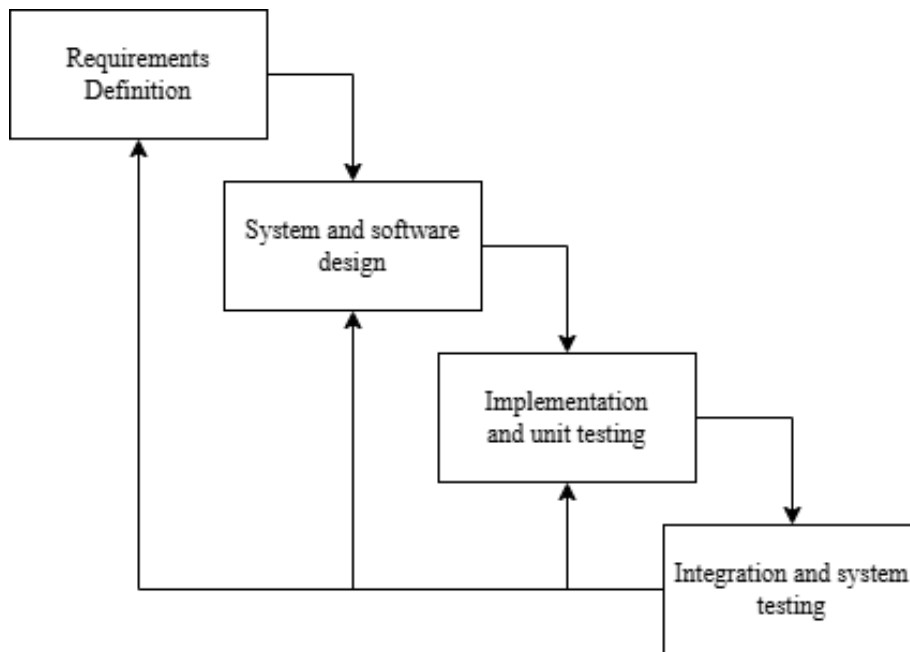
Proses mendeskripsikan arsitektur sistem secara keseluruhan. Pada tahap ini dilakukan perancangan alur kerja sistem (*flowchart*), perancangan antarmuka, serta perancangan skema rangkaian perangkat keras yang menghubungkan mikrokontroler ESP32 dengan sensor ultrasonik, motor servo, LCD, dan Firebase.

3. Implementasi dan Pengujian Unit (*Implementation and unit testing*)

Tahap perakitan fisik komponen elektronik dan penulisan sintaks program menggunakan Arduino IDE. Setiap unit komponen kemudian diuji secara terpisah, seperti menguji respons pembacaan jarak sensor ultrasonik dan pergerakan motor servo, guna memastikan tiap unit berfungsi dengan benar sebelum digabungkan.

4. Integrasi dan Pengujian Sistem (*Integration and system testing*)

Tahap akhir di mana seluruh unit perangkat keras dan perangkat lunak diintegrasikan menjadi satu sistem tempat sampah cerdas yang utuh. Setelah terintegrasi, dilakukan pengujian sistem secara menyeluruh di lapangan menggunakan metode *Black Box* untuk fungsionalitasnya, serta pengujian penerimaan infrastruktur perangkat keras untuk mengevaluasi tingkat penerimaan pengguna.



Gambar 3.1 Tahapan Metode *Waterfall*

3.2 Metode Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data awal dilakukan untuk memvalidasi kendala di lapangan dan memetakan kebutuhan sistem dari sudut pandang pengguna. Metode yang digunakan adalah wawancara semi-terstruktur dengan melibatkan 10 orang responden di lingkungan Fakultas Teknologi Industri (FTI) UII.

Responden tersebut dibagi menjadi dua kelompok, yaitu 5 orang tenaga kebersihan dan 5 orang mahasiswa. Dari hasil wawancara, diperoleh temuan bahwa tenaga kebersihan mengeluhkan inefisiensi waktu karena harus memeriksa kondisi kepenuhan tempat sampah secara manual dengan cara berkeliling. Data ini menjadi acuan utama dalam merumuskan fitur sistem yang akan dibangun.

3.3 Analisis Kebutuhan Sistem (*Requirements Definition*)

Tahap analisis kebutuhan merupakan langkah untuk mendefinisikan seluruh spesifikasi perangkat yang harus dipenuhi agar sistem tempat sampah cerdas dapat berfungsi sesuai dengan tujuannya.

3.3.1 Kebutuhan Fungsional

Kebutuhan fungsional menjelaskan fungsi dan fitur utama yang harus mampu dilakukan oleh sistem, yaitu:

1. Sistem dapat mendeteksi keberadaan objek (tangan pengguna) di depan tempat sampah menggunakan sensor ultrasonik luar.
2. Sistem dapat melakukan otomatisasi mekanisme buka-tutup menggunakan motor servo saat objek terdeteksi.
3. Sistem dapat mengukur jarak permukaan sampah dari penutup menggunakan sensor ultrasonik dalam untuk menghitung persentase kapasitas.
4. Sistem dapat menampilkan status dan mengirimkan data kepenruhan sampah ke Firebase Realtime Database secara real-time.

3.3.2 Kebutuhan Perangkat Keras

Kebutuhan perangkat keras mencakup spesifikasi komponen fisik elektronik yang digunakan dalam perakitan dan implementasi purwarupa. Rincian perangkat keras yang dibutuhkan beserta fungsi dan jumlahnya dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Kebutuhan perangkat keras

No	Nama Perangkat	Fungsi	Jumlah
1	Mikrokontroler ESP32	Sebagai unit pemrosesan utama yang mengontrol logika alat dan mengelola komunikasi jaringan Wi-Fi ke Firebase.	1
2	ESP32 <i>Expansion Board</i>	Mempermudah distribusi daya dan koneksi kabel dari ESP32 ke komponen lainnya secara <i>plug-and-play</i> .	1
3	Sensor Ultrasonik HC-SR04	Mendeteksi keberadaan objek (tangan pengguna) pada bagian luar, dan mengukur jarak tumpukan sampah pada bagian dalam.	2

4	Motor Servo MG996R	Sebagai aktuator mekanik untuk menarik tuas guna membuka dan menutup tutup tempat sampah secara otomatis.	1
5	LCD 16x2 dengan Modul I2C	Sebagai indikator visual untuk menampilkan informasi status tempat sampah dan persentase kapasitas.	1
6	<i>Power Supply</i> 5V 3A	Menyuplai arus listrik dan daya yang stabil untuk seluruh komponen alat, terutama saat lonjakan beban dari motor servo.	1
7	Kabel Jumper	Menghubungkan jalur daya dan komunikasi data antar pin komponen elektronik.	-
8	Tempat Sampah Plastik Berengsel	Sebagai wadah penampung fisik utama sekaligus kerangka (casing) untuk menempatkan dan mengamankan seluruh komponen elektronik seperti sensor ultrasonik, ESP32, dan motor servo.	1

3.3.3 Kebutuhan Perangkat Lunak

Kebutuhan perangkat lunak mencakup spesifikasi aplikasi dan platform pendukung yang digunakan untuk memprogram mikrokontroler serta mengelola basis data sistem. Rincian perangkat lunak yang dibutuhkan dalam sistem ini beserta fungsinya dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut:

Tabel 3.2 Kebutuhan perangkat lunak

No	Nama Perangkat Lunak	Fungsi
1	Arduino IDE	Perangkat lunak <i>open-source</i> yang digunakan sebagai editor teks khusus untuk menulis sintaks logika, mengompilasi (verify), dan mengunggah (upload) kode program ke mikrokontroler.
2	Firebase Realtime Database	Layanan basis data berbasis <i>cloud</i> dari Google yang digunakan untuk menerima, menyimpan, dan menyinkronkan data status kapasitas tempat sampah secara <i>real-time</i> .

3.4 Perancangan Sistem dan Perangkat Lunak (*System and Software Design*)

Bagian ini menjelaskan proses perancangan sistem dan perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian. Perancangan dilakukan untuk mendeskripsikan arsitektur sistem secara keseluruhan, hubungan kerja antar komponen, serta mekanisme alur logika program mulai dari tahap masukan (*input*) hingga keluaran (*output*).

3.4.1 Diagram Blok Sistem

Diagram blok arsitektur digunakan untuk menggambarkan hubungan kerja antar komponen dalam sistem tempat sampah cerdas. Sistem ini terdiri dari tiga bagian operasional utama, yaitu *Input*, *Process*, dan *Output*, yang saling terintegrasi.

1. *Bagian Input*

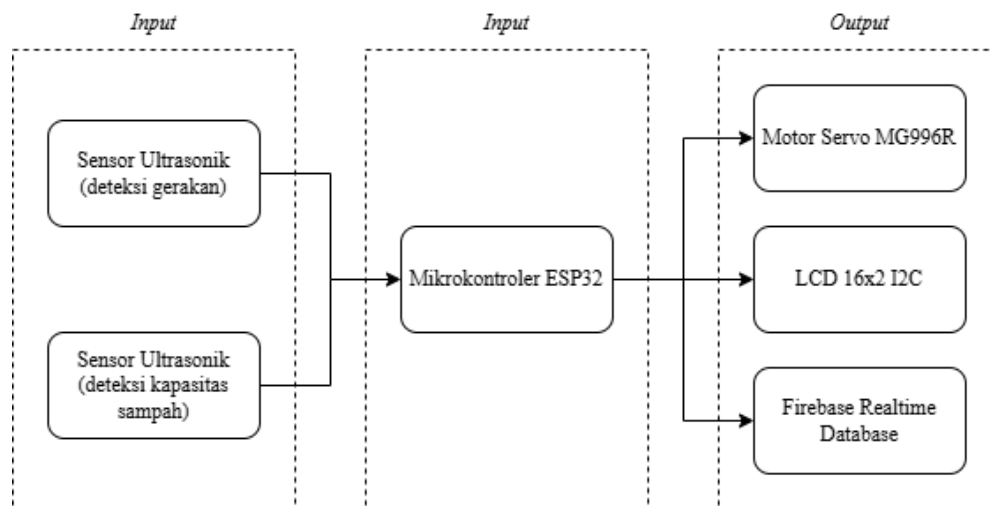
Terdiri dari dua sensor ultrasonik HC-SR04. Sensor pertama bertugas mendeteksi jarak objek (tangan pengguna) yang mendekat sebagai pemicu. Sensor kedua bertugas membaca jarak permukaan tumpukan sampah dari atas tutup.

2. *Bagian Process*

Mikrokontroler ESP32 Dev Module memproses data mentah dari bagian input. ESP32 mengolah data jarak menjadi perintah buka-tutup, mengalkulasi persentase kepenuhan sampah, dan membangun koneksi dengan jaringan Wi-Fi lokal.

3. *Bagian Output*

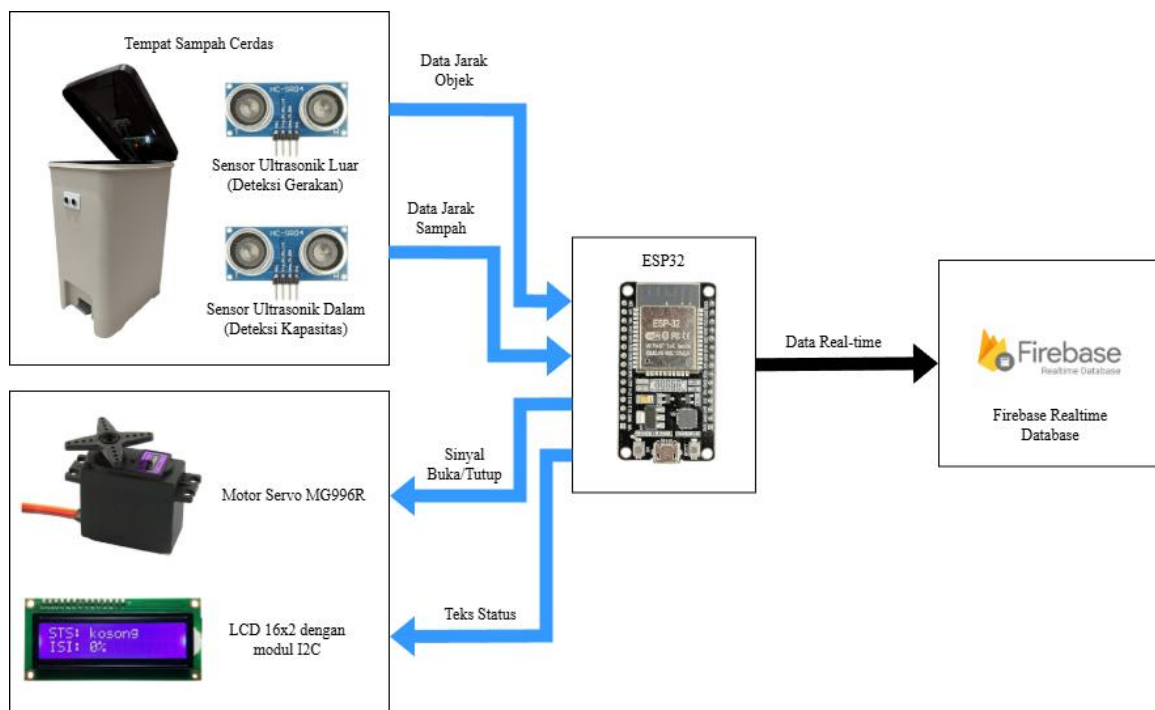
Menghasilkan tiga bentuk keluaran utama. Motor servo (aktuator) bergerak menarik tuas tutup tempat sampah. LCD 16x2 menampilkan informasi status tempat sampah secara lokal (visual), dan modul komunikasi Wi-Fi pada ESP32 mentransmisikan data kepenuhan ke Firebase di cloud server untuk pemantauan jarak jauh (IoT).



Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem

3.4.2 Diagram Arsitektur

Diagram arsitektur sistem dirancang untuk memberikan visualisasi menyeluruh mengenai bagaimana wujud fisik tempat sampah, sensor, mikrokontroler, aktuator, hingga basis data saling berinteraksi. Diagram ini memperlihatkan aliran pertukaran data dari hulu (*input*) hingga ke hilir (*output* dan IoT).



Gambar 3.3 Diagram Arsitektur

Berdasarkan Gambar 3.3, arsitektur sistem Tempat Sampah Cerdas dapat diuraikan ke dalam beberapa aliran komunikasi utama sebagai berikut:

1. Aliran Data Masukan (*Input*)

Berpusat pada fisik Tempat Sampah Cerdas yang dilengkapi dengan dua unit sensor ultrasonik HC-SR04. Sensor ultrasonik bagian luar bertugas mendeteksi keberadaan pengguna dan mengirimkan data jarak objek ke mikrokontroler. Sementara itu, sensor ultrasonik bagian dalam bertugas mendeteksi tingkat kepenuhan dan mengirimkan Data Jarak Sampah ke mikrokontroler.

2. Unit Pemroses Sentral

Mikrokontroler ESP32 bertindak sebagai otak dari seluruh sistem. ESP32 menerima data jarak mentah dari kedua sensor tersebut, lalu mengeksekusi logika pemrograman untuk menentukan apakah pintu harus dibuka dan berapa persentase kapasitas sampah saat ini.

3. Aliran Data Keluaran (*Output Fisik dan Visual*)

Berdasarkan hasil kalkulasi, ESP32 mendistribusikan perintah ke komponen output lokal. ESP32 mengirimkan sinyal Buka/Tutup menuju motor servo MG996R agar tuas penutup bergerak secara otomatis. Selain itu, ESP32 juga mengirimkan teks status (seperti teks "STS: Kosong" dan "ISI: 0%") menuju layar LCD 16x2 dengan modul I2C sebagai indikator visual bagi pengguna di lokasi.

4. Aliran Data Jaringan

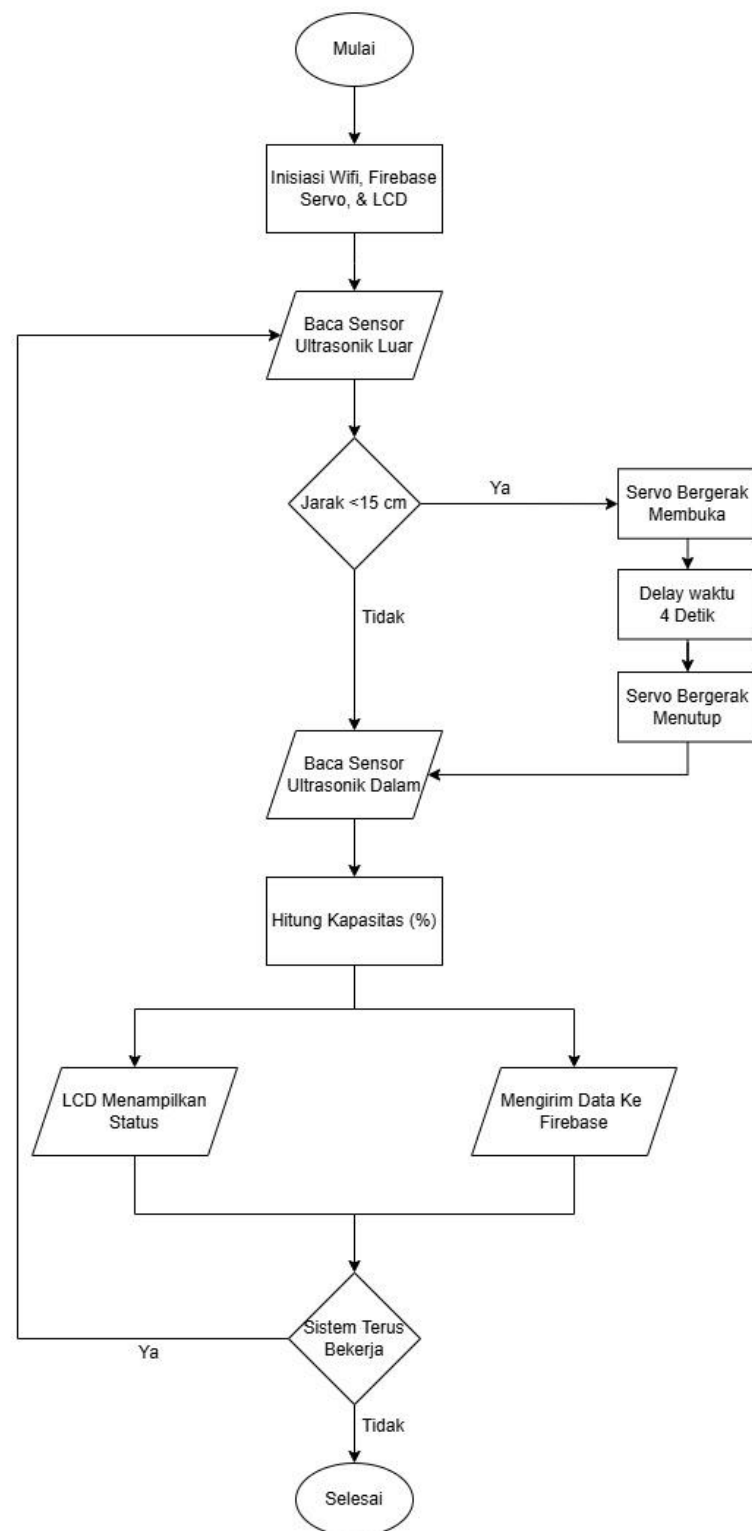
Sebagai bagian dari arsitektur *Internet of Things*, mikrokontroler ESP32 secara terus-menerus mengirimkan data real-time yang berisi pembaruan kapasitas sampah dan status perangkat menuju layanan *cloud* Firebase *Realtime Database* melalui koneksi Wi-Fi. Data inilah yang nantinya dapat diakses dari jarak jauh oleh sistem pemantauan atau aplikasi *mobile*.

3.4.3 Alur Kerja Sistem (*Flowchart System*)

Alur kerja sistem dirancang agar mekanisme buka-tutup otomatis berjalan beriringan dengan pemantauan kapasitas sampah berbasis IoT. Proses diawali dengan inisialisasi sistem, di mana ESP32 terhubung ke Wi-Fi dan Firebase. Kemudian, sistem secara terus-menerus (*looping*) membaca data dari sensor luar.

Jika sensor mendeteksi objek pada jarak ≤ 15 cm, motor servo akan bergerak membuka tutup tempat sampah dan menahannya selama beberapa detik sebelum menutup kembali.

Setelah tutup tertutup (atau jika tidak ada objek), sistem melanjutkan untuk membaca sensor bagian dalam. Nilai pembacaan tersebut dikalkulasi menjadi persentase volume sampah, ditampilkan pada LCD 16x2, dan data persentasenya dikirim ke Firebase secara *real-time*. Proses ini akan terus berulang selama sistem mendapatkan catu daya.



Gambar 3.4 *Flowchart* Sistem

Berdasarkan Gambar 3.4, alur logika sistem dimulai ketika perangkat dihubungkan ke sumber daya listrik. Pada tahap awal, mikrokontroler ESP32 melakukan proses inisialisasi yang mencakup pengaturan pin *Input/Output*, koneksi ke jaringan Wi-Fi, serta sinkronisasi awal

dengan Firebase *Realtime Database*. Setelah inisialisasi berhasil, sistem memasuki siklus utama dengan membaca data dari sensor ultrasonik bagian luar untuk mendeteksi keberadaan pengguna.

Apabila sensor mendeteksi objek dalam jarak kurang dari atau sama dengan 15 cm, mikrokontroler akan segera mengaktifkan motor servo untuk menarik tuas tutup tempat sampah hingga terbuka. Sistem kemudian menahan posisi terbuka selama beberapa detik sebelum memerintahkan servo untuk menutup kembali. Sebaliknya, jika tidak ada objek yang terdeteksi dalam jarak tersebut, sistem akan melewati proses pergerakan servo dan langsung beralih ke tahap pengukuran kapasitas.

Pada tahap ini, sensor ultrasonik bagian dalam akan mengukur jarak permukaan sampah saat tutup dalam kondisi diam. Nilai jarak tersebut dikonversi menjadi persentase kapasitas yang kemudian ditampilkan pada layar LCD 16x2 serta dikirimkan ke server Firebase secara *real-time*. Di akhir siklus, sistem akan memeriksa status daya, jika perangkat masih aktif, alur program akan berulang kembali ke tahap pembacaan sensor luar untuk melakukan pemantauan secara berkelanjutan. Namun, jika sistem dimatikan, maka seluruh proses program akan berhenti.

3.5 Perancangan Perangkat Keras

Bagian ini menjelaskan perancangan perangkat keras (*hardware*) yang digunakan dalam sistem Tempat Sampah Cerdas Berbasis IoT. Sistem ini dirancang menggunakan tempat sampah berbahan plastik polietilena karena sifatnya yang ringan, tahan air, dan mudah untuk dimodifikasi. Tempat sampah yang dipilih wajib memiliki penutup berengsel atas (*hinged lid*) yang secara bobot cukup ringan agar aktuator motor servo MG996R dapat menarik tuas pintu secara optimal tanpa melebihi batas torsi maksimalnya. Dari segi perancangan penempatan, purwarupa ini dirancang khusus untuk area dalam ruangan (*indoor*), seperti di area Hall FTI UII yang terlindung dari cuaca hujan. Penempatan dalam ruangan ini sangat krusial untuk melindungi komponen elektronik dari paparan air dan kelembapan, sekaligus memastikan sistem tetap terjangkau oleh sumber arus listrik PLN serta jangkauan jaringan sinyal Wi-Fi lokal kampus.

Pembahasan meliputi rancangan rangkaian sistem secara keseluruhan, fungsi masing-masing komponen yang saling terintegrasi, serta konfigurasi pin untuk menghubungkan setiap perangkat agar dapat bekerja dengan baik.

Perancangan tata letak komponen pada fisik tempat sampah diatur dengan mempertimbangkan aspek fungsionalitas, mekanis, dan keamanan kelistrikan. Rincian penempatannya adalah sebagai berikut:

a. Sensor Ultrasonik Luar

Ditempatkan di sisi depan bagian luar tempat sampah untuk memudahkan jangkauan sensor dalam mendeteksi tangan pengguna yang mendekat.

b. Sensor Ultrasonik Dalam

Ditempatkan di balik penutup (menghadap tegak lurus ke bawah) agar gelombang suara dapat memantul tepat ke permukaan tumpukan sampah untuk mendapatkan akurasi persentase kapasitas yang presisi.

c. Layar LCD 16x2 I2C

Dipasang pada bagian atas penutup agar informasi teks status dapat dengan mudah dibaca oleh pengguna dari sudut pandang pandangan atas (eye-level saat menunduk).

d. Motor Servo MG006R

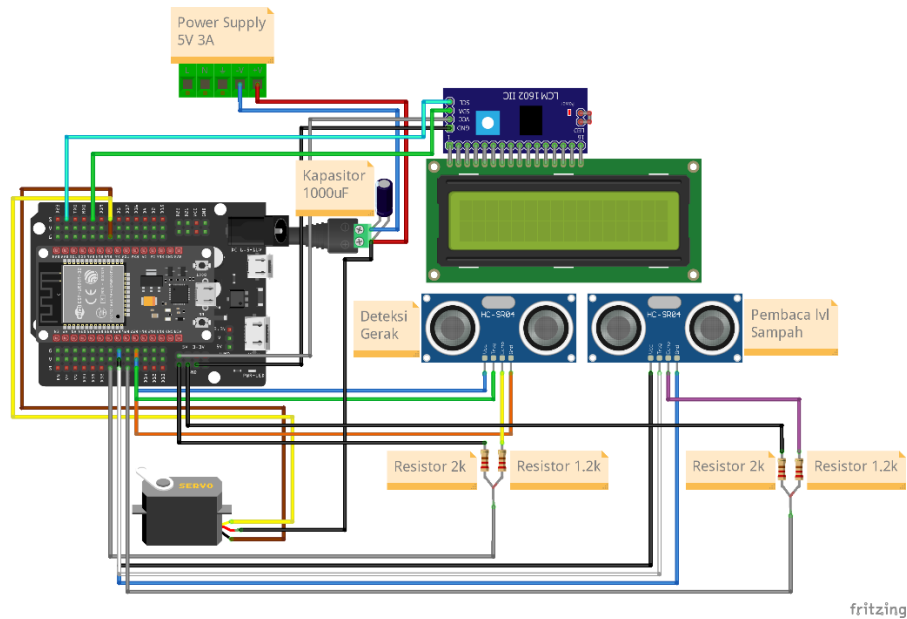
Diletakkan pada sisi samping luar di dekat engsel penutup. Posisi ini dipilih agar lengan servo dapat bertindak sebagai tuas pengungkit mekanis yang optimal saat menarik dan menutup beban penutup tempat sampah.

e. Komponen Kelistrikan Utama (ESP32, *Expansion Board*, dan *Power Supply*)

Seluruh sirkuit pengendali dan kelistrikan tidak dimasukkan ke dalam wadah utama, melainkan diisolasi di dalam kompartemen pelindung khusus di bagian belakang. Pemisahan ini sangat krusial untuk mencegah terjadinya korsleting (short circuit) akibat paparan cairan organik atau kelembapan yang dihasilkan oleh tumpukan sampah di dalam wadah.

3.5.1 Rangkaian Sistem Perangkat Keras

Rancangan *hardware* mengintegrasikan ESP32 Dev Module dengan *Expansion Board* untuk memudahkan distribusi daya dan koneksi kabel secara *plug-and-play*. Sensor ultrasonik pendeteksi gerakan dan kapasitas dihubungkan menggunakan kabel jumper ke pin GPIO digital ESP32. Motor servo MG996R dikendalikan melalui pin PWM, dan LCD 16x2 terhubung ke pin komunikasi I2C (SDA dan SCL) untuk menghemat penggunaan pin. Keseluruhan komponen mendapatkan suplai arus yang stabil dari *Power Supply Switching* eksternal 5V 3A.



Gambar 3.5 Rancangan *Hardware*

Pada Gambar 3.5 ditampilkan skema interkoneksi antar komponen elektronik. Berikut adalah penjelasan fungsi dan sambungan pin untuk setiap komponen :

a. **ESP32 Dev Module dan *Expansion Board* ESP32**

Berfungsi sebagai otak atau unit pemroses utama yang mengontrol seluruh logika sistem serta modul komunikasi Wi-Fi. Komponen ini dipilih karena memiliki fitur Wi-Fi *built-in* yang esensial untuk mengirimkan data ke platform IoT (Firebase) secara *real-time*, sehingga lebih efisien dari segi arsitektur perangkat keras dibandingkan dengan menggunakan Arduino Uno yang memerlukan modul Wi-Fi tambahan. Pada perancangan ini, ESP32 dipasangkan pada *Expansion Board* untuk mempermudah distribusi daya dan koneksi kabel. *Expansion board* menyediakan jalur VCC (5V) dan GND (*Ground*) yang lebih banyak, sehingga setiap komponen eksternal dapat terhubung secara paralel tanpa memerlukan *breadboard* tambahan yang rumit dan berpotensi memicu sambungan longgar (*loose connection*).

b. **Sensor Ultrasonik HC-SR04**

Terdapat dua buah sensor ultrasonik yang digunakan dalam sistem ini. Sensor ini memiliki 4 pin: VCC (5 volt), GND (*Ground*), Trig (Trigger), dan Echo (*Receiver*).

1. Sensor satu (luar): Berfungsi mendeteksi keberadaan objek/pengguna. Pin Trig dan Echo dihubungkan ke GPIO digital ESP32 *Expansion Board*.
2. Sensor dua (dalam): Berfungsi mengukur jarak sampah. Cara kerjanya adalah dengan memancarkan gelombang ultrasonik dan menghitung waktu pantulannya untuk menentukan jarak objek.

c. **Motor Servo MG996R**

Servo ini berfungsi sebagai aktuator mekanik yang menarik tuas untuk membuka tutup tempat sampah. Servo MG996R dipilih karena memiliki mekanisme roda gigi logam (*Metal Gear*) dengan torsi tinggi yang mampu mengangkat beban mekanis tutup tempat sampah, berbeda dengan servo standar berbahan plastik (seperti seri SG90) yang cenderung tidak kuat menahan beban dan rentan mengalami keausan roda gigi. Terdapat 3 kabel pada servo: kabel cokelat (GND), merah (VCC 5 V), dan oranye (Sinyal PWM). Kabel sinyal dihubungkan ke pin GPIO ESP32 yang mendukung PWM untuk mengatur sudut putaran pembukaan tutup secara presisi.

d. **LCD 16x2 dengan Modul I2C**

Layar LCD berfungsi untuk menampilkan informasi status (Terbuka/Tertutup) dan persentase kapasitas sampah secara visual. LCD ini dilengkapi modul I2C (*Inter-Integrated Circuit*) sehingga hanya memerlukan 4 kabel koneksi: VCC (5V), GND, SDA (*Serial Data*), dan SCL (*Serial Clock*). Pin SDA dan SCL dihubungkan ke pin komunikasi khusus pada ESP32.

e. **Power Supply**

Mengingat penggunaan motor servo jenis MG996R membutuhkan arus yang cukup besar, sistem ini menggunakan *Power Supply* eksternal 5V yang dihubungkan melalui jack DC pada *Expansion Board*. Hal ini bertujuan untuk menjaga stabilitas tegangan agar mikrokontroler tidak *restart* saat servo bergerak.

3.5.2 Konfigurasi Pin dan Koneksi Antar Perangkat

Bagian ini menjelaskan konfigurasi pin antarperangkat yang digunakan dalam sistem Tempat Sampah Cerdas Berbasis IoT. Setiap komponen perangkat keras dihubungkan ke pin tertentu pada mikrokontroler ESP32 sesuai dengan fungsi dan kebutuhan sistem. Konfigurasi pin ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai hubungan kelistrikan dan komunikasi data antarperangkat, sehingga memudahkan proses perakitan fisik dan pemrograman sistem.

a. **Koneksi Pin Sensor Ultrasonik HC-SR04**

Sistem ini menggunakan dua buah sensor ultrasonik. Sensor pertama digunakan di bagian luar untuk mendeteksi gerakan pengguna, sedangkan sensor kedua digunakan di bagian dalam untuk mengukur kapasitas sampah.

Tabel 3.3 Konfigurasi pin dan koneksi sensor Ultrasonik

No	Perangkat	Pin Sensor	Pin ESP32	Keterangan
1	Ultrasonik 1	VCC	VIN/5V	Catu Daya
2		GND	GND	Ground
3		TRIG	Pin 27	Trigger
4		ECHO	Pin 33	Echo
5	Ultrasonik 2	VCC	VIN/5V	Catu Daya
6		GND	GND	Ground
7		TRIG	Pin 25	Trigger
8		ECHO	Pin 26	Echo

b. Koneksi Pin Motor Servo MG996R

Motor servo berfungsi sebagai aktuator mekanik untuk menarik tuas dan membuka tutup tempat sampah. Servo ini dikendalikan menggunakan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) dari ESP32.

Tabel 3.4 Konfigurasi pin dan koneksi Servo

No	Perangkat	Pin Komponen	Pin ESP32	Keterangan
1	Motor Servo MG996R	VCC	VIN/5V	Catu Daya
2		GND	GND	Ground
3		PWM	Pin 18	Sinyal Kendali

c. Koneksi Pin LCD 16x2 dengan Modul I2C

Layar LCD digunakan untuk menampilkan informasi kapasitas sampah dan status pintu. Dengan adanya modul I2C, jumlah kabel yang dibutuhkan untuk mikrokontroler dapat diminimalkan menjadi dua jalur komunikasi saja.

Tabel 3.5 Konfigurasi pin dan koneksi LCD

No	Perangkat	Pin Komponen	Pin ESP32	Keterangan
1	LCD 16x2 dengan modul I2C	VCC	VIN/5V	Catu Daya
2		GND	GND	Ground
3		SDA	Pin SDA	Data I2C
4		SCL	Pin SCL	Clock I2C

3.6 Implementasi dan Pengujian Unit (*Implementation and Unit Testing*)

Tahap ini merupakan proses realisasi dari rancangan yang telah dibuat, meliputi perakitan komponen perangkat keras (*hardware*) secara fisik dan penulisan sintaks program (*software*) menggunakan aplikasi Arduino IDE dengan bahasa C++. Setelah seluruh komponen dirakit dan program diunggah ke ESP32, dilakukan pengujian unit secara terpisah untuk memastikan setiap bagian berfungsi dengan normal sebelum digabungkan. Pengujian unit ini meliputi: pengujian tingkat akurasi pembacaan jarak pada masing-masing sensor ultrasonik, pengujian respons pergerakan bukaan motor servo sesuai dengan sudut yang diprogram, serta pengujian kemampuan modul I2C dan layar LCD dalam menampilkan teks informasi.

3.7 Integrasi dan Pengujian Sistem (*Integration and System Testing*)

Setelah seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak berhasil diuji, tahap berikutnya adalah mengintegrasikan seluruh bagian tersebut menjadi satu kesatuan sistem purwarupa Tempat Sampah Cerdas yang utuh. Pada tahap ini dilakukan pengujian secara menyeluruh untuk memastikan bahwa setiap komponen mulai dari deteksi jarak oleh sensor ultrasonik luar, pergerakan motor servo sebagai aktuator pembuka tutup, pengukuran persentase kapasitas sampah oleh sensor dalam, hingga pengiriman data ke Firebase dan penampilannya pada LCD 16x2 dapat saling berkomunikasi dan bekerja secara sinkron. Pengujian ini bertujuan untuk menilai apakah alur kerja sistem telah berjalan sesuai dengan perancangan serta mampu memberikan respons yang cepat dan tepat dalam kondisi penggunaan nyata.

Untuk mendapatkan hasil evaluasi yang komprehensif, pengujian sistem pada penelitian ini dibagi menjadi dua metode pendekatan utama, yaitu pengujian fungsional dengan *Black Box Testing* dan pengujian penerimaan infrastruktur perangkat keras.

a. Pengujian *Black Box*

Metode pengujian fungsional yang digunakan adalah *black box testing*, yaitu pengujian yang dilakukan dengan memberikan input tertentu dan mengamati output yang dihasilkan tanpa harus meninjau kode program secara langsung. Sebagai contoh, ketika tangan pengguna didekatkan ke sensor bagian luar, sistem harus mampu mendeteksi jarak tersebut dan merespons dengan menggerakkan motor servo untuk membuka tutup tempat sampah. Selain itu, dilakukan pengujian terhadap sensor bagian dalam untuk memastikan sistem dapat mengukur volume sampah dengan tepat dan mengirimkan datanya ke Firebase.

Dengan pendekatan ini, dapat diketahui apakah seluruh fungsionalitas sistem telah berjalan sesuai spesifikasi dan tujuan perancangan.

b. Pengujian Penerimaan Infrastruktur Perangkat Keras

Selain melakukan pengujian fungsionalitas sistem secara teknis (Black Box Testing), evaluasi terhadap desain fisik dan tingkat penerimaan pengguna (end-user) juga mutlak diperlukan. Mengingat purwarupa yang dibangun berfokus pada perancangan infrastruktur perangkat keras (IoT) dan bukan merupakan aplikasi perangkat lunak murni, maka pengujian lebih difokuskan pada aspek interaksi manusia dengan mesin (HCI - Human Computer Interaction). Pengumpulan data pada tahap ini dilakukan dengan memberikan kuesioner tertutup kepada 10 orang responden utama. Responden tersebut secara spesifik dipilih dari lingkungan Fakultas Teknologi Industri (FTI) UII, yang terdiri dari 5 orang tenaga atau petugas kebersihan dan 5 orang mahasiswa. Pemilihan dua kelompok responden ini bertujuan untuk mendapatkan sudut pandang yang komprehensif, baik dari sisi pengelola kebersihan yang akan terbantu kinerjanya, maupun dari sisi mahasiswa sebagai pengguna fasilitas harian.

Tabel 3.6 Skala Likert

Skala/Bobot	Keterangan
1	Sangat Tidak Setuju
2	Tidak Setuju
3	Netral
4	Setuju
5	Sangat Setuju

Instrumen pengumpulan data dalam pengujian ini menggunakan skala Likert yang memuat lima tingkatan penilaian. Skala tersebut terentang dari bobot nilai 1 yang merepresentasikan "Sangat Tidak Setuju", hingga bobot nilai 5 yang merepresentasikan "Sangat Setuju". Berbeda dengan kuesioner standar pada pengujian perangkat lunak yang bersifat kaku, pernyataan pada kuesioner infrastruktur ini dirancang secara spesifik (kustom) oleh penulis. Pernyataan tersebut disusun untuk menilai tingkat kenyamanan letak komponen, fungsionalitas mekanik (seperti kecepatan motor servo dan jangkauan sensor ultrasonik), keterbacaan indikator visual (layar LCD), serta aspek keamanan fisik purwarupa saat digunakan secara langsung oleh pengguna. Daftar rumusan pernyataan kuesioner tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.7 berikut:

Tabel 3.7 Pertanyaan Kuisisioner

No	Pertanyaan	Skala
1	Letak sensor pendeteksi gerakan tangan mudah dijangkau pengguna.	1-5
2	Kecepatan respons motor servo saat membuka penutup tempat sampah sudah sangat baik.	1-5
3	Durasi tutup tempat sampah terbuka (4 detik) sudah cukup untuk memasukkan sampah.	1-5
4	Tampilan teks pada layar LCD fisik mudah dibaca dengan jelas.	1-5
5	Secara keseluruhan, desain fisik purwarupa aman dan tidak membahayakan saat digunakan.	1-5

Setelah seluruh data dari kuesioner terkumpul melalui tahapan uji coba langsung, tahapan selanjutnya adalah melakukan analisis data secara kuantitatif. Analisis ini dilakukan dengan menghitung akumulasi total skor dari seluruh responden, yang kemudian dikonversikan menjadi persentase kelayakan infrastruktur. Untuk mendapatkan hasil evaluasi yang presisi dan terukur, sistem ini menggunakan tiga rumus matematis utama, yaitu:

1. Menghitung skor maksimal ideal

Skor maksimal ideal merupakan nilai acuan tertinggi (batas kesempurnaan 100%) yang akan diperoleh apabila seluruh responden memberikan penilaian maksimal pada setiap pernyataan kuesioner. Nilai ini akan menjadi parameter pembanding utama untuk mengetahui sejauh mana skor aktual yang diperoleh di lapangan mendekati nilai kelayakan yang sempurna.

$$\text{Skor Maksimal Ideal} = \text{Jumlah responden} \times \text{julah pertanyaan} \times 5$$

2. Menghitung Persentase Kelayakan

Persentase kelayakan digunakan untuk mengukur dan menyimpulkan seberapa besar tingkat penerimaan serta kepuasan pengguna akhir terhadap desain fisik purwarupa yang telah dibangun. Semakin tinggi persentase yang dihasilkan dari pembagian antara skor yang didapat dengan skor maksimal ideal, maka semakin layak pula infrastruktur perangkat keras tersebut untuk diimplementasikan penggunaannya di lapangan.

$$\text{Persentase Kelayakan} = \left(\frac{\text{Total skor yang didapat}}{\text{Skor maksimal ideal}} \right) \times 100\%$$

3. Menghitung Rata-rata Penilaian

Perhitungan rata-rata (mean) dilakukan untuk melihat tren atau kecenderungan sentral dari penilaian seluruh responden. Nilai rata-rata ini akan secara akurat menunjukkan pada rentang skala seberapa (dari skala 1 hingga 5) posisi kelayakan purwarupa ini berada, berdasarkan akumulasi total jawaban yang terkumpul.

$$\text{Rata – rata Penilaian} = \frac{\text{Total skor yang didapat}}{\text{Total keseluruhan jawaban}}$$

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sesuai dengan metode *Waterfall* yang digunakan dalam penelitian ini, dua tahapan awal, yaitu Analisis Kebutuhan (*Requirements definition*) dan Perancangan Sistem (*System and software design*), telah tuntas dikerjakan dan diuraikan secara mendalam pada Bab III. Sehubungan dengan hal tersebut, Bab IV ini memusatkan pembahasannya pada dua tahapan operasional berikutnya, yaitu Implementasi dan Pengujian Unit (*Implementation and Unit Testing*) yang mencakup perakitan perangkat keras, penulisan kode program, serta pengujian fungsional tiap komponen, lalu dilanjutkan dengan tahap Integrasi dan Pengujian Sistem (*Integration and System Testing*), yang kemudian diakhiri dengan analisis dan pembahasan secara menyeluruh.

4.1 Implementasi dan Sintaks Program

Bagian ini membahas hasil dari perancangan sistem yang telah direalisasikan. Terdapat dua bagian utama yang akan dibahas, yaitu implementasi perangkat keras (*hardware*) dan implementasi perangkat lunak (*software*) yang mencakup sintaks program untuk mikrokontroler ESP32 dan konfigurasi Firebase.

4.1.1 Implementasi *Hardware*

Komponen utama yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari ESP32 sebagai mikrokontroler, dua buah sensor ultrasonik (HC-SR04) untuk mendeteksi gerakan dan kapasitas sampah, motor servo untuk penggerak tutup, serta LCD 16x2 I2C untuk visualisasi status.

Sensor ultrasonik pertama ditempatkan di bagian depan untuk mendeteksi keberadaan objek (tangan/orang) guna membuka tutup sampah secara otomatis. Sensor ultrasonik kedua ditempatkan di bagian dalam tutup untuk mengukur jarak sampah guna menentukan persentase kepenuhan.



Gambar 4.1 Rancangan Sistem Tempat Sampah Cerdas

Gambar 4.1 adalah hasil dari keseluruhan sistem yang sudah dirakit. Pada gambar tersebut terdapat komponen yang telah terintegrasi:

- a. ESP32
- b. *ESP32 Expansion Board*
- c. Sensor Ultrasonik HC-SR04
- d. Servo Motor MG996R
- e. LCD 16x2
- f. *Power Supply*

4.1.2 Implementasi Software

Implementasi perangkat lunak (*software*) dilakukan dengan memprogram mikrokontroler ESP32 menggunakan bahasa C++ melalui Arduino IDE. Program ini mengendalikan pembacaan sensor, pergerakan aktuator, serta komunikasi data ke Firebase *Realtime Database* secara *real-time*.

Tahap pertama dalam penulisan sintaks adalah memuat *library* yang dibutuhkan, serta mengonfigurasi parameter jaringan Wi-Fi dan kredensial akses ke Firebase. Selain itu, dilakukan juga pendefinisian pin mikrokontroler yang terhubung dengan komponen perangkat keras, yaitu pin 18 untuk motor servo, pin 25 dan 26 untuk sensor pembaca tingkat kapasitas sampah, serta pin 27 dan 33 untuk sensor pendeteksi gerakan pengguna.

```
#include <WiFi.h>
#include <Firebase_ESP_Client.h>
#include <ESP32Servo.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <addons/TokenHelper.h>
#include <addons/RTDBHelper.h>
```

```
// ===== 1. KONFIGURASI JARINGAN =====
#define SSID "SCHVNK"
#define PASSWORD "Nugraha2002"
#define DATABASE_URL "https://smart-trash-257c1-default-rt
db.firebaseio.com/"
#define DATABASE_SECRET "Dl8f6dTQrZc8ZrKOICgyp4jOeG0dk4TJlhdRxHXH"

// ===== 2. KONFIGURASI PIN =====
#define SERVO_PIN 18
#define TRIG_PIN_LEVEL 25
#define ECHO_PIN_LEVEL 26
#define TRIG_PIN_MOTION 27
#define ECHO_PIN_MOTION 33
```

Gambar 4.2 Sintaks Konfigurasi Jaringan dan Pin Mikrokontroler

Sistem diatur dengan batas jarak kosong tempat sampah (EMPTY_DISTANCE_CM) sejauh 30 cm, dan batas jarak deteksi gerakan (MOTION_THRESHOLD_CM) sejauh 15 cm. Batas jarak deteksi maksimal 15 cm ini dipilih secara spesifik untuk mencegah terjadinya respons palsu (*false trigger*). Jika jarak diatur terlalu jauh, sensor berisiko mendeteksi orang yang hanya sekadar berjalan melewati tempat sampah tanpa niat untuk membuang sampah, yang akan menyebabkan penutup terbuka secara tidak perlu. Sistem menggunakan fungsi khusus untuk mengkalkulasi selisih jarak pantulan dari sensor dalam untuk dikonversi menjadi persentase kapasitas sampah (0-100%).

```
#define EMPTY_DISTANCE_CM 30
#define MOTION_THRESHOLD_CM 15

int computeFillPercentFromDistance(int distanceCm) {
    if (distanceCm < 0 || distanceCm > 100) return 0;
    int fillHeight = EMPTY_DISTANCE_CM - distanceCm;
    if (fillHeight < 0) fillHeight = 0;
    int percent = (int)((fillHeight * 100.0) / EMPTY_DISTANCE_CM);
    return constrain(percent, 0, 100);
}

FillLevel classifyLevel(int fillPercent) {
    if (fillPercent >= FILL_FULL_PERCENT) return PENUH;
    if (fillPercent >= FILL_MEDIUM_PERCENT) return SEDANG;
    return KOSONG;
}
```

Gambar 4.3 Sintaks Fungsi Perhitungan Kapasitas Sampah

Pada blok void setup(), sistem akan melakukan inisialisasi koneksi ke Wi-Fi dan Firebase, serta mengatur posisi awal motor servo dalam keadaan tertutup (0 derajat) dan menampilkan status kesiapan sistem pada layar LCD 16x2. Setelah koneksi berhasil, program akan masuk ke blok void loop() untuk menjalankan logika utama secara berulang. Logika pergerakan diatur sedemikian rupa sehingga jika sensor luar mendeteksi objek (tangan pengguna) pada jarak ≤ 15 cm, motor servo akan bergerak membuka tutup tempat sampah hingga sudut 160 derajat, dan akan menahannya selama 4000 milidetik (4 detik) sebelum tertutup kembali secara otomatis.

```

void loop() {
    unsigned long currentMillis = millis();

    // --- 1. LOGIKA GERAKAN ---
    int distMotion = readDistanceCM(TRIG_PIN_MOTION, ECHO_PIN_MOTION);
    bool motionDetected = (distMotion > 0 && distMotion <= MOTION_THRESHOLD_CM);

    if (motionDetected && !lidIsOpen) {
        Serial.println("[GERAK] BUKA");
        myServo.write(SERVO_ANGLE_OPEN);
        lidIsOpen = true;
        lidOpenTime = currentMillis;
    } else if (lidIsOpen && motionDetected) {
        lidOpenTime = currentMillis;
    } else if (lidIsOpen && (currentMillis - lidOpenTime >= LID_OPEN_DURATION_MS))
    {
        Serial.println("[TIMER] TUTUP CEPAT...");
        myServo.write(SERVO_ANGLE_CLOSED);
        lidIsOpen = false;
    }
}

```

Gambar 4.4 Sintaks Logika Pergerakan Motor Servo

Terakhir, sistem dirancang untuk mengirimkan data secara berkala ke Firebase *Realtime Database*. Untuk mencegah pengiriman data yang berlebihan dan menjaga kestabilan sistem, pengiriman data status persentase kapasitas sampah hanya akan dilakukan saat tutup tempat sampah dalam keadaan diam (tertutup) dengan interval waktu pengiriman setiap 3000 milidetik (3 detik).

```

// --- 2. LOGIKA LEVEL & KIRIM DATA ---
// Kirim data hanya saat tutup diam
if (!lidIsOpen && (currentMillis - sendDataPrevMillis > DATABASE_INTERVAL_MS)
&& signupOK) {
    sendDataPrevMillis = currentMillis;

    // (Logika pembacaan distLevel & update LCD dilakukan di sini)

    // Pengiriman data ke Firebase
    FirebaseJson json;
    json.set("level_cm", distLevel);
    json.set("persen", fillPercent);
    json.set("status_text", statusText);

    if (!Firebase.RTDB.updateNode(&firebaseData, "esp32", &json)) {
        Serial.println(firebaseData.errorReason());
    }
}
delay(50);
}

```

Gambar 4.5 Sintaks Logika Pengiriman Data ke Firebase

4.2 Pengujian

Tahap pengujian dilakukan untuk memastikan purwarupa Sistem Tempat Sampah Cerdas yang telah dibuat dapat beroperasi dengan baik di kondisi nyata. Evaluasi ini dibagi menjadi

dua bagian utama, yaitu pengujian fungsionalitas alat menggunakan metode *Black Box*, dan pengujian penerimaan infrastruktur perangkat keras.

4.2.1 Pengujian Sensor Ultrasonik (Deteksi Gerakan)

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat responsivitas sensor ultrasonik bagian luar dalam mendeteksi objek (tangan pengguna) pada jarak ≤ 15 cm untuk memicu pergerakan motor servo. Hasil pengujian deteksi gerakan ini direkapitulasi pada Tabel 4.1, sedangkan dokumentasi visual saat pengujian berlangsung dapat dilihat pada Gambar 4.6.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Deteksi Gerakan

Percobaan Ke-	Jarak Objek (cm)	Respons Motor Servo (Buka/Tidak)	Keterangan
1	5 cm	Buka	Berhasil
2	10 cm	Buka	Berhasil
3	14 cm	Buka	Berhasil
4	15 cm	Buka	Berhasil
5	20 cm	Tidak	Berhasil



Gambar 4.6 Pengujian Sensor Deteksi Gerakan

4.2.2 Pengujian Sensor Ultrasonik (Kapasitas Sampah)

Pengujian ini dilakukan untuk memverifikasi tingkat akurasi sensor ultrasonik bagian dalam dalam mengukur jarak tumpukan sampah jika dibandingkan dengan pengukuran manual menggunakan alat ukur mistar (penggaris). Perbandingan hasil pengukuran selengkapnya disajikan pada Tabel 4.2, dan dokumentasi proses pengukuran menggunakan mistar ditunjukkan pada Gambar 4.7.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Akurasi Kapasitas Sampah

Percobaan Ke-	Pengukuran Manual (cm)	Persentase Kapasitas (%)	Tampilan Status LCD	Keterangan
1	30 cm	0%	Kosong	Akurat
2	22 cm	30%	Kosong	Akurat
3	15 cm	50%	Sedang	Akurat
4	10 cm	70%	Sedang	Akurat
5	5 cm	80%	Penuh	Akurat



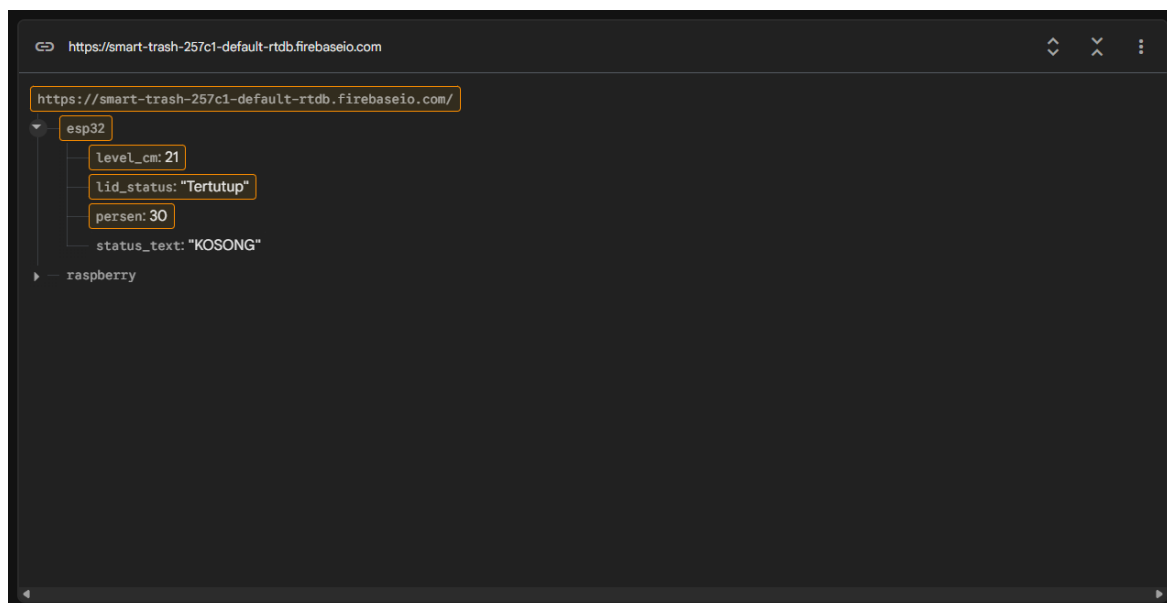
Gambar 4.7 Pengujian Akurasi Pengukuran Kapasitas Sampah

4.2.3 Pengujian Pengiriman Data Ke Firebase

Pengujian ini dilakukan untuk memverifikasi fungsionalitas dan keberhasilan transmisi data dari mikrokontroler ESP32 menuju Firebase *Realtime Database*. Pengujian dievaluasi menggunakan parameter keberhasilan, yaitu dengan membandingkan kesesuaian antara data persentase kapasitas dan status yang diproses oleh perangkat keras dengan data yang pada akhirnya tampil dan diperbarui pada antarmuka Firebase *Console*. Apabila data berhasil masuk dan nilainya sinkron, maka pengiriman dinyatakan "Berhasil". Namun, jika data tidak masuk atau nilainya tidak sesuai, maka dinyatakan "Gagal". Rincian hasil pengujian pengiriman data disajikan pada Tabel 4.3. Adapun tangkapan layar antarmuka yang menunjukkan data berhasil diterima pada Firebase Realtime Database dapat dilihat pada Gambar 4.8.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Pengiriman Data

Percobaan Ke-	Data Pada Layar LCD	Data Tampil di Firebase	Status Pengiriman
1	0% (Kosong)	0% (Kosong)	Berhasil
2	30% (Kosong)	30% (Kosong)	Berhasil
3	50% (Sedang)	50% (Sedang)	Berhasil
4	70% (Sedang)	70% (Sedang)	Berhasil
5	80% (Penuh)	80% (Penuh)	Berhasil



Gambar 4.8 Antarmuka Penerimaan Data Pada Firebase *Realtime Database*

4.2.4 Pengujian Kondisi *Offline*

Pengujian ini dilakukan secara khusus untuk mengevaluasi respons sistem ketika perangkat mengalami kendala jaringan (hilangnya koneksi internet). Skenario ini bertujuan untuk membuktikan mekanisme perlindungan (*fail-safe*) sistem, di mana mikrokontroler ESP32 dirancang untuk menghentikan sementara operasional mekanik aktuator demi mencegah terjadinya ketidaksinkronan data dengan server. Selama kondisi tersebut, sistem akan memberikan informasi visual berupa status "reconnecting" pada layar LCD sembari terus berusaha memulihkan koneksi jaringan secara otomatis.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Dalam Kondisi *Offline*

Percobaan Ke-	Kondisi Jaringan	Respon Perangkat	Status Firebase	Keterangan
1	Normal (Online)	Servo berhasil membuka tutup tempat sampah, LCD menyala normal dan menampilkan status awal kapasitas tempat sampah.	Data perangkat berhasil terhubung dan masuk ke antarmuka Firebase.	Akurat dan sesuai.
2	Terputus (Offline)	Servo mengunci (tidak dapat membuka penutup tempat sampah), layar LCD berubah menampilkan teks <i>reconnecting</i> .	Sistem terputus sementara dari Firebase dan menahan pengiriman data.	Sistem terus <i>reconnecting</i> .
3	Pulih (Online)	Layar LCD kembali normal (menampilkan status tempat sampah) dan servo kembali bisa membuka dan menutup tempat sampah.	ESP32 otomatis terhubung kembali (<i>reconnect</i>) ke Firebase secara lancar.	Sinkronasi dengan firebase berhasil.

4.2.5 Pengujian Penerimaan Infrastruktur Perangkat Keras

Setelah fungsionalitas sistem diuji, dilakukan evaluasi tingkat penerimaan terhadap desain fisik perangkat keras. Pengujian ini melibatkan 10 responden (5 petugas kebersihan dan 5 mahasiswa FTI UII). Responden diminta mencoba membuang sampah secara langsung, kemudian memberikan penilaian menggunakan kuesioner skala Likert (1-5) terhadap 5 aspek infrastruktur alat. Hasil rekapitulasi data dari 10 responden disajikan pada Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4. 5 Rekapitulasi Hasil Kuisisioner Infrastruktur Perangkat Keras

Responden	Pertanyaan					Total Skor
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	
R1	4	4	5	4	5	22
R2	5	5	5	4	5	24
R3	4	4	4	4	4	20
R4	5	5	5	5	5	25
R5	3	4	4	4	3	18
R6	5	4	4	5	5	23
R7	5	4	5	5	5	24
R8	4	4	4	3	5	20
R9	5	4	5	4	4	22
R10	4	4	4	3	5	20
Total Keseluruhan	44	42	45	41	46	218

Berdasarkan Tabel 4.5, diperoleh total skor aktual sebesar 218 dari 10 responden. Selanjutnya, dilakukan perhitungan persentase kelayakan dengan langkah sebagai berikut:

- Skor Maksimal Ideal = $10 \text{ Responden} \times 5 \text{ Pertanyaan} \times \text{Skor } 5 = 250$
- Persentase Kelayakan = $\left(\frac{218}{250}\right) \times 100\% = 87,2\%$
- Rata-rata skala = $\frac{218}{50} = 4,36$ (dari skala 5,0)

Berdasarkan perhitungan di atas, diperoleh tingkat kelayakan infrastruktur sebesar 87,2% dengan nilai rata-rata 4,36 dari 5,0. Nilai tertinggi diberikan pada aspek "Keamanan fisik purwarupa" (Q5) dan "Durasi penutup terbuka" (Q3). Hal ini menunjukkan bahwa desain fisik alat dirasa sangat aman dan mekanisme pergerakan tutupnya sudah sangat pas dengan ritme

membuang sampah pengguna. Sementara itu, nilai terendah berada pada aspek "Keterbacaan layar LCD" (Q4), di mana beberapa responden memberikan nilai 3, yang mengindikasikan perlu adanya sedikit penyesuaian sudut pandang LCD agar lebih mudah dibaca oleh tinggi pengguna yang beragam. Secara keseluruhan, perolehan persentase 87,2% ini membuktikan bahwa desain infrastruktur fisik purwarupa sangat tangguh, fungsional, ramah guna (*user-friendly*), dan dapat diterima dengan sangat baik oleh pengguna akhir di lingkungan FTI UII.

4.2.6 Hasil Observasi Pengujian Lapangan

Selama pengujian berlangsung di area Hall FTI UII, purwarupa sistem tempat sampah cerdas telah diuji secara langsung oleh sekitar 20 hingga 30 pengguna saat membuang berbagai jenis sampah sehari-hari. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, keseluruhan percobaan menunjukkan bahwa sistem dapat merespons dengan baik, di mana sensor ultrasonik luar secara konsisten mendeteksi kehadiran pengguna untuk membuka penutup tempat sampah secara otomatis. Selain itu, sensor ultrasonik bagian dalam juga berhasil mendeteksi level kepenuhan sampah secara presisi, dan data persentase kapasitas tersebut sukses ditransmisikan serta tersinkronisasi ke antarmuka Firebase *Realtime Database* secara mutakhir (*real-time*). Meskipun tingkat keberhasilan sistem sangat tinggi, terdapat beberapa catatan evaluasi operasional di mana pembacaan sensor kapasitas terkadang mengalami sedikit fluktuasi. Fluktuasi ini umumnya disebabkan oleh kondisi sampah yang dibuang memiliki bentuk tidak beraturan atau menumpuk di satu titik, sehingga menghalangi area pancaran gelombang sensor secara optimal.

Selain itu, berdasarkan pengamatan selama masa pengujian, beberapa pengguna memberikan tanggapan bahwa sistem sudah bekerja dengan sangat baik, interaktif, dan sangat higienis karena pengguna tidak perlu menyentuh penutup wadah secara fisik. Hal ini mengonfirmasi bahwa sistem tidak hanya memiliki performa yang andal dari sisi teknis transmisi data *IoT*, tetapi juga sangat ramah guna dan dapat diterima dengan baik oleh pengguna dalam kondisi penggunaan nyata di lapangan. Meskipun terdapat sedikit dinamika pada pembacaan tumpukan sampah yang tidak rata, secara keseluruhan sistem tetap menunjukkan kinerja yang sangat baik, fungsional, dan stabil dalam berbagai skenario pengujian. Dokumentasi suasana saat purwarupa sistem tempat sampah cerdas diuji secara langsung oleh pengguna di lingkungan Hall FTI UII dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Pengujian Tempat Sampah Cerdas

4.3 Pembahasan

Berdasarkan serangkaian pengujian yang telah dilakukan, purwarupa Sistem Tempat Sampah Cerdas Berbasis IoT yang dirancang telah beroperasi dengan baik sesuai spesifikasinya. Pada pengujian *Black Box*, sensor ultrasonik luar mampu secara konsisten merespons pergerakan pada jarak ≤ 15 cm untuk memicu motor servo membuka tutup selama 4 detik. Sensor ultrasonik dalam juga telah terbukti mampu mengklasifikasikan kapasitas volume sampah dan memperbaruinya di layar LCD dengan akurasi sebesar 100% jika dibandingkan dengan alat ukur manual. Pengiriman data status perangkat ke Firebase pun dapat sinkron dan berjalan dengan tingkat keberhasilan 100% selama konektivitas jaringan memadai, di mana data persentase pada alat berhasil diperbarui secara presisi pada *database*.

Selain itu, pengujian penerimaan infrastruktur perangkat keras menunjukkan respons yang sangat positif dengan tingkat kelayakan sebesar 87,2%. Nilai tertinggi diberikan pada tingkat keamanan perangkat fisik dan durasi penutup mekanik, yang membuktikan bahwa alat ini dapat dioperasikan secara aman dan nyaman oleh para pengguna di lingkungan kampus. Secara keseluruhan, perolehan persentase ini membuktikan bahwa purwarupa sangat tangguh dan fungsional.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan kelebihan dan kekurangan dari sistem ini:

- a. Kelebihan

1. Mekanisme *Touchless*: Meminimalkan kontak fisik pengguna dengan penutup sampah.
 2. Pemantauan Otomatis dan *Real-Time*: Mencegah masalah penumpukan sampah berkat fitur pengiriman status kapasitas langsung ke *Firebase* untuk dipantau secara jarak jauh.
 3. Kenyamanan Pengguna: Mendapatkan respons positif dari mahasiswa dan petugas kebersihan berdasarkan hasil pengujian arsitektur perangkat keras dengan perolehan persentase 87,2%.
- b. Kekurangan
1. Sangat bergantung pada kestabilan koneksi listrik dan jaringan Wi-Fi untuk mengoperasikan mikrokontroler ESP32 dan pengiriman data ke *database*.
 2. Sensor pembaca kapasitas terkadang dapat memberikan pembacaan yang kurang konsisten jika sampah yang masuk bertumpuk secara tidak merata menutupi bagian tengah sensor.
 3. Keterbatasan untuk mendeteksi atau membedakan jenis materi sampah secara spesifik.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan sistem tempat sampah cerdas berbasis *Internet of Things (IoT)* untuk pemantauan kapasitas volume sampah dan mekanisme operasional otomatis di lingkungan Fakultas Teknologi Industri (FTI) Universitas Islam Indonesia. Setelah melalui tahapan analisis kebutuhan, perancangan, implementasi, dan pengujian sistem, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

Dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor ultrasonik HC-SR04, sistem mampu beroperasi secara otomatis tanpa menuntut sentuhan fisik dari pengguna (*touchless*). Sensor ultrasonik bagian luar bertugas mendeteksi keberadaan objek untuk membuka penutup tempat sampah secara otomatis melalui aktuator motor servo. Selanjutnya, sensor ultrasonik bagian dalam akan mengklasifikasikan tingkat kepenuhan volume sampah menjadi nilai persentase kapasitas. Data hasil pembacaan tersebut kemudian dikirimkan secara langsung ke Firebase *Realtime Database* dan disajikan melalui layar indikator LCD secara *real-time*.

Bagi petugas kebersihan di lingkungan kampus, sistem ini memberikan kemudahan dalam memantau kondisi aktual setiap tempat sampah secara efisien dari jarak jauh, sehingga dapat mencegah penumpukan sampah tanpa harus melakukan pengecekan manual satu per satu. Selain itu, mahasiswa sebagai pengguna akhir dapat membuang sampah dengan lebih nyaman dan higienis. Informasi seperti persentase kapasitas dan status tempat sampah dapat dipantau setiap saat. Evaluasi penerimaan infrastruktur fisik perangkat keras menggunakan kuesioner skala Likert juga menunjukkan persentase kelayakan yang tinggi sebesar 87,2%, yang mengonfirmasi bahwa sistem yang dirancang tangguh, sangat ramah guna, fungsional, dan mampu menjadi solusi digital yang efektif untuk mendukung modernisasi pengelolaan sampah berbasis Internet of Things di lingkungan FTI UII.

5.2 Saran

Meskipun purwarupa sistem telah beroperasi sesuai dengan spesifikasi yang dirancang, masih terdapat beberapa kekurangan yang dapat disempurnakan. Oleh karena itu, terdapat

beberapa saran yang direkomendasikan bagi peneliti selanjutnya yang bermaksud mengembangkan arsitektur purwarupa tempat sampah cerdas ini, yaitu:

1. Penyempurnaan Arsitektur Sensor Kapasitas

Untuk mengatasi masalah inkonsistensi pembacaan akibat tumpukan sampah yang tidak merata, disarankan untuk memodifikasi arsitektur bagian input dengan menggunakan metode *multi-sensor*. Peneliti selanjutnya dapat menempatkan 2 atau 3 buah sensor ultrasonik di titik yang berbeda pada bagian dalam penutup, kemudian memprogram mikrokontroler ESP32 untuk menghitung nilai rata-rata (*average*) dari seluruh sensor agar hasil pengukuran persentase volume lebih presisi.

2. Pengembangan Output Notifikasi Lokal (Audio)

Arsitektur keluaran (*output*) saat ini hanya mengandalkan indikator visual berupa layar LCD dan Firebase. Disarankan untuk mengoptimalkan sisa pin GPIO pada ESP32 *Expansion Board* dengan menambahkan komponen aktuator audio sederhana seperti modul Buzzer. Modul ini dapat memberikan peringatan suara (alarm) lokal ketika kapasitas tempat sampah telah mencapai 100%, atau berbunyi singkat saat motor servo akan menutup pintu sebagai tambahan fitur keamanan pengguna.

3. Pemisahan Jalur Catu Daya (Power Isolation)

Untuk Kestabilan Komponen, berdasarkan hasil pengujian di lapangan, ditemukan kendala berupa penurunan tegangan sesaat (*voltage sag*) ketika aktuator motor servo bergerak. Tarikan arus yang besar ini menyebabkan suplai listrik ke modul I2C LCD menjadi tidak stabil, sehingga layar sering kali kehilangan inisialisasi karakter. Peneliti selanjutnya disarankan untuk merancang arsitektur kelistrikan dengan sistem isolasi daya, misalnya menggunakan dua sumber catu daya yang terpisah. Pemisahan ini sangat krusial agar operasional mekanik aktuator tidak mengganggu fungsionalitas antarmuka visual.

DAFTAR PUSTAKA

- Adianto, Wiediartini, Nia Rachmadita, R., Erawati, I., Budiawati, R., Asa Utari, D., & Ardliyana, T. (2024). Pengenalan Sistem IoT Pada Pemanfaatan Kebutuhan Sehari-Hari. *Jurnal Cakrawala Maritim*, 7. <http://jcm.ppns.ac.id>
- Andini, S., & Nur Fazria, A. (2022). Strategi Pengolahan Sampah dan Penerapan Zero Waste di Lingkungan Kampus STKIP Kusuma Negara. *Jurnal Citizenship Virtues*, 2022(1), 273–281.
- Astawa, I. K. A., Ananta Sastra Wijaya, P., Made Aditya Wirawan, I., Raka Agung, I., Setiawan, I. N., Shandyasa, I. W., Rahardjo, P., & Divayana, Y. (2025). RANCANG BANGUN SISTEM MONITOR KONDISI AIR DAN PAKAN BERBASIS IOT DENGAN CATU DAYA PLTS PADA KOLAM LELE. *Jurnal SPEKTRUM*, 12(3).
- Ayutantri, D. A., Dedy Irawan, J., & Wibowo, S. A. (2021). PENERAPAN IoT (Internet of Things) DALAM PEMBUATAN TEMPAT SAMPAH PINTAR UNTUK RUMAH KOS. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 5(1), 115–124. <https://doi.org/10.36040/jati.v5i1.3263>
- Baharuddin, B., Sitopu, J. W., Safarudin, M. S., Adam, Muh. W. S., & Safar, Muh. (2024). Mengenal Internet of Things (IoT): Penerapan Konsep dan Manfaatnya dalam Kehidupan Sehari-hari. *Journal Of Human And Education (JAHE)*, 4(4), 827–835. <https://doi.org/10.31004/jh.v4i4.1348>
- Farandy, M. R., Marno, M., & Sena, B. (2024). Rancang Bangun Alat Ukur Digital untuk Suhu Tubuh, Berat Badan dan Tinggi Badan Dengan Tampilan LCD dan Output Suara Berbasis Arduino Uno. *Ranah Research : Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 6(5), 2263–2275. <https://doi.org/10.38035/rrj.v6i5.1060>
- Fathoni, A. N., & Oktawati, U. Y. (2021). Blackbox Testing terhadap Prototipe Sistem Monitoring Kualitas Air Berbasis IoT. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi* |, 10(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.22146/jnteti.v10i4.2095>
- Fitriani, D. A., Khotimah, T., & Jazuli, A. (2025). IMPLEMENTASI IOT UNTUK PENGELOLAAN SAMPAH CERDAS BERBASIS SENSOR DI KAWASAN PERUMAHAN. *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika*, 9(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.36040/jati.v9i4.14483>
- Hanafie, A., Sukirman, S., Karmila, K., & Putri, M. E. (2021). PENGEMBANGAN TEMPAT SAMPAH CERDAS BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) STUDI KASUS

- FAKULTAS TEKNIK UIM. *ILTEK : Jurnal Teknologi*, 16(1), 34–39.
<https://doi.org/10.47398/iltek.v16i1.589>
- Laksmiati, D., & Fariansyah, I. (2025). Rancang Bangun Alat Pendeteksi Sampah Logam dan Non Logam Secara Otomatis Berbasis Mikrokontroler ESP32. *Jurnal Ilmiah Giga*, 28(1), 25–39. <https://doi.org/10.47313/jig.v28i1.4068>
- Lukman, Budiman, T., Kurniawan, E., & Roland Hasibuan, D. (2023). RANCANG BANGUN SISTEM INFORMASI MANAJEMEN PROYEK PADA PT ABC. *Jurnal Manajemen Informatika Jayakarta*, 3(2), 128–141. <https://doi.org/10.52362/jmijayakarta.v3i2.1137>
- Marlina, A., Sari, A. N., Syahhira, N. A., Syafarina, P., & Bintang, R. S. (2023). Edukasi Mengenai Pentingnya Pemilahan Serta Pengolahan Sampah Untuk Mengurangi Dampak Negatif Terhadap Lingkungan. *Darmabhakti: Jurnal Inovasi Pengabdian Dalam Penerbangan*, 4(1), 1–7.
- Maulani, A., Afifah, A., Utami, A. S., Ramadhan, F., & Friza, M. (2025). SMART TRASH BIN: IMPLEMENTASI PEMILAHAN SAMPAH BERBASIS TEKNOLOGI SEBAGAI SOLUSI TANTANGAN LINGKUNGAN DI DESA CIANGIR. *Jurnal Ilmiah Pengabdian Kepada Masyarakat*, 7, 287–295. <https://doi.org/10.32502/suluh>
- Maulida, A., Fayzalmi, C. S., Anaam, F. A. C., Ardiansyah, D., Gunawan, M. A., & Ridwan, N. (2025). Design of IoT-Based Smart Trash Bin Monitoring Using ESP32 and Firebase. *Jurnal Komputer Teknologi Informasi Sistem Informasi (JUKTISI)*, 4(2), 420–428. <https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.420>
- Muhtar, Lie, L. R., Gunawan, Legowo, D. K., Firman, A., & Hidayat. (2025). Rancang Bangun Alat Ukur Indeks Massa Tubuh (IMT) Digital Berbasis Data Untuk Mendukung Pelayanan Medical Check-Up. *Jurnal Ilmiah Kesehatan*, 17(1), 233–242. <https://doi.org/10.37012/jik.v17i1.2804>
- Prabowo, T., & Setiawan, H. (2025). Pengembangan Prototype Smart Waste Bin menggunakan Mikrokontroler Arduino dan Sensor Ultrasonik untuk Meningkatkan Efisiensi Pembuangan Sampah. *PESHUM: Jurnal Pendidikan, Sosial, Dan Humaniora*, 4(2).
- Pramuditya, I. M. A., Gusti Agung Pt Raka Agung, I., & Rahardjo, P. (2023). RANCANG BANGUN ALAT UJI PERIFERAL ESP32 DEVKIT V1 - DOIT 30 PIN. *Jurnal SPEKTRUM*, 10(4), 340.
- Pratama, A. R., Seliwati, & Sudrajat, J. (2024). Monitoring Tempat Sampah Pintar Berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal RESTIKOM : Riset Teknik Informatika Dan Komputer*, 6(3), 544–553. <https://doi.org/10.52005/restikom.v6i3.381>

- Priyansah, A., Adam, M., Arrahman, T., & Sakdiyah, N. A. I. (2025). Kotak Sampah Pintar berbasis IoT Menggunakan ESP 32 dan Sensor Ultrasonik. *Journal of Telecommunication Electronics and Control Engineering (JTECE)*, 7(2), 176–187. <https://doi.org/10.20895/jtece.v7i2.1844>
- Rohyani, I. S., Jupri, A., Ahyadi, H., & Rahayu, R. N. (2022). Sosialisasi Pengelolaan Sampah Domestik di Kelurahan Gomong Mataram. *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 5(4), 446–451. <https://doi.org/10.29303/jpmipi.v5i4.2219>
- Sommerville, Ian. (2011). *Software engineering*. Pearson.
- Trisudarmo, R., Ikhsan Syabani, M., Triyadi, D., Putra Pratama, F., & Feby Sulistiani, D. (2024). TEMPAT SAMPAH PINTAR BERBASIS IOT DENGAN MENGGUNAKAN ARDUINO UNO R3. *Jurnal Borneo Informatika & Teknik Komputer*, 4(2), 44–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.35334/jbit.v4i2.6062>
- Yama, W. E. Z. (2025). Monitoring Volume Tempat Sampah Di Kelurahan Wosi Madu Raja Menggunakan Mikrokontroler Nodemcu Esp 8266 Berbasis Internet Of Things. *RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business*, 4(2), 6243–6251. <https://doi.org/10.31004/riggs.v4i2.1597>
- Jelvix. (2022). *What Makes an IoT Solution Comprehensive? 7 Layers of IoT Architecture*. Jelvix. <https://jelvix.com/blog/iot-architecture-layers>
- Mischianti, R. (2020). *DOIT ESP32 DEV KIT v1 high resolution pinout and specs*. mischianti.org. <https://mischianti.org/doit-esp32-dev-kit-v1-high-resolution-pinout-and-specs/>
- Amazon. (n.d.). *Expansion Development Board for ESP32 DevKitC-32*. Amazon. <https://www.amazon.de/-/en/Expansion-Development-ESP32-DevKitC-32-Integrated-Compatible/dp/B0CTG3W4P9>
- Darlis, D. (n.d.). *Modul Ultrasonik HCSR04*. Telkom University. <https://dennydarlis.staff.telkomuniversity.ac.id/empat-point-nol/limapointdua/4-2-2-sensor/4-2-2-2-modul-ultrasonik-hcsr04/>
- Digiware Store. (n.d.). *Tower Pro MG996R High-Torque Digital Servo Motor*. Digiware Store. <https://digiwarestore.com/id/servo/tower-pro-mg996r-high-torque-digital-servo-motor-713579.html>
- Jogjarobotika. (n.d.). *Cara Mengetahui Alamat pada LCD I2C*. Jogjarobotika. <https://jogjarobotika.com/blog/cara-mengetahui-alamat-pada-lcd-i2c-b146.html>

Ecadio. (n.d.). *Power Supply Switching 5V 3A*. Ecadio. <https://ecadio.com/power-supply-switching-5v-3a>

LAMPIRAN