

## Rancang Bangun Robot Pemilah Sampah Otomatis Menggunakan Motor DC Encoder untuk Menentukan Posisi

Ilham Aziz Saputra<sup>1</sup>, Umi Fadlilah<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. A. Yani Tromol Pos 1, Pabelan, Kartasura, Sukoharjo, Indonesia

 Email korespondensi: [ilhamazizsaputra@gmail.com](mailto:ilhamazizsaputra@gmail.com)

**Abstrak.** Permasalahan sampah di Indonesia semakin kompleks, terutama karena kurangnya proses pemilahan sejak dari sumber. Sampah yang tidak terpilah dengan baik menyulitkan proses daur ulang dan mempercepat pencemaran lingkungan. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini merancang dan mengembangkan robot pemilah sampah otomatis berbasis *image processing* dan navigasi *encoder*. Sistem ini mampu mendeteksi lima jenis sampah, yaitu daun, plastik, kertas, *ferro*, dan *nonferro*, menggunakan kamera webcam dengan algoritma YOLOv8, serta menavigasi robot menuju tempat pembuangan yang sesuai secara mandiri. Navigasi dilakukan dengan bantuan motor DC *encoder* sebagai penentu jarak dan sensor MPU6050 sebagai penentu arah gerak berdasarkan sudut *yaw*. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu mengklasifikasikan sampah dengan *confidence score* tertinggi sebesar 0,97 dan seluruh prediksi berada di atas ambang minimal 0,60. Rata-rata *error* navigasi berdasarkan perhitungan *encoder* sebesar 0,60%, dengan akurasi mencapai lebih dari 99%. Sementara itu, pengujian orientasi arah gerak menunjukkan rata-rata *error* sudut *yaw* sebesar 0,21% saat menuju tempat sampah, dan 0,11% saat kembali ke titik awal. Daya tahan sistem tercatat mampu beroperasi selama  $\pm 76$  menit menggunakan baterai Li-Po 11.1V. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu berfungsi secara *real-time*, presisi, dan otonom. Prototipe ini juga disiapkan untuk mendukung partisipasi dalam ajang Kontes Robot Indonesia (KRI) tahun 2025, khususnya kategori robot otomatis.

**Kata kunci:** Encoder; MPU6050; Navigasi Otomatis; Robot Pemilah; YOLOv8



## PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah merupakan salah satu tantangan besar yang dihadapi oleh banyak negara, termasuk Indonesia [1]. Permasalahan ini menjadi perhatian serius pemerintah karena dunia saat ini tengah menghadapi *triple planetary crisis*, yaitu perubahan iklim, hilangnya keanekaragaman hayati, dan polusi [2]. Berdasarkan data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), timbulan sampah di Indonesia terus meningkat dari tahun ke tahun. Pada 2021 tercatat sebanyak 28,5 juta ton, naik menjadi 38,6 juta ton pada 2022, dan mencapai 42,1 juta ton pada 2023. Komposisi sampah tersebut didominasi oleh sisa makanan (39,40%) dan plastik (18,44%), dengan rumah tangga menjadi sumber sampah terbesar 49,84% [3]. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pengelolaan sampah yang efektif dan berkelanjutan sangat diperlukan guna mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat.

Sampah yang tidak terpilah dengan baik dapat mencemari lingkungan, menghambat proses daur ulang, dan menimbulkan masalah kesehatan masyarakat [4]. Sampah yang dapat berhasil didaur ulang kurang dari 10%, sementara sisanya berakhir di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dan terbuang mencemari lingkungan [5]. Salah satu solusi untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah adalah melalui proses pemilahan yang baik. Namun, pemilahan sampah secara manual memiliki banyak keterbatasan, seperti membutuhkan tenaga kerja besar dan rentan terhadap kesalahan manusia [6]. Maka dari itu, diperlukan teknologi otomatis yang mampu memilah sampah secara cepat dan akurat.

Salah satu bentuk inovasi yang tengah dikembangkan adalah robot pemilah sampah otomatis [7]. Robot ini dirancang untuk mendeteksi jenis sampah dan secara otomatis robot bergerak ke tempat sampah sesuai jenis sampah yang dideteksi. Dalam Kontes Robot Tematik Indonesia (KRTMI) 2024, tantangan yang dihadapi adalah bagaimana merancang robot yang mampu memilah sampah secara otomatis berdasarkan jenisnya dan membuangnya ke tempat yang sesuai. Selain itu, robot juga dilengkapi dengan kamera untuk mendeteksi lima jenis sampah yang memiliki bentuk serupa, yaitu daun, kertas, plastik, *ferro*, dan *nonferro* [8].

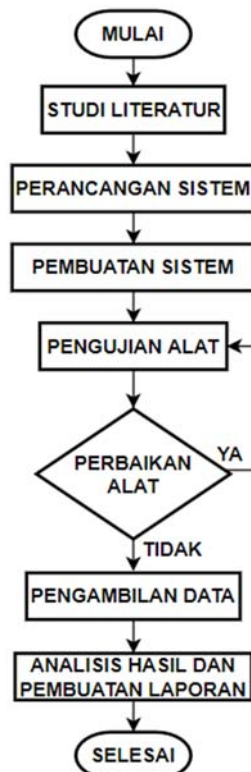
Namun, salah satu tantangan dalam merancang robot pemilah sampah adalah menciptakan sistem navigasi yang presisi agar robot dapat bergerak dan meletakkan sampah pada posisi yang tepat [9]. Motor DC (*Direct Current*) *encoder* merupakan sensor umpan balik yang mampu mengukur rotasi motor dan mengubahnya menjadi data posisi [10]. Data tersebut membantu robot mengetahui jarak tempuh dan posisi secara *real-time*, serta melakukan koreksi pergerakan apabila terjadi penyimpangan arah [11]. Dibandingkan dengan sensor navigasi lainnya seperti ultrasonik, *encoder* menawarkan akurasi yang lebih tinggi dan respons lebih cepat, sehingga cocok untuk aplikasi robot



pemilah sampah yang memerlukan presisi dalam pergerakan [12]. Robot pemilah sampah berdasarkan data dari *encoder* untuk menghitung perubahan posisi dan orientasi, serta menggunakan sistem kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*) guna menjaga kestabilan kecepatan dan arah gerak [13]. Hal ini penting agar robot tetap stabil saat bergerak di medan yang bervariasi, termasuk permukaan yang tidak rata.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun robot pemilah sampah otomatis yang dilengkapi motor DC *encoder* untuk menentukan posisi dengan akurat. Dengan sistem ini, robot diharapkan dapat mendeteksi sampah secara efisien dan meletakkannya di tempat yang sesuai serta mendukung konsep *zero waste*. Selain itu, penelitian ini juga sejalan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), terutama Tujuan 12 tentang Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab, Tujuan 13 tentang Penanganan Perubahan Iklim, serta Tujuan 9 tentang Industri, Inovasi, dan Infrastruktur. Melalui inovasi ini, diharapkan kontribusi nyata dapat diberikan dalam pengembangan teknologi dan pengelolaan sampah yang berkelanjutan.

## METODE



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Pembuatan robot pemilah sampah untuk navigasi otomatis ini menerapkan metode yang tertera pada Gambar 1 yaitu proses pembuatan robot pemilah sampah untuk



menentukan posisi secara otomatis yang membutuhkan perancangan dengan baik. Pengujian serta pengambilan data robot dilakukan pada arena simulasi yang menyerupai kondisi arena pertandingan KRTMI sebenarnya.

### Persiapan Alat dan Bahan

Perancangan robot pemilah sampah otomatis menggunakan motor DC encoder dilakukan untuk meningkatkan akurasi navigasi serta efisiensi dalam proses pemilahan sampah berdasarkan jenisnya. Adapun alat dan bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Alat dan Bahan

Alat dan Bahan	Jumlah
ESP32 38 Pin	1
Motor DC Encoder	4
Driver Motor BTS7960	4
Sensor MPU6050	1
Kamera Webcam	1
Laptop	1
LCD I2C 1602	1
Step Down XL4005	1
Baterai 3S Li-po (Lithium-polymer)	1
Push Button	2
Rangka Robot	1

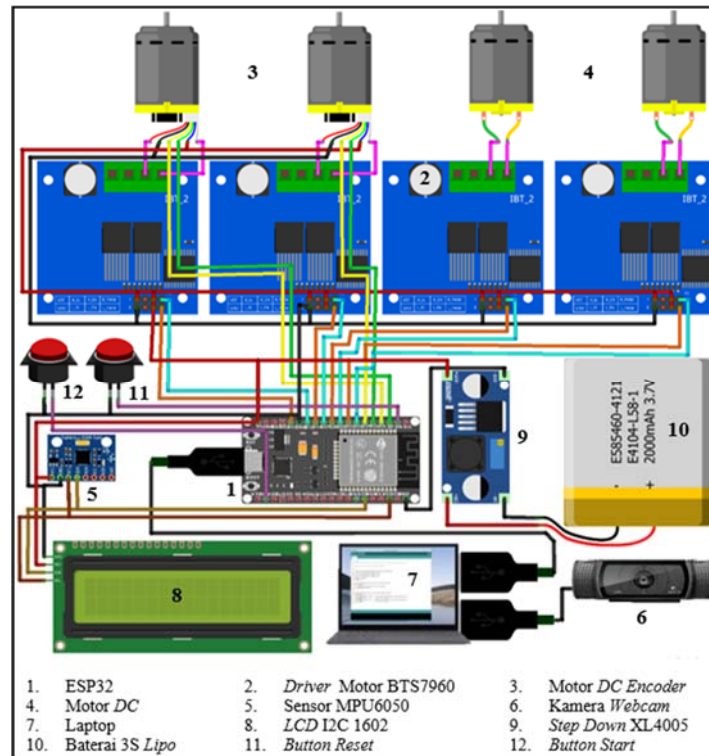
Selain perangkat keras, penelitian ini juga memanfaatkan beberapa perangkat lunak (*software*) untuk mendukung proses perancangan, pemrograman, dan simulasi robot, antara lain: Arduino IDE untuk menulis dan mengunggah program ke mikrokontroler, Visual Studio Code untuk menjalankan dan mengembangkan program *image processing*, EasyEda Editor untuk merancang tata letak (*layout*) PCB (*Printed Circuit Board*), Fritzing untuk membuat *wiring diagram system* secara visual, dan Autodesk Inventor untuk membuat desain mekanik dan model 3D (3 dimensi) robot. Adapun alat penunjang yang digunakan selama proses perakitan dan pengujian penelitian mencakup timah solder, solder, bor, mata bor, obeng set, gerinda, dan tang kombinasi.

### Perancangan Sistem

Sistem pengendalian pada robot pemilah sampah otomatis ini dirancang untuk meningkatkan akurasi navigasi dalam memilah sampah. Sistem ini terdiri dari motor DC encoder, mikrokontroler ESP32, kamera, serta beberapa komponen pendukung lainnya.



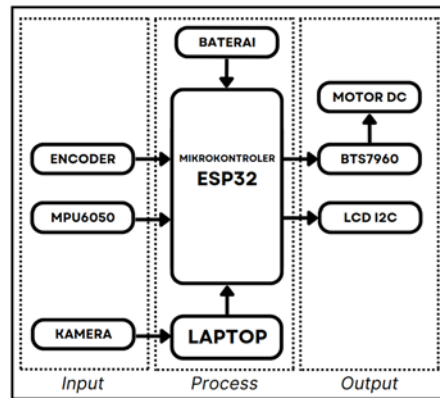
Motor DC *encoder* digunakan untuk menggerakkan robot dan memberikan umpan balik posisi secara *real-time* agar arah gerak dapat dikoreksi. Setiap motor dikendalikan oleh *driver* BTS7960 untuk mengatur kecepatan dan arah putaran. ESP32 berfungsi sebagai otak sistem yang mengolah data dari sensor dan mengendalikan aktuator. Kamera *webcam* terhubung ke laptop untuk mendeteksi jenis sampah menggunakan pemrosesan citra. Hasil deteksi dikirim ke ESP32 melalui komunikasi *serial* agar robot dapat memilah sampah sesuai jenisnya. Sensor MPU6050 (*gyroscope* dan *accelerometer*) digunakan untuk menjaga stabilitas gerak robot. Suplai sistem berasal dari baterai Li-Po 3S, dan diturunkan menggunakan modul *stepdown* XL4005 agar sesuai dengan kebutuhan komponen. Untuk monitoring, data seperti status dan hasil deteksi ditampilkan pada LCD I2C 16x2. Seluruh hubungan antar komponen ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 2. Wiring Diagram

Gambar 2 merupakan *wiring diagram* yang menggambarkan keseluruhan rangkaian sistem elektronik pada robot pemilah sampah otomatis. Penyusunan *wiring diagram* bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai hubungan antar komponen, sehingga dapat mempermudah proses perakitan, pemeliharaan sistem, dan identifikasi kesalahan (*troubleshooting*) selama pengujian dan pengoperasian robot.





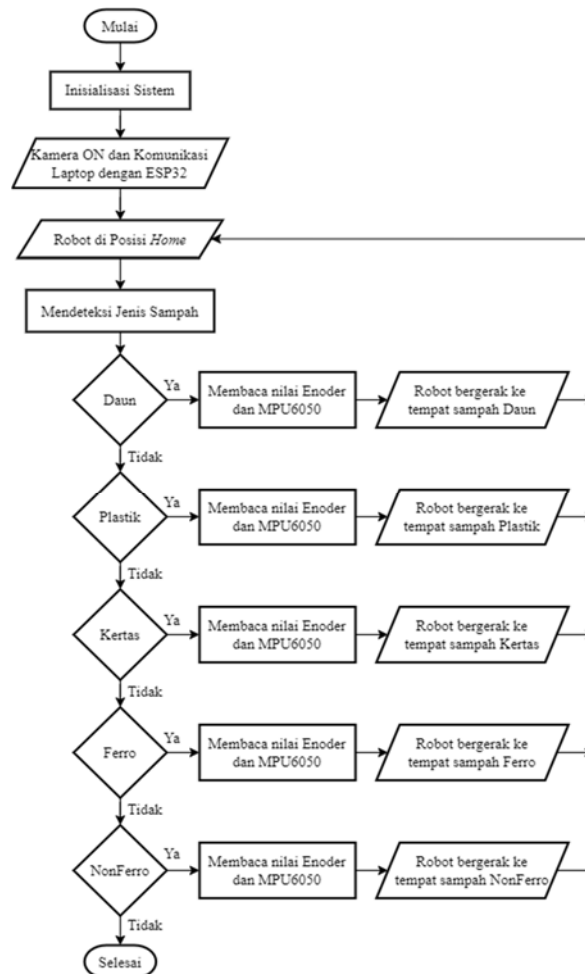
Gambar 3. Blok Diagram System

Gambar 3 menunjukkan blok *diagram system* robot pemilah sampah otomatis yang terdiri dari tiga bagian utama: input, proses, dan output. Pada bagian input, sistem menerima data dari *encoder*, sensor MPU6050, dan kamera (melalui laptop) untuk mengetahui posisi, orientasi, dan jenis sampah. Bagian proses dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengolahan data. Hasil pemrosesan digunakan untuk mengatur pergerakan motor DC melalui *driver* BTS7960 dan ditampilkan di LCD I2C. Seluruh sistem mendapatkan suplai dari baterai.

### Rancangan Perangkat Lunak

Alur kerja sistem ditunjukkan Gambar 4, perangkat lunak pada sistem robot pemilah sampah. Proses dimulai dengan inisialisasi seluruh komponen, termasuk menyalakan robot dan menjalankan program deteksi citra menggunakan OpenCV. Kamera yang terhubung ke laptop akan aktif dan melakukan klasifikasi jenis sampah. Hasil klasifikasi kemudian dikirim ke mikrokontroler ESP32 melalui komunikasi *serial*. Setelah itu, robot berada pada posisi awal (*home*). Jika terdeteksi jenis sampah seperti daun, plastik, kertas, *ferro*, atau *nonferro*, sistem akan membaca data dari sensor *encoder* dan MPU6050 untuk mengetahui posisi dan orientasi robot secara akurat. Berdasarkan data ini, robot akan bergerak otomatis menuju tempat sampah sesuai dengan jenis yang terdeteksi. Setelah selesai, robot dapat kembali ke posisi awal untuk melanjutkan proses pemilahan berikutnya. Jika robot sudah tidak mendeteksi jenis sampah maka sistem selesai.





Gambar 4. Flowchart System

Flowchart pada Gambar 4 mengilustrasikan sistem yang berjalan secara terintegrasi dan otomatis, mulai dari pembacaan data sensor hingga eksekusi pergerakan motor. Program pembuatan sistem ini dapat dilihat pada Gambar 5, yang secara khusus menjelaskan bagaimana data dari sensor MPU6050 diolah dan dikombinasikan dengan pembacaan *encoder* motor untuk menghasilkan kontrol navigasi yang presisi dan responsif.

```

521 void getYaw() {
522     timer = millis();
523     Vector norm = mpu.readNormalizeGyro();
524     yaw = fmod(yaw + norm.ZAxis * timeStep, 360);
525     if (calibrated) {
526         yaw -= yaw_offset;
527     }
528     if (yaw > 180) yaw -= 360;
529     if (yaw < -180) yaw += 360;
530     delay((timeStep * 1000) - (millis() - timer));
531 }
  
```

5a. Program Sensor MPU6050

```

477 void readLeftEncoder() {
478     unsigned long currentTime = micros();
479     if (currentTime - lastLeftInterrupt < DEBOUNCE_TIME) {
480         return;
481     }
482     lastLeftInterrupt = currentTime;
483     bool stateA = digitalRead(ENCODER_LEFT_A);
484     bool stateB = digitalRead(ENCODER_LEFT_B);
485     if (stateA != stateB) {
486         encoderLeftCount++;
487     } else {
488         encoderLeftCount--;
489     }
490 }
  
```

5b. Program Sensor MPU6050

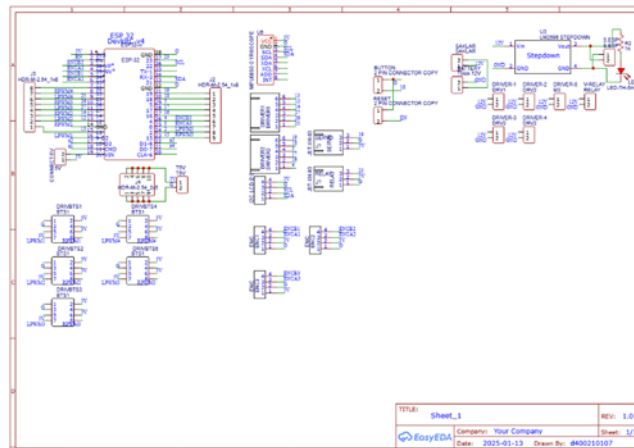
Gambar 5. Program pada Arduino IDE



Gambar 5 menunjukkan sistem navigasi robot pemilah sampah yang menggunakan motor *encoder* dan sensor MPU6050 untuk memastikan pergerakan yang stabil dan akurat. Sensor MPU6050 digunakan untuk membaca sudut *yaw*. Fungsi *getYaw()* menghitung perubahan sudut berdasarkan data dari *gyroscope*. Hasilnya disesuaikan agar tetap dalam rentang  $-180^{\circ}$  hingga  $180^{\circ}$ . *Encoder* motor membaca sinyal dari untuk mengetahui arah dan jumlah putaran roda. Fungsi *readLeftEncoder()* membaca sinyal dari dua *channel* (A dan B) untuk menentukan apakah roda bergerak maju atau mundur. Setiap pulsa dari *encoder* dihitung, dan hasilnya disimpan dalam variabel penghitungan. Informasi ini digunakan untuk mengetahui seberapa jauh dan ke arah mana robot bergerak.

### Rancangan Elektrikal

Pembuatan rangkaian elektronika (*schematic*) dari sistem ini menggunakan *software* EasyEDA seperti pada Gambar 6. Desain ini berfungsi sebagai acuan dalam proses perakitan dan pembuatan PCB agar koneksi antar komponen sesuai dengan kebutuhan sistem.



**Gambar 6.** *Schematic PCB*

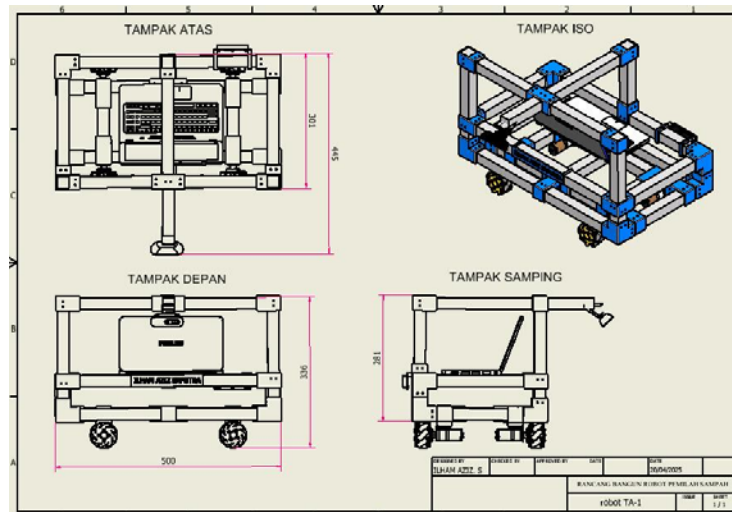
Gambar 6 menunjukkan *schematic* PCB pada sistem robot pemilah sampah. Mikrokontroler ESP32 yang digunakan memiliki banyak pin, sehingga bisa terhubung dengan berbagai sensor dan motor. Untuk menyambungkan komponen, digunakan konektor jenis *molex* dan IDC (*Insulation Displacement Connector*) agar kabel tersusun rapi dan mudah dipasang.

Dalam sistem ini digunakan dua jenis PCB, yaitu PCB utama dan PCB tegangan. PCB utama berisi ESP32, sensor, dan motor, sedangkan PCB tegangan digunakan untuk membagi tegangan 12V dan 5V ke seluruh sistem. Tegangan ini diturunkan dari baterai menggunakan modul *stepdown* XL4005. Pemisahan kedua PCB ini bertujuan agar kabel lebih rapi dan distribusi ke motor lebih efisien.



### Rancangan Mekanikal

Pembuatan mekanik pada sistem robot pemilah sampah diawali dengan proses desain menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor. Dimensi keseluruhan robot dirancang dengan panjang 60 cm, lebar 30 cm, dan tinggi 35 cm untuk integrasi seluruh komponen elektronik dan aktuator. Selain itu, pada desain ini juga disertakan lengan tambahan untuk peletakan kamera dengan panjang 45 cm.



Gambar 7. Desain Robot

Gambar 7 ditampilkan dalam empat tampilan, yaitu tampak atas, tampak depan, tampak samping, dan tampak isometri. Tampak atas memperlihatkan tata letak komponen di permukaan robot, tampak depan menggambarkan struktur dan tinggi keseluruhan, tampak samping menunjukkan posisi aktuator tambahan seperti lengan kamera, sedangkan tampilan isometri memberikan visualisasi tiga dimensi untuk memudahkan pemahaman bentuk keseluruhan.

### Pengujian Sistem

Setelah proses perancangan dan perakitan selesai, dilakukan pengujian sistem untuk memastikan semua komponen bekerja sesuai fungsinya. Pengujian bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan kamera dalam mendeteksi lima jenis sampah menggunakan *image processing* pada laptop, yang hasilnya dikirim ke ESP32. Selain itu, sistem navigasi robot diuji untuk memastikan robot dapat bergerak menuju tempat sampah yang sesuai berdasarkan hasil klasifikasi. Pengujian juga mencakup kestabilan gerakan robot menggunakan data dari *encoder* dan sensor MPU6050. Seluruh sistem diuji secara terintegrasi, termasuk estimasi kebutuhan baterai. Robot diuji dalam skenario pendeteksian jenis sampah dari posisi awal (*home*) hingga ke tempat pembuangan.



## Pengambilan Data dan Analisis

Tahap ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja robot pemilah sampah secara menyeluruh. Data dikumpulkan dari berbagai pengujian, seperti deteksi jenis sampah menggunakan kamera, akurasi navigasi berdasarkan nilai *encoder* dan sensor MPU6050, serta ketahanan baterai. Informasi yang diambil meliputi keakuratan klasifikasi sampah, ketepatan gerakan menuju tempat sampah, dan kestabilan orientasi robot serta estimasi ketahanan baterai. Selanjutnya, data dianalisis dengan membandingkan hasil uji terhadap parameter seperti target posisi, *error*, dan waktu tempuh. Tujuan analisis ini untuk mengetahui sistem telah bekerja sesuai harapan dan bagian yang masih perlu ditingkatkan.

Nilai *error* digunakan untuk mengetahui besar kesalahan (*error*) antara nilai yang sebenarnya dengan nilai hasil pembacaan sistem. Rumus dihitung dari selisih absolut antara nilai asli dan nilai pembacaan, kemudian dibagi dengan nilai asli dan dikalikan 100% untuk hasil dalam satuan persen.

$$Error = \frac{|Nilai\ pembacaan - Nilai\ asli|}{Nilai\ asli} \times 100\% \quad (1)$$

Nilai rata-rata *error* dihitung dengan menjumlahkan seluruh nilai *error* dari beberapa kali pengujian, lalu dibagi dengan jumlah data uji yang dilakukan. Hasil dari perhitungan memberikan nilai *error* rata-rata yang menjadi acuan untuk kestabilan dan keandalan sistem dalam melakukan tugasnya.

$$Rata - rata\ error(\%) = \frac{Penjumlahan\ semua\ data\ uji}{Jumlah\ data\ uji} \quad (2)$$

Nilai akurasi dihitung dengan mengurangkan rata-rata *error* dari 100%. Semakin kecil nilai *error*, maka nilai akurasi akan semakin tinggi. Hal ini berarti bahwa sistem memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mencapai hasil yang mendekati nilai yang sebenarnya.

$$Akurasi = 100\% - (rata - rata\ error)\% \quad (3)$$

Nilai perhitungan jarak tempuh berdasarkan sinyal pulsa yang dihasilkan oleh *encoder*. *Encoder* menghasilkan pulsa setiap kali roda berputar sebagian, dan jumlah total pulsa yang dikumpulkan dapat digunakan untuk menghitung jarak yang telah dilalui. Rumus ini mengalikan jumlah pulsa dengan keliling roda, kemudian dibagi dengan nilai PPR (*Pulses Per Revolution*) [14].

$$Jarak = \frac{Jarak\ Pulsa \times Keliling\ Roda}{PPR\ (Pulses\ per\ Revolution)} \quad (4)$$

Perhitungan estimasi lama waktu baterai dilakukan dengan membagi kapasitas baterai (mAh) dengan besar arus rata-rata (mA) yang dikonsumsi oleh rangkaian [15].



Untuk menjaga umur pakai baterai, umumnya hanya menggunakan 80% dari total kapasitas baterai dan dikalikan 60 untuk memperoleh satuan menit.

$$\text{Waktu Operasi} = \frac{0,8 \times \text{Kapasitas Baterai}}{\text{Arus Beban}} \times 60 \quad (5)$$

Jika data penurunan kapasitas dari hasil pengujian, waktu operasi dihitung berdasarkan laju penurunan kapasitas sebagai berikut:

$$\text{Laju Penurunan Kapasitas} = \frac{\text{Selisih Kapasitas}}{\text{Waktu Penurunan}} \quad (6)$$

$$\text{Waktu Operasi Aman} = \frac{100}{\text{Laju Penurunan Kapasitas}} \times \frac{4}{5} \quad (7)$$

## HASIL

### Pengujian Kamera pada Jenis Sampah

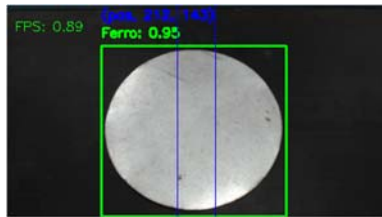
Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan kamera dalam mendeteksi jenis sampah menggunakan model YOLO (*You Only Look Once*) versi 8. Selain akurasi deteksi (*confidence score*), performa *real-time* sistem juga diukur dengan parameter FPS (*Frame Per Second*).



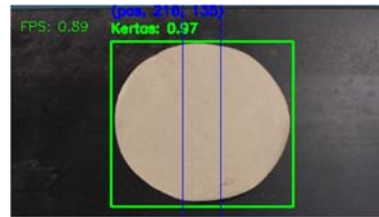
11a. Deteksi Sampah Daun (daun basah)



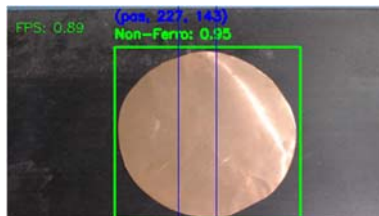
11b. Deteksi Sampah Plastik (plastik sampul)



11c. Deteksi Sampah *Ferro* (plat aluminium)



11d. Deteksi Sampah Kertas (kertas bungkus)



11e. Deteksi Sampah *Nonferro* (plat tembaga)

**Gambar 11.** Hasil *Image Processing*

Gambar 11 merupakan hasil *image processing* yang mengklasifikasikan jenis sampah berdasarkan materialnya, seperti "Daun", "Plastik", "*Ferro*", "Kertas", dan "*Nonferro*".



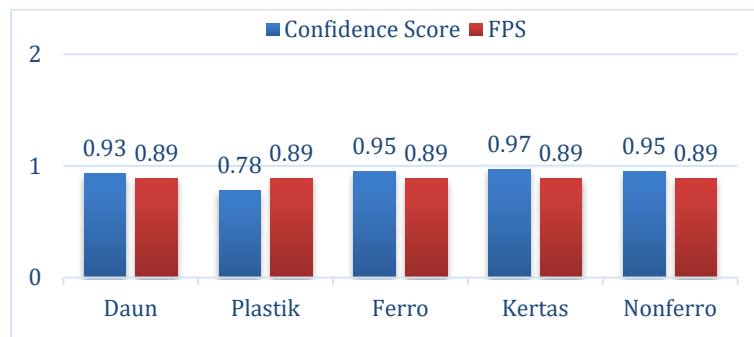
Model memberikan prediksi klasifikasi dengan *confidence score*, menampilkan persegi hijau di sekitar objek yang terdeteksi, serta menampilkan label klasifikasi dan posisi tengah objek pada *frame*.

Sistem ini memeriksa apakah sampah berada di posisi tengah (pas) berdasarkan koordinat *x*, yang ditandai dengan dua garis biru vertikal. Jika objek berada di dalam area tersebut dan memiliki *confidence* melebihi *threshold*, maka jenis bola akan dikirimkan ke ESP32 melalui komunikasi *serial* untuk proses pemilahan lebih lanjut.

**Tabel 2.** Pengujian Kamera pada Jenis Sampah

Jenis Sampah	Tampilan LCD I2C	FPS	x_center	y_center	Confidence Score
Daun	Daun	0,89	225	142	0,93
Plastik	Plastik	0,89	217	147	0,78
Ferro	Ferro	0,89	212	143	0,95
Kertas	Kertas	0,89	216	135	0,97
Nonferro	Nonferro	0,89	227	143	0,95

Dapat dilihat pada Tabel 2 sistem berhasil mendeteksi lima jenis sampah yaitu daun, kertas, plastik, *ferro*, dan *nonferro* dengan akurasi deteksi yang berbeda-beda. Sampah kertas memiliki nilai tertinggi sebesar 0,97, sedangkan plastik terendah dengan nilai 0,78.



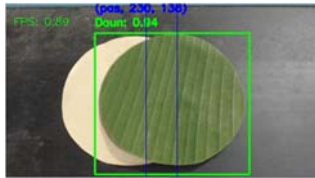
**Gambar 12.** Grafik Nilai *Confidence Score* dan FPS

Grafik pada Gambar 12 menunjukkan perbandingan antara nilai *confidence score* dan FPS dalam proses deteksi lima jenis sampah. Semua nilai *confidence* masih berada di atas batas minimum 0,60. Semakin nilai *confidence* mendekati 1, semakin akurat deteksinya sehingga hasil dianggap valid. Nilai FPS berada di bawah 1, yaitu sekitar 0,89, yang menunjukkan adanya sedikit *frame drop* atau keterlambatan tampilan video, meskipun sistem tetap mampu menjalankan deteksi dengan stabil.

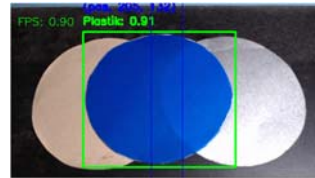


### Pengujian Kamera pada Berbagai Kondisi

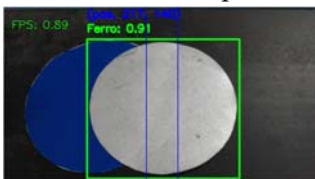
Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi objek sampah ketika berada dalam posisi atau kondisi yang bervariasi, seperti sejajar atau bertumpuk. Robot diuji dalam lima skenario dengan kombinasi posisi dan jenis sampah yang berbeda.



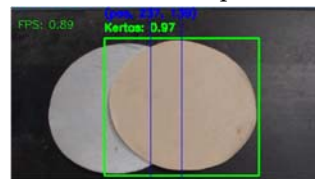
13a. Terdeteksi Sampah Daun



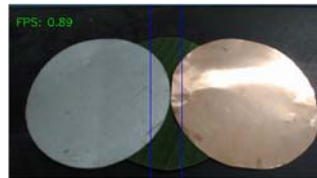
13b. Terdeteksi Sampah Plastik



13c. Terdeteksi Sampah Ferro



13d. Terdeteksi Sampah Kertas



13e. Tidak Terdeteksi Jenis Sampah

**Gambar 13.** Hasil Pendeteksian Sampah Berbagai Kondisi

Gambar 13 menunjukkan hasil kamera dalam mendeteksi berbagai jenis sampah dengan beberapa kondisi. Kamera berhasil mendeteksi jenis sampah meskipun objek bertumpuk, seperti daun di atas kertas (13a) atau kertas di atas *ferro* (13d). Kamera juga dapat mengenali objek yang sejajar, seperti plastik dengan *ferro* (13b). Namun, saat sampah saling menutupi secara acak, seperti pada Gambar 13e, sistem tidak berhasil mendeteksi jenis sampah.

**Tabel 3.** Pengujian Kamera pada Berbagai Kondisi

Skenario Uji	Kondisi	Hasil
Daun, Kertas	Daun bertumpuk diatas kertas	Berhasil mendeteksi sampah daun
<i>Ferro</i> , Plastik, Kertas	Sampah sejajar dengan plastik diatas <i>ferro</i> dan kertas	Berhasil mendeteksi sampah plastik
<i>Ferro</i> , Plastik	<i>Ferro</i> bertumpuk diatas plastik	Berhasil mendeteksi sampah <i>ferro</i>
Kertas, <i>Ferro</i>	Kertas bertumpuk diatas <i>ferro</i>	Berhasil mendeteksi sampah kertas
Daun, <i>Ferro</i> , <i>Nonferro</i>	Sampah sejajar <i>ferro</i> dan <i>nonferro</i> diatas daun	Tidak berhasil mendeteksi sampah



Hasil pengujian bahwa kamera mampu mengenali objek yang berada di atas. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki performa klasifikasi yang cukup andal, tidak hanya dalam kondisi ideal, tetapi juga pada situasi yang lebih kompleks seperti tumpukan dan sejajar. Deteksi tetap berjalan dengan baik selama objek target tidak tertutup sepenuhnya dan masih terdeteksi oleh kamera.

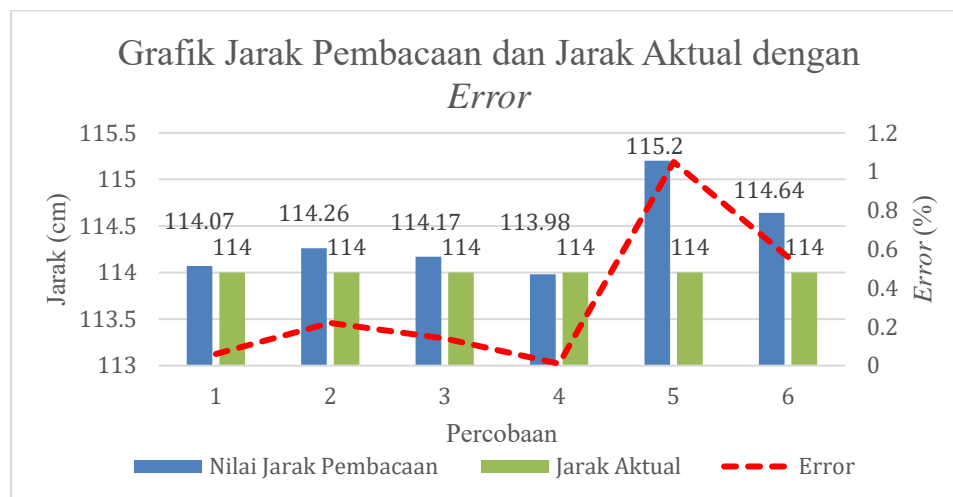
### Pengujian Akurasi Perhitungan Jarak pada Jenis Sampah Daun

Pengujian dilakukan dengan robot mendeteksi jenis sampah daun menuju tempat pembuangan sampah daun. Kemudian mencatat nilai encoder dan membandingkannya dengan jarak aktual menggunakan alat ukur panjang.

**Tabel 4.** Pengujian Sampah Daun

<i>Right Encoder</i>	<i>Left Encoder</i>	<i>Average Encoder</i>	Jarak Pembacaan (Cm)	Jarak Aktual (Cm)	Selisih (Cm)	Error (%)
1213	1209	1211	114,07	114	0,07	0,06
1214	1213	1213	114,26	114	0,26	0,22
1213	1212	1212	114,17	114	0,17	0,14
1215	1205	1210	113,98	114	0,02	0,01
1222	1224	1223	115,2	114	1,2	1,05
1222	1212	1217	114,64	114	0,64	0,56
Rata-rata error						0,34
Akurasi				100 - 0,34 = 99,66 %		

Berdasarkan data Tabel 4, selisih antara jarak pembacaan dan jarak aktual berkisar antara 0,02 cm hingga 1,20 cm, menghasilkan error persentase antara 0,01% hingga 1,05%. Nilai rata-rata error dari enam kali percobaan adalah 0,34%, menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, yaitu sebesar 99,66%.



**Gambar 14.** Grafik Pengujian pada Sampah Daun



Grafik pada Gambar 15 menunjukkan perbandingan nilai jarak pembacaan *encoder* (batang biru) dengan jarak aktual (batang hijau) pada enam percobaan. Selain itu, garis merah putus-putus menggambarkan nilai *error* dalam bentuk persentase. Terlihat pada percobaan ke-5 terjadi lonjakan jarak pembacaan sebesar 115,20 cm, menghasilkan *error* terbesar sebesar 1,05%. Sementara pada percobaan ke-4, sistem mencatat akurasi tertinggi dengan *error* hanya 0,01%.

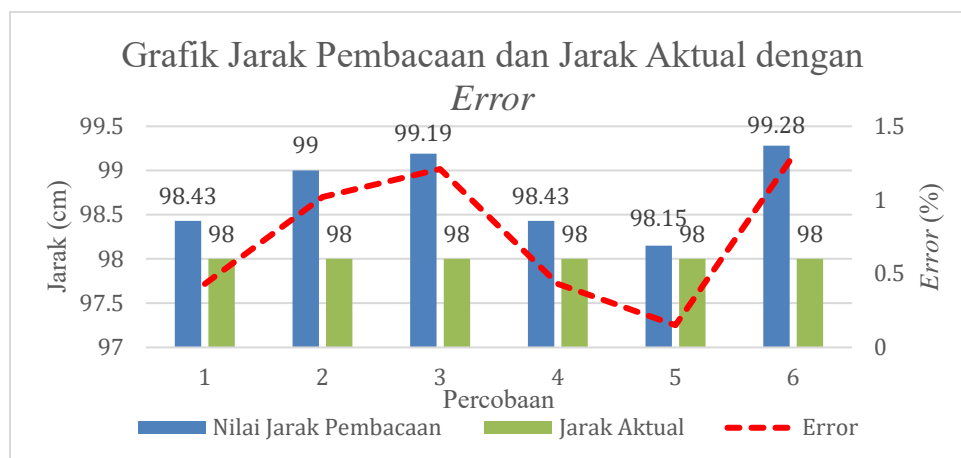
### Pengujian Akurasi Perhitungan Jarak pada Jenis Sampah Plastik

Pengujian dilakukan dengan mendeteksi sampah plastik dan mengarahkan robot ke tempat pembuangan plastik. Hasil *encoder* dibandingkan dengan jarak aktual yang dicapai, sehingga sistem mampu menghitung jarak dengan akurat.

Tabel 5. Pengujian Sampah Plastik

<i>Right Encoder</i>	<i>Left Encoder</i>	<i>Average Encoder</i>	Jarak Pembacaan (Cm)	Jarak Aktual (Cm)	Selisih (Cm)	<i>Error (%)</i>
1043	1048	1045	98,43	98	0,43	0,43
1048	1055	1051	99	98	1	1,02
1053	1053	1053	99,19	98	1,19	1,21
1046	1045	1045	98,43	98	0,43	0,43
1045	1039	1042	98,15	98	0,15	0,15
1048	1060	1054	99,28	98	1,28	1,30
Rata-rata <i>error</i>						0,75
Akurasi				100 - 0,34 = 99,25 %		

Jarak aktual ditetapkan sebesar 98 cm, dan perbandingan antara pembacaan *encoder* dengan jarak aktual menghasilkan nilai *error* yang bervariasi. Berdasarkan Tabel 5, nilai *error* terendah tercatat sebesar 0,15%, sedangkan yang tertinggi mencapai 1,30%, dengan rata-rata *error* 0,75%, sehingga menghasilkan akurasi navigasi sebesar 99,25%.



Gambar 15. Grafik Pengujian pada Sampah Plastik



Grafik pada Gambar 15 garis merah putus-putus nilai *error* yang cenderung meningkat pada percobaan ke-3 dan ke-6, namun masih dalam batas toleransi. Sedangkan percobaan ke-5 nilai *error* menurun sehingga sistem masih mampu mencapai target lokasi.

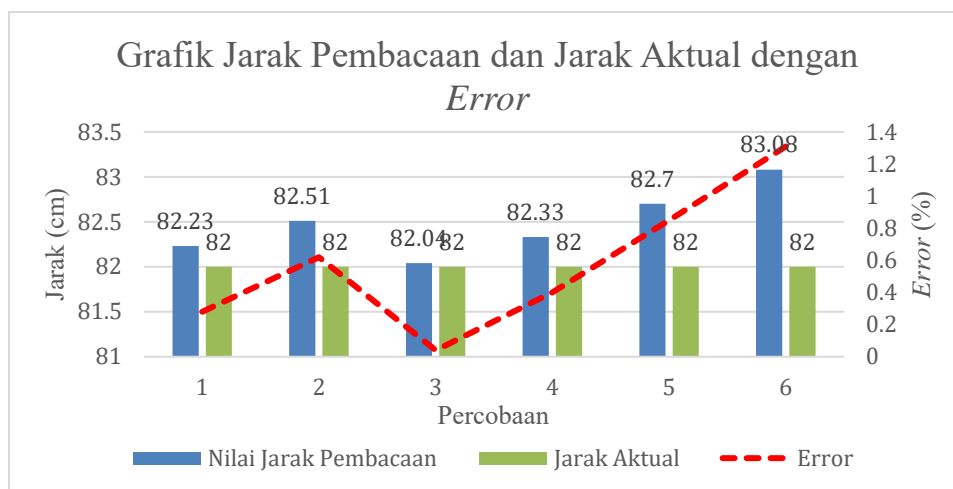
### Pengujian Akurasi Perhitungan Jarak pada Jenis Sampah *Ferro*

Robot diuji dengan mendeteksi jenis sampah logam *ferro*. Hasil menunjukkan adanya sedikit deviasi pada nilai aktual dibanding nilai encoder, namun tetap dalam batas toleransi di bawah 5%. Ini menunjukkan kamera dan sistem penggerak bekerja cukup stabil.

Tabel 6. Pengujian Sampah *Ferro*

<i>Right Encoder</i>	<i>Left Encoder</i>	<i>Average Encoder</i>	Jarak Pembacaan (Cm)	Jarak Aktual (Cm)	Selisih (Cm)	<i>Error (%)</i>
875	871	873	82,23	82	0,23	0,28
878	875	876	82,51	82	0,51	0,62
874	868	871	82,04	82	0,04	0,04
875	874	874	82,33	82	0,33	0,40
877	880	878	82,70	82	0,70	0,85
878	886	882	83,08	82	1,08	1,31
Rata-rata <i>error</i>						0,58
Akurasi				100 - 0,34 = 99,42 %		

Pada Tabel 6 nilai jarak pembacaan bervariasi antara 82,04 cm hingga 83,08 cm, sementara jarak aktual konstan di 82 cm. Selisih terbesar sebesar 1,08 cm terjadi pada percobaan ke-6, menghasilkan *error* sebesar 1,31%, sedangkan selisih terkecil hanya 0,04 cm dengan *error* 0,04% pada percobaan ke-3. Rata-rata *error* keseluruhan adalah 0,58%, yang menunjukkan sistem masih bekerja dan memiliki akurasi 99,42%.



Gambar 16. Grafik Pengujian pada Sampah Ferro

Grafik 16 terlihat nilai pembacaan *encoder* cenderung lebih tinggi dari nilai aktual, khususnya pada percobaan ke-6 yang menunjukkan deviasi paling signifikan. Garis merah putus-putus menunjukkan nilai *error* yang meningkat pada percobaan ke-5 dan ke-6.

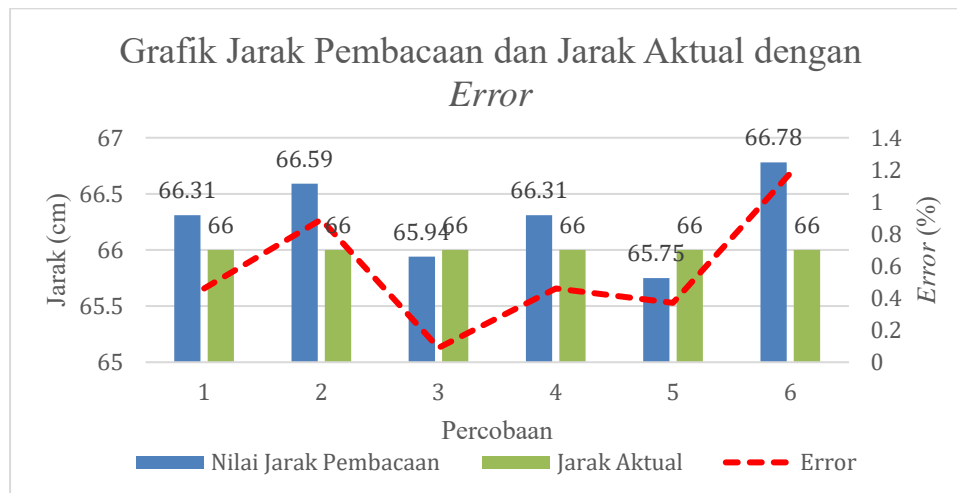
### Pengujian Akurasi Perhitungan Jarak pada Jenis Sampah Kertas

Sampah kertas diuji untuk mengevaluasi akurasi navigasi robot saat mendeteksi dan bergerak menuju tempat sampah jenis kertas. Hasil perhitungan *encoder* menunjukkan *error* yang kecil dari jarak pembacaan terhadap jarak aktual.

Tabel 7. Pengujian Sampah Kertas

<i>Right Encoder</i>	<i>Left Encoder</i>	<i>Average Encoder</i>	Jarak Pembacaan (Cm)	Jarak Aktual (Cm)	Selisih (Cm)	<i>Error (%)</i>
697	712	704	66,31	66	0,31	0,46
701	713	707	66,59	66	0,59	0,89
691	710	700	65,94	66	0,06	0,09
697	711	704	66,31	66	0,31	0,46
690	706	698	65,75	66	0,25	0,37
703	716	709	66,78	66	0,78	1,18
Rata-rata <i>error</i>						0,57
Akurasi				100 - 0,34 = 99,43 %		

Tabel 7 Jarak pembacaan dibandingkan dengan jarak aktual yaitu 66 cm. Dari enam percobaan, selisih antara pembacaan dan jarak sebenarnya sangat kecil, dengan *error* berkisar antara 0,09% hingga 1,18%. Rata-rata *error* hanya 0,57%, sehingga sistem memiliki akurasi tinggi sebesar 99,43%.



Gambar 17. Grafik Pengujian pada Sampah Kertas



Gambar 17 menunjukkan hasil pembacaan sangat dekat dengan jarak sebenarnya, dan hanya pada percobaan ke-6 *error* sedikit lebih tinggi. Pola *error* mengalami fluktuasi kecil, namun masih tergolong rendah dan konsisten, menandakan sistem dapat bekerja.

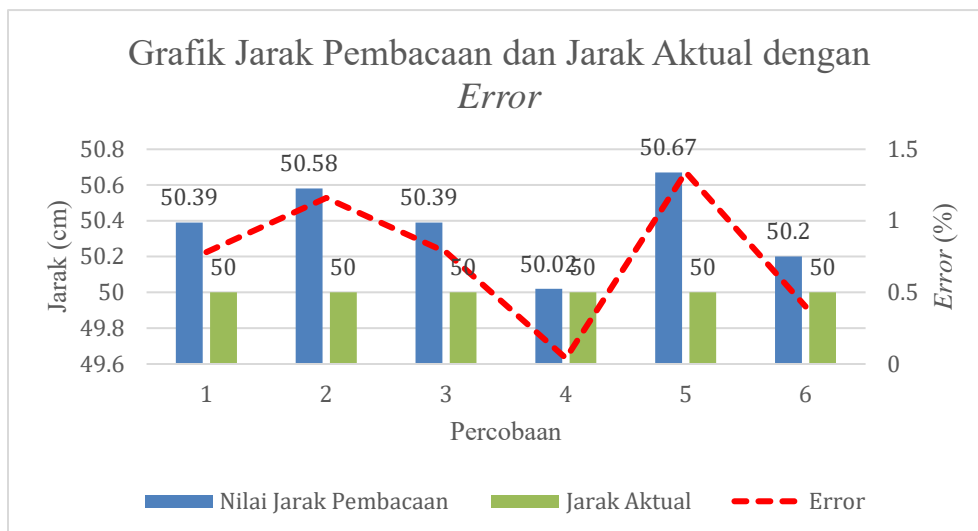
**Pengujian Akurasi Perhitungan Jarak pada Jenis Sampah Nonferro**

Sampah *nonferro* diletakkan pada posisi tetap sejauh 50 cm dari titik referensi awal robot. Sistem menggerakkan robot hingga mencapai tempat sampah *nonferro* dari nilai *encoder* pada roda kiri dan kanan.

**Tabel 8.** Pengujian Sampah *Nonferro*

<i>Right Encoder</i>	<i>Left Encoder</i>	<i>Average Encoder</i>	Jarak Pembacaan (Cm)	Jarak Aktual (Cm)	Selisih (Cm)	<i>Error</i> (%)
531	539	535	50,39	50	0,39	0,78
532	543	537	50,58	50	0,58	1,16
532	539	535	50,39	50	0,39	0,78
531	532	531	50,02	50	0,02	0,04
532	545	538	50,67	50	0,67	1,34
530	537	533	50,20	50	0,20	0,40
Rata-rata <i>error</i>						0,75
Akurasi				100 - 0,34 = 99,25 %		

Tabel 8 hasil pengujian sampah nonferro dari enam percobaan. Didapat *error* berkisar antara 0,04% hingga 1,34%, dengan rata-rata *error* sebesar 0,75%, sehingga akurasi sistem dalam mendeteksi sampah *nonferro* adalah 99,25%.



**Gambar 18.** Grafik Pengujian pada Sampah *Nonferro*

Grafik pada Gambar 18 terlihat hasil pembacaan cukup dekat dengan jarak sebenarnya, walaupun ada sedikit variasi, terutama pada percobaan ke-2 dan ke-5 yang



memiliki *error* paling tinggi. Secara keseluruhan, sistem tetap mampu mendeteksi posisi sampah *nonferro* dengan baik dan cukup akurat.

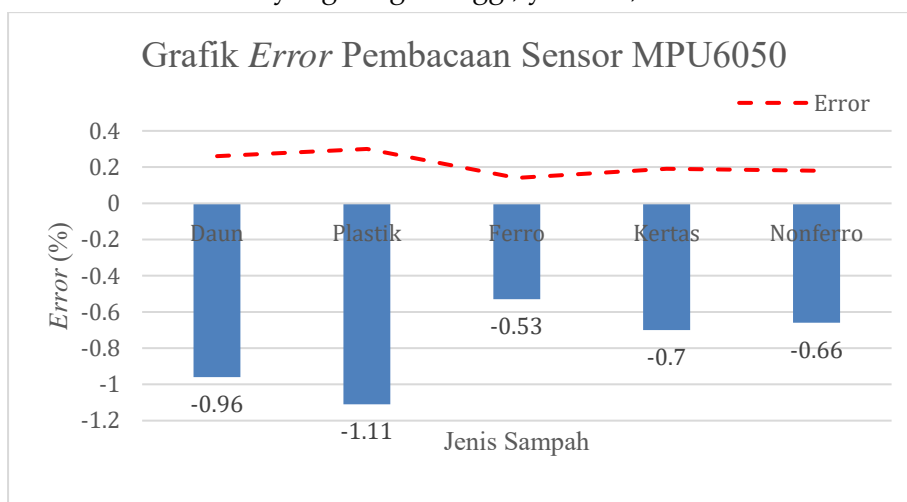
### Pengujian Sensor MPU6050 Menuju Tempat Sampah

Pengujian ini mengevaluasi kemampuan sensor dalam mendeteksi orientasi sudut pergerakan robot menuju tempat sampah setelah mendeteksi jenis sampah tertentu. Pergerakan robot dikendalikan berdasarkan data posisi dan arah dari sensor MPU6050.

**Tabel 9.** Pengujian Sensor MPU6050 Menuju Tempat Sampah

Jenis Sampah	Sudut Target (°/s)	Sudut Pembacaan Sensor(°/s)	Selisih (°/s)	Error (%)
Daun	0	-0,96	0,96	0,26
Plastik	0	-1,11	1,11	0,3
<i>Ferro</i>	0	-0,53	0,53	0,14
Kertas	0	-0,7	0,7	0,19
<i>Nonferro</i>	0	-0,66	0,66	0,18
Rata-rata <i>error</i>				0,21
Akurasi			100 - 0,21 = 99,79 %	

Pada Tabel 9 setiap jenis sampah memiliki target sudut yaw sebesar 0°, namun sudut pembacaan aktual menunjukkan adanya sedikit penyimpangan. Pembacaan sudut sensor sangat dekat dengan target, dengan error terkecil pada jenis *ferro* (0,14%) dan terbesar pada plastik (0,30%). Secara keseluruhan, rata-rata error hanya 0,21%, menghasilkan akurasi sistem yang sangat tinggi, yaitu 99,79%.



**Gambar 19.** Grafik *Error* Sensor MPU6050 Menuju Tempat Sampah

Pada Gambar 19 grafik batang menunjukkan sudut pembacaan aktual dari sensor, sementara garis putus-putus merah menggambarkan nilai *error*. Terlihat bahwa *error*



tertinggi terdapat pada sampah plastik, sedangkan *error* terendah pada ferro, namun secara umum semua nilai *error* berada di bawah 1%.

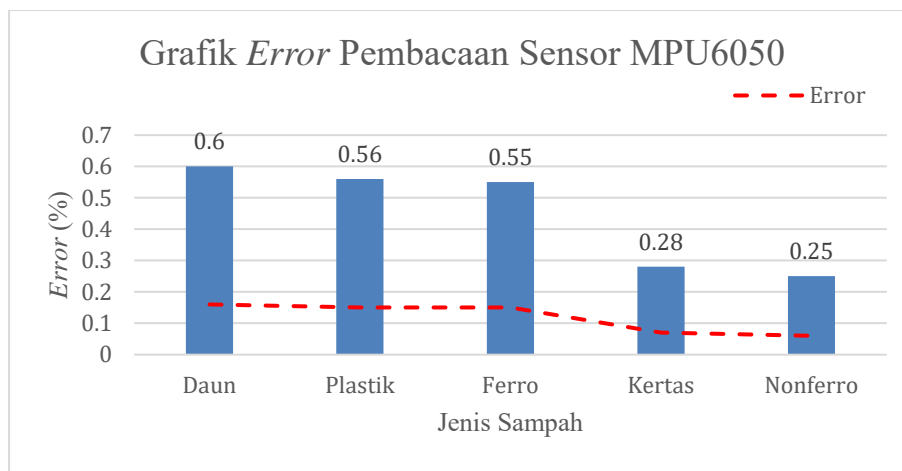
### Pengujian Sensor MPU6050 Menuju Tempat *Home*

Pengujian ini dilakukan untuk mengamati kemampuan sistem navigasi robot dalam kembali ke posisi awal setelah menyelesaikan misi. Akurasi pembacaan orientasi oleh sensor, terhadap sudut *yaw*, guna memastikan bahwa arah pergerakan robot kembali sesuai dengan arah semula.

**Tabel 10.** Pengujian Sensor MPU6050 Menuju Tempat *Home*

Jenis Sampah	Sudut Target (°/s)	Sudut Pembacaan Sensor(°/s)	Selisih (°/s)	Error (%)
Daun	0	0.6	0.6	0,16
Plastik	0	0.56	0.56	0,15
<i>Ferro</i>	0	0,55	0,55	0,15
Kertas	0	0,28	0,28	0,07
<i>Nonferro</i>	0	0,25	0,25	0,06
Rata-rata <i>error</i>				0,11
Akurasi			100 - 0,21 = 99,89 %	

Berdasarkan Tabel 10, setiap jenis sampah memiliki sudut target sebesar 0°, mengindikasikan bahwa robot diharapkan kembali tepat ke arah semula. *Error* tertinggi terjadi pada jenis daun (0,16%), sedangkan *error* terendah ada pada *nonferro* (0,06%). Rata-rata *error* dari seluruh pengujian adalah 0,11%, menghasilkan tingkat akurasi sebesar 99,89%.



**Gambar 20.** Grafik *Error* Sensor MPU6050 Menuju Tempat *Home*

Pada Gambar 20 ditampilkan garis merah putus-putus mewakili tren *error* yang rendah dan cenderung menurun. Terlihat bahwa *error* tertinggi terdapat pada sampah



daun, sedangkan *error* terendah pada *nonferro*, namun secara umum semua nilai *error* berada di bawah 1%.

### Pengujian Ketahanan Baterai

Pengujian ketahanan baterai bertujuan untuk mengetahui seberapa lama robot dapat beroperasi secara terus-menerus menggunakan baterai Li-Po 11.1V berkapasitas 5200 mAh. Semua komponen elektronik, seperti motor DC, motor encoder, sensor MPU6050, driver BTS7960, dan LCD I2C, mendapatkan suplai dari baterai melalui stepdown converter XL4005 yang memiliki efisiensi sekitar 90%.

**Tabel 11.** Spesifikasi Konsumsi Komponen (*Data Sheet*)

Komponen	Tegangan (V)	Arus (A)	Keterangan
Encoder Motor	3,3 - 5	~0,05 - 0,15	Dari <i>stepdown</i>
MPU6050	3,3 - 5	~0.0036	Dari <i>stepdown</i>
BTS7960	3,3 - 5	~0.0003	Dari <i>stepdown</i> (kendali motor)
LCD I2C	3,3 - 5	~0.0008	Dari <i>stepdown</i> ( <i>backlight</i> )
Stepdown XL4005	5 - 32	~0,5 - 5	Efisiensi 90%
Motor DC	12	~0,3 - 1,3	Tergantung torsi dan beban

Tegangan keluaran dari stepdown disesuaikan berdasarkan kebutuhan masing-masing komponen, sebagaimana tercantum pada Tabel 11. Pengukuran dilakukan dengan mencatat penurunan tegangan dan kapasitas baterai secara bertahap tiap menit selama robot dioperasikan dalam kondisi normal (bergerak dan pendeteksian sampah).

**Tabel 12.** Pengujian Ketahanan Baterai

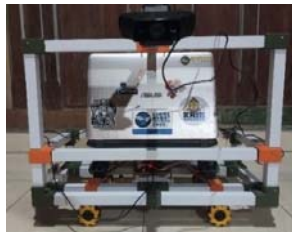
Waktu Operasi (menit)	Tegangan (V)	Arus (A)	Kapasitas Tersisa (%)
0	12,2	0,17 - 0,25	100
1	12,2	0,17 - 0,25	100
2	12,2	0,17 - 0,25	100
3	12,2	0,17 - 0,25	100
4	12,2	0,17 - 0,25	100
5	12,1	0,17 - 0,25	99,18
Waktu Operasi Aman Baterai			76 Menit

Berdasarkan Tabel 12, baterai menunjukkan performa stabil selama 5 menit pengujian, dengan tegangan tetap 12,2 V dan arus antara 0,17–0,23 A. Kapasitas turun dari 100% menjadi 99,18%, atau berkurang 0,82% dalam 5 menit, setara dengan penurunan sekitar 0,164% per menit. Dengan kapasitas baterai 5200 mAh dan hanya 80% yang digunakan agar lebih awet (4160 mAh), maka waktu operasi aman diperkirakan sekitar 76 menit atau 1 jam 16 menit.

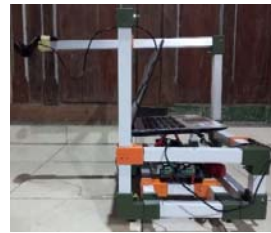


## PEMBAHASAN

Robot pemilah sampah (KRTMI) memiliki dimensi panjang 60 cm, lebar 30 cm, dan tinggi 60 cm. Berat awal robot tanpa perangkat tambahan adalah 4,75 kg, dan menjadi 6,15 kg setelah dipasang laptop. Kerangka utama robot dibuat dari bahan *hollow stainless steel* setebal 0,8 mm, sedangkan sambungan antar bagian menggunakan *filament PLA+* setebal 4 mm. Tampilan fisik dan susunan perangkat keras robot ditunjukkan pada Gambar 8.



8a. Tampak Depan



8b. Tampak Samping

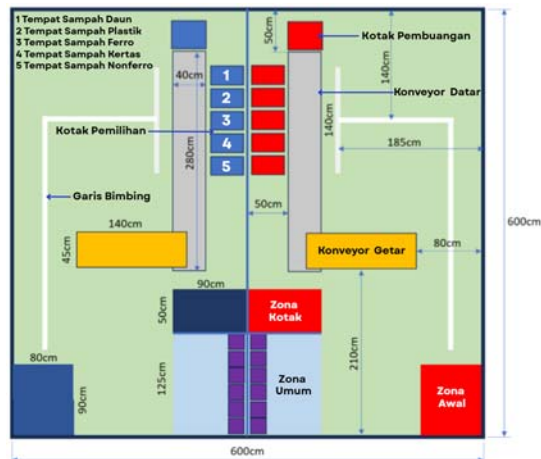


8c. Tampak Atas

**Gambar 8.** Fisik Robot Pemilah Sampah

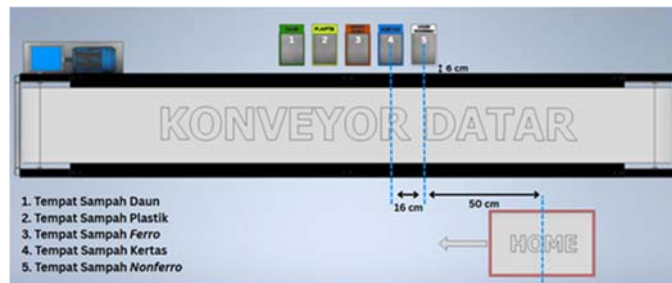
Gambar 8 menunjukkan bentuk fisik robot pemilah sampah dari tampak depan, samping, dan atas. Dari depan terlihat kerangka robot dan kamera di bagian atas untuk mendeteksi sampah. Tampak samping memperlihatkan posisi laptop di atas dan roda penggerak di bawah. Tampak atas menunjukkan susunan komponen seperti kamera, laptop, dan roda, serta jalur gerak robot.





**Gambar 9.** Arena Perlombaan KRTMI 2024

Gambar 9 ilustrasi visual arena perlombaan KRTMI dalam melakukan misi memilah, mengambil hingga melakukan pembuangan sampah ke tempat sampah. Area yang digunakan untuk pengujian pada zona dekat konveyor datar.



**Gambar 10.** Arena Uji Coba

Arena uji coba ditunjukkan pada Gambar 10 dengan ukuran yang disesuaikan dengan arena sesungguhnya. Perbedaan utama terletak pada penambahan area home sebagai titik awal robot dan lokasi awal pendeteksian sampah. Misi robot adalah bergerak ke sisi kanan dan kiri untuk ke tempat yang sesuai berdasarkan jenisnya.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan implementasi, sistem robot pemilah sampah berbasis *image processing* dan navigasi *encoder* berhasil dioperasikan secara mandiri. Robot mampu mendeteksi lima jenis sampah secara akurat dengan *confidence score* > 0,78 dan akurasi klasifikasi yang stabil. Akurasi perhitungan jarak berbasis *encoder* menunjukkan nilai *error* rata-rata < 1%, serta orientasi arah gerak berdasarkan sensor MPU6050 menunjukkan akurasi > 99,7%. Sistem kontrol PID menjaga kestabilan gerak robot secara efektif dalam berbagai skenario. Pengujian ketahanan menunjukkan bahwa robot dapat beroperasi selama  $\pm 76$  menit dengan satu kali pengisian daya baterai. Secara keseluruhan,



sistem ini membuktikan bahwa kombinasi pengolahan citra, kendali motor *encoder*, dan sensor inersia dapat diimplementasikan secara efektif untuk pemilahan sampah otomatis. Hasil ini tidak hanya memenuhi kebutuhan fungsional robot pemilah, tetapi juga menunjukkan potensi untuk diterapkan dalam kompetisi robotika seperti Kontes Robot Indonesia (KRI) 2025, maupun dalam solusi nyata untuk mendukung pengelolaan sampah cerdas.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah. Penulis mengucapkan puji syukur kepada Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan ini dengan baik. Shalawat dan salam juga tidak lupa tucurahkan kepada Nabi besar Muhammad SAW. Dengan terselesaikannya naskah publikasi ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan saudara saya yang telah memberikan dukungan dan doa, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan lancar.
2. Dosen pembimbing penelitian ini, Ibu Umi Fadlilah, S.T., M. Eng., Ph.D yang telah memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis dalam penyelesaian penelitian tugas akhir ini.
3. Bapak/Ibu dosen Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu dan bimbingan selama perkuliahan, sehingga membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini tanpa kendala berarti.
4. Komunitas Robot Research UMS, yang telah menjadi tempat bagi penulis untuk mengembangkan ilmu yang diperoleh selama kuliah.
5. Terima kasih kepada Catur, Harry, Khalid, dan Helmi yang telah membantu dan menemani penulis dalam mengerjakan penelitian ini.
6. Terima kasih kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas dukungan yang telah diberikan kepada penulis selama masa akhir kuliah. Penulis berterima kasih atas pelajaran yang telah membuatnya lebih dewasa dan membantu dalam memahami bahwa kehilangan adalah bagian dari proses kehidupan.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Sutariyono *et al.*, "Pemantapan Sumber Daya Manusia (SDM) dalam Peningkatan Kesejahteraan Masyarakat Pengelola Sampah di Pasar Ciputat," *J. Pengabd. Masy. Nusant. (Pengabmas Nusantara)*, vol. 2, no. 2, pp. 08–17, 2020, doi: 10.57214/pengabmas.v2i2.519.
- [2] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, "KLHK Ajak Masyarakat 'Gaya Hidup Minim Sampah' dalam Festival LIKE 2." Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/7818/klhk-ajak-masyarakat->



- gaya-hidup-minim-sampah-dalam-festival-like-2
- [3] Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional, "Data Pengelolaan Sampah." Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/timbulan>
- [4] C. Rahmawati, B. L. Nopitasari, S. Mardiyah WD, A. K. Wardani, and B. Nurbaety, "Penyuluhan Pengelolaan Sampah Plastik Menuju 'Zero Waste Kampus Ummat,'" *SELAPARANG J. Pengabd. Masy. Berkemajuan*, vol. 3, no. 2, p. 196, 2020, doi: 10.31764/jpmb.v3i2.1689.
- [5] R. B. Prihatin, "Pengelolaan Sampah di Kota Bertipe Sedang: Studi Kasus di Kota Cirebon dan Kota Surakarta," *Aspir. J. Masal. Sos.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–16, 2020, doi: 10.46807/aspirasi.v11i1.1505.
- [6] F. Liyani, A. R. Annisa, A. Al Farouq, and R. Y. Adhitya, "Perancangan Sistem Sortir Limbah Plastik Warna Berdasarkan Warna Menggunakan PLC," *J. Comput. Electron. Telecommun.*, vol. 4, no. 1, 2023, doi: 10.52435/complete.v4i1.365.
- [7] M. Hanif, A. Razaq, S. Sendari, M. Leo, and A. P. Alvina, "Penggunaan Robot Arm Sebagai Upaya Otomasi dan Optimalisasi Pemilahan Sampah pada Industri Sirkular Ekonomi," *J. Sci. Res. Dev.*, vol. 6, no. 1, pp. 1774–1783, 2024.
- [8] B. Kusumoputro *et al.*, "Pedoman Kontes Robot Indonesia (KRI) Pendidikan Tinggi Tahun 2024," *Kementeri. Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknol.*, pp. 1–164, 2024.
- [9] F. A. Salsabilla, I. Siradjuddin, and T. Winarno, "Position Based Visual Servoing untuk Robot Sepak Bola Beroda Menggunakan Kamera Omni," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 11, no. 1, pp. 14–23, 2024, doi: 10.33795/elkolind.v11i1.3467.
- [10] Sihono *et al.*, "Robot Navigasi Odometry Dengan Antarmuka Myrio," *Semin. Has. Penelit. dan Pengabd. Masy. Polines*, vol. 3, pp. 87–100, 2020.
- [11] M. F. Ridho, A. Z. Abidin, and B. Septian, "Integrasi Odometri LiDAR dan Sensor IMU untuk Peningkatan Lokalisasi pada Robot Bergerak Indoor," *Blend Sains J. Tek.*, vol. 2, no. 4, pp. 287–297, 2024, doi: 10.56211/blendsains.v2i4.470.
- [12] A. Habibi, I. M. B. Sukmadana, and B. Darmawan, "Perbandingan Efektivitas Pengendalian Robot Dengan Penggunaan PID dan Tanpa PID pada Aplikasi Jarak Tertentu," *J. Inform. Teknol. dan Sains*, vol. 6, no. 4, pp. 813–819, 2024.
- [13] S. Setiawan, E. D. Marindani, and B. W. Sanjaya, "Perancangan dan Implementasi Robot Tiga Roda Omnidirectional Berbasis Koordinat Kartesian Menggunakan Metode Odometri dan Potential Field," *J. Glob. Ilm.*, vol. 1, no. 9, pp. 489–507, 2024.
- [14] A. N. Ranaminanta, D. Nurcipto, and M. A. Heryanto, "Pemetaan Ruang Dua Dimensi Menggunakan Sensor Lidar 360 Derajat Pada Mobile Robot," *J. Tek. Elektro dan Komputasi*, vol. 4, no. 1, pp. 30–38, 2022, [Online]. Available: <http://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/ELKOM/article/view/6949>
- [15] F. I. Pasaribu and M. Reza, "Design and Build an Arduino-Based Charging Station Using 50 WP Solar Cells," *R E L E (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 3, no. 2, pp. 46–55, 2021.

