

## Integrasi Robot Lengan Beroda Holonomic dan Pengindraan Visual Menggunakan YOLOv5 untuk Pemilah Sampah

Ali Rizal Chaidir<sup>\*1</sup>, Dedy Wahyu Herdiyanto<sup>2</sup>, Khairul Anam<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jawa Timur, Indonesia

e-mail: <sup>\*1</sup>ali.rizal@unej.ac.id, <sup>2</sup>dedy.wahyu@unej.ac.id, <sup>3</sup>khairul@unej.ac.id

### Abstrak

Permasalahan pengelolaan sampah menjadi salah satu topik yang menjadi perhatian, khususnya dalam proses pemilahan sampah yang memerlukan tenaga manusia dengan risiko higienitas dan ketidakakuratan. Beberapa teknologi telah dicoba untuk menyelesaikan masalah tersebut. Robot lengan dengan pengindraan visual adalah salah satu yang banyak digunakan, beberapa permasalahannya adalah area kerja yang terbatas dan proses instalasi yang relatif kompleks. Penelitian ini mengembangkan robot pemilah sampah berbasis robot beroda holonomic dengan integrasi pengindraan visual dan algoritma YOLOv5 untuk klasifikasi sampah. Robot dilengkapi vacuum gripper untuk pengambilan dan peletakan sampah, serta sensor untuk navigasi dan kontrol posisi. Uji coba dilakukan pada empat jenis sampah, yaitu botol, daun, logam, dan kertas. Hasil penelitian menunjukkan tingkat keberhasilan akurasi klasifikasi mencapai 100%, dengan rata-rata keberhasilan peletakan sampah sebesar 90% untuk daun dan kertas, serta 80% untuk botol, yang dipengaruhi oleh faktor permukaan sampah dan konsistensi posisi robot. Sistem robot ini menunjukkan peningkatan efisiensi dan akurasi dibandingkan metode manual, meskipun terdapat ruang untuk perbaikan pada aspek gripping dan sinkronisasi gerakan robot. Secara keseluruhan, sistem robot menunjukkan performa dengan akurasi di atas 80% dengan area kerja yang lebih luas dibandingkan jika menggunakan robot lengan.

**Kata kunci**— klasifikasi sampah, pengindraan visual, robot holonomic

### Abstract

The issue of waste management has become a critical topic, particularly in the sorting process, which relies on human labor and poses hygiene risks and inaccuracy. Several technologies have been explored to address this problem, including robotic arms with visual sensing, which are widely used but face challenges such as limited working areas and relatively complex installation processes. This study develops a waste-sorting robot based on a holonomic-wheeled robot integrated with visual sensing and the YOLOv5 algorithm for waste classification. The robot is equipped with a vacuum gripper for waste pickup and placement, as well as sensors for navigation and position control. Tests were conducted on four types of waste: bottles, leaves, metals, and paper. The results demonstrate a classification accuracy rate of 100%, with an average waste placement success rate of 90% for leaves and paper, and 80% for bottles, influenced by the surface characteristics of the waste and the consistency of the robot's positioning. This robotic system offers enhanced efficiency and accuracy compared to manual methods, although there remains room for improvement in the gripping mechanism and synchronization of the robot's movements. Overall, the robot system shows performance with accuracy above 80% with a wider working area than using a robot arm.

**Keywords**— holonomic robot, visual sensing, waste classification

## 1. PENDAHULUAN

Sampah merupakan masalah lingkungan yang sangat serius yang umum dihadapi oleh masyarakat [1]. Sampah rumah tangga baik organik maupun anorganik dihasilkan setiap hari. Salah satu cara pengelolaan sampah yang relatif mudah adalah dengan memilah sampah sesuai jenisnya, yaitu sampah organik, anorganik dan residu, yang masing-masing memerlukan penanganan yang berbeda [2]. Proses pemilah sampah merupakan suatu permasalahan yang dapat dikatakan cukup kompleks, permasalahan tersebut perlu diatasi dalam beberapa tahap untuk pemulihan limbah secara efisien [3] [4]. Setelah pemilik barang menentukan barang yang perlu dibuang, tahap proses berikutnya adalah memisahkan berdasarkan jenis sampah untuk kemudian diproses menjadi fungsi tertentu. Jenis sampah menentukan teknik yang digunakan untuk mendaur ulang sampah tersebut. Proses panjang tersebut membutuhkan tenaga yang tidak sedikit, diantara alasannya adalah pekerjaan tersebut adalah pekerjaan yang tidak higienis dan berulang, sehingga dalam prosesnya dapat menyebabkan ketidakakuratan pemisahan sampah, permasalahan tersebut diharapkan dapat terselesaikan menggunakan teknologi [5][6], menemukan cara efisien sistem pengelolaan sampah yang cerdas merupakan tantangan saat ini [7][8].

Robot adalah teknologi yang dapat digunakan untuk membantu manusia mengerjakan pekerjaan berulang tanpa lelah dan dapat bekerja sesuai dengan lingkungannya. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menghasilkan robot pemisah sampah berdasarkan jenis sampah, terdapat teknik yang menggunakan AI untuk klasifikasi jenis sampah [9][10] dan sensor [11][12], sortir pneumatik [13], menggunakan kamera di atas meja sampah dengan robot lengan untuk memilah sampah [14]. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan tersebut, terdapat beberapa parameter yang digunakan untuk menentukan metode yang perlu digunakan, yaitu penggunaan jenis robot yang berdampak pada kecepatan pemisahan sampah [15], penggunaan jenis gripper [16], penggunaan dan posisi kamera untuk mengidentifikasi jenis sampah agar lebih fleksibel [17], serta penggunaan algoritma untuk meningkatkan akurasi pengenalan jenis sampah [18][19]. Penggunaan robot lengan memiliki keterbatasan jangkauan area kerja, posisi atau peletakkan kamera mempengaruhi jangkauan area visual robot, dan algoritma pengindraan visual yang sesuai dengan permasalahan akan memberikan akurasi pemilahan yang tinggi. Selain itu penggunaan jenis *gripper* pada *end effector* robot memberikan pengaruh terhadap keberhasilan pengambilan dan peletakkan sampah pada tempatnya. Beberapa teknologi pemilah sampah memiliki kerumitan dalam proses instalasinya [20].

Robot pada penelitian ini menggunakan robot beroda holonomic yang dapat bergerak dalam semua arah secara langsung [21][22]. Salah satu robot beroda holonomic adalah robot yang menggunakan roda jenis mecanum [23] [24]. Robot pada penelitian ini disertai dengan kamera yang diletakkan pada robot. Robot juga dilengkapi dengan *gripper* berupa *vacuum gripper* pada *end effector*nya. Yolov5 dimanfaatkan untuk membantu algoritma pengindraan visual untuk mendeteksi objek dan melakukan klasifikasi [25]. Penggunaan perangkat keras dan lunak tersebut bertujuan untuk memberikan dampak terhadap kinerja robot, yaitu jangkauan area kerja lebih luas, area visual robot lebih *mobile*, serta peningkatan akurasi penentuan jenis, pengambilan serta peletakkan sampah.

## 2. METODE PENELITIAN

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan robot yang dapat memilah sampah berdasarkan jenisnya. Terdapat beberapa kelemahan yang dapat dilihat dari beberapa penelitian tersebut. Seperti penggunaan jenis mekanik robot yang menyebabkan area kerja robot menjadi terbatas dan kurangnya akurasi pengambilan dan peletakkan sampah, serta penggunaan algoritma untuk mendeteksi objek, menentukan posisi, serta melakukan klasifikasi jenis sampah. Berdasarkan hal tersebut terdapat beberapa bagian yang perlu dikembangkan.

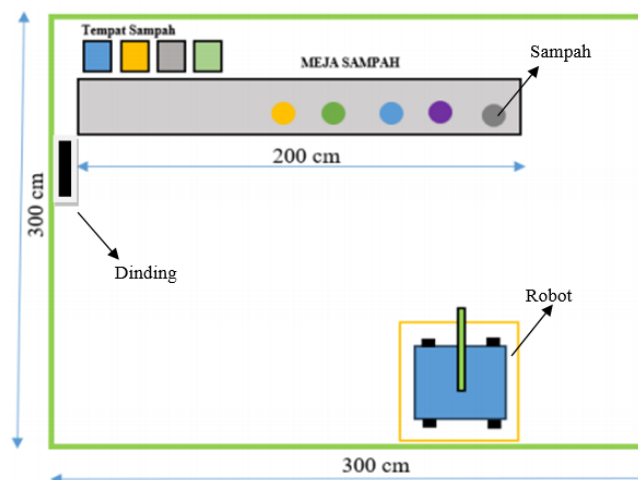
### 2.1 Perancangan Mekanik dan Lingkungan Kerja Robot

Sistem mekanik robot menentukan kinerja dan algoritma serta rangkaian elektronika yang diperlukan. Gambar 1 merupakan desain mekanik robot yang memiliki lebar sekitar 40 cm dan tinggi 110 cm. *Webcam* terletak pada robot yaitu berada di bagian atas yang berfungsi untuk mendeteksi adanya sampah di meja dengan cara diberi penyangga pada kamera supaya memperkokoh kamera agar tidak jatuh. Selain itu robot ini dilengkapi dengan sensor ping untuk mengatur jarak dengan meja dan menandai jarak setiap tempat sampah. Aktuator robot terdiri dari 2 servo, motor pg36, dan motor stepper nema 17.



Gambar 1. Mekanik Robot

Lingkungan kerja robot ditetapkan berdasarkan tugas yang harus dikerjakan. Lingkungan robot untuk memilah sampah ditunjukkan pada Gambar 2. Lingkungan kerja tersebut menggunakan alas berupa karpet dan meja berwarna hitam sebagai tempat objek sampah. Lingkungan kerja memiliki ukuran lebar 300 cm dan panjang 300 cm, serta berwarna hijau. Di samping meja tempat sampah terdapat tempat sampah yang berjumlah 4 kotak dengan ukuran tempat sampah 25x20x36 cm, jumlah kotak tersebut sesuai dengan jenis sampah yang diklasifikasi. Robot bernavigasi di lingkungan kerja ini, robot dapat mengetahui posisi setiap tempat sampah berdasarkan jarak antar robot dengan dinding di sebelah kirinya ketika robot menghadap meja sampah, jarak antara dinding dan tempat sampah secara berurutan adalah 35 cm, 55 cm, 75 cm, 95 cm.

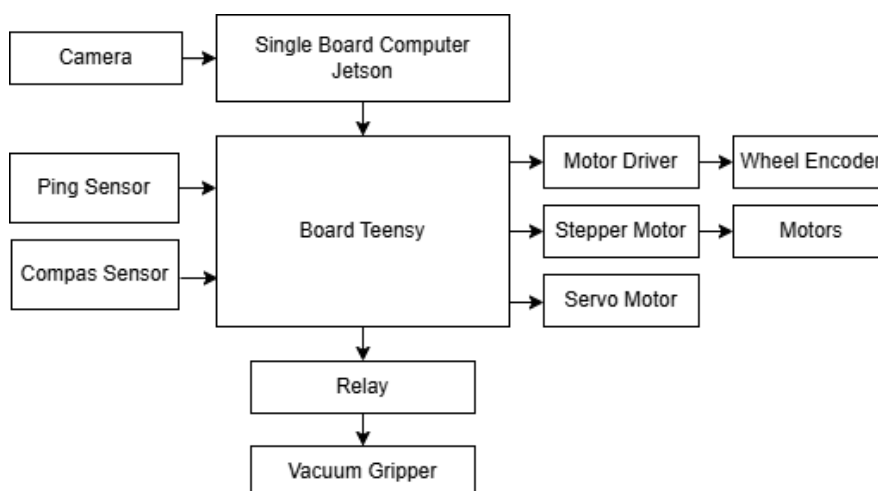


Gambar 2. Lingkungan Kerja Robot

## 2. 2 Blok Diagram dan Rangkaian Elektronika

Blok diagram yang digunakan ditunjukkan Gambar 3. Blok diagram tersebut menunjukkan arsitektur sistem yang terdiri dari berbagai komponen perangkat keras dan fungsinya. *Single board computer* (SBC) digunakan untuk menerima data citra dari kamera, fungsinya adalah untuk memproses data dari kamera dan digunakan untuk analisa visual dan melakukan klasifikasi objek melalui deteksi objek. *Board teensy* digunakan untuk menerima data dari SBC untuk diteruskan ke *driver* motor, board ini cocok untuk aplikasi yang membutuhkan pemrosesan data *real-time* dan kontrol presisi [26]. *Board teensy* juga menerima data dari ping sensor, sensor ini digunakan untuk memastikan robot bernavigasi disekitar meja sampah. Selain sensor ping, terdapat sensor kompas yang digunakan untuk menentukan orientasi robot [27][28]. Sedangkan untuk *outputnya* terdiri dari motor *driver* untuk mengontrol motors untuk pergerakan robot, *wheel encoder* untuk membaca kecepatan atau posisi roda, stepper motor untuk untuk menggerakkan *vaccum gripper* robot yang dimanfaatkan untuk mengambil dan meletakkan sampah, servo motor untuk kontrol posisi naik turun *vaccum gripper*, dan relay untuk mengaktifkan dan mematikan fungsi *vacuum gripper*.

Sistem ini dirancang untuk menjalankan berbagai fungsi yang melibatkan pengolahan data sensor, kontrol motor, dan manipulasi objek. Jetson melakukan pemrosesan tingkat tinggi (seperti visi komputer), sementara *Board Teensy* menangani pengendalian aktuator dan interaksi langsung dengan sensor dan perangkat *output*.

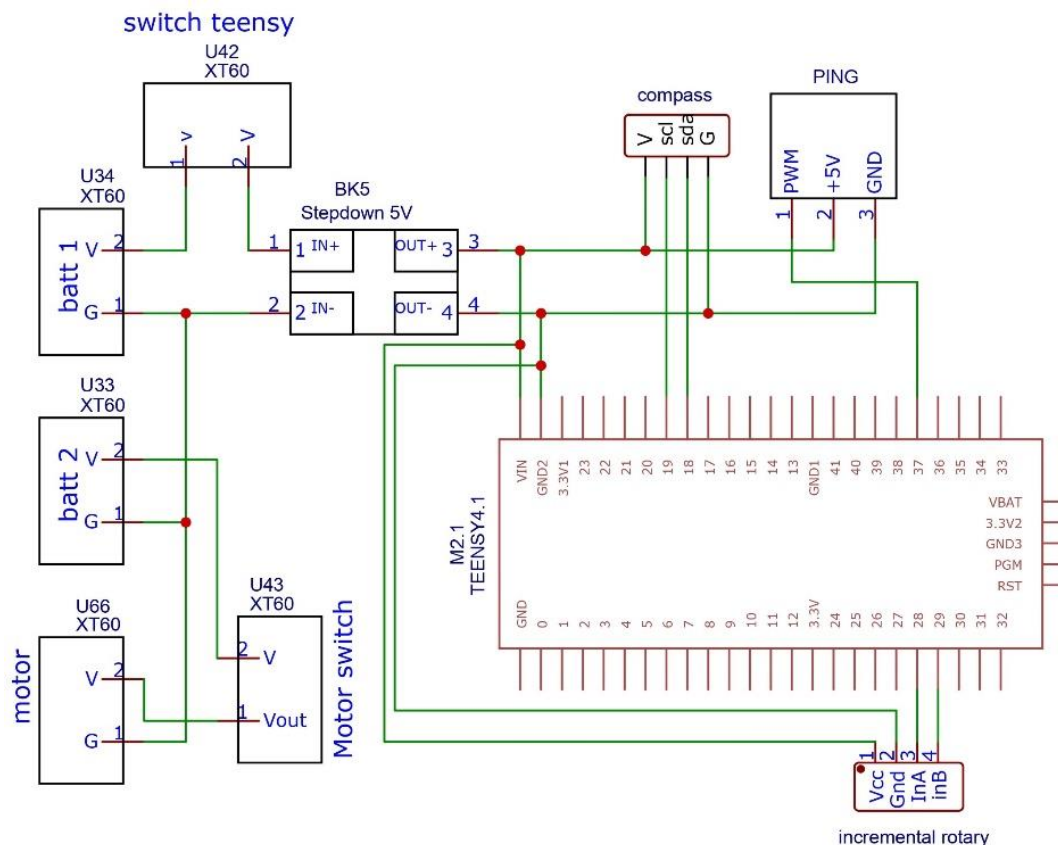


Gambar 3. Blok Diagram

Berdasarkan blok diagram yang telah ditentukan, kemudian blok diagram tersebut diturunkan menjadi rangkaian elektronika untuk mengaktifkan semua perangkat yang digunakan pada blok diagram tersebut. Rangkaian yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4 dan 5. Gambar 4 merupakan rangkaian yang menunjukkan pengkabelan antara Teensy 4.1 dengan perangkat input, sedangkan Gambar 5 merupakan rangkaian yang menunjukkan pengkabelan antara Teensy 4.1 dengan perangkat output. Rangkaian pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa sistem elektronika berbasis mikrokontroler Teensy 4.1, yang dirancang untuk mengintegrasikan beberapa komponen utama, seperti sumber daya, sensor, dan aktuator, guna mendukung operasional perangkat keseluruhan. Sumber daya sistem berasal dari dua baterai (Batt 1 dan Batt 2) yang masing-masing memiliki koneksi melalui terminal XT60. Baterai ini terhubung ke rangkaian melalui step-down converter (BK5), yang mengatur tegangan menjadi 5V untuk memastikan daya terdistribusi ke berbagai komponen, termasuk mikrokontroler Teensy. Tegangan keluaran dari step-down converter juga digunakan untuk mengoperasikan beberapa modul eksternal, seperti sensor dan motor.

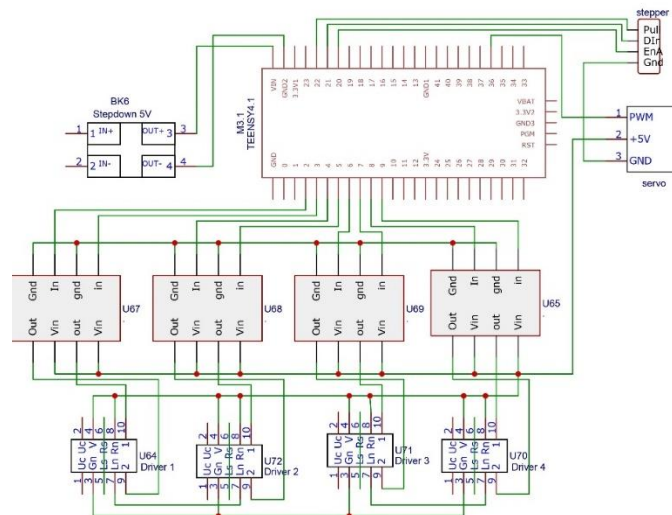
Komponen sensor yang terhubung dengan Teensy dapat terlihat meliputi Sensor kompas yang terhubung melalui koneksi I2C, sensor ini terhubung melalui jalur VCC, SCL, SDA, dan GND, yang digunakan untuk membaca orientasi arah berdasarkan medan magnet bumi. Sensor lainnya adalah sensor jarak ultrasonik (PING), sensor ini terhubung melalui pin pin digital, +5V, dan GND, berfungsi untuk mengukur jarak objek menggunakan gelombang ultrasonik.

Seluruh komponen dirancang untuk terhubung langsung ke mikrokontroler Teensy 4.1 melalui pin I/O digital dan analog, yang menyediakan komunikasi data antara sensor, aktuator, dan pengolah data utama. Mikrokontroler ini juga mendapatkan suplai daya dari rangkaian step-down melalui pin VIN dan GND.



Gambar 4. Rangkaian antara Teensy 4.1 dengan Perangkat Input

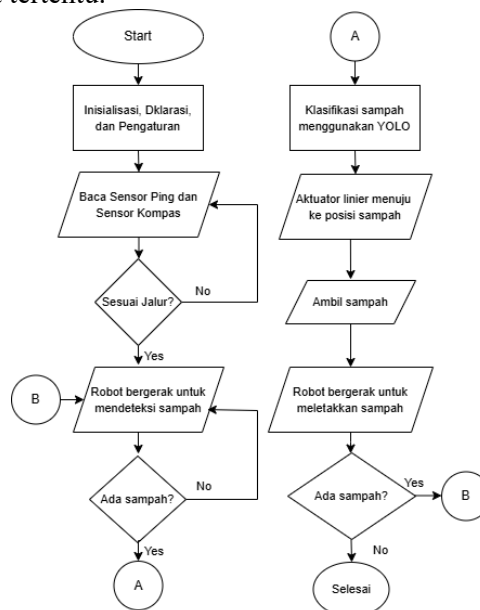
Rangkaian pada Gambar 5 memberikan informasi bahwa sistem kontrol berbasis mikrokontroler Teensy 4.1, yang dirancang untuk mengoperasikan aktuator seperti motor stepper dan servo, serta mengontrol sejumlah motor melalui driver. Sistem ini mengintegrasikan sumber daya, pengendali, dan penggerak untuk robot. Sumber daya untuk sistem ini berasal dari step-down converter (BK6), yang menurunkan tegangan input ke level 5V. Tegangan ini digunakan untuk memberikan daya ke mikrokontroler Teensy 4.1 melalui pin VIN dan GND, serta untuk mengoperasikan sensor, servo, dan driver motor. Bagian kontrol aktuator terdiri dari dua jenis aktuator utama, yaitu Motor stepper Terhubung ke Teensy melalui pin PUL, DIR, EN A, dan GND, yang mengontrol arah, kecepatan, dan enable/disable motor stepper. Selain itu terdapat Servo motor Terhubung melalui tiga jalur, yaitu pin PWM, +5V, dan GND, untuk mengatur posisi servo berdasarkan sinyal PWM yang dikirimkan oleh Teensy. Sistem penggerak motor dikendalikan menggunakan empat modul driver (U64, U65, U68, dan U69), masing-masing dihubungkan dengan motor untuk mengontrol pergerakan berdasarkan input dari mikrokontroler. Driver ini mendapatkan sinyal input dari Teensy melalui pin digital tertentu dan memiliki terminal Vin, GND, dan Out, yang terhubung ke sumber daya dan motor.



Gambar 5. Rangkaian antara Teensy 4.1 dengan Perangkat Output

### 2. 3 Perancangan Algoritma dan Pengindraan Visual

Sistem robotik ini dimulai dengan tahap inisialisasi, di mana variabel dideklarasikan dan komponen seperti sensor, aktuator, dan komunikasi disiapkan. Setelah itu, robot membaca data dari Ping Sensor untuk mendeteksi jarak dan sensor kompas untuk menentukan arah orientasi. Selanjutnya, sistem memeriksa apakah robot berada pada titik awal atau lokasi yang telah ditentukan. Jika tidak, sistem akan kembali membaca data sensor untuk melakukan koreksi. Namun, jika robot sudah berada di titik yang tepat, robot mulai bergerak untuk mendeteksi keberadaan sampah di area tertentu.



Gambar 6. Diagram Alir Program

Ketika robot mendeteksi sampah, sistem menggunakan algoritma YOLOv5 (You Only Look Once) untuk mengklasifikasikan jenis sampah [25], YOLOv5 memiliki keunggulan signifikan dibandingkan dengan versi YOLOv7. Berdasarkan pengujian pada dataset khusus yang terdiri dari lebih dari 9.000 gambar dan 21.000 anotasi, YOLOv5 memperoleh nilai precision yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan dengan YOLOv7 [29]. Pada penelitian lain YOLOv5 menghasilkan nilai mean Average Precision (mAP) tertinggi, mengungguli YOLOv7, YOLOv6, dan YOLOv8 dalam skenario deteksi objek bawah air. Selain itu, YOLOv5

menunjukkan performa terbaik pada kurva F1 dan menunjukkan kestabilan yang lebih baik dalam menghadapi lingkungan yang kompleks [30].

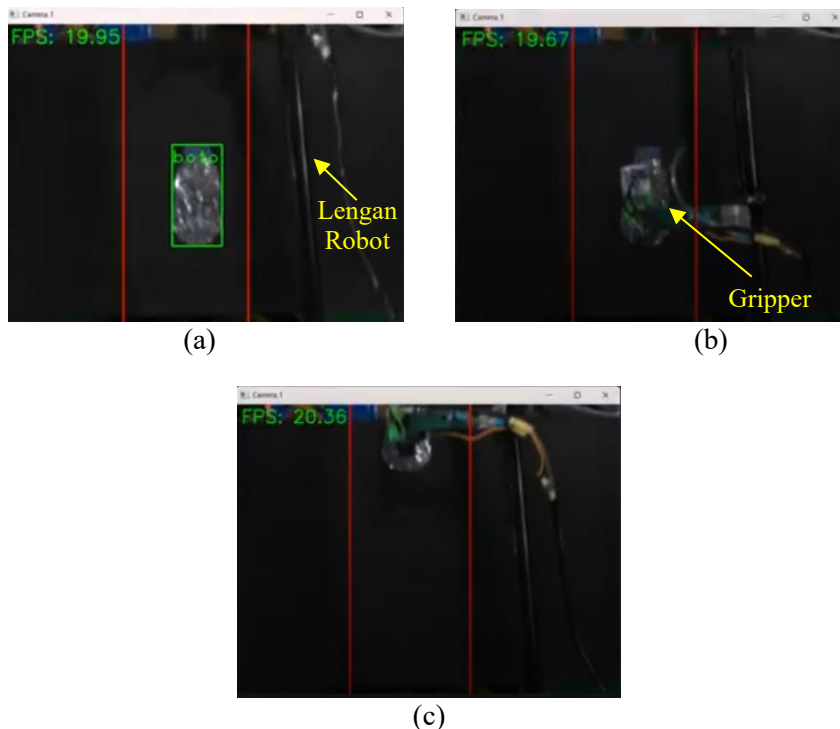
Setelah sampah teridentifikasi, lengan robot bergerak menuju lokasi sampah untuk melakukan proses pengambilan. Sampah yang telah diambil kemudian ditempatkan di lokasi pembuangan atau tempat penyimpanan yang telah ditentukan. Setelah proses ini selesai, sistem memeriksa apakah masih ada sampah lain yang perlu dicari. Jika ya, robot kembali bergerak untuk mendeteksi sampah berikutnya. Jika tidak, proses berhenti, menandakan bahwa tugas robot telah selesai. Dengan alur ini, sistem robotik dapat mendeteksi, mengklasifikasikan, dan menangani sampah secara otomatis.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaturan posisi robot, meja sampah, dan tempat sampah ditunjukkan pada Gambar 7, dan proses pengenalan jenis sampah, pengambilan, serta memindahkan sampah ditunjukkan pada Gambar 8. Setiap sub sistem diuji untuk mendapatkan hasil kinerja robot. Mulai dari kinerja robot melakukan tracking di samping meja sampah, sampai robot melakukan pemilahan sampah ke tempat sampah yang sesuai dengan jenisnya.



Gambar 7. Pengaturan Posis Robot, Meja, dan Tempat Sampah



Gambar 8. Tampilan Hasil Tangkap Webcam Saat Proses Pengenalan Jenis Sampah (a), Pengambilan (b), Serta Memindahkannya (c)

### 3. 1 Pengujian Gerak Robot saat Tracking Meja

Pengujian ini untuk mengetahui konsistensi gerakan robot saat tracking di samping meja sampah. Sebuah *marker* diletakkan di bawah robot agar dapat menghasilkan tanda gerakan robot. Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian gerakan robot dalam melakukan tracking di samping meja selama tiga menit. Data dalam tabel terdiri dari dua kolom, yaitu kolom Waktu yang menunjukkan menit pengamatan (Menit 1, Menit 2, dan Menit 3) dan kolom Hasil Gerakan Robot, yang berisi gambar jejak gerakan robot yang direkam pada tiap menit.

Pada Menit 1, hasil gerakan robot menunjukkan pola lintasan awal yang relatif lurus, namun ada indikasi bahwa lintasan mungkin belum sepenuhnya stabil. Hal ini dapat terjadi karena robot masih dalam tahap penyesuaian atau kalibrasi sistem kontrol untuk memastikan lintasan sesuai dengan jalur yang diinginkan.

Pada Menit 2, jejak gerakan robot terlihat lebih kompleks dibandingkan menit pertama, dengan beberapa pola yang menunjukkan adanya kemungkinan koreksi lintasan. Hal ini bisa disebabkan oleh adanya pengaruh gangguan eksternal atau respons sistem kontrol terhadap lingkungan meja, seperti perubahan permukaan atau hambatan kecil.

Pada Menit 3, lintasan gerakan robot tampak lebih konsisten dibandingkan menit sebelumnya. Ini menunjukkan bahwa robot mulai mencapai kestabilan dalam melakukan tracking, dengan pola jejak yang lebih jelas dan teratur. Proses ini dapat menggambarkan kemampuan sistem untuk belajar dan beradaptasi terhadap kondisi meja dalam waktu tertentu.

Secara keseluruhan, pengujian ini memberikan gambaran progresif mengenai kinerja robot dalam mengikuti lintasan tracking di atas meja dari waktu ke waktu, serta kemampuan sistem kontrolnya untuk beradaptasi dan meningkatkan akurasi lintasan seiring dengan durasi pengujian. Hasil ini menunjukkan penggunaan sensor ping dan kompas, serta aktuator dan algoritma yang digunakan dapat bekerja bersama untuk menghasilkan gerakan robot yang konsisten di samping meja sampah. Sensor kompas dapat bekerja dengan baik karena tanpa ada gangguan magnetik dari lingkungan [27][31].

Tabel 1 Pengujian Gerak Tracking Meja

| Waktu   | Jejak Hasil Gerakan Robot                                                            |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Menit 1 |  |
| Menit 2 |  |
| Menit 3 |  |

### 3. 2 Pengujian Klasifikasi Sampah dengan Yolo V5

Terdapat 4 jenis sampah yang digunakan untuk menguji sistem keseluruhan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja penggunaan YOLOv5 untuk melakukan klasifikasi jenis sampah. Sebelum diterapkan pada sistem keseluruhan, algoritma klasifikasi dan deteksi objek diuji terlebih dahulu. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dari setiap jenis sampah. Tabel 2

menunjukkan hasil dari pengujian, terlihat 4 jenis sampah dapat di deteksi dan diklasifikasi dengan benar. YOLOv5 memberikan performa yang sangat baik untuk deteksi dan klasifikasi sampah dalam waktu nyata [23]. Nilai hasil kinerja yang diperoleh dari pengujian model YOLOv5 adalah 98,3% untuk precision, yang menunjukkan bahwa sebagian besar objek yang terdeteksi telah diklasifikasikan dengan benar, dan 99,5% untuk nilai recall yang menunjukkan bahwa sistem berhasil mendeteksi hampir seluruh objek yang relevan dalam data uji. Keseimbangan antara precision dan recall tersebut tercermin dari nilai F1-score sebesar 98,8%, yang menandakan bahwa sistem mampu mempertahankan akurasi deteksi yang kuat, baik dalam ketepatan maupun kelengkapan klasifikasi.

Tabel 2 Pengujian Klasifikasi Sampah dengan Yolo V5

| Jenis Sampah | Tingkat Keberhasilan (%) |
|--------------|--------------------------|
| Botol        | 100                      |
| Daun         | 100                      |
| Logam        | 100                      |
| Kertas       | 100                      |

### 3. 3 Pengujian Akurasi Gerak Robot ke Tempat Sampah

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan robot dapat bergerak dan berhenti di setiap tempat sampah, posisi robot berhenti ditentukan berdasarkan jarak antara dinding dan tempat sampah. Tabel 3 merupakan hasil dari pengujian, terlihat bahwa robot dapat menempati posisi sampah tersebut pada rentang jarak tertentu. Rentan jarak tersebut diakibatkan karena pergerakan robot yang kurang sinkron dengan hasil pembacaan sensor ping yang digunakan untuk mengetahui jarak robot dengan dinding. Akibat dari fenomena ini adalah akan ada kemungkinan sampah tidak berhasil ditempatkan di tempat sampah yang semestinya.

Tabel 3 Pengujian Akurasi Gerak Robot ke Tempat Sampah

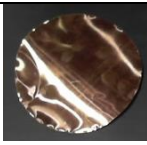
| Jarak antara Tempat Sampah dengan dinding (cm) | Tingkat Keberhasilan (%) |
|------------------------------------------------|--------------------------|
| 26 - 43 (Botol)                                | 100                      |
| 48 - 66 (Daun)                                 | 100                      |
| 71 - 84 (Metal)                                | 100                      |
| 99 - 106 (Kertas)                              | 100                      |

### 3. 4 Pengujian Robot Memilah Sampah

Pengujian terakhir adalah pengujian robot melakukan pemilahan sampah, hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4. Setiap jenis sampah diletakkan di atas meja, sampah yang digunakan adalah botol air mineral yang telah dipipihkan dan jenis sampah lainnya dengan diameter 15 cm, lalu robot bergerak atau bernavigasi menuju meja sampah dan kemudian melakukan deteksi objek untuk mengklasifikasinya. Berdasarkan tabel pengujian terlihat bahwa robot tidak selalu berhasil melakukan pilahan sampah pada jenis sampah tertentu, terlihat bahwa jenis sampah botol memiliki rerata keberhasilan menempatkan sampah sesuai dengan tempatnya adalah sebesar 80 %, keberhasilan tertinggi adalah pada jenis sampah logam sebesar 100%. Nilai persentase keberhasilan tersebut terjadi karena pada saat vacuum gripper bekerja, terkadang gagal melakukan gripping pada botol [16], hal ini dikarenakan jenis sampah botol yang digunakan memiliki permukaan yang tidak rata. Selain itu kasus lainnya adalah proses peletakkan sampah pada tempat sampah tidak selalu tepat, hal ini karena pergerakan robot untuk berhenti di posisi tempat sampah tidak konsisten pada posisi tertentu, seperti yang ditunjukkan pada Tabel pengujian 3. Secara umum kinerja yang ditunjukkan oleh robot lengan beroda holonomic

memiliki kinerja yang tidak jauh berbeda dengan robot lengan untuk pemilah sampah lainnya [8][9][17].

Tabel 4. Pengujian Robot Pemilah Sampah

| Jenis Sampah                                                                                 | Keberhasilan    |                 |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|------------|
|                                                                                              | Pengujian 1 (%) | Pengujian 2 (%) | Rerata (%) |
| <br>Botol   | 80              | 80              | 80         |
| <br>Daun    | 80              | 100             | 90         |
| <br>Logam   | 100             | 100             | 100        |
| <br>Kertas | 80              | 100             | 90         |

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, Sistem robot berhasil melakukan tracking di samping meja dengan peningkatan stabilitas lintasan setelah waktu pengujian tertentu, hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan sensor ping dan kompas telah terintegrasi dengan baik untuk menghasilkan gerakan robot yang konsisten. Algoritma YOLO V5 dapat melakukan klasifikasi empat jenis sampah yaitu botol, daun, logam, dan kertas mencapai tingkat akurasi 100% dalam uji pendeteksian. Selain itu, pengujian gerakan robot ke tempat sampah menunjukkan tingkat keberhasilan penuh dalam mencapai posisi dengan rentan jarak tertentu. Meskipun demikian, proses pemilahan sampah memiliki beberapa kendala, terutama pada sampah botol dengan permukaan tidak rata, yang menyebabkan penurunan keberhasilan rata-rata menjadi 80%, dan jenis sampah daun dan kertas yang rerata keberhasilannya sebesar 90%. Penyebab tingkat keberhasilan tersebut dikarenakan dalam tahap pergerakan robot untuk berhenti pada satu posisi tertentu tidak selalu tepat di tempat sampah yang dituju, dikarenakan sinkronisasi antara pergerakan robot terhadap hasil pembacaan sensor ping yang kurang akurat. Secara keseluruhan, sistem robot menunjukkan performa dengan akurasi di atas 80% dengan area kerja yang lebih luas dibandingkan jika menggunakan robot lengan, meskipun ada ruang untuk meningkatkan akurasi gripping dan konsistensi navigasi robot.

#### 5. SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dan untuk perbaikan penelitian berikutnya maka disarankan untuk meningkatkan kemampuan gripping vacuum gripper agar dapat menangani sampah dengan permukaan tidak rata, seperti botol, melalui penggunaan

material gripper yang lebih fleksibel atau penyesuaian tekanan hisap. Selain itu, algoritma kontrol gerakan robot perlu disempurnakan untuk memastikan posisi berhenti yang lebih konsisten, sehingga meminimalkan kesalahan dalam peletakan sampah. Integrasi sensor tambahan, seperti sensor visual atau sensor jarak yang lebih akurat, juga dapat membantu meningkatkan navigasi robot dan deteksi posisi tempat sampah.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. P. Srinivasan, R. Kalidhasan, U. S. Jivithesh, P. M. Logesh, and R. Kiran Prasad, "Design and Fabrication of Waste Sorting Robot." [Online]. Available: <http://www.paideumajournal.com>
- [2] K. Ulusoy, P. M. Sekula, A. Sternik, and N. Doğan-Sağlamtimur, "Waste Classification and Separation Approaches."
- [3] A. Bacchin, N. Carlon, S. Tonello, A. Pretto, and E. Menegatti, "AI and Robotics for waste sorting and recycling," 2023. [Online]. Available: <http://ceur-ws.org>
- [4] B. Amante Garca, A. Puig, J. Ll. Zamora, J. Moreno, and A. Sanfeliu, "ROBOTS IN WASTE MANAGEMENT," *Detritus*, no. 29, pp. 179–190, Oct. 2024, doi: 10.31025/2611-4135/2024.19430.
- [5] T. Kiyokawa, J. Takamatsu, and S. Koyanaka, "Challenges for Future Robotic Sorters of Mixed Industrial Waste: A Survey," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 1023–1040, Jan. 2024, doi: 10.1109/TASE.2022.3221969.
- [6] C. Lubongo, M. A. A. Bin Daej, and P. Alexandridis, "Recent Developments in Technology for Sorting Plastic for Recycling: The Emergence of Artificial Intelligence and the Rise of the Robots," *Recycling*, vol. 9, no. 4, Aug. 2024, doi: 10.3390/recycling9040059.
- [7] A. G. Satav, S. Kubade, C. Amrutkar, G. Arya, and A. Pawar, "A state-of-the-art review on robotics in waste sorting: scope and challenges," Dec. 01, 2023, *Springer-Verlag Italia s.r.l.* doi: 10.1007/s12008-023-01320-w.
- [8] C. Lubongo and P. Alexandridis, "Assessment of Performance and Challenges in Use of Commercial Automated Sorting Technology for Plastic Waste," *Recycling*, vol. 7, no. 2, Apr. 2022, doi: 10.3390/recycling7020011.
- [9] M. Koskinopoulou, F. Raptopoulos, G. Papadopoulos, N. Mavrikis, and M. Maniadakis, "Robotic Waste Sorting Technology: Toward a Vision-Based Categorization System for the Industrial Robotic Separation of Recyclable Waste," *IEEE Robot Autom Mag*, vol. 28, no. 2, pp. 50–60, Jun. 2021, doi: 10.1109/MRA.2021.3066040.
- [10] H. Chen, "Optimization of an Intelligent Sorting and Recycling System for Solid Waste Based on Image Recognition Technology," *Advances in Mathematical Physics*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/4094684.
- [11] K. Friedrich, "Sensor-based and Robot Sorting Processes and their Role in Achieving European Recycling Goals - A Review," *Academic Journal of Polymer Science*, vol. 5, no. 4, Feb. 2022, doi: 10.19080/ajop.2022.05.555668.
- [12] J. C. Arbeláez-Estrada *et al.*, "A Systematic Literature Review of Waste Identification in Automatic Separation Systems," Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/recycling8060086.
- [13] R. Sarc, A. Curtis, L. Kandlbauer, K. Khodier, K. E. Lorber, and R. Pomberger, "Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management – A review," Jul. 15, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.wasman.2019.06.035.
- [14] A. Elsayed Ibrahim, R. Shoitani, M. M. Moussa, H. A. Elnemr, Y. Im Cho, and M. S. Abdallah, "Object Detection-based Automatic Waste Segregation using Robotic Arm." [Online]. Available: [www.ijacsa.thesai.org](http://www.ijacsa.thesai.org)
- [15] F. Raptopoulos, M. Koskinopoulou, and M. Maniadakis, "Robotic Pick-and-Toss Facilitates Urban Waste Sorting," in *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, IEEE Computer Society, Aug. 2020, pp. 1149–1154. doi: 10.1109/CASE48305.2020.9216746.
- [16] E. Papadakis, F. Raptopoulos, M. Koskinopoulou, and M. Maniadakis, "On the Use of Vacuum Technology for Applied Robotic Systems," in *2020 6th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering, ICMRE 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Feb. 2020, pp. 73–77. doi: 10.1109/ICMRE49073.2020.9065189.

- [17] T. Kiyokawa, H. Katayama, Y. Tatsuta, J. Takamatsu, and T. Ogasawara, "Robotic Waste Sorter with Agile Manipulation and Quickly Trainable Detector," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 124616–124631, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3110795.
- [18] L. Yu, "Development of an Instance Segmentation Model for the Automatic Identification of Recyclable Objects in Construction Sites." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/365700731>
- [19] T. Limsila, A. Sirimangkalalo, W. Chuengwutigool, and W. Feng, "Computer-vision-powered Automatic Waste Sorting Bin: A Machine Learning-based Solution on Waste Management," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2550/1/012030.
- [20] H. Wilts, B. R. Garcia, R. G. Garlito, L. S. Gómez, and E. G. Prieto, "Artificial intelligence in the sorting of municipal waste as an enabler of the circular economy," *Resources*, vol. 10, no. 4, 2021, doi: 10.3390/resources10040028.
- [21] R. Pizá, R. Carbonell, V. Casanova, Á. Cuenca, and J. J. Salt Llobregat, "Nonuniform Dual-Rate Extended Kalman-Filter-Based Sensor Fusion for Path-Following Control of a Holonomic Mobile Robot with Four Mecanum Wheels," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/app12073560.
- [22] I. Zeidis and K. Zimmermann, "Dynamics of a four-wheeled mobile robot with Mecanum wheels," Dec. 01, 2019, *Wiley-VCH Verlag*. doi: 10.1002/zamm.201900173.
- [23] M. D. Nguyen, M. T. Ngo, H. Do Quang, and N. D. Phuong, "Reinforcement Learning-Based Trajectory Control for Mecanum Robot with Mass Eccentricity Considerations," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 5, no. 5, pp. 1436–1443, 2024.
- [24] M. Satriansyah, I. Siradjuddin, and S. Sungkono, "Sistem Navigasi Mobile Robot Penggerak Mecanum Menggunakan Sensor Kompas," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 9, no. 3, pp. 154–160, Sep. 2022, doi: 10.33795/elkolind.v9i3/305.
- [25] M. Mahboob Ali, H. Chvs, G. Sai Teja, B. Veera Jyothi, and L. Suresh Kumar, "Intelligent Waste Sorting System: Leveraging Arduino for Automated Trash Identification and Categorization," 2024.
- [26] J. Peter and M. J. Thomas, "Development of a Low-Cost Multipurpose Autonomous Navigation Robot," in *Proceedings - 2022 IEEE World Conference on Applied Intelligence and Computing, AIC 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 451–454. doi: 10.1109/AIC55036.2022.9848857.
- [27] W. Chen and T. Zhang, "An indoor mobile robot navigation technique using odometry and electronic compass," *Int J Adv Robot Syst*, vol. 14, no. 3, Jun. 2017, doi: 10.1177/1729881417711643.
- [28] A. R. Chaidir, K. Anam, D. Setiabudi, and W. Muldayani, "Penerapan Finite State Machine pada Navigasi Kendaraan Otonom untuk Menghasilkan Pola Gerak Sirkular," *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, vol. 8, no. 1, p. 67, Jun. 2023, doi: 10.31544/jtera.v8.i1.2022.67-74.
- [29] O. E. Olorunshola, M. E. Irhebhude, and A. E. Ewuekpae, "A Comparative Study of YOLOv5 and YOLOv7 Object Detection Algorithms," *Journal of Computing and Social Informatics*, vol. 2, no. 1, pp. 1–12, Feb. 2023.
- [30] B. Gašparović, G. Mauša, J. Rukavina, and J. Lerga, "Evaluating YOLOV5, YOLOV6, YOLOV7, and YOLOV8 in Underwater Environment: Is There Real Improvement?," in *2023 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, IEEE, Jun. 2023, pp. 1–4. doi: 10.23919/SpliTech58164.2023.10193505.
- [31] P. Chand, "Integrating an electronic compass for position tracking on a wheeled tricycle mobile robot," *Drone Systems and Applications*, vol. 10, no. 1, pp. 179–199, Jan. 2022, doi: 10.1139/dsa-2021-0049.