

PERANCANGAN SISTEM MATERIAL HANDLING OTOMATIS BERBASIS IoT UNTUK PEMILAHAN MATERIAL LOGAM DAN NON-LOGAM

Micky Firdaus Wicaksana; Ratnanto Fitriadi
Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Perkembangan teknologi Industri 4.0 mendorong penerapan sistem otomasi yang terintegrasi dengan Internet of Things (IoT) pada berbagai sektor industri. Laboratorium Otomasi Industri Universitas Muhammadiyah Surakarta telah memiliki media pembelajaran berupa conveyor trainer, namun belum mampu merepresentasikan proses material handling otomatis yang mencakup identifikasi material, robotika, dan integrasi IoT. Penelitian ini bertujuan mengembangkan media pembelajaran berupa sistem material handling otomatis berbasis IoT yang mampu melakukan pemilahan material logam dan non-logam. Metode penelitian meliputi reverse engineering, perancangan sistem, pembuatan sistem, pengujian sistem, analisis statistik, dan evaluasi media pembelajaran. Sistem dikembangkan menggunakan sensor infrared, sensor proximity induktif, conveyor, robot arm 4-DOF, dan mikrokontroler ESP32. Logika kendali dirancang menggunakan Sequential Ladder Diagram (SLD) sebelum diimplementasikan ke dalam program Arduino. Pengujian dilakukan menggunakan 30 sampel yang terdiri dari aluminium foil, kaleng minuman, dan plastik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi dan memilah material logam maupun non-logam dengan tingkat keberhasilan 100%. Hasil uji Independent Sample t-test menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada waktu respons sensor ($p = 0,620$) maupun waktu perpindahan robot arm ($p = 0,355$) antara material logam dan non-logam. Hasil evaluasi media pembelajaran menunjukkan bahwa sistem memperoleh tanggapan positif dari pengguna sehingga mampu mendukung proses pembelajaran praktikum otomasi industri melalui integrasi konsep material handling, sistem kendali, robotika, dan Internet of Things (IoT). Dengan demikian, penelitian ini menghasilkan media pembelajaran yang lebih representatif dalam menggambarkan penerapan sistem material handling otomatis berbasis IoT dibandingkan media pembelajaran yang sebelumnya tersedia di laboratorium.

Kata Kunci: material handling, IoT, ESP32, sensor proximity induktif, media pembelajaran, uji-t.

Abstract

Technological advancements in Industry 4.0 are driving the adoption of automation systems integrated with the Internet of Things (IoT) across various industrial sectors. The Industrial Automation Laboratory at Muhammadiyah University of Surakarta already has a learning tool in the form of a conveyor trainer; however, it is not yet capable of simulating an automated material handling process that encompasses material identification, robotics, and IoT integration. This study aims to develop a learning tool in the form of an IoT-based automated material handling system capable of sorting metallic and non-metallic materials. The research methods include reverse engineering, system design, system development, system testing, statistical analysis, and evaluation of the learning tool. The system was developed using an infrared sensor, an inductive proximity sensor, a conveyor, a 4-DOF robotic arm, and an ESP32 microcontroller. The control logic was designed using a Sequential Ladder Diagram (SLD) before being implemented into an Arduino program. Testing was conducted using 30 samples consisting of aluminum foil, beverage cans, and plastic. The research results show that the system is capable of detecting and sorting both metallic and non-metallic materials with a 100%

success rate. The results of the independent samples t-test indicate that there are no significant differences in sensor response time ($p = 0.620$) or robot arm movement time ($p = 0.355$) between metallic and non-metallic materials. The evaluation of the learning media showed that the system received positive feedback from users, thereby supporting the learning process in industrial automation labs through the integration of material handling, control systems, robotics, and the Internet of Things (IoT) concepts. Thus, this research produced learning media that more accurately depicts the application of an IoT-based automated material handling system compared to the learning media previously available in the laboratory.

Keywords: material handling, IoT, ESP32, inductive proximity sensor, learning media, t-test.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) telah mendorong sistem manufaktur menuju Industri 4.0 melalui integrasi perangkat, sensor, jaringan komunikasi, dan teknologi pengolahan data dalam lingkungan produksi yang saling terhubung (Kalsoom et al., 2021). *Internet of Things* (IoT) menjadi salah satu teknologi utama yang mendukung implementasi Industri 4.0 melalui integrasi perangkat fisik dan sistem digital dalam lingkungan manufaktur cerdas (Lampropoulos et al., 2019). Material handling merupakan salah satu aspek penting dalam sistem manufaktur yang berperan dalam proses pemindahan, penyimpanan, perlindungan, dan pengendalian material selama proses produksi berlangsung. Material handling adalah proses menangani material yang melibatkan pengaturan jumlah, jenis, dan kondisi bahan di waktu dan tempat yang tepat, menggunakan biaya yang efisien (Putri et al., 2024). Optimalisasi sistem material handling berperan penting dalam meningkatkan efisiensi operasional dan menurunkan biaya penanganan material pada sistem produksi (Ponis & Efthymiou, 2020). Salah satu aktivitas penting dalam sistem material handling adalah proses sortasi material. Proses ini dilakukan untuk mengelompokkan atau memisahkan material berdasarkan karakteristik tertentu sehingga dapat diproses lebih lanjut sesuai kebutuhan produksi dan meningkatkan efisiensi penanganan material (Wang et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan sistem otomatis yang mampu melakukan proses pemilahan material sebagai tahap penting dalam menjaga kualitas dan efisiensi produksi (R. Wulandari et al., 2024).

Conveyor merupakan salah satu perangkat yang banyak digunakan dalam sistem material handling karena mampu memindahkan material secara kontinu dan efisien (Siahaan et al., 2022). Selain itu, sensor proximity induktif banyak digunakan pada sistem otomasi industri untuk mendeteksi material logam karena memiliki tingkat keandalan dan akurasi yang tinggi pada lingkungan industri (Akhiruddin et al., 2024). Informasi hasil deteksi sensor kemudian dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pada sistem kendali untuk menentukan proses pemilahan material secara otomatis. Integrasi sensor, aktuator, dan sistem kendali merupakan salah satu prinsip utama dalam penerapan otomasi industri modern (Dames & Tri Putra Yanto, 2022). Dalam sistem otomasi, data

yang diperoleh dari sensor digunakan sebagai masukan bagi sistem kendali untuk mengatur aktuator sehingga proses dapat berjalan sesuai kondisi yang terdeteksi (Satriani & Yuhendri, 2023). Penerapan *robot arm* dalam sistem material handling semakin berkembang karena mampu melakukan proses pengambilan, pemindahan, dan penempatan material secara otomatis. Penggunaan *robot arm* dapat mengurangi keterlibatan operator pada pekerjaan yang bersifat repetitif serta meningkatkan konsistensi dan efisiensi proses penanganan material (Ghodsian et al., 2023). Integrasi *robot arm* dengan sensor dan sistem kendali memungkinkan proses sortasi material dilakukan secara otomatis berdasarkan hasil deteksi sensor. Selain itu, integrasi teknologi IoT memungkinkan seluruh proses tersebut dapat dipantau secara *real-time* serta meningkatkan efisiensi produksi (Atmasani, 2025).

Implementasi sistem IoT pada penelitian ini didukung oleh penggunaan mikrokontroler ESP32 yang memiliki kemampuan komunikasi nirkabel sehingga banyak digunakan pada aplikasi *monitoring* dan kendali berbasis internet (Rizqi Samkayana, 2025). Berdasarkan hasil observasi pada Laboratorium Otomasi Industri, media pembelajaran yang tersedia masih berupa sistem demonstrasi sederhana sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan integrasi teknologi material handling, robotika, dan IoT yang banyak diterapkan di industri modern. Pengembangan media pembelajaran berbasis *trainer kit* atau prototipe dapat meningkatkan efektivitas pembelajaran praktikum karena mampu memberikan pengalaman yang lebih aplikatif dan mendekati kondisi nyata di dunia industri (Ekawati et al., 2021).

Dalam perspektif Al-Islam dan Kemuhammadiyah (AIK), pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi merupakan bentuk ikhtiar manusia dalam memanfaatkan akal yang dianugerahkan Allah SWT untuk memberikan kemanfaatan bagi kehidupan. Sebagaimana firman Allah SWT dalam QS. Az-Zumar ayat 9, "...Katakanlah, apakah sama orang-orang yang mengetahui dengan orang-orang yang tidak mengetahui?...", ayat tersebut menegaskan pentingnya menuntut dan mengembangkan ilmu pengetahuan. Nilai tersebut sejalan dengan pengembangan media pembelajaran berbasis *Internet of Things* (IoT) yang bertujuan meningkatkan kualitas pembelajaran melalui penerapan teknologi otomasi industri.

Laksmiati dan Fariansyah (Laksmiati & Fariansyah, 2025) mengembangkan alat pendeteksi material logam dan non-logam berbasis ESP32, Yulianeu dan Ridwanulloh (Yulianeu & Ridwanulloh, 2022) mengembangkan model pemilah material otomatis berbasis Arduino, sedangkan Akhiruddin dkk. (Akhiruddin et al., 2024) mengembangkan alat pemilah logam dan non-logam menggunakan sensor proximity induktif dan sensor infrared. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa proses identifikasi dan pemilahan material dapat dilakukan secara otomatis. Namun, penelitian-penelitian tersebut masih berfokus pada proses deteksi dan pemilahan material, sedangkan integrasi *robot arm* sebagai aktuator pemindah material serta teknologi *Internet of Things*

(IoT) untuk *monitoring* sistem secara *real-time* dalam satu sistem material handling yang terintegrasi masih terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem material handling otomatis berbasis IoT yang dapat melakukan pemilahan material logam dan non-logam dengan sensor proximity induktif dan *robot arm* sebagai media pembelajaran pada Laboratorium Otomasi Industri Universitas Muhammadiyah Surakarta.

2. METODE

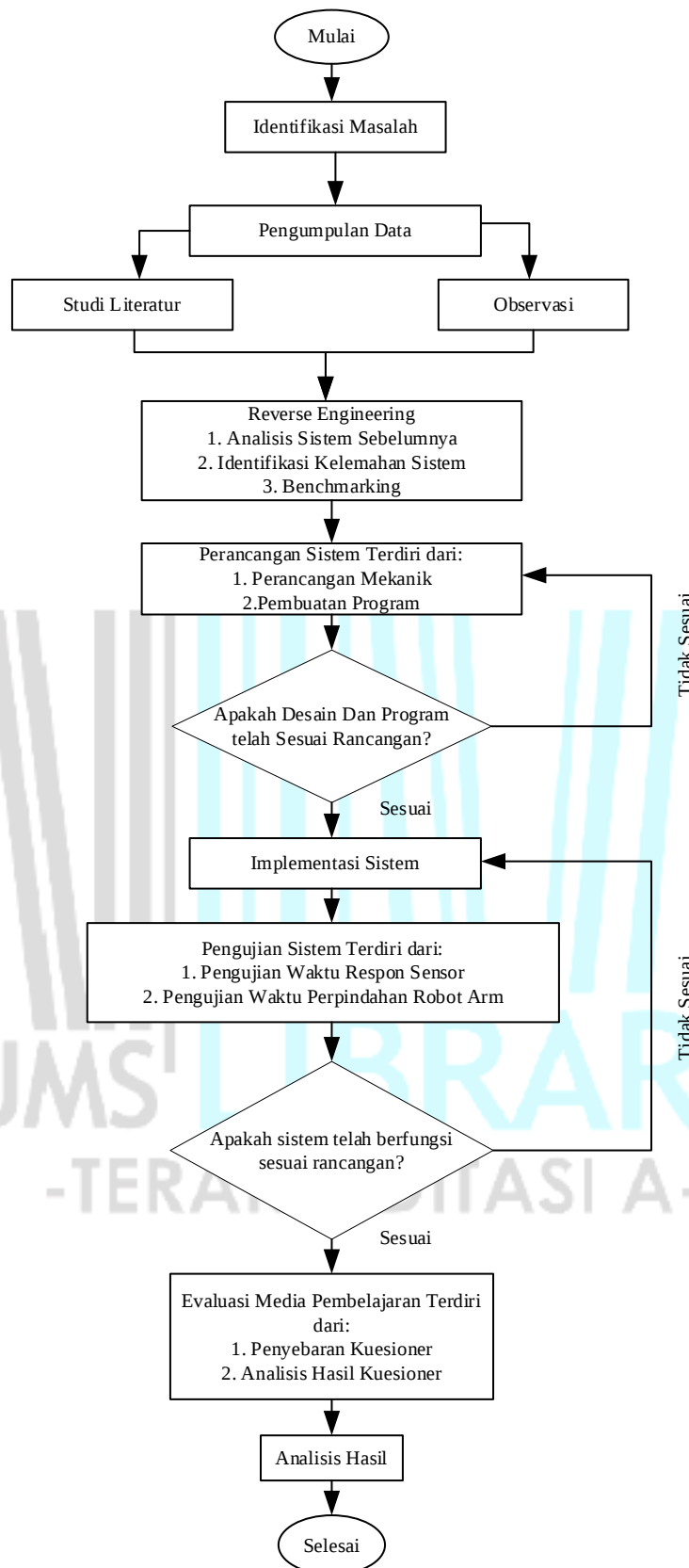
Penelitian ini dilakukan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem material handling otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) sebagai media pembelajaran pada Laboratorium Otomasi Industri. Tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah, pengumpulan data, *reverse engineering* sistem yang telah ada, perancangan sistem, pembuatan sistem, pengujian sistem, analisis statistik, serta evaluasi media pembelajaran. Tahapan tersebut dilakukan secara sistematis untuk memastikan sistem yang dikembangkan mampu melakukan proses pemilahan material logam dan non-logam secara otomatis sesuai dengan kebutuhan pembelajaran.

2.1 Objek Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Otomasi Industri Program Studi Teknik Industri Universitas Muhammadiyah Surakarta. Objek penelitian berupa perancangan dan pengembangan sistem material handling otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) yang digunakan untuk melakukan proses pemilahan material logam dan non-logam secara otomatis. Sistem yang dikembangkan dirancang sebagai media pembelajaran yang mengintegrasikan teknologi conveyor, sensor, *robot arm*, sistem kendali, dan IoT dalam satu kesatuan sistem yang merepresentasikan proses material handling pada industri manufaktur.

2.2 Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan yang meliputi identifikasi masalah, pengumpulan data, *reverse engineering*, perancangan sistem, pengujian desain dan program, implementasi sistem, pengujian sistem, evaluasi media pembelajaran, dan analisis hasil. Setiap tahapan dilakukan secara berurutan untuk memastikan sistem material handling otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dikembangkan dapat berfungsi sesuai dengan tujuan penelitian sebagai media pembelajaran di Laboratorium Otomasi Industri. Alur tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Flowchart Alur Penelitian.



Gambar 1. *Flowchart Alur Penelitian*

2.3 Tahap *Reverse Engineering* dan *Benchmarking* Sistem

Tahap *reverse engineering* dilakukan terhadap media pembelajaran yang telah tersedia di

Laboratorium Otomasi Industri berupa conveyor *trainer kit*. Tahap *reverse engineering* bertujuan untuk memahami fungsi, cara kerja, komponen penyusun, serta keterbatasan sistem yang digunakan sebagai dasar pengembangan sistem baru (Mubaroq et al., 2025). Proses *reverse engineering* dilakukan melalui tahap *breakdown* sistem untuk mengidentifikasi komponen utama, hubungan antar komponen, dan alur kerja sistem yang telah ada.

Setelah dilakukan *reverse engineering*, tahap berikutnya adalah *benchmarking* untuk mengidentifikasi kebutuhan sistem yang akan dikembangkan. *Benchmarking* dilakukan dengan membandingkan fitur sistem yang tersedia dengan kebutuhan pembelajaran otomasi industri. Hasil *benchmarking* digunakan sebagai dasar dalam menentukan spesifikasi sistem, kebutuhan komponen, serta fitur yang akan ditambahkan pada sistem material handling otomatis yang dikembangkan.

2.4 Tahap Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem dilakukan berdasarkan hasil *reverse engineering* dan *benchmarking* yang telah dilakukan sebelumnya. Sistem yang dirancang terdiri atas conveyor utama sebagai jalur perpindahan material, conveyor kedua sebagai jalur keluaran material logam, sensor infrared sebagai pendeteksi keberadaan objek, sensor proximity induktif sebagai pendeteksi material logam, *robot arm* 4 *Degree of Freedom* (DOF) sebagai aktuator pemindah material, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali sistem, serta sistem *monitoring* berbasis *Internet of Things* (IoT).

Perancangan dilakukan dalam dua aspek utama, yaitu perancangan mekanik dan perancangan sistem kendali atau program. Perancangan mekanik dilakukan menggunakan *software* SolidWorks untuk menentukan tata letak komponen dan memastikan seluruh area kerja berada dalam jangkauan *robot arm*. Sementara itu, perancangan sistem kendali dilakukan menggunakan *Sequential Ladder Diagram* (SLD) yang kemudian dikonversi ke dalam program Arduino IDE untuk diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32.

2.5 Tahap Pengujian Desain dan Program

Sebelum sistem direalisasikan, dilakukan pengujian terhadap desain mekanik dan program untuk memastikan hasil perancangan telah sesuai dengan kebutuhan sistem. Pengujian desain mekanik dilakukan menggunakan perangkat lunak SolidWorks dengan mensimulasikan jangkauan kerja *robot arm* terhadap titik pengambilan material pada conveyor utama dan titik peletakan material pada conveyor kedua. Tata letak komponen dinyatakan sesuai apabila seluruh titik pengambilan dan peletakan material berada dalam jangkauan *robot arm*.

Pengujian program dilakukan dengan mensimulasikan urutan kerja sistem menggunakan *Sequential Ladder Diagram* (SLD). Simulasi dilakukan dengan memberikan kondisi *input* sesuai alur kerja sistem, seperti pendeteksian objek oleh sensor infrared dan sensor proximity induktif, kemudian diamati apakah keluaran yang dihasilkan telah sesuai, yaitu conveyor berhenti, *robot arm* melakukan

proses pemindahan material, serta conveyor kembali beroperasi sesuai urutan yang dirancang. Program dinyatakan sesuai apabila seluruh urutan operasi berjalan tanpa kesalahan logika sebelum diimplementasikan ke dalam mikrokontroler ESP32.

2.6 Tahap Implementasi Sistem

Tahap implementasi sistem dilakukan setelah desain dan program dinyatakan sesuai berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan sebelumnya. Implementasi sistem meliputi proses perakitan mekanik, pemasangan sensor, instalasi sistem kendali, integrasi *robot arm*, serta implementasi sistem *monitoring* berbasis IoT. Seluruh komponen dirakit menjadi satu kesatuan sistem yang mampu melakukan proses pemindahan dan pemilahan material secara otomatis.

2.7 Tahap Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mendeteksi dan memilah material logam dan non-logam. Material yang digunakan pada pengujian terdiri atas aluminium foil dan kaleng minuman sebagai material logam, serta plastik sebagai material non-logam. Pengujian dilakukan sebanyak 30 kali pada masing-masing jenis material. Parameter yang diukur meliputi waktu respons sensor dan waktu perpindahan robot arm selama proses pemindahan material.

Data hasil pengujian kemudian dianalisis menggunakan metode statistik untuk mengetahui karakteristik data dan membandingkan waktu respons sensor serta waktu perpindahan robot arm pada masing-masing jenis material. Analisis diawali dengan uji normalitas *Shapiro-Wilk* untuk mengetahui distribusi data (Nurhaswinda et al., 2026). Selanjutnya dilakukan uji *Independent Sample t-test* untuk mengetahui perbedaan waktu respon sensor dan waktu perpindahan *robot arm* antara material logam dan non-logam (A. D. R. Wulandari et al., 2025).

2.8 Evaluasi Media Pembelajaran

Selain pengujian sistem, dilakukan Evaluasi media pembelajaran dilakukan untuk mengetahui tingkat penerimaan sistem material handling otomatis yang telah dikembangkan sebagai media praktikum di Laboratorium Otomasi Industri. Evaluasi dilakukan menggunakan metode kuesioner dengan skala Likert yang disebarkan kepada 7 orang asisten Laboratorium Otomasi Industri sebagai responden. Hasil kuesioner dianalisis secara deskriptif berdasarkan distribusi jawaban responden pada setiap aspek yang dievaluasi. Penilaian menggunakan skala Likert yang disajikan pada Tabel 1. Penilaian kuesioner menggunakan skala Likert yang disajikan pada Tabel 1. (Wardhani et al., 2025).

Tabel 1. Skala Likert

Skor	Kategori
5	Sangat Setuju
4	Setuju
3	Cukup Setuju
2	Tidak Setuju
1	Sangat Tidak Setuju

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tahap *Reverse Engineering* Sistem

1) Tahap *Breakdown* Sistem Lama

Tahap *reverse engineering* diawali dengan melakukan *breakdown* terhadap media pembelajaran yang telah tersedia di Laboratorium Otomasi Industri berupa conveyor *trainer kit*. Tahap ini bertujuan untuk mengidentifikasi komponen penyusun sistem, fungsi masing-masing komponen, serta alur kerja sistem yang digunakan sebagai dasar pengembangan sistem baru. Sistem yang digunakan sebagai objek *reverse engineering* ditunjukkan pada Gambar 2. Conveyor *Trainer Kit*.



Gambar 2. Conveyor *Trainer Kit*

Hasil identifikasi menunjukkan bahwa sistem terdiri atas conveyor sebagai media perpindahan objek, sensor untuk mendeteksi keberadaan objek, aktuator berupa motor DC sebagai penggerak conveyor, serta panel kendali sederhana. Sistem yang tersedia mampu memperagakan prinsip dasar perpindahan material menggunakan conveyor, namun belum memiliki kemampuan untuk melakukan identifikasi dan pemilahan material secara otomatis.

Berdasarkan hasil *breakdown* sistem, diketahui bahwa conveyor *trainer kit* yang tersedia masih memiliki beberapa keterbatasan, yaitu belum mampu membedakan jenis material, belum dilengkapi aktuator pemindah objek berupa *robot arm*, serta belum terintegrasi dengan sistem *monitoring* berbasis *Internet of Things* (IoT). Keterbatasan tersebut menjadi dasar dalam pengembangan sistem material handling otomatis yang diusulkan pada penelitian ini.

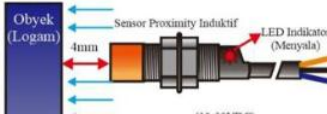
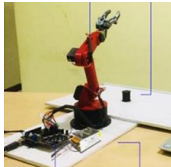
2) Analisis Cara Kerja Sistem Lama

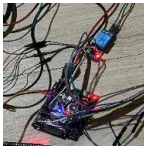
Berdasarkan hasil pengamatan, sistem conveyor *trainer kit* bekerja dengan memindahkan objek dari satu titik ke titik lainnya menggunakan conveyor yang digerakkan oleh motor DC. Sensor yang digunakan hanya berfungsi untuk mendeteksi keberadaan objek tanpa mampu mengidentifikasi jenis material yang dipindahkan. Seluruh proses perpindahan material berlangsung tanpa adanya proses sortasi maupun pemindahan material ke jalur yang berbeda secara otomatis.

3) Benchmarking dan Identifikasi Kebutuhan Sistem

Tahap *benchmarking* dilakukan untuk menentukan spesifikasi sistem yang akan dikembangkan berdasarkan hasil *reverse engineering* dan kebutuhan pembelajaran di laboratorium. Proses *benchmarking* dilakukan dengan membandingkan fitur yang tersedia pada sistem lama dengan fitur yang dibutuhkan pada sistem baru. Berikut merupakan tabel 2. Hasil *Benchmarking* Sistem.

Tabel 2. Hasil *Benchmarking* Sistem

No	Nama Produk	Gambar	Keterangan
1.	Alat Pemilah Sampah Menggunakan Sensor Proximity (Lenni et al., 2025).		Sensor proximity induktif digunakan untuk mendeteksi material logam pada conveyor. Metode deteksi tersebut dijadikan referensi dalam pengembangan sistem pemilahan material.
2.	Small-scale Robot arm (Tahtawi et al., 2021).		Robot arm digunakan untuk melakukan proses pengambilan dan pemindahan objek secara otomatis. Mekanisme pick and place tersebut dijadikan referensi dalam perancangan sistem
3.	Development of Robotic Arm Control Using Arduino Controller (Chenchireddy et al.,		Sistem kendali robot arm menggunakan motor servo dan mikrokontroler. Metode pengendalian tersebut dijadikan referensi dalam

No	Nama Produk	Gambar	Keterangan
	2024).		pengembangan pergerakan robot arm.
4.	Development an ESP32 Microcontroller and Monitoring Sistem (Attariq Ziad et al., 2024).		ESP32 digunakan untuk proses monitoring dan pengiriman data secara real-time. Konsep tersebut dijadikan referensi dalam pengembangan sistem IoT.

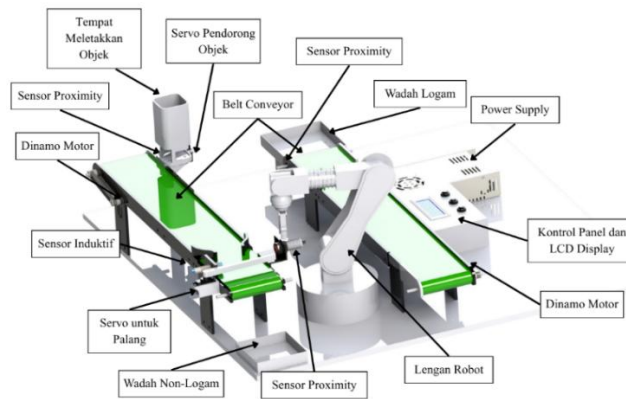
Hasil *benchmarking* menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan perlu memiliki kemampuan untuk mendeteksi material logam dan non-logam, melakukan proses pemilahan secara otomatis, menggunakan *robot arm* sebagai aktuator pemindah material, serta menyediakan fitur *monitoring* berbasis *Internet of Things*. Selain itu, sistem harus mampu merepresentasikan integrasi antara material handling, sistem kendali, robotika, dan IoT dalam satu media pembelajaran.

Berdasarkan hasil *benchmarking*, ditetapkan kebutuhan utama sistem yang terdiri atas conveyor utama sebagai jalur perpindahan material, conveyor kedua sebagai jalur keluaran material logam, sensor infrared sebagai pendeteksi keberadaan objek, sensor proximity induktif sebagai pendeteksi material logam, *robot arm 4 Degree of Freedom (DOF)* sebagai aktuator pemindah material, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali sistem, serta platform *monitoring* berbasis *Internet of Things*.

3.2 Tahap Perancangan Sistem

1) Perancangan Mekanik

Berdasarkan kebutuhan yang telah diidentifikasi, dilakukan perancangan sistem material handling otomatis menggunakan perangkat lunak SolidWorks. Perancangan dilakukan untuk menentukan tata letak komponen dan memastikan seluruh proses pemindahan material dapat berlangsung sesuai dengan alur kerja yang direncanakan. Desain rancangan sistem dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain Rancangan Sistem

Sistem yang dirancang terdiri atas conveyor utama sebagai jalur masuk material, sensor infrared pertama sebagai pendeteksi objek yang masuk ke sistem, sensor infrared kedua sebagai sensor pemicu proses identifikasi material, sensor proximity induktif sebagai pendeteksi material logam, *robot arm* 4-DOF sebagai aktuator pemindah material logam, conveyor kedua sebagai jalur keluaran material logam, serta ESP32 sebagai pusat kendali sistem. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan fitur *monitoring* berbasis IoT yang digunakan untuk menampilkan informasi hasil proses sortasi secara *real-time*.

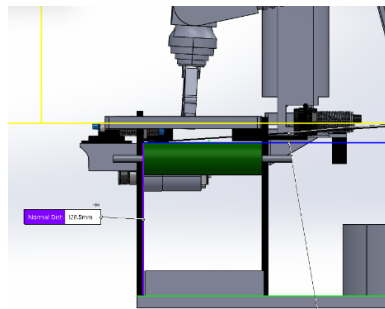
Desain sistem dirancang sedemikian rupa sehingga material yang terdeteksi sebagai logam akan dipindahkan oleh *robot arm* menuju conveyor kedua, sedangkan material non-logam akan tetap melanjutkan perjalanan pada conveyor utama. Dengan konfigurasi tersebut, sistem mampu melakukan proses pemilahan material secara otomatis sesuai hasil identifikasi sensor.

2) Pengujian Desain Sistem

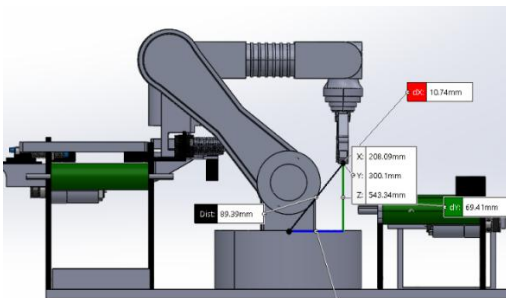
Pengujian desain sistem dilakukan untuk memverifikasi kesesuaian rancangan mekanik yang telah dibuat menggunakan *software* SolidWorks sebelum tahap pembuatan sistem. Pengujian bertujuan untuk memastikan bahwa tata letak komponen utama pada sistem material handling telah sesuai dengan kebutuhan proses sortasi material yang dirancang. Komponen yang menjadi fokus pengujian meliputi *robot arm*, conveyor utama, dan conveyor kedua yang berperan dalam proses pengambilan dan peletakan material.

Pengujian dilakukan dengan mengevaluasi jangkauan kerja *robot arm* terhadap seluruh titik kerja yang direncanakan pada sistem. Pengukuran dilakukan menggunakan fitur *Measure* pada SolidWorks dengan mengukur jarak dari pusat base *robot arm* menuju ujung gripper pada berbagai posisi kerja. Hasil pengukuran digunakan untuk memastikan bahwa seluruh area pengambilan dan peletakan material masih berada dalam rentang jangkauan *robot arm*. Hasil pengujian ketinggian conveyor jangkauan minimum, jangkauan maksimum, proses pengambilan material, dan proses

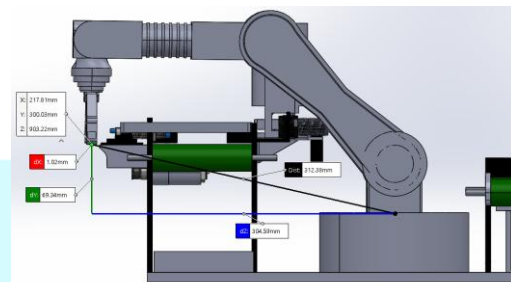
peletakan material ditunjukkan pada Gambar dibawah ini.



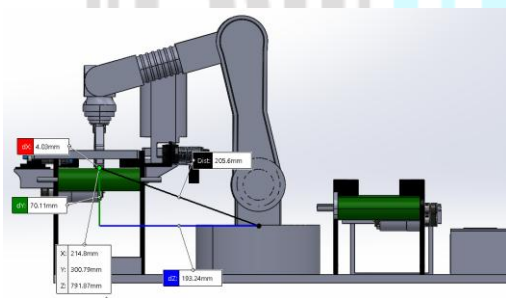
Gambar 4. Pengukuran Ketinggian Conveyor



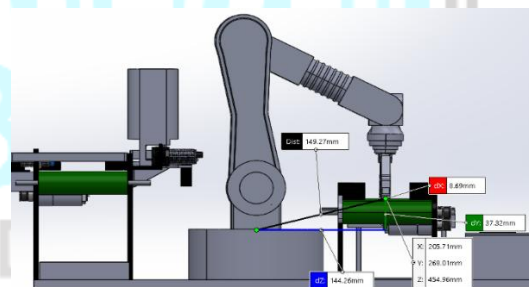
Gambar 5. Jangkauan Minimum *Robot arm*



Gambar 6. Jangkauan Maksimum *Robot arm*



Gambar 7. Pengujian Pengambilan Material



Gambar 8. Pengujian Peletakan Material

Pengujian desain sistem dilakukan untuk memastikan seluruh titik kerja berada dalam jangkauan *robot arm*. Berdasarkan hasil pengukuran, ketinggian conveyor sebesar 128,5 mm, *robot arm* memiliki jangkauan minimum sebesar 89,39 mm dan jangkauan maksimum sebesar 312,38 mm. Selain itu, titik pengambilan material pada conveyor utama berada pada jarak 205,6 mm dari pusat base *robot arm*, sedangkan titik peletakan material pada conveyor kedua berada pada jarak 149,27 mm. Seluruh titik kerja tersebut masih berada dalam rentang jangkauan *robot arm* sehingga tata letak komponen dinyatakan sesuai untuk direalisasikan pada tahap pembuatan sistem.

3) Perancangan Program *Sequential Ladder Diagram* PLC

Perancangan sistem kendali dilakukan menggunakan pendekatan *Sequential Ladder Diagram* (SLD) untuk menggambarkan urutan kerja sistem material handling secara sistematis. Penggunaan *ladder diagram* bertujuan untuk mempermudah perancangan logika kendali sebelum diimplementasikan ke dalam program mikrokontroler ESP32. Selain itu, penggunaan *ladder diagram* juga mendukung fungsi sistem sebagai media pembelajaran karena mahasiswa dapat memahami hubungan antara sensor, aktuator, dan logika kendali yang digunakan dalam proses otomasi industri.

Berdasarkan hasil perancangan, *ladder diagram* mampu merepresentasikan seluruh urutan operasi sistem mulai dari deteksi material, proses sortasi, hingga *monitoring* berbasis IoT. Alur logika sistem yang dirancang adalah sebagai berikut:

1. Sensor infrared mendeteksi keberadaan objek pada conveyor.
2. Conveyor utama bergerak membawa objek menuju area deteksi material.
3. Sensor proximity induktif melakukan identifikasi jenis material.
4. Jika material logam terdeteksi, conveyor utama berhenti dan *robot arm* diaktifkan untuk memindahkan material menuju conveyor kedua.
5. Conveyor kedua membawa material logam menuju area keluaran.
6. Jika material non-logam terdeteksi, conveyor utama tetap berjalan sehingga material bergerak menuju area keluaran tanpa melibatkan *robot arm*.
7. Data hasil proses pemilahan dikirimkan ke sistem *monitoring* IoT dan sistem kembali ke kondisi awal untuk memproses material berikutnya.

Logika kendali yang telah dirancang kemudian digunakan sebagai dasar dalam proses implementasi program pada mikrokontroler ESP32.

4) Konversi *Ladder diagram* Menjadi Program Arduino

Setelah proses pengujian *ladder diagram* selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah mengonversi logika kendali ke dalam bahasa pemrograman Arduino yang dijalankan pada mikrokontroler ESP32. Konversi dilakukan dengan menerjemahkan setiap *rung* pada *ladder diagram* menjadi struktur program berupa pembacaan *input*, proses logika, dan pengendalian *output*. Program Arduino dikembangkan menggunakan *software* Arduino IDE dengan ESP32 sebagai perangkat utama. *Input* sistem terdiri atas sensor infrared dan sensor proximity induktif, sedangkan *output* sistem terdiri atas motor conveyor, *robot arm*, serta sistem *monitoring* berbasis IoT. Logika program dirancang mengikuti urutan operasi yang telah diverifikasi melalui *ladder diagram* sehingga cara kerja sistem pada implementasi nyata tetap sesuai dengan rancangan awal.

Penggunaan ESP32 memungkinkan sistem tidak hanya menjalankan proses kendali lokal tetapi juga mengirimkan data hasil deteksi material ke platform IoT melalui jaringan internet. Data yang

dikirim meliputi jenis material yang terdeteksi, jumlah material yang diproses, serta status operasional sistem. Dengan demikian, proses *monitoring* dapat dilakukan secara *real-time* melalui perangkat yang terhubung ke internet sehingga pengguna dapat memantau hasil proses pemilahan tanpa harus berada di lokasi pengoperasian alat.

3.3 Tahap Implementasi Sistem

Tahap implementasi sistem dilakukan setelah seluruh proses perancangan mekanik, perancangan sistem kendali, serta pengujian desain dan program dinyatakan sesuai dengan kebutuhan sistem. Tahap ini bertujuan untuk merealisasikan rancangan yang telah dibuat menjadi sebuah sistem material handling otomatis yang dapat digunakan untuk melakukan proses pemilahan material logam dan non-logam secara nyata. Hasil realisasi sistem material handling yang telah dikembangkan ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Sistem *Material Handling*

Pembuatan sistem material handling diawali dengan proses pembuatan rangka menggunakan *filament* PLA hasil proses *3D printing*, pemasangan conveyor utama, conveyor kedua, *robot arm*, sensor infrared, sensor proximity induktif, mikrokontroler ESP32, serta komponen pendukung lainnya sesuai dengan tata letak yang telah dirancang pada model SolidWorks.

Conveyor utama dipasang sebagai jalur perpindahan material menuju area identifikasi. Sensor infrared pertama digunakan untuk mendeteksi objek yang masuk ke sistem, sedangkan sensor infrared kedua menjadi pemicu proses identifikasi material. Sensor proximity induktif dipasang pada area identifikasi untuk mendeteksi material logam. *Robot arm* ditempatkan di antara conveyor utama dan conveyor kedua untuk memindahkan material logam ke jalur keluaran, sementara material non-logam tetap melanjutkan perjalanan pada conveyor utama. Sensor infrared ketiga dipasang pada ujung conveyor kedua untuk mendeteksi material yang telah mencapai titik akhir proses. Seluruh komponen kemudian diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 melalui proses pengkabelan dan pemrograman berdasarkan hasil konversi *Sequential Ladder Diagram* (SLD). Pengujian awal menunjukkan bahwa seluruh komponen berfungsi dengan baik sehingga sistem material handling berhasil direalisasikan sesuai dengan desain dan siap digunakan untuk pengujian sistem.

3.4 Tahap Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam melakukan proses deteksi, pemilahan, dan pemindahan material secara otomatis. Pengujian menggunakan dua kategori material, yaitu material logam dan material non-logam. Material logam terdiri atas aluminium foil sebanyak 8 kali pengujian dan kaleng minuman sebanyak 7 kali pengujian, sedangkan material non-logam berupa plastik diuji sebanyak 15 kali. Dengan demikian, total pengujian yang dilakukan adalah 30 kali. Parameter yang diamati meliputi keberhasilan deteksi material oleh sensor proximity induktif, serta keberhasilan proses pemindahan material oleh *robot arm*. Data hasil pengujian sistem dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Sistem

No	Material	Jenis	Deteksi Sensor	Pemindahan Robot arm	Waktu Respon Sensor (Detik)
1.	Aluminium Foil	Logam	Berhasil	Berhasil	1,340
2.	Plastik	Non- Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,430
3.	Kaleng Minuman	Logam	Berhasil	Berhasil	1,370
4.	Plastik	Non- Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,420
5.	Aluminium Foil	Logam	Berhasil	Berhasil	1,440
6.	Plastik	Non- Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,370
7.	Kaleng Minuman	Logam	Berhasil	Berhasil	1,350
8.	Plastik	Non- Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,330
9.	Aluminium Foil	Logam	Berhasil	Berhasil	1,320
10.	Plastik	Non- Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,370
11.	Kaleng	Logam	Berhasil	Berhasil	1,330

No	Material	Jenis	Deteksi Sensor	Pemindahan Robot arm	Waktu Respon Sensor (Detik)
	Minuman				
12.	Plastik	Non-Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,340
13.	Aluminium Foil	Logam	Berhasil	Berhasil	1,370
14.	Plastik	Non-Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,320
15.	Kaleng Minuman	Logam	Berhasil	Berhasil	1,350
16.	Plastik	Non-Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,390
17.	Aluminium Foil	Logam	Berhasil	Berhasil	1,370
18.	Plastik	Non-Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,340
19.	Kaleng Minuman	Logam	Berhasil	Berhasil	1,390
20.	Plastik	Non-Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,400
21.	Aluminium Foil	Logam	Berhasil	Berhasil	1,380
22.	Plastik	Non-Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,370
23.	Kaleng Minuman	Logam	Berhasil	Berhasil	1,320
24.	Plastik	Non-Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,350
25.	Aluminium Foil	Logam	Berhasil	Berhasil	1,390
26.	Plastik	Non-Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,332
27.	Kaleng	Logam	Berhasil	Berhasil	1,320

No	Material	Jenis	Deteksi Sensor	Pemindahan Robot arm	Waktu Respon Sensor (Detik)
Minuman					
28.	Plastik	Non- Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,340
29.	Aluminium Foil	Logam	Berhasil	Berhasil	1,360
30.	Plastik	Non- Logam	Berhasil	Tidak Diperlukan	1,390

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor proximity induktif mampu mendeteksi material logam dengan baik dan menghasilkan respon yang konsisten pada setiap pengujian. Ketika material logam terdeteksi, conveyor utama berhenti secara otomatis dan *robot arm* melakukan proses pengambilan material dari conveyor utama menuju conveyor kedua. Setelah proses pemindahan selesai, conveyor kedua aktif untuk memindahkan material ke area keluaran.

Pada pengujian material non-logam, sensor proximity induktif tidak memberikan sinyal deteksi sehingga sistem mengaktifkan logika non-logam terdeteksi. Dalam kondisi tersebut, conveyor utama tetap beroperasi dan material melanjutkan perpindahan menuju ujung conveyor tanpa dipindahkan oleh *robot arm*. Selain proses sortasi, sistem *monitoring* berbasis IoT juga berhasil menampilkan informasi hasil deteksi material secara *real-time*. Data yang ditampilkan meliputi jenis material yang terdeteksi dan status operasional sistem selama proses pengujian berlangsung.

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan sebanyak 30 kali, sistem menunjukkan tingkat keberhasilan sebesar 100% dalam melakukan proses deteksi dan pemilahan material. Seluruh material logam berhasil dipindahkan ke conveyor kedua sesuai dengan logika sistem yang dirancang, sedangkan seluruh material non-logam tetap melanjutkan perpindahan pada conveyor utama. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi antara sensor, conveyor, *robot arm*, ESP32, dan sistem IoT mampu bekerja dengan baik dalam mendukung proses material handling otomatis.

3.5 Analisis Statistik

1) Analisis Statistik Waktu Respon Sensor

Analisis statistik dilakukan terhadap data waktu respon sensor yang diperoleh dari hasil pengujian sistem. Data dikelompokkan ke dalam dua kategori, yaitu material logam dan material non-logam. Kelompok material logam terdiri atas data pengujian aluminium foil dan kaleng minuman dengan total 15 data, sedangkan kelompok material non-logam terdiri atas 15 data pengujian plastik. Sebelum

dilakukan uji perbedaan, terlebih dahulu dilakukan uji normalitas menggunakan metode *Shapiro-Wilk*. Hasil Uji Normalitas *Shapiro-Wilk* Variabel Waktu Respon Sensor dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Normalitas *Shapiro-Wilk* Variabel Waktu Respon Sensor

Jenis Material	Jumlah Data (n)	Nilai Sig.	Keterangan
Logam	15	0,218	Berdistribusi Normal
Non-logam	15	0,306	Berdistribusi Normal

Hasil uji normalitas menunjukkan bahwa data waktu respon sensor material logam maupun non-logam memiliki nilai signifikansi lebih besar dari 0,05. Dengan demikian, data dapat dinyatakan berdistribusi normal sehingga memenuhi syarat untuk dilakukan pengujian menggunakan *Independent Sample t-test*. Hasil *Independent sample t-test* Waktu Respon Sensor dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil *Independent Sample t-test* Waktu Respon Sensor

Variabel	Logam	Non-logam	Levene Sig.	Sig. (2-tailed)	Keterangan
Waktu Respon Sensor	15	15	0,688	0,620	Tidak Terdapat Perbedaan Signifikan

Berdasarkan Tabel 5, hasil *Independent Sample t-test* menunjukkan nilai signifikansi (*Sig. (2-tailed)*) sebesar 0,620 yang lebih besar dari taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara waktu respon sensor pada material logam dan non-logam. Dengan demikian, sistem memiliki performa deteksi yang konsisten terhadap kedua jenis material yang diuji.

2) Analisis Statistik Waktu Perpindahan *Robot arm*

Analisis statistik waktu perpindahan *robot arm* dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan waktu perpindahan yang signifikan antara material aluminium foil dan kaleng minuman. Pengujian dilakukan karena kedua material tersebut termasuk kategori logam yang dipindahkan oleh *robot arm* menuju conveyor kedua. Berikut merupakan Tabel 6. Data Waktu Perpindahan *Robot arm*.

Tabel 6. Data Waktu Perpindahan *Robot arm*

No	Waktu Kaleng Minuman (Detik)	Waktu Aluminium Foil (Detik)
1.	6,450	6,400
2.	6,430	6,460
3.	6,440	6,420
4.	6,450	6,410
5.	6,430	6,440
6.	6,460	6,420
7.	6,450	6,410
8.	6,400	6,430
9.	6,420	6,460
10.	6,450	6,440
11.	6,420	6,460
12.	6,450	6,430
13.	6,450	6,400
14.	6,410	6,420
15.	6,440	6,450

Sebelum dilakukan pengujian menggunakan *Independent Sample t-test*, terlebih dahulu dilakukan uji normalitas menggunakan metode *Shapiro–Wilk* untuk memastikan bahwa data memenuhi asumsi distribusi normal. Pengujian normalitas dilakukan terhadap data waktu perpindahan *robot arm* pada material aluminium foil dan kaleng minuman. Hasil uji normalitas *Shapiro–Wilk* waktu perpindahan *robot arm* disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Uji Normalitas *Shapiro-Wilk* Waktu Perpindahan *Robot arm*.

Jenis Material	Jumlah Data (n)	Nilai Sig.	Keterangan
Kaleng Minuman	15	0,070	Berdistribusi Normal
Aluminium Foil	15	0,210	Berdistribusi Normal

Berdasarkan Tabel 7. nilai signifikansi hasil uji normalitas pada material aluminium foil sebesar 0,210, sedangkan pada material kaleng minuman sebesar 0,070. Kedua nilai tersebut lebih besar dari 0,05 sehingga data waktu perpindahan *robot arm* pada kedua jenis berdistribusi normal. Dengan demikian, data memenuhi asumsi normalitas dan dapat dilanjutkan ke tahap pengujian menggunakan *Independent Sample t-test*. Berikut merupakan Tabel 8. Hasil Uji *Independent Sample t-test* Waktu Perpindahan *Robot arm*.

Tabel 8. Hasil Uji *Independent Sample t-test* Waktu Perpindahan *Robot arm*.

Variabel	n (Kaleng Minuman)	n (Aluminium Foil)	Levene Sig.	Sig. (2- tailed)	Keterangan
Waktu Perpindahan Robot Arm	15	15	0,471	0,355	Tidak Terdapat Perbedaan Signifikan

Berdasarkan Tabel 8, nilai signifikansi uji homogenitas (*Levene's Test*) sebesar 0,471 ($>0,05$), sehingga varians data pada kedua kelompok dinyatakan homogen. Selanjutnya, hasil *Independent Sample t-test* menunjukkan nilai signifikansi (*Sig. (2-tailed)*) sebesar 0,355 ($>0,05$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara waktu perpindahan *robot arm* pada material aluminium foil dan kaleng minuman. Dengan demikian, *robot arm* mampu melakukan proses pemindahan kedua jenis material logam dengan waktu perpindahan yang relatif konsisten. Hasil ini menunjukkan bahwa jenis material logam yang digunakan dalam pengujian tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap waktu perpindahan *robot arm*, sehingga sistem memiliki performa pemindahan yang stabil.

3.6 Evaluasi Media Pembelajaran

Evaluasi media pembelajaran dilakukan untuk mengetahui tingkat penerimaan sistem material handling otomatis yang telah dikembangkan sebagai media praktikum di Laboratorium Otomasi Industri. Evaluasi dilakukan menggunakan metode kuesioner dengan skala *Likert* yang diberikan kepada 7 orang asisten laboratorium yang memahami konsep otomasi industri.

Sebelum penelitian ini dilakukan, Laboratorium Otomasi Industri telah memiliki media pembelajaran berupa conveyor trainer yang digunakan untuk memperkenalkan konsep dasar perpindahan material. Namun, media tersebut belum mampu merepresentasikan sistem material handling otomatis secara terintegrasi karena belum dilengkapi dengan proses identifikasi material, pemilahan material secara otomatis menggunakan robot arm, serta sistem *monitoring* berbasis *Internet of Things* (IoT).

Melalui penelitian ini dilakukan pengembangan media pembelajaran dengan menambahkan sensor proximity induktif sebagai pendeteksi material logam, *robot arm* 4-DOF sebagai aktuator pemindahan material, serta sistem *monitoring* berbasis IoT yang menampilkan informasi proses sortasi secara *real-time*. Pengembangan tersebut menghasilkan media pembelajaran yang tidak hanya

memperagakan proses perpindahan material, tetapi juga mengintegrasikan konsep material handling, sensor industri, sistem kendali, robotika, dan *Internet of Things* (IoT) dalam satu sistem pembelajaran..

Aspek yang dievaluasi meliputi kemudahan penggunaan sistem, kesesuaian sistem dengan kebutuhan pembelajaran, kemudahan memahami konsep otomasi industri, integrasi teknologi yang digunakan, serta manfaat sistem sebagai media pembelajaran. Berikut merupakan Tabel 9. Hasil Penilaian Responden.

Tabel 9. Hasil Penilaian Responden

No	Pernyataan	SS	S	CS	TS	STS
1.	Saya memahami cara kerja sistem material handling yang baru.		7			
2.	Saya memahami fitur monitoring berbasis IoT pada sistem.	1	6			
3.	Sistem baru mudah dioperasikan saat digunakan.	2	5			
4.	Sistem monitoring berbasis IoT mudah dipahami.	1	6			
5.	Sistem baru membantu memahami konsep otomasi industri.	3	4			
6.	Sistem baru menarik digunakan sebagai media praktikum.	4	3			
7.	Sistem baru merepresentasikan proses industri secara nyata.	2	5			
8.	Sistem baru lebih baik dibanding sistem sebelumnya.	4	3			
9.	Sistem baru lebih modern karena terintegrasi IoT.	5	2			
10.	Sistem baru lebih efektif digunakan sebagai media pembelajaran dibanding sistem lama.	2	5			

Keterangan:

SS : Sangat Setuju

S : Setuju

CS : Cukup Setuju
TS : Tidak Setuju
STS : Sangat Tidak Setuju

Berdasarkan Tabel 9. seluruh responden memberikan penilaian pada kategori Setuju dan Sangat Setuju terhadap seluruh aspek yang dievaluasi. Tidak terdapat penilaian pada kategori Tidak Setuju maupun Sangat Tidak Setuju, sehingga sistem memperoleh tanggapan positif sebagai media pembelajaran. Responden menilai bahwa sistem membantu memahami konsep material handling, sensor industri, sistem kendali, *robot arm*, dan *Internet of Things* (IoT) secara terintegrasi. Selain itu, fitur *monitoring* berbasis IoT membuat proses praktikum lebih interaktif dan mendekati implementasi di lingkungan industri.

Dibandingkan dengan conveyor trainer sebelumnya, sistem yang dikembangkan memiliki fungsi yang lebih lengkap karena mampu melakukan identifikasi material, sortasi otomatis menggunakan robot arm, serta monitoring berbasis IoT secara real-time. Pengembangan tersebut memberikan pengalaman belajar yang lebih komprehensif dibandingkan media pembelajaran sebelumnya. Berdasarkan hasil evaluasi, sistem material handling otomatis berbasis IoT memperoleh tanggapan positif dan dapat digunakan sebagai media pembelajaran di Laboratorium Otomasi Industri.

4. PENUTUP

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan sistem, pengujian sistem, analisis statistik, dan evaluasi media pembelajaran yang telah dilakukan, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem material handling otomatis berbasis Internet of Things (IoT) berhasil dirancang dan direalisasikan dengan mengintegrasikan conveyor, sensor infrared, sensor proximity induktif, robot arm 4-DOF, mikrokontroler ESP32, dan sistem monitoring IoT sebagai media pembelajaran di Laboratorium Otomasi Industri.
2. Sistem mampu melakukan proses deteksi, pemilahan, dan pemindahan material logam dan non-logam secara otomatis sesuai dengan alur kerja yang telah dirancang.
3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keberhasilan sebesar 100% dalam proses deteksi dan pemilahan material. Selain itu, hasil analisis statistik menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada waktu respon sensor antara material logam dan non-logam maupun pada waktu perpindahan robot arm antara aluminium foil dan kaleng minuman, sehingga sistem memiliki performa yang konsisten.
4. Berdasarkan hasil evaluasi media pembelajaran, sistem dinilai layak digunakan sebagai media

pembelajaran karena mampu mengintegrasikan konsep material handling, sistem kendali, robotika, dan Internet of Things dalam satu media pembelajaran.

5. Keterbatasan penelitian ini terletak pada jenis material yang diuji masih terbatas, sistem IoT yang hanya berfungsi sebagai media monitoring sederhana, serta belum dilakukan pengukuran performa sistem secara menyeluruh. Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada pengembangan metode identifikasi material yang lebih beragam, peningkatan kemampuan robot arm, implementasi kendali sistem secara real-time melalui platform IoT, serta evaluasi performa sistem menggunakan parameter yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhiruddin, A., Imnadir, I., & Nurjannah, N. (2024). Rancang Bangun Alat Pemilah Sampah Logam dan Non Logam Menggunakan Sensor Proximity Induktif dan Infrared Berbasis Arduino UNO R3. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 8(3), 83–90. <https://doi.org/10.30743/jet.v8i3.8799>
- Atmasani, D. (2025). Peran Internet of Things (Iot) Terhadap Peningkatan Fleksibilitas Sistem Produksi Industri Dalam Era Industri 4.0. *Jurnal Media Elektronika*, 1(2), 93–103. <https://doi.org/10.26858/ccp4h511>
- Attariq Ziad, Eva Darnila, & Kurniawati. (2024). Development and Implementation of an ESP32 Microcontroller and Monitoring System for Smart Door Lock Using RFID Sensor for E-KTP ID and Fingerprint Based on the Internet of Things. *Proceedings of Malikussaleh International Conference on Multidisciplinary Studies (MICoMS)*, 4, 00023. <https://doi.org/10.29103/micoms.v4i.908>
- Chenchireddy, K., Dora, R., Mulla, G. B., Jegathesan, V., & Sydu, S. A. (2024). Development of robotic arm control using Arduino controller. *IAES International Journal of Robotics and Automation*, 13(3), 264–271. <https://doi.org/10.11591/ijra.v13i3.pp264-271>
- Dames, F., & Tri Putra Yanto, D. (2022). Sistem Kendali dan Monitoring Kecepatan Motor Servo Berbasis Human Machine Interface. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 3(2), 487–495. <https://doi.org/10.24036/jtein.v3i2.273>
- Ekawati, R., Permata, E., Fathkhurrohman, M., Irwanto, & Afridah, S. (2021). *Pengembangan Media Pembelajaran Trainer Kit Teknik Digital berbasis Cooperative Learning Approach*. 12(2), 6. <https://doi.org/10.31849/lectura.v12i2.7486>
- Ghodsian, N., Benfriha, K., Olabi, A., Gopinath, V., & Arnou, A. (2023). Mobile Manipulators in Industry 4.0: A Review of Developments for Industrial Applications. *Sensors*, 23(19). <https://doi.org/10.3390/s23198026>
- Kalsoom, T., Ahmed, S., Rafi-Ul-shan, P. M., Azmat, M., Akhtar, P., Pervez, Z., Imran, M. A., & Ur-Rehman, M. (2021). Impact of IoT on manufacturing industry 4.0: A new triangular systematic review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(22), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su132212506>
- 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>
- Lampropoulos, G., Siakas, K., & Anastasiadis, T. (2019). Internet of Things in the Context of Industry

4.0: An Overview. *International Journal of Entrepreneurial Knowledge*, 7(1), 4–19. <https://doi.org/10.2478/ijek-2019-0001>

- Lenni, Mahpud, & Suhartono, F. (2025). *Prototipe Alat Pemilah Sampah Menggunakan Sensor Proximity Berbasis IoT Dengan Notifikasi Telegram*. 9, 69–73. <https://doi.org/10.31000/bk8tg51>
- Mubaroq, F., Muhammad, R. A., & Irwan, H. (2025). Pengembangan Sistem Kendali Sepeda Statis Berbasis Ergonomi Dengan Menggunakan Metode Reverse Engineering. *Jurnal Teknik Ibnu Sina (JT-IBSI)*, 10(1), 11–20. <https://doi.org/10.36352/jt-ibsi.v10i1.1131>
- Nurhaswinda, Muslimah, N., Yuliani, C., Putri, R., Mayura, V., & Selvira, D. (2026). Uji Normalitas Dan Homogenitas Dalam Analisis Statistik. *Jurnal Ilmiah PGSD FKIP Universitas Mandiri*, 12(1), 104–116. <https://doi.org/10.36989/didaktik.v12i01.11233>
- Ponis, S. T., & Efthymiou, O. K. (2020). Cloud and IoT Applications in Material Handling Automation and Intralogistics. *Logistics Journal*. <https://doi.org/10.3390/logistics4030022>
- Putri, S., Ranzani, C., & Sihombing, A. (2024). *Penentuan Ongkos Material Handling Di PT XYZ Menggunakan Metode Computerized Relative Allocation Of Facilities Technique (CRAFT)*. 4(desember), 31–41. <https://doi.org/10.46306/tgc.v4i2.252>
- Rizqi Samkayana, I. N. W. R. S. (2025). Implementasi Firebase Realtime Database Pada Smart Cat Feeder Berbasis Mikrokontroler Esp32. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 13(3). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i3.7198>
- Satriani, Y. D., & Yuhendri, M. (2023). Kontrol Posisi Motor Servo Berbasis Human Machine Interface dan Internet of Things. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 4(2), 949–956. <https://doi.org/10.24036/jtein.v4i2.523>
- Siahaan, I. H., Jonoadji, N., & Chandra, A. (2022). Pemanfaatan Roller dan Belt Conveyor pada Pembuatan Prototipe Mesin untuk Proses Sortasi Telur. *Jurnal Teknik Mesin*, 19(2), 40–44. <https://doi.org/10.9744/jtm.19.2.40-44>
- Tahtawi, A. R. Al, Agni, M., & Hendrawati, T. D. (2021). Small-scale robot arm design with pick and place mission based on inverse kinematics. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(6), 469–475. <https://doi.org/10.18196/jrc.26124>
- Wang, L., Rem, P., Di Maio, F., van Beek, M., & Tomás, G. (2024). An Innovative Magnetic Density Separation Process for Sorting Granular Solid Wastes. *Recycling*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/recycling9030048>
- Wardhani, I. P., Hendajani, F., & Pramaishella, D. P. (2025). Implementasi Pengukuran Skala Likert Pada Aplikasi Edukasi Bahaya Toxic Parent Berbasis Web. *Journal Computer and Technology*, 3(1), 08–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.69916/comtechno.v3i1.338>
- Wulandari, A. D. R., Mashitasari, D., & Fatimah, F. (2025). Perbandingan Nilai Ujian Madrasah Aqidah Akhlak Antara Kurikulum Ktsp Dan Kurikulum 2013 Dengan Menggunakan Analisis Uji Independent Sample T-Test (Studi Kasus Siswa Kelas Vi Mi Al-Hamidi Jember). *ESTIMATOR: Journal of Applied Statistics, Mathematics, and Data Science*, 3(1), 47–57. <https://doi.org/10.31537/estimator.v3i1.2503>
- Wulandari, R., Ariwibowo, M. R., Taryo, T., & Ananda, G. (2024). Design Smart Trash Based On the Inductive Proximity Sensor. *International Journal of Multidisciplinary Approach Research and Science*, 2(01), 194–200. <https://doi.org/10.59653/ijmars.v2i01.394>
- Yulianeu, A., & Ridwanulloh, M. F. (2022). Model Dan Simulasi Pemilah Sampah Logam Dan Non Logam Otomatis Berbasis Arduino. *JUTEKIN (Jurnal Teknik Informatika)*, 10(2). <https://doi.org/10.51530/jutekin.v10i2.668>