

---

## Prototipe Alat Pendeteksi dan Pengumpul Serpihan Logam Berbasis Remote Control

**Irham Fadilah<sup>1\*</sup>, Endah Fitriani<sup>2</sup>, Rahmat Novrianda Dasmen<sup>3</sup>, Nina Paramytha<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>Department of Electrical Engineering, Universitas Bina Darma Palembang, Indonesia

irhamfadilah.13@gmail.com<sup>1\*</sup>, endahfitriani@binadarma.ac.id<sup>2</sup>, rahmat\_novrianda@gmail.com<sup>3</sup>,

nina.paramitha@binadarma.ac.id<sup>4</sup>

---

### Article Info

#### Article history:

Received: 3 September 2025

Revised: 16 December 2025

Accepted: 27 January 2026

Published: March 2026

---

#### Keywords:

Debris Collector;

Metal Material;

ESP-NOW;

Wireless Control;

R&D.

---

### ABSTRACT

*Handling metal cutter debris in the tissue processing industry poses a significant risk of physical injury, compromising Occupational Health and Safety (OHS). To address this issue, this research aimed to design, build, and test the functionality of a remote-controlled prototype for detecting and collecting metal fragments. This study applied a Research and Development (R&D) methodology, resulting in a Robot Unit (Receiver) equipped with an SN04-N2 metal proximity sensor, an HC-SR04 ultrasonic sensor, and an electromagnet-based collection mechanism. Operational control was performed via a Control Unit (Transmitter) using the ESP-NOW wireless communication protocol. The test results show that the device characteristics include a stable communication range of up to 220 meters in an outdoor environment. The metal detection limit is effective at a 3 mm distance, with an electromagnetic mechanism capable of lifting a maximum load of 41.2 grams at a lifting distance of 0.3 cm. However, the operational endurance of the Receiver Unit is recorded at 1 hour and 34 minutes. From these results, the conclusion of this study is that the prototype successfully functions as intended, with reliable communication and actuator strength as its main advantages. However, power efficiency and the challenge of precise remote positioning are its primary limitations that require further development.*

---

### Corresponding Author:

Irham Fadilah,

Department of Electrical Engineering, Universitas Bina Darma

Irhamfadilah.13@gmail.com

---

## 1. PENDAHULUAN

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan aspek krusial dalam lingkungan industri [1],[2], khususnya pada industri produksi tisu yang memiliki risiko. Salah satu risiko yang sering muncul namun berpotensi fatal adalah timbulnya serpihan logam tajam selama proses penggantian pisau cutter. Serpihan ini, yang dapat secara tidak sengaja terlepas atau terjatuh, menciptakan bahaya laten yang dapat menyebabkan cedera fisik serius bagi karyawan. Saat ini, banyak sistem penanganan logam di lingkungan serupa masih bergantung pada metode manual, yang kurang efisien dan tetap memaparkan pekerja pada risiko cedera secara langsung.

Perkembangan teknologi robotika menawarkan peluang signifikan untuk memitigasi risiko ini dengan menggantikan peran manusia di lingkungan berbahaya [3], Oleh karena itu, diperlukan inovasi untuk mengatasi masalah ini secara efektif. Sistem deteksi metal atau logam masih menggunakan sistem yang manual [4], Namun, tinjauan terhadap *state of the art* teknologi saat ini menunjukkan bahwa solusi yang ada belum sepenuhnya terintegrasi. Beberapa penelitian sebelumnya berfokus pada aspek deteksi semata. Sebagai contoh, Nirmala mengembangkan alat pendeteksi logam berbasis mikrokontroler yang dilengkapi GPS untuk penentuan lokasi [5]. Meskipun alat ini mampu memetakan keberadaan logam, kelemahan utamanya adalah tidak adanya mekanisme pengumpulan, sehingga operator manusia tetap harus mendekati untuk mengambil objek berbahaya tersebut. Serupa dengan itu, penelitian oleh Octavian et al. berhasil merancang bangun alat deteksi logam menggunakan sensor induktif dengan sensitivitas baik [6], namun alat tersebut hanya berfungsi sebagai detektor genggam atau statis, dan belum diimplementasikan pada platform robotik bergerak yang dapat melakukan eksekusi pengumpulan.

Di sisi lain, penggunaan sensor proksimitas induktif dan elektromagnet sebenarnya telah teruji keandalannya dalam aplikasi industri terotomatisasi. Rosnani Affandi memanfaatkan sensor proximity induktif dalam sistem pemilahan sampah otomatis [7], sementara Dafa et al. menggunakannya untuk deteksi posisi komponen manufaktur [8]. Namun, kedua sistem ini bersifat stasioner (tetap di tempat) dan terpaku pada jalur konveyor, sehingga tidak fleksibel untuk membersihkan area lantai yang luas atau tidak terstruktur. Terkait mekanisme pengambil, aplikasi elektromagnet dalam robotika telah dieksplorasi, Berdasarkan tinjauan literatur tersebut, teridentifikasi sebuah celah riset (*research gap*) yang signifikan. Teknologi yang ada saat ini ada yang hanya mendeteksi (tanpa mengambil), dan ada yang dapat memilah namun bersifat stasioner. Belum ada sistem terintegrasi yang menggabungkan kemampuan mobilitas jarak jauh, deteksi logam presisi, dan mekanisme pengumpulan magnetik dalam satu unit robot kompak untuk keperluan K3.

Menjawab tantangan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan prototipe alat pendeteksi dan pengumpul serpihan logam berbasis *remote control*. Kontribusi kebaruan dari penelitian ini terletak pada integrasi sensor proksimitas induktif dan aktuator elektromagnet pada *platform mobile robot* yang dikendalikan *nirkabel*. Dengan pendekatan ini, alat dirancang untuk dapat mendeteksi sekaligus membersihkan serpihan logam berbahaya dari jarak aman, yang secara langsung meningkatkan standar keselamatan kerja dengan meminimalisir interaksi fisik antara pekerja dan sumber bahaya. Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang, membangun, dan memvalidasi fungsionalitas prototipe tersebut sebagai solusi preventif yang inovatif di lingkungan industri.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan metodologi penelitian dan pengembangan atau *research and development* (R&D). Pendekatan ini mencakup siklus tahapan mulai dari studi literatur, observasi lapangan, perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan lunak, hingga pengujian fungsionalitas produk [9],[10]. Sebuah pendekatan yang dipilih karena sifatnya yang berorientasi pada produk untuk menciptakan solusi fungsional. Proses ini diawali dengan studi literatur dan observasi lapangan untuk menganalisis kebutuhan, yang menjadi dasar perancangan sistem.

Tahap perancangan mencakup arsitektur perangkat keras dan lunak, termasuk pemilihan komponen elektronik seperti mikrokontroler, sensor, dan aktuator, serta desain logika kontrol. Selanjutnya, dilakukan implementasi dengan merakit komponen dan melakukan pengkodean program untuk *transmitter* dan *receiver*. Setelah prototipe selesai, serangkaian pengujian fungsionalitas produk dilakukan, yang mencakup verifikasi setiap komponen, jangkauan komunikasi nirkabel, kinerja elektromagnet, daya tahan baterai, dan uji sistem terintegrasi. Data dari pengujian ini kemudian dievaluasi untuk memvalidasi apakah prototipe telah memenuhi tujuan awal dan untuk mengidentifikasi area pengembangan lebih lanjut.

## 2.1. Protokol Komunikasi ESP-NOW

Protokol komunikasi untuk sistem ini dipilih berdasarkan studi performa untuk memastikan transfer data yang efisien dan andal. *ESP-NOW* adalah protokol komunikasi nirkabel yang dikembangkan oleh Espressif yang memungkinkan pengiriman data secara langsung antar perangkat tanpa memerlukan koneksi *Wi-Fi* atau internet. Protokol ini sangat relevan untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT) yang membutuhkan transfer data lokal yang cepat dengan latensi rendah [11]. Studi performa oleh Wedyanti et al. pada konfigurasi multi-node menunjukkan bahwa *ESP-NOW* mampu menjaga *delay* sangat rendah 5-11 ms, *jitter* minimal 1-1.3 ms, dan pengiriman data tanpa *packet loss* pada jarak hingga 10 meter [12].

Penelitian tersebut juga mengkonfirmasi bahwa meskipun *throughput* yang dihasilkan rendah sekitar 6.7 bps, kecepatan ini sudah memadai untuk pengiriman data sensor pada sistem IoT. Selain itu, keandalan pengiriman data tetap stabil 100% pada berbagai interval pengiriman, mulai dari 1 hingga 20 detik. Di sisi lain, penelitian oleh Makmun Mamunir pada kondisi tanpa hambatan menunjukkan latensi bisa mencapai 2 ms pada jarak 15-20 meter, namun juga menyoroti bahwa kualitas sinyal akan menurun seiring bertambahnya jarak, yang dapat menyebabkan data gagal terkirim [13]. Berdasarkan karakteristik ini, *ESP-NOW* dipilih karena keunggulannya dalam komunikasi *real-time*, efisiensi energi, dan keandalan pada jarak operasional yang relevan untuk lingkungan industri.

## 2.2. Arsitektur dan Perancangan Sistem

Protokol komunikasi untuk sistem ini dipilih berdasarkan studi performa untuk memastikan transfer data yang efisien dan andal. *ESP-NOW* adalah protokol komunikasi nirkabel yang dikembangkan oleh Espressif yang memungkinkan pengiriman data secara langsung antar perangkat tanpa memerlukan koneksi *Wi-Fi* atau internet. Protokol ini sangat relevan untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT) yang membutuhkan transfer data lokal yang cepat dengan latensi rendah [11]. Studi performa oleh Wedyanti et al. pada konfigurasi multi-node menunjukkan bahwa *ESP-NOW* mampu menjaga *delay* sangat rendah 5-11 ms, *jitter* minimal 1-1.3 ms, dan pengiriman data tanpa *packet loss* pada jarak hingga 10 meter [12].

Penelitian tersebut juga mengkonfirmasi bahwa meskipun *throughput* yang dihasilkan rendah sekitar 6.7 bps, kecepatan ini sudah memadai untuk pengiriman data sensor pada sistem IoT. Selain itu, keandalan pengiriman data tetap stabil 100% pada berbagai interval pengiriman, mulai dari 1 hingga 20 detik. Di sisi lain, penelitian oleh Makmun Mamunir pada kondisi tanpa hambatan menunjukkan latensi bisa mencapai 2 ms pada jarak 15-20 meter, namun juga menyoroti bahwa kualitas sinyal akan menurun seiring bertambahnya jarak, yang dapat menyebabkan data gagal terkirim [13]. Berdasarkan karakteristik ini, *ESP-NOW* dipilih karena keunggulannya dalam komunikasi *real-time*, efisiensi energi, dan keandalan pada jarak operasional yang relevan untuk lingkungan industri.

Sistem ini dirancang dengan arsitektur yang terdiri dari dua unit utama yang saling berkomunikasi yakni Unit Kontrol (*Transmitter*) dan Unit Alat (*Receiver*). Unit Kontrol berfungsi sebagai *remote control* genggam yang dioperasikan oleh pengguna. Input dari komponen seperti *joystick* analog dan *push button* diterima dan diolah oleh NodeMCU ESP-8266. Untuk mengatasi keterbatasan pin ADC tunggal pada NodeMCU, sebuah multiplexer CD74HC4067 digunakan untuk memungkinkan pembacaan beberapa sinyal analog. Hasil olahan data ini kemudian dikirimkan sebagai sinyal nirkabel melalui protokol *ESP-NOW*, dengan sebuah LED sebagai indikator visual bagi operator.

Unit Alat (*Receiver*), yang merupakan robot pengumpul, menerima perintah dari *transmitter*. Unit ini juga menggunakan NodeMCU ESP-8266 sebagai pusat proses yang mengolah data dari sensor ultrasonik HC-SR04 untuk deteksi halangan dan Sensor SN04-N2 untuk deteksi logam. Sinyal output yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan berbagai aktuator, seperti *motor DC* melalui modul L298N, relay yang mengaktifkan elektromagnet, motor servo, dan buzzer sebagai indikator audio. Prototipe ini menggunakan sasis akrilik bertingkat dan konfigurasi penggerak empat roda untuk manuver yang stabil.

### 2.2.1 Unit Kontrol (*Transmitter*)

Unit kontrol berfungsi sebagai *remote control* genggam yang dioperasikan oleh pengguna. Alur kerja dan desain unit ini dijelaskan melalui blok diagram berikut.

Gambar 1. Blok diagram unit kontrol (*transmitter*).

Diagram ini menunjukkan alur kerja fungsional *transmitter*. Input dari komponen seperti *joystick analog* dan *push button* diterima dan diolah oleh NodeMCU ESP-8266, yang bertindak sebagai unit proses utama. Hasil olahan data kemudian dikemas dan dikirimkan sebagai sinyal output nirkabel melalui protokol *ESP-NOW*. Sebuah *LED* digunakan sebagai indikator visual bagi operator.

Gambar 2. Diagram rangkaian/*wiring* unit kontrol (*transmitter*).

Diagram ini merinci koneksi elektrik antar komponen pada *transmitter*. Terlihat bahwa beberapa input analog dari *joystick* dihubungkan melalui *multiplexer* CD74HC4067. Ini adalah solusi teknis untuk mengatasi keterbatasan pin analog pada NodeMCU, memungkinkan pembacaan beberapa sinyal analog secara bergantian. Rangkaian juga mencakup regulator tegangan untuk memastikan suplai daya yang stabil ke mikrokontroler dari sumber baterai.

Gambar 3. Unit kontrol (*remote control*).

Gambar ini menampilkan unit kontrol, yang dirancang sebagai perangkat genggam (*hand-held*) untuk kemudahan dan ergonomi penggunaan. Penempatan *joystick* dan tombol dirancang untuk memberikan kontrol yang intuitif dan responsif bagi operator saat mengendalikan alat dari jarak jauh.

### 2.2.2 Unit Alat (*Receiver*)

Unit alat merupakan robot pengumpul yang menerima perintah dari *transmitter*. Arsitektur dan desain rangkaiannya dijelaskan pada diagram berikut.

Gambar 4. Blok diagram unit alat (*receiver*).

Diagram ini mengilustrasikan arsitektur fungsional pada unit alat. NodeMCU ESP-8266 berfungsi sebagai pusat proses yang menerima perintah dari *transmitter*. Unit ini memproses data dari sensor Input dan menghasilkan sinyal Output untuk menggerakkan berbagai aktuator, seperti *Motor DC* melalui modul L298N, *Relay* yang mengaktifkan elektromagnet, motor servo, dan *buzzer* sebagai indikator audio.

Gambar 5. Diagram rangkaian/*wiring* unit alat (*receiver*).

Diagram ini memperlihatkan pengkabelan lengkap untuk unit alat. Rangkaian ini menunjukkan bagaimana setiap komponen terhubung ke pin GPIO (*General Purpose Input/Output*) pada NodeMCU. Driver Motor L298N terhubung ke pin digital untuk mengontrol arah dan kecepatan empat *motor DC*. Relay dikendalikan oleh satu pin digital untuk menyalakan atau mematikan elektromagnet 24V (yang dayanya disuplai oleh modul *step-up*). Sensor dan aktuator lainnya juga terhubung ke pin yang sesuai, membentuk sebuah sistem elektromekanis yang terintegrasi.

Gambar 6. Unit alat (*receiver*).

Gambar ini adalah unit alat (*receiver*) setelah seluruh komponen dirakit. Prototipe ini menggunakan sasis akrilik transparan bertingkat untuk menempatkan semua komponen elektronik seperti NodeMCU, driver motor, sensor, dan baterai. Konfigurasi penggerak empat roda (*differential drive*) dipilih untuk memberikan kemampuan manuver yang stabil dan fleksibel di area kerja.

### 2.3 Alur Kerja Sistem

*Flowchart* adalah penggambaran secara grafik dari langkah-langkah dan urutan prosedur dari suatu program [14],[15]. Diagram alir pada Gambar 7 merepresentasikan algoritma pengendalian utama yang tertanam pada mikrokontroler Unit *Receiver*. Proses sistem diawali dengan tahap inisialisasi untuk menetapkan mode pin *General Purpose Input/Output* (GPIO) dan memulai protokol komunikasi ESP-NOW. Setelah sistem siap, program memasuki siklus perulangan utama (*main loop*) yang bertugas memantau kondisi lingkungan dan menerima perintah operator secara *real-time*. Pada setiap siklus iterasi, sistem memprioritaskan fungsi keselamatan dengan membaca data dari sensor ultrasonik HC-SR04.

Logika keputusan pertama mengevaluasi jarak objek di depan alat. Apabila jarak terukur kurang dari 15 cm, mikrokontroler segera mengaktifkan buzzer untuk memberikan peringatan dini kepada operator mengenai potensi tabrakan, sedangkan jika jarak aman, sistem melanjutkan ke proses berikutnya. Selanjutnya, sistem memproses sinyal digital dari sensor proksimitas induktif SN04-N2 untuk mendeteksi keberadaan serpihan logam. Jika sensor memberikan logika LOW (logam terdeteksi), sistem akan mengirimkan umpan balik status ke Unit Transmitter agar operator mengetahui posisi target. Langkah terakhir dalam siklus ini adalah pemrosesan paket data kendali. Sistem memvalidasi apakah terdapat data masuk dari remote control. Jika data valid diterima, mikrokontroler menerjemahkan input joystick menjadi sinyal kendali motor DC untuk manuver pergerakan, serta mengaktifkan relay elektromagnet apabila tombol pengumpul ditekan oleh operator.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem dilakukan secara komprehensif untuk memvalidasi fungsionalitas prototipe sebagai solusi K3 di lingkungan industri. Evaluasi difokuskan pada tiga parameter kritis: reliabilitas komunikasi jarak jauh, efektivitas mekanisme pengumpulan, dan efisiensi manajemen daya.

### 3.1 Analisis Stabilitas Komunikasi Nirkabel

Pengujian jangkauan komunikasi ESP-NOW dilakukan di area terbuka dengan halangan fisik parsial untuk mensimulasikan kondisi pabrik. Berdasarkan Grafik pada Gambar 8, sistem menunjukkan performa komunikasi yang sangat stabil (responsif tanpa packet loss yang teramati) pada rentang jarak 0 hingga 220 meter. Degradasi sinyal yang menyebabkan putus koneksi baru terjadi secara tajam pada jarak 230 meter.

Gambar 7. Flowchart alur kerja sistem.

Gambar 8. Grafik hasil uji jangkauan komunikasi ESP-NOW.

Temuan ini mengonfirmasi bahwa protokol ESP-NOW memiliki keunggulan signifikan dibandingkan koneksi *Wi-Fi* standar yang berbasis router untuk aplikasi ini. Dengan jangkauan

efektif 220 meter, alat ini memberikan "zona aman" yang sangat luas bagi operator, jauh melampaui kebutuhan jarak aman standar industri saat penggantian pisau *cutter*. Stabilitas ini krusial karena kegagalan komunikasi di tengah proses pengambilan logam dapat menyebabkan robot berhenti mendadak atau bergerak tidak terkendali, yang justru menambah risiko baru.

### 3.2 Analisis Kinerja Elektromagnet dan Presisi Manuver

Evaluasi mekanisme pengumpul mengungkapkan temuan paling signifikan dalam penelitian ini. Grafik pada Gambar 9 menunjukkan korelasi *non-linear* antara jarak angkat dan kekuatan magnet. Pada posisi *low-clearance* (jarak 0.3 cm dari tanah), elektromagnet mampu mengangkat beban hingga 41.2 gram (objek obeng), yang jauh melampaui berat rata-rata serpihan pisau *cutter* (14.7 gram). Hal ini memvalidasi bahwa secara spesifikasi komponen, aktuator yang dipilih sudah sangat memadai.

Namun, analisis komparatif antara pengujian ideal dan simulasi lapangan menyoroti sebuah tantangan operasional. Kegagalan pengambilan objek sering terjadi saat posisi magnet berada di ketinggian 1.3 cm, di mana gaya tarik magnet menurun drastis sehingga gagal mengangkat pisau *cutter*. Dalam operasi *remote control*, mempertahankan jarak ideal 0.3 cm sangat sulit dilakukan karena operator mengandalkan visual mata telanjang dari jarak jauh.

Gambar 9. Grafik perbandingan kemampuan angkat ideal elektromagnet.

Oleh karena itu, dapat dianalisis bahwa keterbatasan utama alat ini bukan pada kekuatan magnet, melainkan pada presisi pemosisian (*positioning accuracy*). Fenomena paralaks visual saat mengendalikan robot dari jarak jauh menyebabkan operator kesulitan menempatkan magnet tepat di atas target dengan celah udara (*air gap*) yang minimal. Ini mengindikasikan bahwa untuk pengembangan selanjutnya, penambahan fitur bantu visual seperti kamera *First Person View* (FPV) adalah mutlak diperlukan untuk menjembatani kesenjangan antara kekuatan mekanis alat dan persepsi operator.

### 3.3 Evaluasi Manajemen Daya

Pengujian daya tahan baterai pada Gambar 10 menunjukkan asimetri konsumsi daya yang ekstrem antara kedua unit. Unit *Receiver* mengalami penurunan tegangan sebesar 1.23V dalam 31 menit pengujian, dengan total durasi operasional hanya mencapai 1 jam 34 menit. Sebaliknya, Unit *Transmitter* diproyeksikan mampu bertahan hingga 7 jam 46 menit.

Gambar 10. Grafik perbandingan durasi operasional dan penurunan voltase baterai.

Tingginya konsumsi daya pada *Receiver* disebabkan oleh beban ganda dari empat motor DC yang dikendalikan driver L298N (yang dikenal memiliki efisiensi daya rendah karena disipasi panas) serta beban induktif dari elektromagnet yang aktif secara intermiten. Durasi 90 menit ini dinilai cukup untuk skenario pembersihan insidental pasca-perbaikan mesin (biasanya < 30 menit), namun menjadi kendala untuk operasional pemantauan berkelanjutan. Temuan ini merekomendasikan perlunya penggantian modul driver motor yang lebih efisien atau peningkatan kapasitas baterai pada sisi robot untuk mendukung siklus kerja industri yang lebih panjang.

### 3.4 Pembahasan Hasil

Pembahasan hasil pengujian secara keseluruhan memberikan gambaran komprehensif mengenai kapabilitas dan keterbatasan prototipe yang dikembangkan. Untuk mempermudah evaluasi, kinerja kunci dari prototipe ini dirangkum dalam tabel berikut, yang menyatukan metrik-metrik terpenting dari serangkaian pengujian yang telah dilakukan.

Tabel 1. Rekapitulasi kinerja kunci prototipe.

No	Parameter Kinerja	Komponen	Hasil Pengujian	Validasi
1.	Jangkauan Nirkabel	Kendali Komunikasi	ESP-NOW Stabil hingga 220 meter (luar ruangan)	Sangat Memenuhi
2.	Daya Operasional	Tahan Baterai Receiver	1 Jam 34 Menit	Cukup
3.	Estimasi Daya Kontrol	Tahan Baterai Transmitter	± 7 Jam 46 Menit	Sangat Memenuhi
4.	Kekuatan Maksimal	Angkat Elektromagnet P32/22	ZYE- Mampu mengangkat beban 41.2 gram pada jarak 0.3 cm	Sangat Memenuhi
5.	Akurasi Halangan	Sensor Ultrasonik SR04	HC- Memadai untuk fungsi peringatan pada jarak <15 cm	Memenuhi
6.	Jarak Deteksi (Tanpa Beban)	Logam Sensor Proximity SN04-N2	Efektif maksimal 3 mm	Cukup
7.	Kecepatan (Tanpa Beban)	Gerak Motor DC & Driver L298N	960 rpm (Maju), 882 rpm (Mundur)	Memenuhi

Pembahasan dimulai dengan mengevaluasi kinerja masing-masing komponen kunci yang menjadi fondasi sistem. Sensor ultrasonik HC-SR04 menunjukkan akurasi yang memadai untuk fungsi dasarnya, yaitu sebagai sistem peringatan tabrakan pada jarak kurang dari 15 cm. Meskipun memiliki variasi error, kinerjanya sudah cukup untuk memberi notifikasi kepada operator. Sedangkan, sensor *proximity* SN04-N2 terbukti memiliki karakteristik dengan jarak deteksi pada 3 mm. Di sisi lain, protokol *ESP-NOW* menunjukkan kinerja yang luar biasa. Kemampuannya

untuk mempertahankan koneksi yang stabil dan responsif hingga jarak 220 meter di lingkungan dengan halangan fisik (pepohonan) membuktikan bahwa sistem komunikasi ini sangat kuat dan andal.

Setelah memvalidasi setiap komponen, pembahasan beralih ke bagaimana komponen-komponen ini bekerja sebagai satu kesatuan sistem yang terintegrasi. Perbandingan antara pengujian kemampuan angkat ideal dan kinerja praktis mengungkapkan temuan paling signifikan dari penelitian ini, tantangan operasional terbesar bukanlah pada kekuatan magnet, melainkan pada akurasi posisi saat bermanuver. Pengujian ideal membuktikan bahwa elektromagnet memiliki kekuatan yang lebih dari cukup untuk mengangkat semua target (termasuk obeng seberat 41,2 gram) ketika posisi sempurna. Namun, pada pengujian di area simulasi, banyak dari objek yang sama gagal terambil saat magnet berada di posisi atas. Hal ini mengkonfirmasi bahwa kegagalan tersebut disebabkan oleh kesulitan operator dalam memposisikan magnet secara presisi di atas target tanpa visualisasi yang memadai. Analisis lebih lanjut terhadap keterbatasan sistem juga menjadi poin krusial. Data uji daya tahan baterai menunjukkan asimetri performa yang signifikan. Unit *transmitter*, dengan beban kerja yang ringan, memiliki estimasi daya tahan yang sangat panjang, yaitu sekitar 7 Jam 46 menit. Sebaliknya, Unit *receiver*, yang menanggung beban kerja mekanis dari motor dan elektromagnet, memiliki daya tahan yang jauh lebih singkat, hanya 1 Jam 34 Menit.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan serangkaian pengujian yang telah dilakukan, dapat ditarik simpulan sebagai berikut:

1. Prototipe alat pendeteksi dan pengumpul serpihan logam berhasil dirancang dan berfungsi sesuai tujuan penelitian. Integrasi antara unit kontrol dan unit robot berjalan dengan baik menggunakan protokol nirkabel.
2. Sistem kendali berbasis ESP-NOW terbukti sangat efektif untuk penerapan luar ruangan, dengan jangkauan komunikasi yang stabil hingga jarak 220 meter. Hal ini memberikan jaminan keselamatan bagi operator untuk bekerja dari jarak jauh.
3. Secara spesifikasi teknis, elektromagnet yang digunakan memiliki kekuatan yang sangat memadai, terbukti mampu mengangkat beban hingga 41.2 gram pada jarak 0.3 cm. Namun, dalam penerapan praktis, efektivitas pengumpulan ini sangat bergantung pada posisi alat. Tantangan utama yang ditemukan bukan pada kekuatan komponen, melainkan pada kesulitan operator untuk memposisikan alat secara presisi di atas target (*positioning*) akibat keterbatasan pandangan dari jarak jauh.

Terdapat perbedaan signifikan pada durasi operasional. Unit *Receiver* hanya mampu bertahan selama 1 Jam 34 Menit karena beban motor dan *elektromagnet*, sedangkan Unit *Transmitter* memiliki estimasi daya tahan yang jauh lebih lama. Efisiensi daya pada sisi robot menjadi batasan utama untuk penggunaan berkelanjutan.

#### KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

#### REFERENSI

- [1] B. J. A. W. S. Tjakra, J. E. C. Langi, and D. R. O. Walangitan, "Manajemen Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Pada Proyek Pembangunan Ruko Orlens Fashion Manado," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 1, no. 4, pp. 282–288, 2013.
- [2] R. Ilham and M. Basuki, "Penilaian Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Pekerjaan Reparasi Kapal Pada PT Dewa Ruci Agung dengan Menggunakan Metode Hazard Identification

- And Risk Assesment And Determining Control (HIRADC),” *Ocean Engineering : Jurnal Ilmu Teknik dan Teknologi Maritim*, vol. 2, no. 2, pp. 45–56, Jul. 2023, doi: 10.58192/ocean.v2i2.1132.
- [3] G. Gould, “The Impact of Robotics on Safety and Health,” *Wolters Kluwer*. [Online]. Available: <https://www.wolterskluwer.com/>. [Accessed: Sep. 16, 2025].
- [4] B. Bragiwibisana, F. T. S. F. Titan, and I. Permatasari,, “Pengiriman Data Sensor Untuk Deteksi Logam yang Bersifat Metal dengan Menggunakan Platform Antares,” *Jurnal SINTA: Sistem Informasi dan Teknologi Komputasi*, vol. 1, no. 4, pp. 191–199, Jan. 2025, doi: 10.61124/sinta.v1i4.31.
- [5] E. Nirmala, “Perancangan Robot Pendeteksi Logam Menggunakan Algoritma Fuzzy Logic,” *Scientia Sacra: Jurnal Sains*, vol. 2, no. 3, 2022, [Online]. Available: <http://pijarpemikiran.com/index.php/Scientia>
- [6] B. A. Octavian, A. Ridho’i, and R. S. Widagdo, “Rancang Bangun Alat Pendeteksi Logam (Besi) Berbasis Mikrokontroler ESP32,” *Prosiding Senakama*, vol. 1, 2022.
- [7] R. Affandi, “Development of the Metal and Non-Metal Waste Sorting System Design by Using an Arduino Uno,” *International Journal of Advanced Research in Technology and Innovation*, Jun. 2023, doi: 10.55057/ijarti.2023.5.2.2.
- [8] M. Dafa, D. Rezaputra, M. Ridwan, and A. Cahyono, “Mitsubishi Type-Q PLC Based Press Roll Automatic Control System On Building Tire Machine,” *Indonesian Journal of Electronics Engineering*, vol. 04, pp. 59–67, 2021.
- [9] M. Waruwu, “Metode Penelitian dan Pengembangan (R&D): Konsep, Jenis, Tahapan dan Kelebihan,” *Jurnal Ilmiah Profesi Pendidikan*, vol. 9, no. 2, pp. 1220–1230, May 2024, doi: 10.29303/jipp.v9i2.2141.
- [10] I. Fadilah and E. Fitriani, “Rancang Bangun Protokol Alternatif Saat Konektivitas Internet Terputus Pada Pertanian Berbasis IoT,” *Jupiter: Publikasi Ilmu Keteknikan Industri, Teknik Elektro dan Informatika*, vol. 3, no. 1, pp. 205–212, Jan. 2025, doi: 10.61132/jupiter.v3i1.705.
- [11] H. W. Huda, “Lokalisasi Dalam Ruangan Menggunakan ESP-Now berbasis Wireless Sensor Network Trilateration dengan Model Free Space Path Loss,” *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 07, no. 06, pp. 309–315, Jun. 2023.
- [12] F. P. Wedyanti and D. A. Wag yana, “Analisis Performasi ESP-NOW Sebagai Protokol Komunikasi Efisien Antar Multi-node dan Gateway dalam Sistem IoT,” *SNIV SEMINAR NASIONAL INOVASI VOKASI*, Jun. 2025.
- [13] F. M. Maimunir and P. D. Widayaka, “Rancang Bangun protokol ESP-Now untuk Monitoring Kondisi Lingkungan Tanaman Hidroponik 168 Rancang Bangun Protokol ESP-Now Untuk Monitoring Kondisi Lingkungan Tanaman Hidroponik,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 13, no. 2, 2024.
- [14] A. Zalukhu *et al.*, “Perangkat Lunak Aplikasi Pembelajaran Flowchart,” *Jurnal Teknologi Informasi dan Industri*, vol. 4, no. 1, 2023.
- [15] K. I. Listyoningrum, D. Y. Fenida, and N. Hamidi, “Inovasi Berkelanjutan dalam Bisnis: Manfaatkan Flowchart untuk Mengoptimalkan Nilai Limbah Perusahaan,” *Jurnal Informasi Pengabdian Masyarakat*, vol. 1, no. 4, pp. 100–112, Nov. 2023, doi: 10.47861/jipm-nalanda.v1i4.552.