

Analisis Perbandingan Sistem Kontrol Open-Loop dan Closed-Loop pada Troli Barang Elektrik Berbasis Motor DC

[Comparative Analysis of Open-Loop and Closed-Loop Control System on Electric Goods Trolley Based on DC Motor]

Muhammad Tamyiz Firmansyah¹⁾, Prantasi Harmi Tjahjanti ^{*,2)} (16ppt)

¹⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: prantasiharmi@umsida.ac.id

Abstract. This study was conducted to determine the differences in the characteristics of Open-Loop and Closed-Loop control systems on an electric goods trolley powered by a DC motor under varying load conditions. The research employed an experimental method with a quantitative approach through load testing ranging from 0 to 100 kg. The observed parameters included rotational speed, voltage, current, electrical power, and torque. The test results showed that under no-load conditions, both control systems produced a speed of 283.5 RPM. When the load was increased to 100 kg, the speed of the Open-Loop system decreased to 123.6 RPM, while the Closed-Loop system maintained a speed of 228.5 RPM. At a load of 100 kg, the electrical power recorded was 265.1 W for the Open-Loop system and 374.2 W for the Closed-Loop system. Meanwhile, the calculated torque at the same load was 20.48 Nm for the Open-Loop system and 15.64 Nm for the Closed-Loop system. Based on these results, an increase in load affected the response of both control systems, particularly the motor speed. The Closed-Loop system demonstrated a greater ability to maintain a stable rotational speed as the load increased, whereas the Open-Loop system experienced a greater reduction in rotational speed.

Keywords - electric goods trolley, DC motor, Open-Loop, Closed-Loop, load, speed.

Abstrak. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perbedaan karakteristik sistem kontrol Open-Loop dan Closed-Loop pada troli barang elektrik berbasis motor DC dengan kondisi pembebanan yang bervariasi. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif melalui pengujian beban dari 0 hingga 100 kg. Parameter yang diamati meliputi kecepatan putaran, tegangan, arus, daya listrik, dan torsi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa beban, kedua sistem menghasilkan kecepatan sebesar 283,5 RPM. Setelah beban dinaikkan hingga 100 kg, kecepatan pada sistem Open-Loop turun menjadi 123,6 RPM, sedangkan sistem Closed-Loop menghasilkan kecepatan sebesar 228,5 RPM. Pada kondisi beban 100 kg, daya listrik yang diperoleh masing-masing sistem adalah 265,1 W untuk Open-Loop dan 374,2 W untuk Closed-Loop. Sementara itu, nilai torsi yang dihitung pada kondisi tersebut sebesar 20,48 Nm pada Open-Loop dan 15,64 Nm pada Closed-Loop. Berdasarkan data tersebut, peningkatan beban memberikan pengaruh terhadap respons kedua sistem kontrol, terutama terhadap perubahan kecepatan motor. Sistem Closed-Loop menunjukkan kemampuan mempertahankan putaran yang lebih stabil ketika beban meningkat, sedangkan Open-Loop mengalami penurunan putaran yang lebih besar.

Kata Kunci - troli barang elektrik, motor DC, Open-Loop, Closed-Loop, beban, kecepatan.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan industri dan logistik menyebabkan kebutuhan terhadap alat pemindah barang yang praktis dan mampu membantu proses material handling semakin meningkat. Salah satu alat yang banyak digunakan adalah troli karena dapat membantu memindahkan barang dari satu tempat ke tempat lainnya. Pada troli konvensional, proses pemindahan masih mengandalkan tenaga operator sehingga kemampuan pengguna dan berat beban dapat memengaruhi proses pengangkutan. Aktivitas pemindahan barang yang dilakukan secara berulang juga dapat

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

meningkatkan risiko kelelahan serta gangguan muskuloskeletal pada pekerja [1] [2].

Penggunaan sistem penggerak Direct Current (DC) pada troli elektrik dapat meningkatkan efisiensi pemindahan barang. Karena ukuran, torsi, dan keandalan yang lebih tinggi daripada motor DC konvensional, motor DC banyak digunakan pada kendaraan listrik [3]. Karakteristik tersebut menjadikan motor Direct Current (DC) dapat diterapkan sebagai penggerak pada troli barang yang membutuhkan pengaturan putaran motor sesuai dengan kondisi operasionalnya [4].

Perubahan berat beban yang dibawa troli dapat memengaruhi kerja motor DC. Ketika beban bertambah, kebutuhan torsi untuk menggerakkan roda juga mengalami perubahan dan kondisi tersebut dapat menyebabkan perubahan pada kecepatan putaran motor. Oleh karena itu, diperlukan sistem kontrol yang dapat mengatur kerja motor sesuai dengan kondisi pembebanan sehingga karakteristik kinerja motor dapat diamati pada kondisi yang berbeda [5].

Sistem kontrol Open-loop dan Closed-loop adalah salah satu pendekatan pengendalian yang digunakan. Tanpa menggunakan umpan balik dari keluaran sistem, sistem kontrol open-loop menggunakan nilai masukan seperti PWM. Meskipun metodenya sederhana, itu tidak memiliki kemampuan untuk melakukan koreksi otomatis ketika terjadi perubahan beban [6]. Di sisi lain, sistem closed-loop menggunakan sensor sebagai umpan balik untuk membandingkan nilai aktual dengan nilai referensi, yang memungkinkan pengendali untuk melakukan perubahan secara otomatis. Dalam sistem closed-loop, penggunaan metode kontrol seperti Controller dapat meningkatkan kestabilan kecepatan motor DC terhadap perubahan beban [7], [8].

Berdasarkan penelitian sebelumnya, pengendalian motor DC menggunakan PWM dan Controller telah banyak dikembangkan, tetapi penelitian yang membandingkan secara langsung sistem kontrol open-loop dan closed-loop pada troli barang elektrik berbasis motor DC dengan parameter kecepatan, daya, dan torsi masih perlu dianalisis. Oleh sebab itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perbedaan karakteristik kedua sistem kontrol tersebut pada kondisi beberapa beban. Oleh karena itu penelitian ini menggunakan judul “Analisis Perbandingan Sistem Kontrol Open-Loop dan Closed-Loop pada Troli Barang elektrik Berbasis Motor DC” untuk mengetahui metode kontrol yang memiliki performa terbaik berdasarkan variasi beban dan karakteristik kinerja sistem [9], [10].

II .METODOLOGI

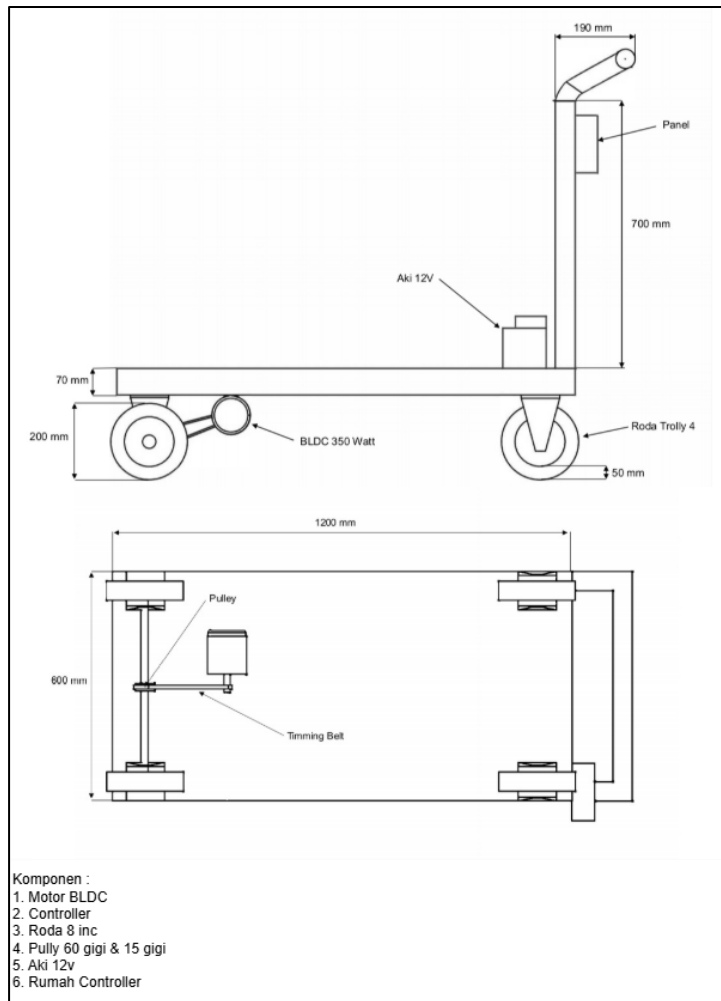
2.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif. Pengujian dilakukan secara langsung pada troli barang elektrik berbasis motor Direct Current (DC) menggunakan dua sistem kontrol, yaitu sistem kontrol Open-loop dan Closed-loop. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui bagaimana kedua sistem kontrol bekerja dalam berbagai kondisi pembebanan, termasuk kecepatan, daya, dan torsi [11].

Pendekatan kuantitatif digunakan karena data penelitian diperoleh dalam bentuk nilai hasil pengukuran. Parameter yang diamati meliputi kecepatan putaran motor, tegangan, arus, daya listrik, dan torsi sistem penggerak. Pengujian dilakukan dengan kondisi yang dibuat sama untuk kedua sistem kontrol sehingga hasil pengukuran dapat digunakan sebagai dasar analisis perbandingan kinerja [12].

2.2 Objek dan Variabel Penelitian

Objek penelitian berupa sistem penggerak troli barang elektrik yang menggunakan motor Direct Current (DC). Motor tersebut digunakan sebagai penggerak utama troli untuk mengetahui karakteristik kinerjanya ketika menggunakan sistem kontrol Open-Loop dan Closed-Loop pada kondisi beban yang berbeda [13].



Gambar 2.1 Desain Troli Barang Elektrik Berbasis Motor DC

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis sistem kontrol, yaitu Open-Loop dan Closed-Loop, serta variasi beban. Variabel terikat meliputi kecepatan, daya, dan torsi. Sementara itu, spesifikasi motor Direct Current DC, tegangan sumber, diameter roda, dan kondisi pengujian ditetapkan sebagai variabel kontrol agar proses pengujian dapat dilakukan secara konsisten [14].

2.3 Alat dan Bahan Penelitian

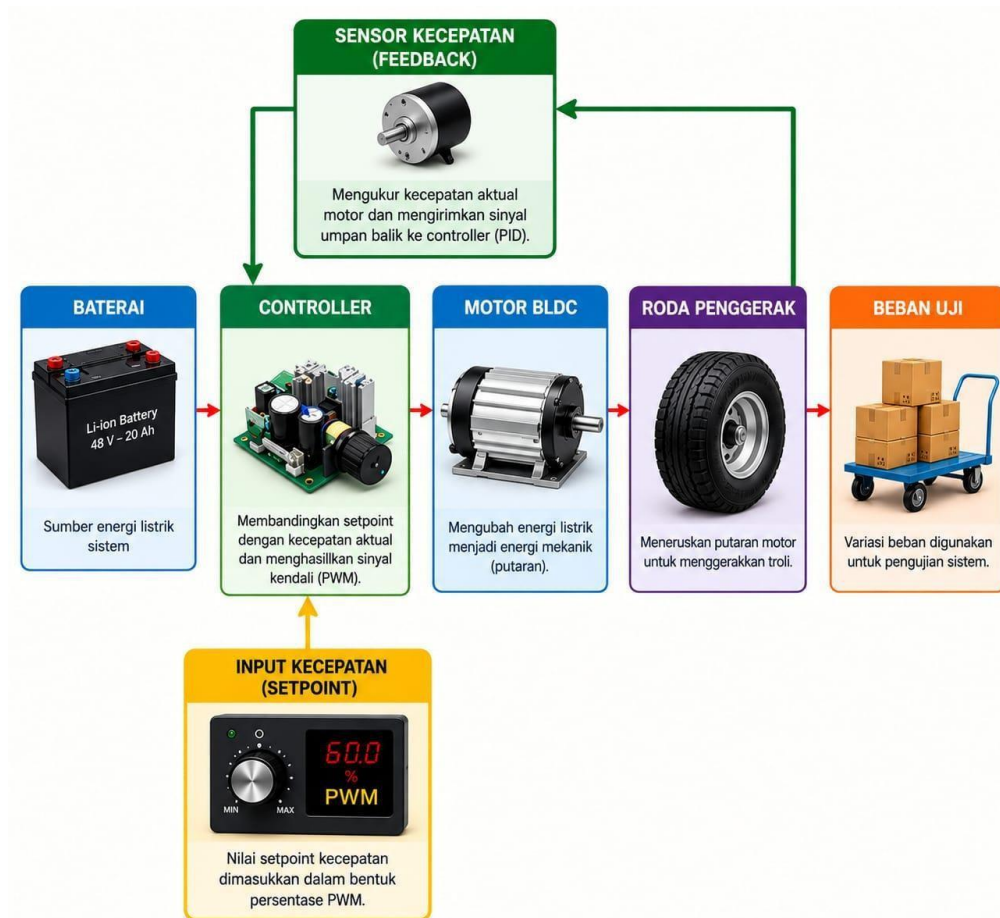
Peralatan dan bahan penelitian disiapkan untuk mendukung pengujian sistem penggerak troli barang elektrik berbasis motor Direct Current (DC). Motor DC digunakan sebagai penggerak utama karena memiliki karakteristik yang sesuai untuk aplikasi kendaraan listrik ringan dan sistem pemindahan barang [15].

Komponen utama yang digunakan terdiri atas motor DC 350 W, controller, baterai sebagai sumber energi, sensor kecepatan untuk sistem Closed-Loop, serta rangka troli sebagai media pengujian. Pengukuran parameter penelitian dilakukan menggunakan beban uji 10 – 100 Kg, tachometer, dan avometer untuk memperoleh data kecepatan, tegangan, arus, daya, dan torsi sistem [16].

2.4 Desain Sistem Penelitian

Desain penelitian dibuat untuk membandingkan cara kerja sistem kontrol Open-Loop dan Closed-Loop pada troli barang elektrik berbasis motor Direct Current (DC). Parameter yang diamati meliputi perubahan kecepatan motor, respons terhadap variasi beban, serta karakteristik sistem berdasarkan nilai kecepatan, daya, dan torsi [17].

Sistem penggerak troli terdiri atas baterai sebagai sumber energi, controller untuk set point dan mengubah mode open – loop dan closed-loop, motor Direct Current (DC) sebagai penggerak, dan sensor kecepatan yang digunakan sebagai umpan balik pada sistem Closed-Loop. Perbedaan kedua sistem terletak pada penggunaan informasi keluaran. Pada Open-Loop, pengendalian dilakukan berdasarkan masukan yang diberikan tanpa memperhatikan kondisi aktual keluaran. Sementara itu, Closed-Loop menggunakan hasil pembacaan sensor sebagai informasi untuk melakukan pengaturan terhadap sistem [18].



Gambar 2.2 Diagram Blok Sistem Troli Elektrik Berbasis Motor DC

2.4.1 Sistem Kontrol Open-Loop

Sistem kontrol open-loop tidak menggunakan sinyal umpan balik dari keluaran sistem. Metode ini memungkinkan pengaturan kecepatan motor DC dengan memberikan sinyal PWM (Pulse Width Modulation) kepada pengontrol motor sesuai dengan nilai masukan yang telah ditetapkan sebelumnya [19].

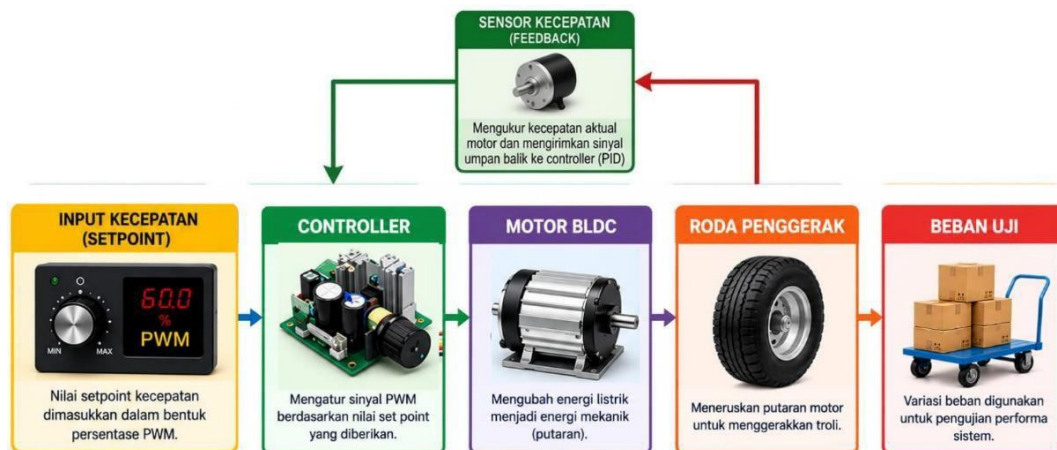


Gambar 2.3 Diagram Blok Sistem Kontrol Open-Loop Motor DC

Pada sistem ini, perubahan beban dapat menyebabkan perubahan kecepatan motor karena tidak terdapat mekanisme koreksi otomatis terhadap kondisi aktual sistem.

2.4.2 Sistem Kontrol Closed-Loop

Dalam sistem kontrol closed-loop, sensor digunakan sebagai umpan balik untuk menjaga nilai keluaran sesuai dengan nilai referensi. Dalam penelitian ini, sensor kecepatan digunakan untuk mengukur kecepatan motor yang sebenarnya, yang kemudian dibandingkan dengan nilai setpoint, yang memungkinkan sistem untuk melakukan koreksi terhadap perubahan beban [20].



Gambar 2.4 Diagram Blok Sistem Kontrol Closed-Loop Motor DC

Selisih antara nilai referensi (setpoint) dan nilai aktual kecepatan motor dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Error} = \text{Setpoint} - \text{Kecepatan Aktual}$$

Keterangan:

- Error = selisih antara nilai setpoint dan kecepatan aktual
- Setpoint = nilai kecepatan yang ditentukan
- Kecepatan aktual = nilai kecepatan hasil pengukuran

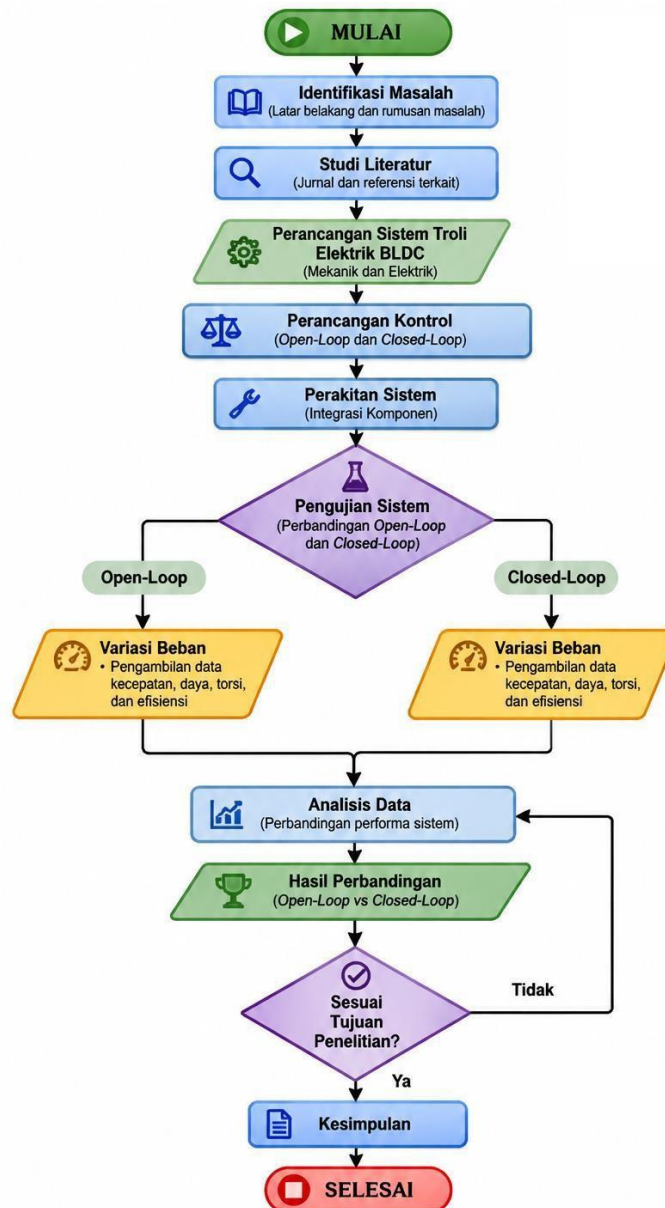
Nilai error selanjutnya diproses oleh controller untuk menghasilkan sinyal kendali PWM. Sinyal tersebut digunakan untuk mengatur motor Direct Current (DC) sehingga kecepatan motor dapat disesuaikan ketika terjadi perubahan beban. Penggunaan controller pada pengaturan kecepatan motor Direct Current (DC) ditujukan untuk memperoleh respons sistem yang lebih stabil terhadap perubahan kondisi operasi [21].

2.4.3 Sistem Pengereman

Sistem penghentian motor dilakukan menggunakan tombol stop yang dioperasikan oleh operator dengan menekan tombol sebanyak dua kali (double click) hingga motor berhenti. Penelitian ini tidak menggunakan mekanisme pengereman khusus, sehingga proses penghentian motor dilakukan melalui perintah stop pada system kontrol.

2.5 Diagram Alir (Flowchart) Penelitian

Diagram alir/flowchart penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram Alir (Flowchart) Penelitian

Untuk mengetahui perbandingan kinerja sistem, diagram alir penelitian disusun berdasarkan tahapan penelitian eksperimental yang meliputi identifikasi masalah, penelitian literatur, perancangan sistem troli barang elektrik berbasis motor Direct Current (DC), perancangan kontrol open-loop dan closed-loop, pengujian variasi beban, pengambilan data, analisis hasil, dan penarikan kesimpulan [22]. Berdasarkan Gambar 2.5, data hasil pengujian berupa kecepatan, daya, dan torsi dianalisis untuk mengetahui perbandingan kinerja sistem kontrol open-loop dan closed-loop.

2.6 Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan menyiapkan sistem troli barang elektrik berbasis motor Direct Current (DC) serta menentukan komponen yang diperlukan. Tahap berikutnya adalah menerapkan sistem kontrol open-loop dan closed-

loop pada motor Direct Current (DC). Setelah sistem siap digunakan, dilakukan pengujian menggunakan beberapa variasi beban untuk memperoleh data kecepatan, daya, dan torsi. Pengujian tersebut mengacu pada penelitian terdahulu mengenai kinerja motor DC pada kendaraan listrik dan sistem penggerak elektrik [23], [24].

2.7 Teknik Pengambilan Data

Data penelitian diperoleh melalui pengujian langsung pada troli barang elektrik. Parameter yang dicatat meliputi kecepatan motor, respons sistem, dan perubahan kinerja motor ketika diberikan variasi beban. Pengambilan data dilakukan pada sistem Open-Loop dan Closed-Loop dengan kondisi pengujian yang dibuat sama [25].

2.8 Teknik Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif dengan membandingkan hasil pengukuran sistem Open-Loop dan Closed-Loop. Analisis dilakukan terhadap parameter kecepatan, daya, dan torsi pada setiap variasi beban [26], [27]. Hasil pengujian dari kedua sistem kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk melihat perubahan karakteristik sistem terhadap peningkatan beban. Perbandingan dilakukan berdasarkan data hasil pengukuran dan respons motor selama proses pengujian [28].

III .HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Realisasi Sistem Troli Barang elektrik Berbasis Motor DC

Sistem diimplementasikan sesuai dengan desain penelitian yang sudah dibuat pada Bab II. Sistem troli barang elektrik menggunakan motor Direct Current (DC) sebagai penggerak utama dengan daya 350 watt. Sistem ini terdiri dari beberapa bagian utama, seperti motor DC, controller motor, baterai yang berfungsi sebagai sumber tenaga, sensor kecepatan yang digunakan sebagai sistem pengontrolan, serta rangka troli yang bertugas membawa beban



Gambar 3.1 Realisasi Troli Barang elektrik Berbasis Motor DC

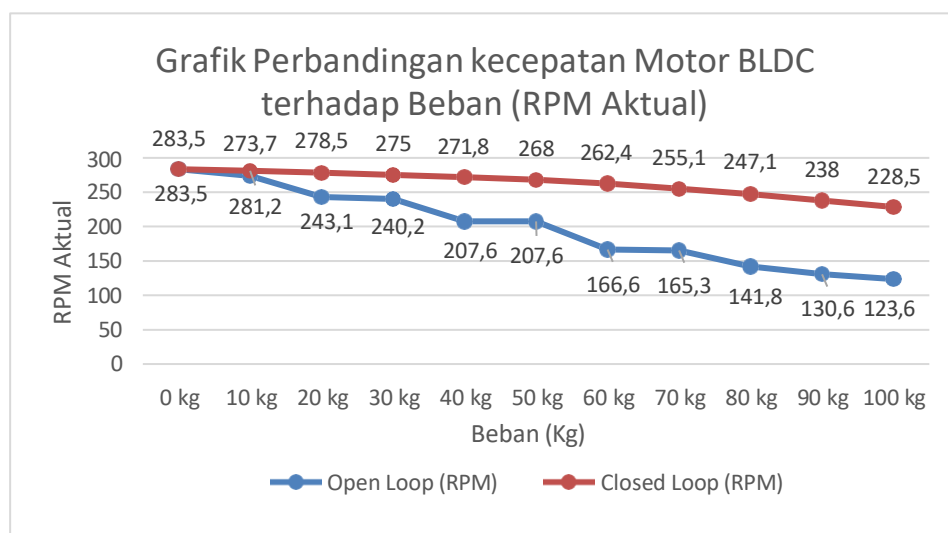
Sistem yang sudah dibuat sesuai dengan rencana yang diteliti seperti pada Gambar 3.1. Motor DC digunakan untuk mendorong roda, sedangkan controller bekerja untuk mengendalikan motor sesuai dengan cara pengendalian yang digunakan. Dalam sistem closed-loop, sensor kecepatan berfungsi memberi tahu kondisi sebenarnya dari motor, sehingga sistem bisa melakukan penyesuaian terhadap perubahan beban yang terjadi.

3.2 Hasil Pengujian Kecepatan Motor DC terhadap Variasi Beban

Uji kecepatan dilakukan untuk melihat bagaimana perubahan beban memengaruhi putaran motor DC pada sistem kontrol open-loop dan closed-loop. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban berbeda pada troli, lalu kecepatan motor diukur menggunakan sensor kecepatan atau tachometer. Hasil pengujian kecepatan ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Kecepatan Motor DC

NO	Beban (Kg)	Open Loop (Set)	Open Loop (RPM)	Closed Loop (Set)	Closed Loop (RPM)
1	0 Kg	878	283,5	878	283,5
2	10 Kg	358	273,7	358	281,2
3	20 Kg	371	243,1	371	278,5
4	30 Kg	378	240,2	378	275,0
5	40 Kg	383	207,6	383	271,8
6	50 Kg	448	207,6	448	268,0
7	60 Kg	548	166,6	548	262,4
8	70 Kg	602	165,3	602	255,1
9	80 Kg	661	141,8	661	247,1
10	90 Kg	757	130,6	757	238,0
11	100 Kg	878	123,6	878	228,5



Gambar 3.2 Grafik Hubungan Beban terhadap Kecepatan Motor BLDC

Berdasarkan grafik hubungan beban terhadap kecepatan motor DC, peningkatan beban menyebabkan perubahan kecepatan pada kedua sistem kontrol. Sistem Open-Loop mengalami perubahan kecepatan yang lebih besar karena tidak menggunakan sistem umpan balik, sedangkan sistem Closed-Loop mampu mempertahankan kecepatan lebih stabil melalui sensor feedback yang memberikan informasi kecepatan aktual kepada controller.

3.3 Hasil Pengujian Daya Motor DC

Pengujian daya dilakukan untuk mengetahui berapa banyak energi listrik yang digunakan oleh motor DC selama troli beroperasi. Nilai daya didapatkan dari hasil pengukuran tegangan dan arus motor dengan menggunakan persamaan:

$$P_{in} = V \times I$$

Keterangan:

P_{in} = daya listrik (W)

V = tegangan (V)

I = arus listrik (A)

Contoh perhitungan:

Pada beban 10 Kg diperoleh

$$P_{in} = V \times I$$

$$= 24,12 \times 13,4$$

$$= 323,2 \text{ W}$$

Jadi, berdasarkan perhitungan tersebut, Daya pada beban 10 kg kondisi Open-Loop adalah 323,2 W

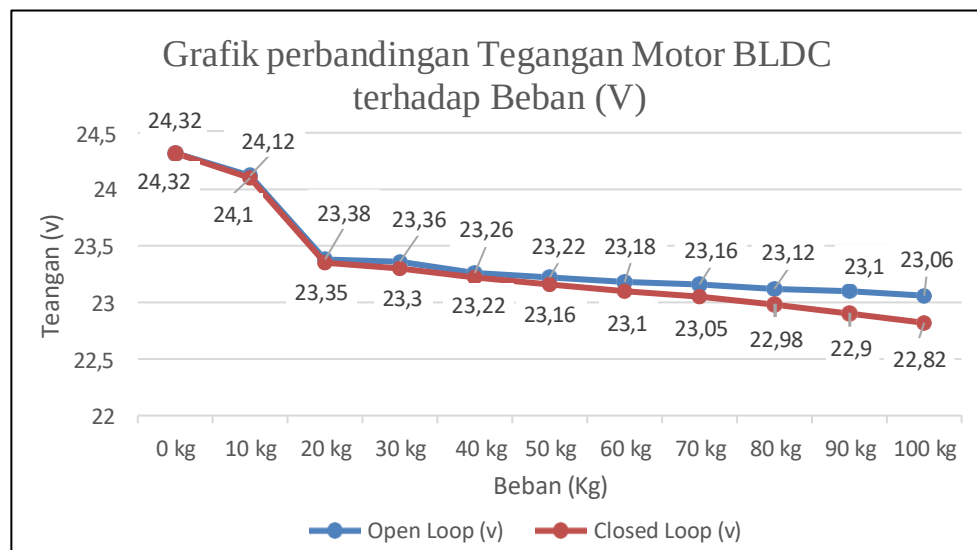
Hasil pengukuran daya ditunjukkan pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Data Konsumsi Daya Open Loop Motor BLDC

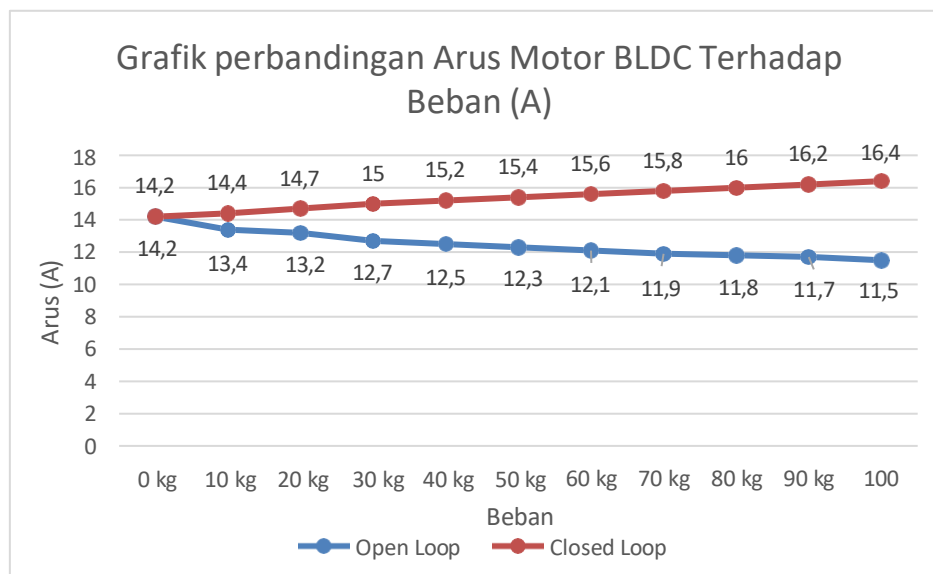
NO	Beban (Kg)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Listrik (W)
1	0 kg	24,32	14,2	345,3
2	10 kg	24,12	13,4	323,2
3	20 kg	23,38	13,2	308,6
4	30 kg	23,36	12,7	296,6
5	40 kg	23,26	12,5	290,7
6	50 kg	23,22	12,3	285,5
7	60 kg	23,18	12,1	280,4
8	70 kg	23,16	11,9	275,6
9	80 kg	23,12	11,8	272,8
10	90 kg	23,1	11,7	270,2
11	100 kg	23,06	11,5	265,1

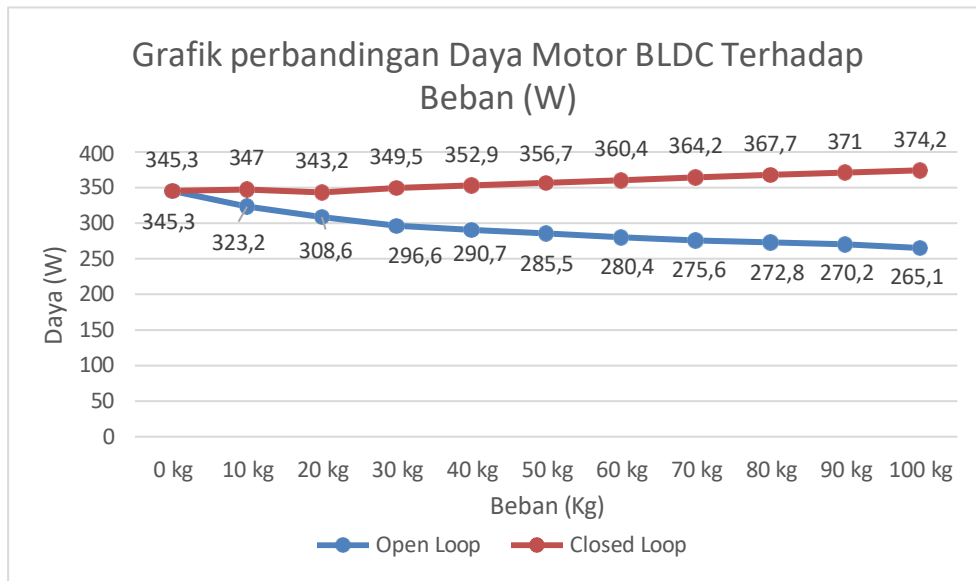
Tabel 3.3 Data Konsumsi Daya Closed Loop Motor BLDC

NO	Beban (Kg)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Listrik (W)
1	0 Kg	24,32	14,2	345,3
2	10 Kg	24,10	14,4	347,0
3	20 Kg	23,35	14,7	343,2
4	30 Kg	23,30	15,0	349,5
5	40 Kg	23,22	15,2	352,9
6	50 Kg	23,16	15,4	356,7
7	60 Kg	23,10	15,6	360,4
8	70 Kg	23,05	15,8	364,2
9	80 Kg	22,98	16,0	367,7
10	90 Kg	22,90	16,2	371,0
11	100 Kg	22,82	16,4	374,2



Gambar 3.3 Grafik Perbandingan Tegangan Open-Loop dan Closed-Loop



Gambar 3.4 Grafik Perbandingan Arus Open-Loop dan Closed-Loop

Berdasarkan hasil pengujian, perubahan beban memengaruhi daya yang digunakan oleh motor DC. Pada sistem Open-Loop, daya cenderung menurun ketika beban bertambah, sedangkan pada sistem Closed-Loop, daya cenderung meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa kedua sistem kontrol memiliki respons yang berbeda terhadap perubahan beban.

3.4 Hasil Perhitungan Torsi Motor DC

Analisis torsi dilakukan untuk mengetahui kemampuan motor Direct Current (DC) dalam menghasilkan gaya putar untuk menggerakkan roda troli pada setiap variasi beban. Perhitungan torsi dilakukan pada sistem kontrol open-loop dan closed-loop sehingga dapat diketahui perubahan nilai torsi berdasarkan perubahan beban dan kecepatan putaran motor. Pada penelitian ini, perhitungan torsi menggunakan daya listrik masuk (Pin) yang diperoleh dari hasil pengukuran tegangan dan arus motor. Daya listrik masuk dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{in} = V \times I$$

Keterangan:

P_{in} = Daya listrik masuk (W)

V = Tegangan listrik (V)

I = Arus listrik (A)

Selanjutnya, kecepatan putaran motor dalam satuan RPM dikonversikan menjadi kecepatan sudut menggunakan persamaan:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

Keterangan:

ω = kecepatan sudut (rad/s)

n = kecepatan putaran motor (RPM)

$\pi = 3,14$

Setelah nilai daya listrik masuk dan kecepatan sudut diperoleh, torsi estimasi dihitung menggunakan persamaan:

$$T = \frac{P_{in}}{\omega}$$

Keterangan:

T estimasi = torsi estimasi (Nm)

P_{in} = daya listrik masuk (W)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

Contoh perhitungan:

Pada beban 10 Kg Open loop diperoleh

$V = 24,12$ V

$I = 13,4$ A

$n = 273,7$ RPM

Maka daya listrik masuk :

$$P_{in} = V \times I$$

$$= 24,12 \times 13,4$$

$$= 323,21 \text{ W}$$

Kecepatan sudut:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$= \frac{2 \times 3,14 \times 273,7}{60}$$

$$= 28,65 \text{ rad/s}$$

Sehingga Torsi Estimasi:

$$T = \frac{P_{in}}{\omega}$$

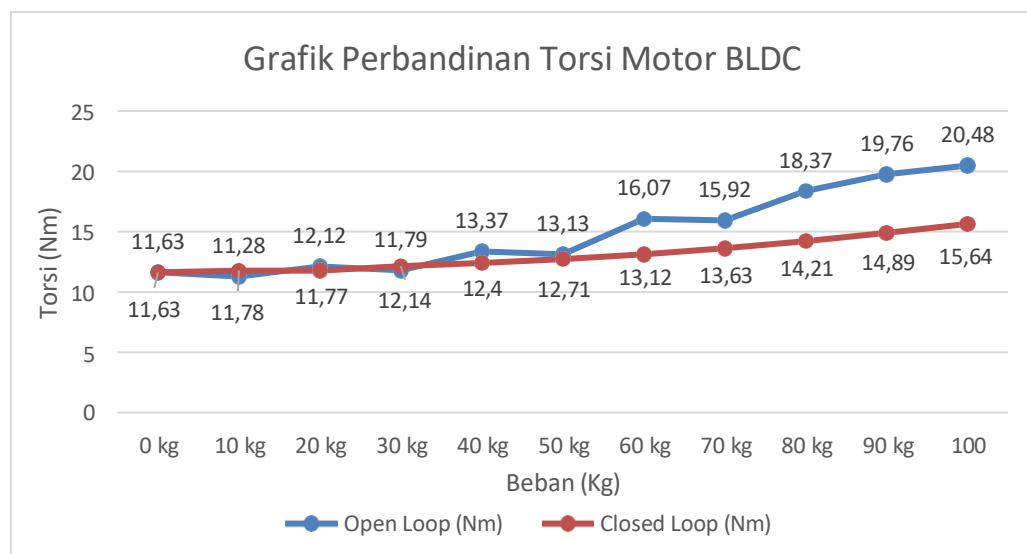
$$= \frac{323,21}{28,65}$$

Jadi, berdasarkan perhitungan tersebut, Torsi estimasi pada beban 10 kg kondisi Open-Loop adalah 11,28 Nm.

Hasil perhitungan torsi ditampilkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Hasil Perhitungan Torsi

NO	Beban (Kg)	Open Loop (Nm)	Closed Loop (Nm)
1	0 Kg	11,63	11,63
2	10 Kg	11,28	11,78
3	20 Kg	12,12	11,77
4	30 Kg	11,79	12,14
5	40 Kg	13,37	12,40
6	50 Kg	13,13	12,71
7	60 Kg	16,07	13,12
8	70 Kg	15,92	13,63
9	80 Kg	18,37	14,21
10	90 Kg	19,76	14,89
11	100 Kg	20,48	15,64



Gambar 3.4 Grafik Perbandingan Torsi Motor DC

Berdasarkan hasil perhitungan, torsi estimasi pada Open-Loop meningkat dari 11,63 Nm pada beban 0 kg menjadi 20,48 Nm pada beban 100 kg. Sementara itu, pada Closed-Loop meningkat dari 11,63 Nm menjadi 15,64 Nm. Peningkatan torsi estimasi pada Open-Loop lebih besar karena bertambahnya beban menyebabkan penurunan putaran motor, sedangkan pada Closed-Loop kecepatan motor lebih terjaga melalui sistem kontrol. Hasil ini menunjukkan hubungan antara daya listrik, kecepatan putaran, dan beban pada kedua mode. Nilai yang diperoleh merupakan torsi estimasi berdasarkan daya listrik input.

3.5 Analisis Perbandingan Sistem Kontrol Open-Loop dan Closed-Loop

Berdasarkan hasil pengujian, sistem kontrol Open-Loop dan Closed-Loop memiliki respon yang berbeda terhadap peningkatan beban. Perbandingan hasil pada beban 100 Kg ditunjukkan pada tabel 3.5

Tabel 3.5 Ringkasan Perbandingan Hasil Pengujian

Parameter	Open – Loop	Closed - Loop
Kecepatan (RPM)	123,6 RPM	228,5 RPM
Tegangan (V)	23,06 V	22,82 V
Arus (A)	11,5 A	16,4 A
Daya Listrik (W)	265,1 W	374,2 W
Torsi Estimasi (Nm)	20,48 Nm	15,64 Nm

Berdasarkan Tabel 3.5, pada beban 100 Kg sistem Closed – Loop mampu mempertahankan kecepatan sebesar 228,5 RPM, sedangkan Open – Loop sebesar 123,6 RPM. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan beban memberikan pengaruh yang besar terhadap penurunan kecepatan pada sistem Open – Loop.

Pada parameter kelistrikan, tegangan Open – Loop sebesar 23,06 V dan Closed – Loop sebesar 22,82 V. Arus yang digunakan masing masing sebesar 11,5 A dan 16,4 A, sedangkan daya listrik sebesar 265,1 W pada sistem Open – Loop dan 374,2 W pada sistem Closed – Loop.

Hasil perhitungan torsi estimasi menunjukkan nilai 20,48 Nm pada sistem Open – Loop dan 15,64 Nm pada sistem Closed – Loop. Nilai tersebut diperoleh berdasarkan daya listrik masukan dan kecepatan putaran motor. Secara keseluruhan, kedua sistem menunjukkan karakteristik respon yang berbeda terhadap perubahan beban, terutama pada kecepatan, arus, daya listrik, dan torsi estimasi.

IV .KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan mengenai perbandingan sistem kontrol Open-Loop dan Closed-Loop pada troli barang elektrik menggunakan motor BLDC, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. **Perubahan beban berpengaruh terhadap kecepatan putaran motor BLDC.** Pada sistem Open-Loop, kecepatan aktual mengalami penurunan dari 283,5 RPM pada kondisi tanpa beban menjadi 123,6 RPM pada beban 100 kg. Sementara itu, pada sistem Closed-Loop, kecepatan aktual berubah dari 283,5 RPM menjadi 228,5 RPM pada beban 100 kg.
2. **Nilai daya listrik yang digunakan motor menunjukkan pola yang berbeda pada kedua sistem kontrol.** Pada sistem Open-Loop, nilai daya cenderung mengalami penurunan ketika beban bertambah. Sebaliknya, pada sistem Closed-Loop, nilai daya cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya beban. Hal tersebut menunjukkan adanya perbedaan respons sistem kontrol dalam mengatur kerja motor BLDC terhadap variasi beban.
3. **Bertambahnya beban menyebabkan perubahan pada nilai torsi estimasi motor BLDC.** Pada sistem Open-Loop, torsi estimasi berada pada rentang 11,63–20,48 Nm, sedangkan pada sistem Closed-Loop berada

pada rentang 11,63–15,64 Nm. Nilai tersebut diperoleh berdasarkan daya listrik masuk dan kecepatan putaran motor yang telah diukur selama pengujian.

4. **Hasil perbandingan menunjukkan bahwa sistem Open-Loop dan Closed-Loop memiliki karakteristik respons yang berbeda terhadap perubahan beban.** Perbedaan tersebut terlihat pada perubahan kecepatan aktual, daya listrik masuk, dan torsi estimasi motor BLDC pada setiap variasi beban yang diberikan.

REFERENSI

- [1] A. B. Kurniawan and E. Ismiyah, "Analisis Postur Kerja Menggunakan Metode Reba Dan Rula Untuk Mengurangi Risiko Gangguan Muskuloskeletal Pada Pekerja Bengkel Bubut," *J. Teknol. dan Manaj. Ind. Terap.*, vol. 4, no. 4, pp. 2069–2075, 2025.
- [2] M. Nurul Achmadiyah, A. anwar Rosyidin, A. Pracoyo, I. Siradjuddin, D. A. Permatasari, and G. Al Azhar, "Desain permodelan dan simulasi Field Oriented Control (FOC) menggunakan motor BLDC," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 10, no. 3, pp. 361–368, 2023, doi: 10.33795/elkolind.v10i3.4416.
- [3] C. Adi, R. Hariyanto, F. A. Widiarsa, and H. M. Ma, "Performance Characteristics Of Brushless Direct Current (BLDC) Motor 350W 36V As The Driving Motor Of An Electric Bicycle," *J. Transm.*, vol. 21, no. 1, pp. 42–46, 2025, doi: 10.26905/jtmt.v21i2.16390.
- [4] P. Budi Megantoro, I. Anshory, I. Sulistiyowati, and Jamaaluddin, "Design and Simulation of PID Speed Controller on BLDC Motor," *JREEC(JurnalRenewable Energy, Electron. Control.*, vol. 2, no. 1, pp. 41–49, 2022, doi: 10.31284/j.JREEC.2022.v2i1.2623.
- [5] M. Yahya, D. Darmawan, and W. Wahyudi, "Development of a BLDC (Brushless DC) Media Trainer for Learning Working Principles of Electric Vehicle Motors," *Proc. Vocat. Eng. Int. Conf.*, vol. 5, no. Brushless DC, pp. 395–400, 2023.
- [6] A. I. Abouseda, R. O. Doruk, and A. Amini, "Parameter Identification and Speed Control of a Small-Scale BLDC Motor: Experimental Validation and Real-Time PI Control with Low-Pass Filtering," *Machines*, vol. 13, no. 8, pp. 1–21, 2025, doi: 10.3390/machines13080656.
- [7] R. Shenbagalakshmi, S. K. Mittal, J. Subramaniam, V. Vengatesan, D. Manikandan, and K. Ramaswamy, "Adaptive speed control of BLDC motors for enhanced electric vehicle performance using fuzzy logic," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–22, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-90957-6.
- [8] Z. Gmyrek, "Optimal Electric Motor Designs of Light Electric Vehicles: A Review," *Energies*, vol. 17, no. 14, pp. 1–35, 2024, doi: 10.3390/en17143462.
- [9] M. Şen and M. Mutluer, "A Review of BLDC Motors: Types, Application, Failure Modes and Detection," *Energies*, vol. 18, no. 24, pp. 1–35, 2025, doi: 10.3390/en18246402.
- [10] R. Ridhani, Muhammad Ari Sutarinda, Roid Ariq Nauval, Yuan perdana, "Performance Analysis Of 2000 Watt Hub Type BLDC Motor On Electric Vehicle Prototype," *ROTARY*, vol. 7, no. 1, pp. 99–106, 2025, doi: 10.20527/jtamrotary.v7i.
- [11] B. Prabowo, A. Pramono, E. T. M, and A. Kustanto, "PERANCANGAN TROLLEY PEMINDAH DRUM BERKAPASITAS 200 LITER DENGAN BERAT MAKSIMUM 225 kg," *Mekanika*, vol. 11, no. 2, pp. 137–146, 2025.
- [12] F. Amran, M. Anisah, S. Terapan, T. Elektro, and T. Elektro, "Analisa Sistem Kendali Kecepatan Motor Bldc Pada Mobil Autonomous Menggunakan Pwm (Pulse Width Modulation) Berbasis Arduino," *Teliska-Jurnal Tek. Elektro ...*, vol. 16, no. III, pp. 23–28, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/teliska/article/view/68999><https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/teliska/article/download/68999/2911>
- [13] N. F. Maula, S. M. Ilman, and S. Yahya, "Implementation of 48V/350W BLDC Motor Speed Control

- With PID Method Using Microcontroller-Based Sensorless Techniques,” *Elinvo (Electronics, Informatics, Vocat. Educ.*, vol. 9, no. 2, pp. 331–347, 2025, doi: 10.21831/elinvo.v9i2.77124.
- [14] N. Ilmi, M. Okta Dwiyantri, Dinda, and I. Teknologi Batam, “Analisis Beban dan Produktivitas Kerja Pemindahan Manual serta Semi-Manual Air Galon Productivity Analysis in Manual and Semi-Manual Displacement of Water Gallon,” *Integr. J. Ilm. Tek. Ind.*, vol. 6, no. 1, pp. 17–23, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.um-palembang.ac.id/integrasi/index>
- [15] M. Humaedi, R. A. Pamungkas, H. H. Mubarak, F. S. Nugraha, R. A. Pamungkas, and R. Arisandy, “Evaluasi Beban Fisiologis Pada Aktivitas Material Handling di PT XYZ Dengan Metode Simulasi,” *J. Sains Student Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 10–14, 2026.
- [16] D. T. V N, M. M. F. Mia, and M. M. A. Akram, “BLDC Motor Speed Control with PID Controller in Electric Vehicles,” *Interantional J. Sci. Res. Eng. Manag.*, vol. 08, no. 06, pp. 1–5, 2024, doi: 10.55041/ijsrem35332.
- [17] C. R. Harahap, E. Komalasari, and B. G. Nugroho, “Pengendalian Motor Brushless Direct current Dengan Frekuensi Tinggi Pulse Width Modulation Dengan Metode Back-Electromotive Force Menggunakan Microcontroller,” *Electr. J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 17, no. 2, pp. 128–133, 2023, doi: 10.23960/elc.v17n2.2479.
- [18] I. Mudin, R. Dhayanti, and R. Sembiring, “Perancangan dan Simulasi Kendali Motor BLDC Menggunakan Atmega2560 Berbasis Sensor Hall di Proteus,” *Edu Elektr. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 9–14, 2026, doi: 10.15294/eduel.v13i1.27033.
- [19] B. P. Putri, S. Sutedjo, O. A. Qudsi, and L. S. Mahendra, “Alat Penstabil Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Kontrol PID,” *Emit. J. Tek. Elektro*, vol. 22, no. 2, pp. 134–140, 2022, doi: 10.23917/emitor.v22i2.19384.
- [20] P. Astuti and H. Masdi, “Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC Menggunakan PWM Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno,” *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 3, no. 1, pp. 120–135, 2022, doi: 10.24036/jtein.v3i1.216.
- [21] Nurizka Fitra Maula, Sofian Yahya, and Sofyan Muhammad Ilman, “Perancangan dan Simulasi Kendali Kecepatan Motor BLDC dengan Metode PID Menggunakan Teknik Tanpa Sensor Berbasis Simulink MatLab,” *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 15, no. 1, pp. 461–465, 2024, doi: 10.35313/irwns.v15i1.6205.
- [22] M. F. R. Setiawan and A. I. A. S. Endryansyah, Subuh Isnur Haryudo, “Optimasi Sistem Monitoring Penghitung Produk Gula dengan Menggunakan SCADA Berbasis Distributed Control System (DCS),” *urnal Tek. Elektro*, vol. 11, no. 3, pp. 463–470, 2022.
- [23] S. Mahendra, F. Fatra, and M. Tamamudin, “Analisis Performa pada Sepeda Motor Listrik Menggunakan Motor BLDC 500 W,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 19, no. 3, pp. 339–352, 2024, doi: 10.32497/jrm.v19i3.5249.
- [24] M. Mara, I. G. N. K. Yudhyadi, I. G. A. K. C. Adhi, P. D. Setyawan, and A. A. A. Triadi, “Uji performansi motor listrik sebagai penggerak kendaraan listrik,” *Din. Tek. Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 18–22, 2023, doi: 10.29303/dtm.v13i1.607.
- [25] M. A. Izzati and N. Gusnita, “Analisis Performa dan Daya Konsumsi Brushless Direct Current Motor 1000-Watt pada Mobil Listrik Hykorasaki,” *Briliant J. Ris. dan Konseptual*, vol. 7, no. 4, pp. 1104–1115, 2022, doi: 10.28926/briliant.v7i4.1050.
- [26] K. F. Anderson, F. D. Hanggara, and A. Nugroho, “Desain Perancangan Troli Ergonomi Bagi Pekerja Material Handling UMKM Sigma Motor. Journal of Green Engineering for Sustainability,” *J. Green Eng. Sustain.*, vol. 01, no. 01, pp. 31–41, 2023, [Online]. Available: <http://journal.uvers2.ac.id/index.php/greeners/article/view/170%0Ahttps://journal.uvers2.ac.id/index.php/greeners/article/download/170/104>

- [27] V. Olivia De Deus and S. Perdana, "Analisis risiko kerja di Pabrik Kerupuk Dila menggunakan metode WERA dan NERPA," *J. Tek. Ind. dan Manaj. Rekayasa*, vol. 2, no. 2, pp. 65–80, 2024, doi: 10.24002/jtimr.v2i2.9733.
- [28] N. Margaretha, "ANALISIS KEGIATAN MANUAL MATERIAL HANDLING TERHADAP GEJALA MUSCULOSKELETAL DISORDER PADA OPERATOR GUDANG," *J. Indones. Sos. Sains*, vol. 3, no. 2, pp. 167–190, 2022.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.