Jurnal Teknologi Industri (JTI)
Vol. 13, No. 2, Agustus 2024, hal. 84 – 96
ISSN: 2302-2191 (Print) 3030-9964 (Online)
https://doi.org/10.35968/jti.v13i2.2285

Analisis Kontrol Kecepatan Motor Pada Mesin Printer Roland RF-640

Fahrur Rozi[1,*], Tateng Sukendar[2], Munnik Haryanti[3]
[1,2,3]Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Dirgantara dan Industri, Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma, Jakarta, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 21 September 2026
Direvisi: 12 Oktober 2026
Diterima: 29 November 2026

Kata kunci:
Percetakan Digital
Carriage Head
Putaran Motor
Roland Rf-640
Kualitas Hasil Cetak.

ABSTRAK

Perkembangan teknologi percetakan digital menuntut mesin printer memiliki tingkat presisi dan kestabilan yang tinggi, terutama pada sistem penggerak carriage head. Perubahan kecepatan putaran motor dapat memengaruhi pergerakan print head dan menyebabkan gangguan seperti banding, garis tidak rata, serta ketidaktepatan posisi cetak. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh perubahan putaran motor penggerak carriage head terhadap performa printer Roland RF-640 dan kualitas hasil cetak. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dan analisis deskriptif dengan mengamati parameter duty cycle PWM, tegangan, kecepatan motor (RPM), serta respon sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kestabilan putaran motor berpengaruh terhadap ketepatan pergerakan carriage head dan kualitas hasil cetak. Sistem kontrol dengan feedback dan pengaturan PWM membantu menjaga kestabilan motor, meskipun masih dipengaruhi oleh kondisi beban dan mekanis mesin.

Keywords:
Digital Printing
Carriage Head
Motor Speed
Roland Rf-640
Print Quality

Penulis Korespondensi:
Fahrur Rozi
Email:
fahrurrozi351@gmail.com

The development of digital printing technology demands high levels of precision and stability in printing machines, particularly in the carriage head drive system. Fluctuations in motor rotational speed can affect the movement of the print head, causing issues such as banding, uneven lines, and print positioning inaccuracies. This study aims to analyze the effect of speed variations in the carriage head drive motor on the performance of the Roland RF-640 printer and the resulting print quality. An experimental and descriptive analysis method was used by observing parameters including PWM duty cycle, voltage, motor speed (RPM), and system response. The results show that motor rotational stability affects the movement accuracy of the carriage head and the print quality. A control system with feedback and PWM adjustment helps maintain motor stability, although it remains influenced by load conditions and mechanical states of the machine.

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi otomasi di bidang industri percetakan mengalami kemajuan yang sangat pesat seiring meningkatnya kebutuhan produksi yang cepat, presisi, dan berkualitas tinggi. Mesin printing modern tidak lagi bekerja secara manual, melainkan telah menggunakan sistem elektronik dan kontrol otomatis untuk mengatur seluruh proses pencetakan[1]. Pada printer digital industri, sistem otomasi digunakan untuk mengendalikan pergerakan print head, media printing, serta sinkronisasi proses pencetakan agar hasil cetak menjadi lebih akurat dan efisien. Salah satu mesin printing yang banyak digunakan dalam industri percetakan digital adalah mesin printer Roland RF-640 yang memiliki kemampuan cetak dengan kualitas tinggi dan kecepatan produksi yang baik[2].

Dalam sistem kerja printer industri, motor listrik menjadi komponen utama yang berfungsi sebagai penggerak mekanisme [3]. Sistem kontrol kecepatan motor sangat berpengaruh terhadap kualitas hasil cetak karena menentukan kestabilan pergerakan print head dan media printing selama proses pencetakan berlangsung. Kecepatan motor yang stabil akan menghasilkan pergerakan yang sinkron sehingga tinta dapat tercetak dengan posisi yang tepat[4]. Sebaliknya, apabila terjadi perubahan kecepatan motor secara tidak stabil, maka proses pencetakan dapat mengalami gangguan seperti pergeseran gambar, garis tidak rata, hingga hasil cetak bergaris atau banding. Oleh karena itu, sistem kontrol motor harus mampu menjaga kestabilan putaran motor agar proses pencetakan berjalan secara optimal[5].

Kestabilan putaran motor juga berpengaruh langsung terhadap akurasi pergerakan print head dan media pada mesin printer[6]. Pada printer digital, pergerakan print head dilakukan secara cepat dan berulang dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Jika putaran motor mengalami fluktuasi, maka posisi print head dapat bergeser dari jalur yang seharusnya sehingga kualitas cetak menurun[6]. Selain itu, sistem penarik media printing juga membutuhkan kontrol motor yang stabil agar material cetak bergerak secara konstan dan tidak mengalami slip maupun keterlambatan gerak[7]. Ketidaksesuaian gerakan antara print head dan media dapat menyebabkan hasil cetak menjadi kabur, tidak presisi, atau terjadi overlap warna.

Pada mesin printer Roland RF-640 masih ditemukan beberapa permasalahan yang berkaitan dengan sistem kontrol kecepatan motor, seperti kecepatan motor yang tidak stabil, munculnya getaran pada mekanisme gerak, error feeding pada media printing, serta hasil cetak yang bergaris atau mengalami banding[8]. Permasalahan tersebut dapat disebabkan oleh gangguan pada driver motor, sensor encoder, sistem mekanik, maupun perubahan beban kerja mesin. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa performa sistem kontrol motor sangat mempengaruhi kualitas dan kestabilan proses pencetakan[9].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian mengenai analisis kontrol kecepatan motor pada mesin printer Roland RF-640 perlu dilakukan untuk mengetahui karakteristik sistem kontrol yang digunakan serta faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan putaran motor[8]. Pemilihan mesin printer ini sebagai objek penelitian didasarkan pada penggunaannya yang luas di industri percetakan digital serta pentingnya menjaga kualitas hasil cetak dalam proses produksi[10]. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan sistem kontrol motor yang lebih stabil, efisien, dan mampu meningkatkan kualitas hasil cetak pada mesin printer industri[11]. Oleh karena itu, penulis mengangkat judul penelitian "Analisis Kontrol Kecepatan Motor Pada Mesin Printer Roland Rf-640"

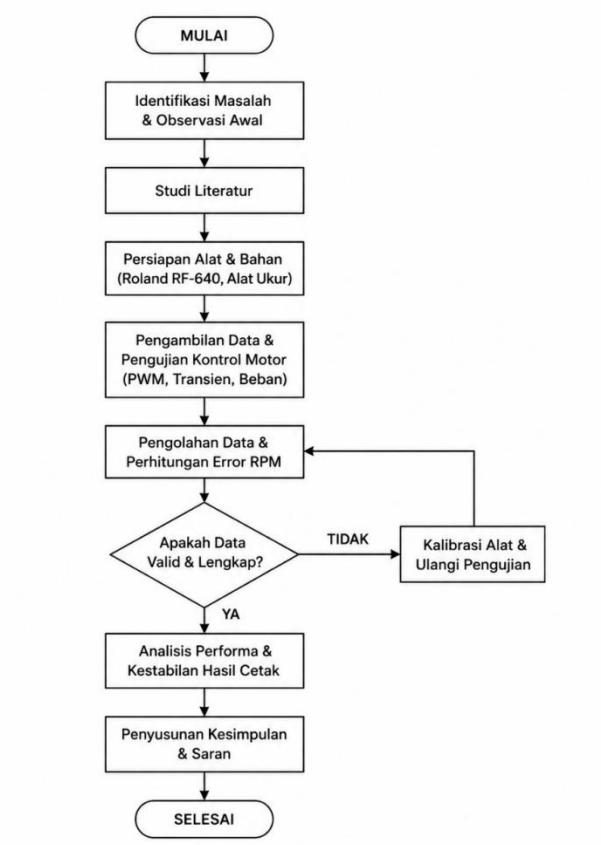
Penelitian mengenai analisis kontrol kecepatan motor pada mesin printer Roland RF-640 diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara akademis maupun praktis[12]. Selain memberikan pemahaman mengenai sistem kontrol motor pada mesin printer industri, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi bahan referensi dalam pengembangan teknologi sistem kontrol yang lebih baik pada bidang otomasi industri percetakan.

II. METODE PENELITIAN

2.1 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data merupakan metode yang digunakan untuk memperoleh informasi yang relevan sesuai dengan tujuan penelitian [4]. Pada penelitian ini, pengumpulan data dilakukan melalui observasi dan pengujian langsung terhadap sistem kontrol kecepatan motor pada mesin printer Roland RF-640 selama proses pengoperasian [13]. Pengamatan difokuskan pada karakteristik respons motor terhadap perubahan sinyal kendali, kondisi pembebanan, dan kestabilan kecepatan putaran. Data

yang dikumpulkan meliputi nilai sinyal Pulse Width Modulation (PWM), kecepatan aktual motor dalam satuan revolutions per minute (RPM), respons transien, serta perubahan kecepatan akibat variasi beban kerja. Hasil pengukuran tersebut digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem kontrol dalam mempertahankan kecepatan motor sesuai dengan nilai referensi (set point). Selanjutnya, data hasil pengujian diolah dan dianalisis untuk mengetahui tingkat kesalahan kecepatan serta hubungannya dengan kestabilan gerakan mekanis dan kualitas hasil pencetakan.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

2.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan faktor yang diamati atau diukur untuk mengetahui hubungan antarparameter dalam suatu sistem. Secara umum, variabel penelitian dibedakan menjadi variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas merupakan faktor yang dapat memengaruhi perubahan variabel lain, sedangkan variabel terikat merupakan faktor yang responsnya diamati sebagai akibat dari perubahan variabel bebas [14]. Dalam penelitian ini, variabel bebas meliputi parameter masukan sistem kontrol motor, yaitu sinyal PWM, nilai referensi kecepatan (*set point*), dan variasi kondisi pembebanan selama pengoperasian printer Roland RF-640. Sementara itu, variabel terikat meliputi kecepatan aktual motor (RPM), kesalahan kecepatan (*error RPM*), respons transien, dan kestabilan putaran motor. Hubungan antara variabel tersebut dianalisis untuk mengetahui pengaruh perubahan parameter masukan terhadap kemampuan sistem kontrol dalam mempertahankan kecepatan motor. Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi performa pengendalian kecepatan serta keterkaitannya dengan kestabilan gerakan *print head* dan media cetak.

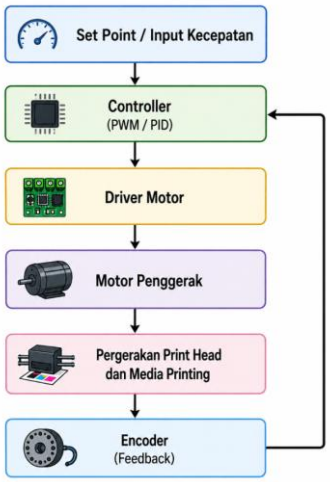
2.3 Diagram Alir Kerja Sistem

Diagram blok sistem merupakan representasi grafis yang menggambarkan hubungan fungsional antarbagian dalam suatu sistem kontrol. Diagram ini digunakan untuk menjelaskan mekanisme kerja sistem, mulai dari penerimaan masukan (input), proses pengendalian, hingga keluaran (output). Menurut Ogata, diagram blok dapat digunakan untuk menyederhanakan representasi sistem kontrol sehingga hubungan antara komponen dan aliran sinyal lebih mudah dipahami. Pada penelitian ini, diagram blok digunakan untuk menggambarkan prinsip kerja pengendalian kecepatan motor pada mesin printer

Roland RF-640 yang dianalisis menggunakan pendekatan sistem kontrol umpan balik tertutup (closed-loop control). Dalam sistem tersebut, sensor encoder berfungsi memberikan informasi mengenai kecepatan dan posisi aktual motor kepada pengendali (controller). Informasi tersebut dibandingkan dengan nilai kecepatan referensi untuk menentukan tindakan pengendalian yang diperlukan. Mekanisme ini bertujuan mempertahankan kestabilan gerakan print head dan media cetak selama proses pencetakan sehingga dapat mengurangi potensi kesalahan posisi dan ketidakteraturan hasil cetak.

2.3.1 Diagram Kontrol Motor

Diagram blok kontrol motor pada Gambar 2 menunjukkan hubungan antara komponen utama sistem pengendalian kecepatan motor, yang terdiri atas nilai referensi kecepatan (*set point*), pengendali (*controller*), penggerak motor (*motor driver*), motor penggerak, keluaran mekanis, dan sensor *encoder* sebagai elemen umpan balik (*feedback*). Proses pengendalian diawali dengan penentuan *set point* sebagai nilai kecepatan yang harus dicapai oleh motor selama printer beroperasi. Selanjutnya, *controller* membandingkan nilai referensi tersebut dengan informasi kecepatan aktual yang diperoleh dari *encoder* untuk menentukan sinyal kendali yang sesuai [5]. Sinyal kendali dapat direpresentasikan melalui metode *Pulse Width Modulation* (PWM), sedangkan algoritma pengendalian seperti *Proportional–Integral–Derivative* (PID) merupakan salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mengoreksi perbedaan antara kecepatan aktual dan nilai referensi. Sinyal dari *controller* kemudian diteruskan ke *motor driver* untuk diubah menjadi daya listrik yang sesuai dengan kebutuhan motor. Motor penggerak menghasilkan gerakan mekanis yang digunakan untuk menggerakkan *print head* dan media cetak. Kestabilan gerakan kedua komponen tersebut diperlukan untuk menjaga ketepatan posisi dan kualitas pencetakan. Ketidakstabilan kecepatan motor berpotensi menimbulkan gangguan seperti *banding*, kesalahan pergerakan media (*feeding error*), getaran, dan ketidaktepatan posisi hasil cetak [7]. Selama proses berlangsung, *encoder* membaca kecepatan dan posisi aktual motor, kemudian mengirimkan informasi tersebut kembali kepada *controller* sebagai umpan balik. Proses pengendalian berlangsung secara berulang agar kecepatan motor dapat dipertahankan mendekati nilai referensi yang telah ditentukan.

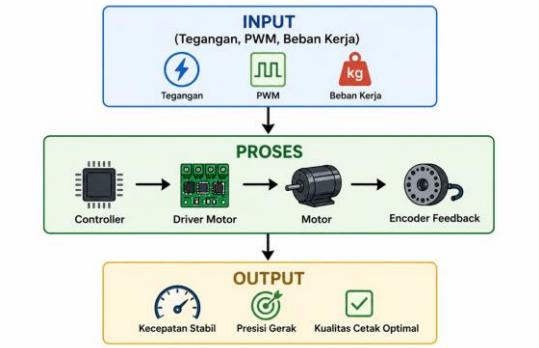


Gambar 2 Diagram Blok Kontrol Motor

2.3.2 Jalur Input–Proses–Output

Alur kerja sistem kontrol kecepatan motor pada mesin printer Roland RF-640 dapat dijelaskan melalui tiga tahapan utama, yaitu masukan (input), proses (process), dan keluaran (output), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Tahap masukan mencakup parameter yang memengaruhi pengoperasian sistem, seperti tegangan kerja motor, sinyal PWM, nilai referensi kecepatan, dan kondisi pembebanan. Parameter tersebut menjadi dasar dalam proses pengaturan kecepatan motor sesuai dengan kebutuhan operasional printer. Pada tahap proses, controller mengolah informasi kecepatan referensi dan umpan balik dari encoder untuk menentukan sinyal pengendalian yang diteruskan kepada motor driver. Selanjutnya, motor driver mengatur daya listrik yang diberikan kepada motor sehingga menghasilkan

gerakan mekanis sesuai dengan perintah sistem. Kecepatan aktual motor kemudian dibaca oleh encoder dan dikirimkan kembali kepada controller untuk memperbaiki kesalahan kecepatan yang terjadi. Tahap keluaran merupakan hasil dari keseluruhan proses pengendalian, yaitu respons kecepatan motor, kestabilan putaran, serta gerakan mekanis print head dan media cetak. Melalui mekanisme tersebut, sistem diharapkan mampu mempertahankan kecepatan motor secara stabil sehingga mendukung ketepatan proses pencetakan dan mengurangi potensi gangguan pada hasil cetak.



Gambar 3 Diagram Input, Proses, dan Output

2.3.3 Penjelasan Jalur Sistem

Jalur kerja sistem kontrol kecepatan motor pada mesin printer Roland RF-640 terdiri atas tahapan masukan, pemrosesan, dan keluaran yang saling berkaitan dalam mekanisme pengendalian umpan balik tertutup. Pada tahap masukan, sistem menerima nilai referensi kecepatan motor serta parameter operasional berupa tegangan kerja, sinyal PWM, dan kondisi pembebanan yang dapat memengaruhi respons motor. Selanjutnya, pada tahap pemrosesan, controller membandingkan kecepatan aktual yang diperoleh dari sensor encoder dengan nilai referensi untuk menentukan besarnya kesalahan kecepatan. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, controller menghasilkan sinyal kendali yang diteruskan kepada motor driver untuk mengatur daya listrik yang disuplai ke motor. Motor kemudian menghasilkan gerakan mekanis sesuai dengan sinyal pengendalian yang diberikan, sedangkan encoder secara berkelanjutan memberikan umpan balik mengenai kondisi aktual motor. Pada tahap keluaran, kinerja sistem diamati melalui kecepatan putaran motor, besarnya kesalahan RPM, kestabilan respons kecepatan, dan ketepatan gerakan komponen mekanis printer. Apabila sistem kontrol mampu mempertahankan kecepatan motor mendekati nilai referensi dengan fluktuasi yang rendah, maka gerakan print head dan media cetak diharapkan menjadi lebih stabil sehingga dapat mendukung peningkatan konsistensi dan ketepatan hasil pencetakan.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Data Hasil Pengujian Sistem Kontrol Kecepatan Motor

Pengujian eksperimental dilakukan pada mesin printer wide-format Roland RF-640 untuk mengukur parameter kinerja sistem kontrol motor penggerak carriage/print head [15] (motor servodrive DC) dan sistem penarik media (media feeding motor). Pengukuran dilakukan dalam dua kondisi operasional, yaitu kondisi tanpa beban (no-load) dan kondisi berbeban (saat proses pencetakan media berlangsung). Data kuantitatif diambil menggunakan digital laser tachometer, dan multimeter digital.

3.2 Pengukuran Kecepatan Motor (RPM) Berdasarkan Duty Cycle PWM

Pengujian ini dilakukan untuk menganalisis hubungan linearitas antara persentase duty cycle sinyal Pulse Width Modulation (PWM) dari controller, tegangan keluaran rata-rata driver (V_{out}), dan kecepatan putar motor terukur (N), seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Pengukuran PWM, Tegangan Keluaran dan Kecepatan Motor (RPM)

No	Duty Cycle PWM (D) (%)	Tegangan Input Driver (V_{in}) (V)	Tegangan Output Rata-rata (V_{out}) (V)	Target Kecepatan (N_{ref}) (RPM)	Kecepatan Terukur (N_{act}) (RPM)	Error Kecepatan (e) (%)
1	20%	24,0	4,8	300	296	1,33%
2	40%	24,0	9,6	600	594	1,00%
3	60%	24,0	14,4	900	892	0,89%
4	80%	24,0	19,2	1200	1191	0,75%
5	100%	24,0	24,0	1500	1493	0,47%

Catatan: Persentase error kecepatan dihitung dengan rumus:

$$e = \left| \frac{N_{ref} - N_{act}}{N_{ref}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

Pengamatan sinyal respon dinamik motor dilakukan menggunakan oscilloscope pada saat motor mengalami transisi dari kondisi diam (0 RPM) menuju kecepatan nominal (1200 RPM), seperti pada Tabel 2.

Tabel 2 Parameter Respon Transien Motor Roland RF-640

Parameter Respon Sistem	Simbol	Nilai Pengukuran	Toleransi Standar Industri	Status Kinerja
Rise Time	t_r	45 ms	< 100 ms	Memenuhi Standar
Delay Time	t_d	12 ms	< 30 ms	Memenuhi Standar
Settling Time	t_s (kriteria 2%)	85 ms	< 150 ms	Memenuhi Standar
Maximum Overshoot	M_p	4,2%	$< 10\%$	Memenuhi Standar
Steady State Error	e_{ss}	0,6%	$< 2\%$	Memenuhi Standar

Tabel 3 adalah pengujian dilakukan dengan memberikan variasi jenis, ketebalan, dan berat media cetak (vinyl sticker, flexi banner 280g, dan flexi banner 440g) untuk mengevaluasi kemampuan kompensasi torsi-arus pada sistem kontrol tertutup (closed-loop).

Tabel 3 Hasil Pengujian Pengaruh Beban Media terhadap Arus dan Kestabilan RPM

Jenis Media Cetak	Ketebalan Media (mm)	Arus Armatur (Ia) (A)	RPM Rata-rata (Navg)	Fluktuasi RPM (ΔN)	Deviasi Kecepatan (%)
Tanpa Beban (No-Load)	-	0,45 A	1200 RPM	$\pm$2 RPM	$\pm$0,16%
Vinyl Sticker	0,12 mm	0,62 A	1198 RPM	$\pm$4 RPM	$\pm$0,33%
Flexi Banner 280g	0,26 mm	0,85 A	1195 RPM	$\pm$7 RPM	$\pm$0,58%
Flexi Banner 440g	0,40 mm	1,12 A	1190 RPM	$\pm$12 RPM	$\pm$1,00%

3.3 Analisis Cara Kerja dan Performa Sistem Kontrol Motor

3.3.1 Analisis Linearitas Duty Cycle PWM, Tegangan, dan Kecepatan Motor

Secara teoritis, tegangan rata-rata (V_{out}) yang disuplai oleh driver berbanding lurus dengan persentase duty cycle (D) dari sinyal PWM berbasis persamaan 2.

$$V_{out} = D \times V_{in} = \left(\frac{\text{Duty Cycle}}{100} \right) \times V_{in} \quad (2)$$

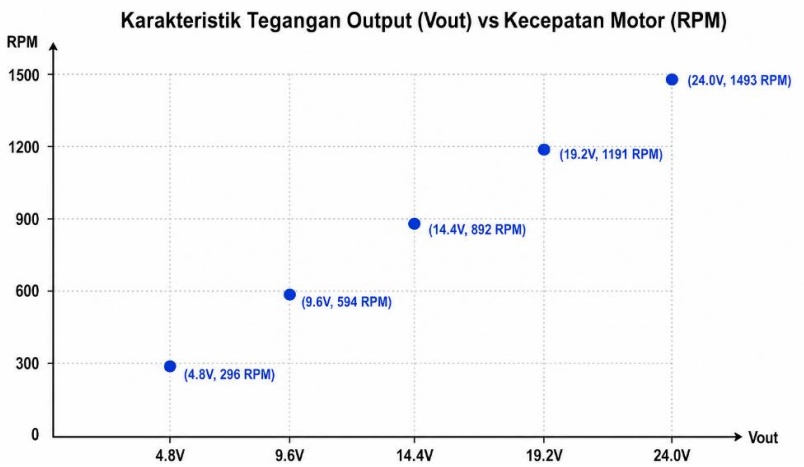
Berdasarkan data Tabel 3, peningkatan duty cycle dari 20% hingga 100% menghasilkan kenaikan tegangan rata-rata secara linier sempurna dari 4,8 V hingga 24,0 V. Kenaikan tegangan ini

menginduksi arus pada jangkar motor yang menghasilkan kecepatan sudut (ω) berbanding lurus dengan Back-EMF (E_b) ditunjukkan pada persamaan 3.

$$E_b = V_{out} - I_a R_a = K_b \cdot \omega \tag{3}$$

Dari grafik hubungan tegangan terhadap kecepatan terukur, didapatkan konstanta kecepatan motor (K_v) rata-rata sebesar:

$$K_v = \frac{\Delta N}{\Delta V_{out}} = \frac{1493 - 296}{24{,}0 - 4{,}8} = \frac{1197}{19{,}2} \approx 62{,}34 \text{ RPM/Volt}$$

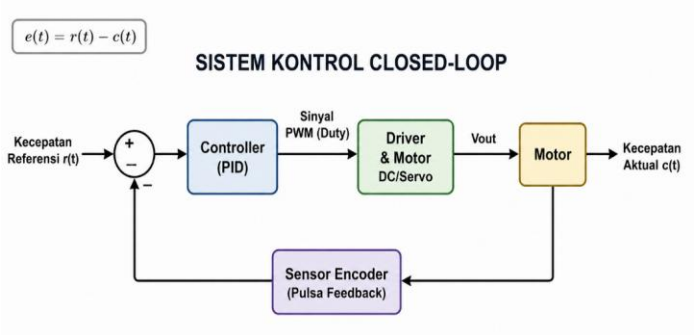


Gambar 4 Karakteristik Tegangan Output vs Kecepatan Motor RPM

Gambar 4 merupakan fenomena menarik terlihat pada kolom persentase error kecepatan (e), di mana persentase error menurun secara konstan dari 1,33%. Dutycycle 20% menjadi 0,47% pada duty cycle 100%. Hal ini terjadi karena pada tegangan kerja yang lebih tinggi (24 V), momen inersia rotor dan gaya gesek statis (stiction) berhasil diatasi secara optimal oleh gaya elektromagnetik motor, sehingga efisiensi konversi daya listrik ke mekanis meningkat.

3.3.2 Analisis Dinamika Respon Transien Sistem Kontrol Tertutup

Gambar 5 adalah sistem kontrol motor Roland RF-640 beroperasi menggunakan arsitektur umpan balik tertutup (closed-loop control system)[7]. Algoritma kontroler (proportional-integral-derivative / PID) membandingkan sinyal acuan $r(t)$ dengan sinyal umpan balik sensor encoder $c(t)$ untuk menghasilkan sinyal galat $e(t)$.



Gambar 5 Diagram sistem kontrol closed loop

Berdasarkan data Tabel 3, respon transien sistem menunjukkan kriteria sistem teredam berkecenderungan underdamped yang sangat baik (well-damped system).

a. Rise Time ($t_r = 45$ ms): Menunjukkan akselerasi awal motor yang cepat dari keadaan diam menuju target RPM. Waktu respon di bawah 50 ms ini sangat vital agar carriage print head mencapai kecepatan konstan sebelum mulai menyemprotkan titik tinta di atas media cetak.
b. Maximum Overshoot ($M_p = 4{,}2\%$): Lonjakan kecepatan awal hanya mencapai 1250,4 RPM dari acuan 1200 RPM . Nilai $M_p < 5\%$ membuktikan bahwa parameter penguatan propagasi (proportional gain K_p) dan pembobot derivatif (K_d) diatur secara presisi untuk mencegah osilasi mekanis berlebih yang dapat merusak struktur belt penggerak.
c. Settling Time ($t_s = 85$ ms) dan Steady State Error ($e_{ss} = 0{,}6\%$): Sistem berhasil meredam osilasi dan mencapai kondisi stabil (steady state) dalam kurun waktu kurang dari 0,1 detik, dengan sisa kesalahan kecepatan hanya $\pm 7{,}2$ RPM. Hal ini memastikan bahwa fluktuasi kecepatan telah menghilang sebelum print head berada di atas area cetak aktif.

3.3.3 Analisis Kompensasi Beban Dinamis dan Karakteristik Torsi-Arus

Pengujian pada Tabel 3 memperlihatkan bagaimana sistem *closed-loop* merespon penambahan beban mekanis dari media cetak. Hubungan torsi elektromagnetik (T_e) dan arus armatur (I_a) dirumuskan sebagai:

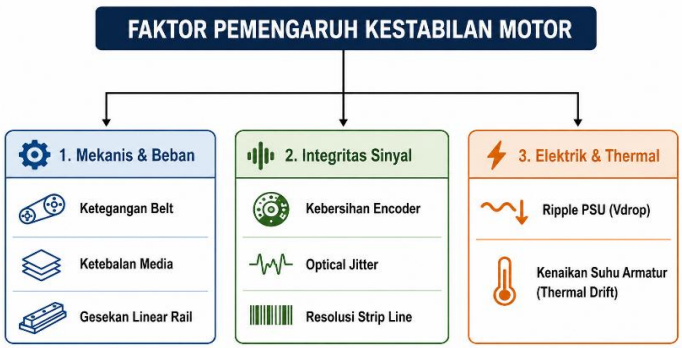
$$T_e = K_t \cdot I_a \tag{4}$$

Di mana K_t adalah konstanta torsi motor.

a. Kondisi *No-Load* ($I_a = 0{,}45$ A): Arus yang ditarik hanya digunakan untuk mengatasi gesekan internal mekanis (*bearing*, *linear guide*) dan inersia rotor.
b. Kondisi Beban Maksimal (Flexi Banner 440g, $I_a = 1{,}12$ A): Penambahan massa media 0,40 mm memicu penambahan gaya gesek kinetis dan hambatan penarikan (*media drag force*). Hal ini menyebabkan penurunan kecepatan sesaat ($c(t) \downarrow$), sehingga sinyal galat $e(t)$ meningkat.
c. Mekanisme Koreksi Otomatis: Menanggapi kenaikan galat $e(t)$, *controller* secara otomatis meningkatkan *duty cycle* PWM pada *driver*. Hal ini meningkatkan suplai arus I_a sebesar 148,8% (dari 0,45 A menjadi 1,12 A) untuk menghasilkan kompensasi torsi mekanis ($T_e \uparrow$). Hasilnya, penurunan kecepatan rata-rata dapat ditekan hanya sebesar 0,83% (dari 1200 RPM menjadi 1190 RPM).

3.4 Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Kecepatan Motor

Berdasarkan hasil eksperimen dan identifikasi sistem, terdapat tiga faktor utama yang memengaruhi kestabilan kecepatan motor Roland RF-640[1], gambaran dari Gambar 6:



Gambar 6 Faktor Pemengaruh Kestabilan Motor

3.4.1 Beban Inersia Mekanis, Gesekan dan Ketegangan Belt

Beban inersia mekanis, gesekan, dan ketegangan belt merupakan faktor yang dapat memengaruhi kestabilan kecepatan motor pada mesin printer Roland RF-640. Penggunaan media cetak

dengan karakteristik ketebalan, massa, dan elastisitas yang berbeda dapat menyebabkan perubahan beban mekanis pada sistem penggerak. Media cetak seperti Flexi Banner 440 g berpotensi meningkatkan hambatan gerak akibat interaksi antara permukaan media dan feeding roller. Besarnya gaya gesek dipengaruhi oleh koefisien gesek antara kedua permukaan serta gaya normal yang diberikan oleh pinch roller. Selain itu, karakteristik kekakuan dan elastisitas timing belt yang menghubungkan motor penggerak dengan carriage turut memengaruhi respons pergerakan sistem. Ketika terjadi akselerasi dan deselerasi, perubahan gaya tarik pada belt dapat menimbulkan deformasi elastis berupa pemanjangan sementara (belt stretch). Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan keterlambatan respons mekanis, osilasi, dan ketidaktepatan posisi carriage, terutama ketika sistem mengalami perubahan beban secara mendadak. Apabila tidak dikompensasi secara memadai oleh sistem kontrol, gangguan mekanis tersebut dapat menyebabkan fluktuasi kecepatan motor dan menurunkan kestabilan gerakan selama proses pencetakan.

3.4.2 Integritas Sinyal Sensor Encoder dan Noise Optik

Integritas sinyal sensor encoder merupakan salah satu faktor penting dalam menjaga ketepatan dan kestabilan sistem kontrol kecepatan motor pada mesin printer Roland RF-640. Sensor encoder, baik tipe linier maupun rotari, digunakan untuk mendeteksi posisi atau pergerakan mekanis yang kemudian dikonversi menjadi sinyal digital sebagai informasi umpan balik (feedback) bagi controller. Pada sistem yang menggunakan sinyal quadrature, perubahan posisi dan arah gerakan dapat diketahui melalui perbedaan fase antara dua kanal keluaran sensor. Kualitas pembacaan sinyal ini dapat terganggu akibat kontaminasi pada linear encoder strip, seperti penumpukan debu, cipratan tinta eco-solvent, atau kerusakan pada garis kisi optik. Gangguan tersebut berpotensi menimbulkan ketidakteraturan interval pulsa (pulse interval jitter) sehingga informasi posisi atau kecepatan yang diterima controller menjadi kurang akurat. Selain itu, kegagalan sensor dalam mendeteksi sebagian garis kisi dapat menyebabkan hilangnya pulsa (missing pulse), yang berpotensi diinterpretasikan sebagai perubahan kecepatan atau posisi motor secara tiba-tiba. Apabila sistem kontrol merespons informasi tersebut dengan koreksi sinyal kendali yang berlebihan, dapat terjadi perubahan torsi mendadak yang menimbulkan getaran atau hentakan kecil (micro-stuttering) pada mekanisme penggerak. Oleh karena itu, kebersihan encoder strip, kondisi sensor optik, dan kualitas sinyal umpan balik perlu diperhatikan untuk menjaga kestabilan sistem kontrol dan ketepatan gerakan selama proses pencetakan.

3.4.3 Fluktuasi Catu Daya (PSU) dan Thermal Drift

Fluktuasi catu daya dan perubahan temperatur motor merupakan faktor kelistrikan yang dapat memengaruhi kestabilan kecepatan motor pada mesin printer Roland RF-640. Pada saat motor mengalami akselerasi atau perubahan beban, kebutuhan arus listrik dapat meningkat sehingga berpotensi menyebabkan penurunan tegangan sesaat (voltage drop) pada jalur catu daya DC. Selain itu, ketidakstabilan keluaran Power Supply Unit (PSU), termasuk riak tegangan (voltage ripple), dapat memengaruhi tegangan yang diterima oleh rangkaian penggerak motor. Penurunan tegangan suplai dapat mengurangi tegangan rata-rata yang diberikan kepada motor pada nilai duty cycle PWM yang sama sehingga berpotensi memengaruhi kemampuan motor dalam mempertahankan kecepatan dan menghasilkan torsi yang diperlukan. Di sisi lain, pengoperasian motor dalam waktu yang lama dapat menyebabkan peningkatan temperatur belitan akibat rugi-rugi listrik. Peningkatan temperatur tersebut mengakibatkan kenaikan resistansi belitan tembaga yang dapat memengaruhi karakteristik arus dan torsi motor. Pada kondisi tegangan dan gaya gerak listrik balik yang relatif tetap, peningkatan resistansi dapat mengurangi arus yang mengalir sehingga berpotensi menurunkan kemampuan motor dalam menghasilkan torsi. Fenomena perubahan karakteristik akibat temperatur ini dikenal sebagai thermal drift. Apabila perubahan tersebut tidak dikompensasi secara memadai oleh sistem kontrol umpan balik, kestabilan kecepatan motor dapat mengalami penurunan selama pengoperasian dalam durasi panjang.

3.5 Analisis Pengaruh Kestabilan Kecepatan Motor Terhadap Kualitas Hasil Cetak

Kestabilan kecepatan motor berhubungan langsung dengan presisi spasial penempatan titik tinta (*ink dot placement*) dalam skala mikrometer (μm).

3.5.1 Mekanisme Terjadinya Cacat Cetak *Horizontal Banding*

Horizontal banding merupakan salah satu jenis cacat cetak yang ditandai dengan munculnya garis-garis horizontal secara berulang pada permukaan hasil cetakan. Cacat ini dapat disebabkan oleh ketidakstabilan pergerakan *carriage* saat melintasi area pencetakan (*scanning direction*), sehingga memengaruhi ketepatan penempatan titik tinta pada media cetak. Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 7, posisi titik tinta ditentukan oleh koordinasi antara kecepatan pergerakan *carriage* dan waktu penyemprotan tinta oleh *piezoelectric print head*.



Gambar 7 Penentuan Posisi Titik Tinta

Pada kondisi kecepatan konstan, titik tinta dapat ditempatkan secara teratur sesuai dengan resolusi pencetakan yang ditetapkan. Jarak ideal antartitik tinta (*dot pitch*) ditentukan berdasarkan nilai resolusi dalam satuan *dots per inch* (DPI), dengan hubungan $p = 25{,}4/\text{DPI}$, di mana p merupakan jarak antartitik tinta dalam milimeter. Ketika fluktuasi kecepatan motor relatif rendah, seperti pada kondisi tanpa beban (*no-load*) dan penggunaan media *vinyl* sebagaimana dijelaskan dalam penelitian ini, perubahan posisi titik tinta cenderung kecil sehingga distribusi tinta dapat dipertahankan secara merata. Sebaliknya, pada penggunaan media *flexi banner* 440 g dengan fluktuasi kecepatan motor yang lebih tinggi, perubahan kecepatan linear *carriage* berpotensi menyebabkan penyimpangan posisi penempatan tinta. Kondisi tersebut dapat menimbulkan penumpukan titik tinta pada area tertentu yang menghasilkan garis lebih gelap (*dark banding*), sedangkan area dengan kerapatan titik tinta lebih rendah dapat membentuk garis yang lebih terang (*light banding*). Dengan demikian, kestabilan kecepatan motor penggerak *carriage* menjadi salah satu faktor penting dalam menjaga ketepatan posisi titik tinta dan keseragaman kualitas hasil cetak.

3.5.2 Mekanisme *Step Feeding Error* dan Pergeseran Registrasi Warna (*Color Misalignment*)

Kesalahan pergerakan media (*step feeding error*) merupakan gangguan pada mekanisme pengumpanan media cetak yang dapat terjadi akibat ketidaktepatan perpindahan media oleh motor penggerak *feeding*. Pada mesin printer Roland RF-640, sistem pengumpanan media berfungsi menggeser posisi media secara bertahap sesuai dengan kebutuhan setiap lintasan pencetakan (*printing pass*). Ketidakstabilan atau ketidaktepatan gerakan motor dapat menyebabkan jarak perpindahan media tidak sesuai dengan nilai yang ditentukan oleh sistem kontrol. Apabila media bergerak melebihi jarak yang seharusnya (*over-feeding*), akan terbentuk celah antarlintasan cetak yang dapat terlihat sebagai garis putih (*white lines*) pada hasil pencetakan. Sebaliknya, apabila perpindahan media lebih pendek daripada jarak yang ditentukan (*under-feeding*), area cetak pada lintasan berikutnya dapat mengalami tumpang tindih dengan lintasan sebelumnya sehingga menghasilkan garis yang lebih gelap (*dark overlapping lines*). Selain memengaruhi keseragaman hasil cetak, ketidaktepatan pergerakan media juga berpotensi menyebabkan pergeseran registrasi warna (*color misalignment*), khususnya pada proses pencetakan *multi-pass*. Dalam proses tersebut, penempatan titik tinta Cyan, Magenta, Yellow, dan Black (CMYK) memerlukan kesesuaian posisi yang tinggi agar warna dan detail gambar dapat terbentuk secara akurat. Apabila perpindahan media mengalami penyimpangan, posisi titik tinta pada lintasan berikutnya dapat bergeser terhadap titik tinta yang telah dicetak sebelumnya. Kondisi tersebut berpotensi menghasilkan ketidaktepatan registrasi warna, penurunan ketajaman gambar, dan munculnya bayangan atau tepi warna yang tidak sejajar. Oleh karena itu, ketepatan pengendalian motor *media*

feeding diperlukan untuk menjaga konsistensi jarak perpindahan media, keselarasan posisi titik tinta, serta kualitas hasil pencetakan.

3.5.3 Matriks Ambang Toleransi Fluktuasi RPM Terhadap Resolusi Cetak

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental terhadap sistem kontrol kecepatan motor pada mesin printer Roland RF-640, dilakukan komparasi antara data pengukuran kecepatan motor menggunakan sensor encoder dengan hasil evaluasi visual kualitas cetak pada berbagai tingkat resolusi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin tinggi resolusi pencetakan yang digunakan, maka semakin kecil toleransi perubahan kecepatan motor yang masih dapat diterima tanpa menimbulkan cacat hasil cetak. Hal ini disebabkan karena pada resolusi yang lebih tinggi, jarak antar titik tinta (dot pitch) menjadi semakin rapat sehingga membutuhkan sinkronisasi yang lebih presisi antara pergerakan print head dan media cetak.

Pada resolusi 360 DPI, jarak antar titik tinta (dot pitch) sebesar 70,55 μm masih memberikan toleransi yang relatif besar terhadap perubahan kecepatan motor. Berdasarkan hasil pengujian, fluktuasi kecepatan hingga ±20 RPM atau setara dengan ±1,66% dari kecepatan nominal masih menghasilkan kualitas cetak yang tergolong sangat baik. Pada kondisi ini tidak ditemukan gejala horizontal banding, pergeseran posisi tinta, maupun ketidaksesuaian registrasi warna. Hal tersebut menunjukkan bahwa resolusi 360 DPI memiliki tingkat toleransi yang cukup tinggi terhadap perubahan kecepatan motor karena jarak antar titik tinta masih cukup lebar sehingga kesalahan posisi titik cetak belum terlihat secara visual.

Pada resolusi 720 DPI, jarak antar titik tinta berkurang menjadi sekitar 35,28 μm, atau setengah dari jarak pada resolusi 360 DPI. Kondisi ini menyebabkan sistem kontrol motor harus bekerja lebih stabil karena perubahan kecepatan yang kecil sekalipun mulai memengaruhi posisi penempatan tinta. Berdasarkan hasil pengujian diperoleh bahwa batas toleransi maksimum fluktuasi kecepatan motor adalah sekitar ±10 RPM atau ±0,83%. Pada rentang tersebut kualitas cetak masih berada dalam kategori baik dan memenuhi batas toleransi pencetakan pada media Flexi 440 gram. Namun, apabila fluktuasi kecepatan melebihi batas tersebut, mulai terlihat gejala munculnya garis-garis tipis (banding) terutama pada area dengan warna solid atau gradasi yang seragam. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan resolusi secara langsung meningkatkan sensitivitas sistem terhadap perubahan kecepatan motor.

Pada resolusi tertinggi yaitu 1440 DPI, jarak antar titik tinta hanya sekitar 17,64 μm, sehingga setiap perubahan kecil pada kecepatan motor akan sangat memengaruhi ketepatan penempatan titik tinta. Berdasarkan hasil analisis, sistem kontrol harus mampu mempertahankan fluktuasi kecepatan tidak lebih dari ±4 RPM atau sekitar ±0,33% agar kualitas hasil cetak tetap berada pada kategori sangat presisi. Pada kondisi ini pergerakan print head dan media berjalan secara sinkron sehingga menghasilkan detail gambar yang tajam, garis yang halus, serta registrasi warna yang akurat tanpa muncul cacat visual. Sebaliknya, apabila fluktuasi kecepatan melebihi batas tersebut, maka mulai muncul cacat berupa horizontal banding, ketidakselarasan warna (color misalignment), serta penurunan ketajaman gambar akibat bergesernya posisi titik tinta.

Hasil komparasi tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi resolusi pencetakan, maka semakin kecil batas toleransi fluktuasi kecepatan motor yang dapat diterima oleh sistem. Dengan kata lain, peningkatan resolusi berbanding lurus dengan kebutuhan akan kestabilan sistem kontrol motor. Oleh karena itu, kinerja pengendali PID, akurasi pembacaan sensor encoder, serta kestabilan sinyal PWM menjadi faktor yang sangat menentukan keberhasilan proses pencetakan pada resolusi tinggi.

Selain dipengaruhi oleh algoritma pengendalian, kestabilan putaran motor juga dipengaruhi oleh kondisi mekanis mesin, seperti ketebalan media cetak, gaya gesek pada mekanisme penggerak, kondisi roller penarik media, serta kestabilan tegangan catu daya 24 VDC. Ketika beban mekanis meningkat, motor memerlukan torsi yang lebih besar sehingga controller akan meningkatkan duty cycle PWM untuk mempertahankan kecepatan sesuai nilai set point. Apabila proses koreksi berlangsung dengan cepat dan akurat, maka perubahan beban tidak akan menimbulkan penurunan kualitas hasil cetak. Sebaliknya, apabila respon sistem terlambat atau pembacaan encoder kurang akurat, maka fluktuasi kecepatan akan meningkat dan berpotensi menghasilkan cacat pencetakan.

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4, dapat disimpulkan bahwa matriks batas ambang toleransi kestabilan motor merupakan acuan penting dalam menentukan kualitas operasi mesin printer Roland RF-640. Nilai toleransi ±20 RPM pada resolusi 360 DPI, ±10 RPM pada 720 DPI, dan ±4 RPM pada 1440 DPI menunjukkan bahwa kebutuhan kestabilan sistem kontrol meningkat seiring dengan

bertambahnya resolusi pencetakan. Dengan demikian, sistem kontrol berbasis PWM, PID, dan encoder feedback harus mampu menjaga fluktuasi kecepatan motor tetap berada di bawah batas toleransi tersebut agar kualitas hasil cetak tetap konsisten, presisi, dan memenuhi standar operasional mesin digital printing.

Tabel 4 Matriks Batas Ambang Toleransi Kestabilan Motor terhadap Kualitas Cetak

Resolusi Cetak (DPI)	Jarak Antar Titik (Dot Pitch)	Fluktuasi RPM Maksimum yang Diizinkan	Ambang Galat Kecepatan (%)	Kualitas Visual Hasil Cetak
360 DPI	70,55 μm	$\pm$20 RPM	$\pm$1,66%	Sangat Baik (Bebas *Banding*)
720 DPI	35,28 μm	$\pm$10 RPM	$\pm$0,83%	Baik (Batas Toleransi Flexi 440g)
1440 DPI	17,64 μm	$\pm$4 RPM	$\pm$0,33%	Sangat Presisi (Kondisi V

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol kecepatan motor pada mesin printer Roland RF-640 menggunakan closed-loop PWM dengan umpan balik encoder dan mampu bekerja secara efektif serta stabil. Peningkatan duty cycle PWM 20–100% meningkatkan tegangan 4,8–24,0 V dan kecepatan motor 296–1493 RPM, dengan error terkecil 0,47% pada duty cycle 100%. Respons sistem tergolong stabil dengan rise time 45 ms, settling time 85 ms, overshoot 4,2%, dan steady-state error 0,6%. Kestabilan motor dipengaruhi oleh beban mekanis, kebersihan sinyal encoder, dan kestabilan catu daya; penggunaan media cetak yang lebih tebal dapat meningkatkan arus hingga 1,12 A dan menyebabkan fluktuasi sekitar ±12 RPM. Kestabilan putaran motor juga berpengaruh langsung terhadap kualitas cetak karena fluktuasi kecepatan dapat menyebabkan horizontal banding, step feeding error, dan color misalignment. Batas toleransi fluktuasi kecepatan semakin kecil pada resolusi yang lebih tinggi, yaitu ±20 RPM pada 360 DPI, ±10 RPM pada 720 DPI, dan ±4 RPM pada 1440 DPI.

DAFTAR PUSTAKA

[1] R. D. G. Corporation, “Roland VersaEXPRESS RF-640 Service Manual,” 2015, *Roland DG Corporation*.

[2] N. Kn, R. R. Ismail, A. Sugiharto, and F. Nugroho, “Application of Tsukamoto Fuzzy Logic in Expert System Application for Diagnosing Web-Based Skin Diseases,” vol. 5, no. 2, pp. 277–281, 2025.

[3] R. D. G. Corporation, “Roland VersaEXPRESS RF-640 User’s Manual,” 2014, *Roland DG Corporation*.

[4] Pratama and Setiawan, “Analisis Sistem Kontrol Motor DC,” 2021.

[5] F. Suryatmo, *Teknik Motor Listrik dan Sistem Penggerak Industri*. Rineka Cipta, 2018.

[6] B. Santoso and S. Handoko, “Pengaruh variasi Pulse Width Modulation (PWM) terhadap kinerja motor servo pada mekanisme penggerak presisi,” *J. Otomasi dan Kendali Sist.*, vol. 5, no. 1, pp. 45–53, 2020.

[7] A. R. Pratama and I. Setiawan, “Analisis respon transien sistem kontrol kecepatan motor DC menggunakan kendali PID,” *J. Tek. Elektro dan Otomasi Ind.*, vol. 8, no. 2, pp. 112–119, 2021.

[8] B. D. Ushofa, L. Anifah, I. G. P. Asto B., and Endryansyah, “Sistem Kendali Kecepatan Putaran Motor DC pada Conveyor dengan Metode Kontrol PID,” *J. Tek. Elektro*, vol. 11, no. 2, pp. 332–342, 2022.

[9] M. A. Alotaibi, “PID Controller Design for Motor Speed Regulation with Linear and Non-Linear Load,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 4, pp. 225–229, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.06.037.

[10] B. C. Kuo, *Automatic Control Systems*, 9th ed. John Wiley & Sons, 2014.

[11] Fajar and P. W. Rusimamto, "Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan PID," *J. Tek. Elektro*, 2024.

[12] R. Fajar and P. W. Rusimamto, "Rancang Bangun Sistem Kendali Kecepatan Putaran Motor DC Menggunakan PID Controller," *J. Tek. ELEKTRO*, vol. 13, no. 2, pp. 135–143, 2024, doi: 10.26740/jte.v13n2.p135-143.

[13] S. Arikunto, *Prosedur Penelitian Suatu Pendekatan Praktik*. Jakarta: Rineka Cipta, 2024.

[14] Sugiyono, *Metode Penelitian Pendidikan (Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D)*. Bandung: Alfabeta, 2023.

[15] A. Hughes and B. Drury, *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*, 5th ed. Newnes, 2019.