METROTECH
Journal of Mechanical and Electrical Technology
Vol. 04 No. 02, Mei 2025, E-ISSN 2809-9605 | P-ISSN 2827-8097

Implementasi Operasi *Linear Regression* Dalam Peningkatan Respon Proporsional Motor Penggerak Robot Beroda Holonomik

Gillang Al Azhar[1*], Fitri[2], Wahyu Aulia Nurwicaksana[3], Rizky Pradana[4]
[1,2,3,4]Politeknik Negeri Malang, Kota Malang
[*]Penulis Korespondensi, email: gillang_al_azhar@polinema.ac.id

Received:01/06/2025 *Revised:11/06/2025* *Accepted:12/06/2025*

Abstract. *This study aims to improve the motor response speed and stability in holonomic-wheeled robots by applying multivariate linear regression to predict initial PWM signals. The main issue with conventional proportional control is the slow and oscillatory motor response due to rapid and dynamic RPM setpoint changes. To overcome this, regression models were developed to estimate initial PWM values based on the RPM setpoints, which were later refined by a proportional controller. Data was collected in open-loop conditions for three motors, each modeled with polynomial regression optimized using R^2 evaluation. Experimental results show that the combined regression and proportional control system produces more stable motor responses and significantly improves robot movement efficiency. In trajectory tests, the robot reached two target points in 9.38 seconds and 8.47 seconds, compared to 19.07 and 27.14 seconds using proportional control alone. These results confirm that predictive motor control significantly enhances robot performance, especially in applications requiring fast and accurate movement.*

Keywords: *Linear regression, Proportional control, DC motor, Holonomic robot, Speed control*

Abstrak. Penelitian ini bertujuan meningkatkan stabilitas dan kecepatan respon motor pada robot beroda holonomik melalui penerapan regresi linier multivariat untuk prediksi awal sinyal PWM. Permasalahan utama pada sistem kontrol proporsional konvensional adalah respon motor yang lambat dan osilatif akibat perubahan setpoint RPM yang cepat dan dinamis. Untuk mengatasinya, dibangun model regresi antara RPM dan PWM sebagai nilai awal sebelum dikoreksi oleh kontroler proporsional. Data dikumpulkan secara openloop dari tiga motor, masing-masing diberi model regresi polynomial dengan orde optimal berdasarkan nilai R^2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi regresi linier dan kontrol proporsional menghasilkan respon motor yang lebih stabil serta meningkatkan efisiensi gerak robot secara signifikan. Dalam pengujian pergerakan menuju dua titik tujuan, sistem gabungan mencatat waktu tempuh 9,38 detik dan 8,47 detik, jauh lebih cepat dibanding kontrol proporsional murni yang mencatat 19,07 detik dan 27,14 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan prediktif pada kontrol motor mampu meningkatkan performa robotik dalam skenario pergerakan cepat dan presisi tinggi.

Kata Kunci: Regresi linier, Kontrol proporsional, Motor DC, Robot holonomik, Kontrol kecepatan

I. PENDAHULUAN

Robot beroda dengan sistem penggerak holonomik kini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi yang menuntut mobilitas tinggi [1], seperti robot layanan, sistem transportasi dalam ruang terbatas [2] [3], dan robot kompetisi [4]. Sistem ini memungkinkan robot bergerak ke segala arah secara langsung tanpa rotasi, berkat konfigurasi roda khusus seperti *omniwheel* atau *mecanum-wheel*. Setiap roda dapat dikendalikan secara independen, sehingga kecepatan dan arah gerak robot dihasilkan dari kombinasi kecepatan masing-masing roda berdasarkan hasil perhitungan kinematika gerak [5].

Namun, karakteristik utama dari sistem holonomik adalah kecepatan tiap roda bersifat berbeda-beda dan berubah secara cepat, tergantung arah dan target gerak robot. Kondisi ini menimbulkan tantangan dalam sistem pengendalian motor, terutama saat hanya menggunakan kontroler proporsional (P), karena sinyal PWM awal sering kali tidak cukup mendekati nilai ideal, menyebabkan osilasi dan respon lambat [6].

Pendekatan ini diterapkan pada robot beroda holonomik dan dapat digunakan pula pada sistem seperti robot sepak bola beroda, di mana kecepatan motor sering berubah secara dinamis [7] [8].

Kontribusi utama dari penelitian ini terletak pada penggunaan model regresi polinomial dengan orde yang disesuaikan untuk tiap motor berdasarkan data eksperimen tanpa beban, sehingga estimasi nilai PWM awal menjadi lebih akurat dan respons sistem lebih cepat. Dengan menggabungkan regresi sebagai estimasi awal dan kontrol proporsional sebagai korektor, pendekatan ini mampu mengurangi osilasi serta menyederhanakan proses kendali tanpa memerlukan model dinamik motor yang kompleks.

II. METODOLOGI

A. Sistem gerak robot beroda holonomik

Robot beroda holonomik merupakan jenis robot dengan kemampuan bergerak ke segala arah di bidang dua dimensi tanpa perlu rotasi awal [9]. Karakteristik ini diperoleh dari penggunaan konfigurasi roda seperti omniwheel atau mecanum wheel yang memungkinkan pergerakan lateral [10].

1. Model kinematika robot

Model kinematika robot holonomik digunakan untuk mengubah keinginan gerak translasi dan rotasi dari frame global ke kecepatan tiap roda. Model ini dibagi menjadi dua: kinematika invers (untuk mengonversi kecepatan robot ke kecepatan roda) dan kinematika forward (untuk mengestimasi kecepatan robot dari kecepatan roda) [11]. Secara umum, model kinematika invers dapat dituliskan sebagai:

$$\dot{q}_i = f_i(v_x, v_y, \omega_z) \tag{1}$$

Dimana:

$\dot{q}_i$ = kecepatan roda ke-i.
v_x, v_y = kecepatan linear pada sumbu x dan y pada frame global.
ω_z = kecepatan rotasi terhadap sumbu Z (yaw).

Untuk robot dengan n roda dan konfigurasi simetris, fungsi f_i dapat diformulasikan sebagai sistem matriks, sehingga (1) dapat dijabarkan dan dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \frac{1}{r}\boldsymbol{J}^{\dagger}\,\dot{\boldsymbol{x}} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\\ \vdots\\ \dot{q}_n\end{bmatrix} = \frac{1}{r}\begin{bmatrix}\cos\alpha_1 & \sin\alpha_1 & l_1\\ \cos\alpha_2 & \sin\alpha_2 & l_2\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ \cos\alpha_n & \sin\alpha_n & l_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_x\\ v_y\\ \omega_z\end{bmatrix} \tag{3}$$

Dimana α_i merupakan sudut yang terbentuk antara arah putaran roda terhadap arah orientasi dari robot, r merupakan jari – jari roda, dan l adalah jarak antara titik tengah robot ke titik tengah dari roda robot ke-*i* [12].

2. Pemodelan gerakan

Sebaliknya, model kinematika forward digunakan untuk memperkirakan arah gerakan berdasarkan kecepatan roda saat robot bergerak [13], dan dapat dituliskan sebagai:

$$x = g_i(\dot{q}_i) \tag{4}$$

Sama seperti kinematika invers, persamaan kinematika forward pada (4) dapat dituliskan kedalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}\,\dot{\boldsymbol{q}} \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix}v_x\\ v_y\\ \omega_z\end{bmatrix} = \boldsymbol{J}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_1\\ \vdots\\ \dot{q}_n\end{bmatrix} \tag{6}$$

Dengan $\boldsymbol{J}$ merupakan matriks jacobian yang merepresentasikan spesifikasi mekanis robot kedalam persamaan matematis. Untuk kasus robot holonomik dengan bentuk simetris, jacobian pada (6) dapat dijabarkan menjadi:

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta & 0\\ \sin\theta & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\alpha_1 & \cos\alpha_2 & \dots & \cos\alpha_n\\ \sin\alpha_1 & \sin\alpha_2 & \dots & \sin\alpha_n\\ {}^{r}/_{l_1} & {}^{r}/_{l_2} & \dots & {}^{r}/_{l_n}\end{bmatrix} \tag{7}$$

Dengan θ merupakan arah orientasi dari robot terhadap titik acuan global.

3. Pengendalian kecepatan motor

Dalam implementasinya, pengendalian pergerakan robot dilakukan dengan cara mengubah nilai PWM untuk tiap motor penggeraknya sesuai dengan set point kecepatan roda. Namun, karena kecepatan setiap motor berubah secara dinamis

selama robot bergerak (terutama dalam skenario manuver kompleks atau koreksi posisi), terjadi fluktuasi setpoint RPM yang sangat cepat [14].

Jika hanya menggunakan kontroler proporsional (P), kondisi ini dapat memicu osilasi pada respon motor, karena output nilai PWM yang didapatkan dari output kontroler P tidak mampu memberikan kecepatan putaran pada motor sesuai dengan nilai RPM yang dibutuhkan [15], terlebih lagi ketika motor mendapatkan beban atau hambatan ketika berputar [16]. Hal ini telah dibuktikan melalui pengujian yang dibahas pada [17].

Oleh karena itu, dibutuhkan metode untuk mengestimasi nilai PWM yang mendekati kebutuhan motor, sehingga kontroler proporsional hanya bertugas melakukan penyesuaian kecil. Pendekatan tersebut dijelaskan pada subbab berikutnya melalui metode regresi linier multivariat. Sehingga nilai PWM yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor dapat dituliskan sebagai berikut:

$$PWM_{out} = PWM_{reg} + PWM_{PV} \qquad (8)$$

Nilai PWM_{reg} akan didapatkan melalui persamaan regresi linier, dimana nilai regresi untuk masing – masing motor penggerak akan berbeda – beda bergantung pada nilai koefisien yang didapatkan.

B. Model regresi linier multivariat

Untuk mengatasi permasalahan respon osilasi dalam pengendalian kecepatan motor akibat perubahan setpoint RPM yang cepat dan bersifat dinamis, digunakan pendekatan regresi linier multivariat. Pendekatan ini bertujuan untuk memperkirakan nilai awal PWM yang dibutuhkan motor agar dapat berputar sesuai dengan setpoint RPM yang dibutuhkan, sebelum disempurnakan oleh kontroler proporsional.

Pengambilan sampling data set RPM dan PWM dari motor bisa dilakukan dengan cara mengukur nilai RPM aktual motor berdasarkan sinyal PWM yang diberikan untuk menggerakkan motor dengan variasi kenaikan nilai secara bertahap, dimana putaran motor yang diukur adalah putaran motor tanpa beban. Berdasarkan metode pengambilan sampling data tersebut, itulah mengapa dibutuhkan kontroler proporsional untuk membantu menaikkan atau menurunkan nilai PWM sesuai dengan kebutuhan agar putaran motor dapat sesuai dengan setpoint RPM yang dibutuhkan, dimana nilai hambatan atau beban yang didapatkan motor tidak dapat diprediksi dikarenakan hal tersebut memiliki berbagai macam faktor yang dapat mempengaruhi tingkat hambatan pada motor.

1. Konsep regresi linier multivariat

Regresi linier multivariat adalah metode statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara satu variabel dependen (y) dan dua atau lebih variabel independen ($x_1, x_2, \dots, x_n$). Dalam konteks ini, y adalah nilai PWM Motor dan x adalah nilai setpoint RPM yang didapatkan dari perhitungan kinematik invers pergerakan robot. Model regresi ini memiliki tingkatan orde yang dapat ditentukan dan disesuaikan agar nilai yang dihasilkan dari perhitungan regresi dapat sesuai dengan kebutuhan. Umumnya model regresi dapat dituliskan kedalam:

$$y = k_0 + k_1 x + k_2 x^2 + \cdots + k_n x^n \qquad (9)$$

Dimana $(k_0, k_1, \dots, k_n)$ merupakan nilai koefisiensi regresi yang didapatkan berdasarkan dataset yang digunakan.

2. Pengambilan data kalibrasi

Data untuk mendapatkan pemodelan regresi dikumpulkan melalui pengujian nilai RPM motor secara *openloop* dengan ketentuan sebagai berikut:

a. Motor diberikan nilai PWM dengan peningkatan nilai secara bertahap
b. RPM aktual diukur menggunakan sensor kecepatan (dapat menggunakan tachometer atau rotary encoder yang telah terkalibrasi)
c. Hasil direkam sebagai pasangan data (x, y)

Berdasarkan pasangan data yang telah diambil, dapat dihitung nilai koefisien regresi $(k_0, k_1, \dots, k_n)$ dengan menggunakan pendekatan metode *least squares*.

3. Perhitungan koefisiensi regresi

Berdasarkan sampling dataset yang telah diambil, menghitung nilai koefisiensi regresi dapat dilakukan dengan menggunakan:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

Berdasarkan (10), nilai koefisien regresi dapat dihitung menggunakan:

$$\boldsymbol{k} = (\boldsymbol{X}^T \boldsymbol{X})^{-1} \boldsymbol{X}^T \boldsymbol{y} \quad (11)$$

Dimana:

- $\boldsymbol{X}$ adalah matriks dari dataset RPM
- $\boldsymbol{y}$ adalah vektor target PWM
- $\boldsymbol{k}$ adalah vektor koefisien regresi

Setelah koefisien diperoleh, model dapat digunakan untuk memprediksi nilai PWM awal berdasarkan RPM yang ditentukan dari hasil perhitungan kinematika.

4. Integrasi dengan kontrol proporsional

Nilai PWM hasil regresi digunakan sebagai nilai awal. Bila RPM aktual dari motor masih berbeda dengan target, maka selisih akan dikoreksi dengan kontroler proporsional (P) untuk mengurangi error sesuai dengan (8), jika dijabarkan akan menjadi:

$$PWM_{out} = PWM_{reg} + Kp \,.\, e \quad (12)$$

Dengan,

$$e = RPM_{sp} - RPM_{PV} \quad (13)$$

Dimana:

a. RPM_{SP} merupakan nilai setpoin RPM berdasarkan output kinematik invers
b. RPM_{PV} merupakan nilai RPM aktual yang terukur melalui sensor kecepatan
c. Kp adalah konstanta proporsional kontroler P

Dengan cara ini, respons motor menjadi lebih cepat dan stabil, serta menghindari osilasi akibat setpoint yang berubah secara dinamis.

C. Implementasi dan pengujian sistem

Setelah model regresi diperoleh, tahap selanjutnya adalah implementasi sistem kendali motor secara menyeluruh pada robot beroda holonomik dan melakukan pengujian performa.

1. Arsitektur kontroler

Sistem kendali kecepatan motor disusun dalam beberapa tahap sebagai berikut:

a. Input RPM target

RPM target untuk masing-masing motor ditentukan dari hasil perhitungan *inverse kinematics* berdasarkan arah dan kecepatan gerak robot.

b. Prediksi PWM awal

Menggunakan persamaan regresi dengan pemilihan orde sesuai kebutuhan, proses ini dilakukan dengan cara membandingkan hasil data dari penggunaan orde 2 hingga orde 5, RPM target dikonversikan menjadi nilai PWM awal untuk masing-masing motor.

c. Pengukuran RPM aktual

Sensor kecepatan berupa *rotary encoder* digunakan untuk mengukur RPM aktual dari motor secara *real-time*.

d. Koreksi dengan kontrol proporsional

Selisih antara RPM target dan aktual dihitung dan digunakan untuk menambah atau mengurangi PWM:

$$\Delta PWM = Kp \,.\, e \quad (14)$$

Selanjutnya substitusikan (13) pada (14):

$$\Delta PWM = Kp \,.\, (RPM_{sp} - RPM_{PV}) \quad (15)$$

Setelah itu substitusikan (15) pada (12), didapatkan:

$$\mathrm{PWM}_{\mathrm{out}} = PWM_{reg} + \Delta PWM \quad (16)$$

Berdasarkan Nilai PWM yang didapatkan melalui (16), osilasi pada putaran motor akan dapat diminimalisir.

e. Pengendalian motor

PWM final berdasarkan (16) dikirimkan ke driver motor untuk mengendalikan kecepatan dari motor penggerak robot. Meski begitu dengan mempertimbangkan *range* sinyal kontrol yang lebih lebar dan disesuaikan dengan kebutuhan frekuensi PWM yang dibutuhkan motor, maka berikut ketentuan sinyal PWM yang digunakan untuk mengendalikan motor:

- *Range* PWM yang digunakan adalah resolusi 10 bit (0 - 1023)
- Dengan mempertimbangkan arah putaran motor didapatkan:

$$-1023 \leq PWM_{out} \leq 1023 \qquad (17)$$

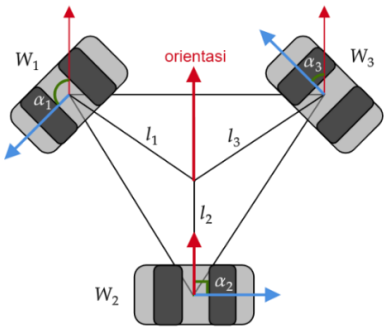
f. *Logging* data respon motor dan pergerakan robot

Untuk dapat mengetahui perubahan respon dari motor, maka respon data akan disimpan dengan interval waktu setiap 0.1 detik, untuk masing – masing motornya, serta data lain yang disimpan adalah posisi robot secara aktual. Sehingga dapat diketahui hubungan antara kestabilan pergerakan robot berdasarkan respon masing – masing motor penggeraknya.

2. Skema implementasi dan pengujian

Dalam implementasi dan pengujian sistem robot, berikut merupakan beberapa konfigurasi serta kondisi yang digunakan dalam pengambilan data yang diuji cobakan:

a. Robot holonomik yang digunakan adalah robot yang menggunakan *omniwheel*



Gambar 1. Konfigurasi mekanis robot beroda yang digunakan

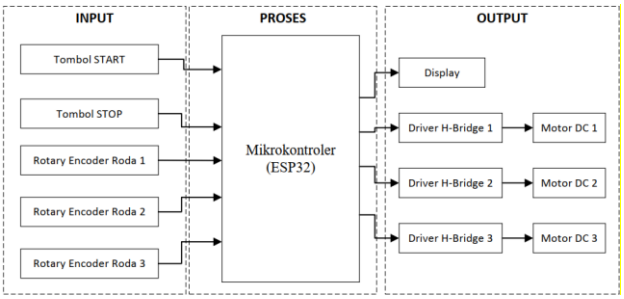
b. Jumlah aktuator penggerak robot berjumlah 3 buah dengan konfigurasi susunan roda berbentuk simetris dengan nilai sudut $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ $(135^o, -90^o, 45^o)$, serta nilai l sebesar 17 cm yang ditunjukkan Gambar 1.

c. Spesifikasi motor yang digunakan memiliki kecepatan maksimal sebesar 300 RPM

d. Arena pengujian gerak robot bersifat statis dan tanpa ada *obstacle*.

e. Pengujian gerak robot dilakukan berdasarkan pergerakan pada sumbu x dan sumbu y

f. Konfigurasi Rangkaian Elektronik Robot ditunjukkan oleh blok diagram sistem pada Gambar 2.



Gambar 2. Blok diagram sistem elektronik yang digunakan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dan eksperimen dilakukan dengan skema yang telah direncanakan pada bab sebelumnya, berikut merupakan hasil pengambilan data baik dari dataset, perhitungan pemodelan linier regresi, pengujian respon motor tanpa dan dengan bantuan linier regresi, serta akurasi dari pergerakan robot dengan dan tanpa bantuan linier regresi pada pengendalian motor.

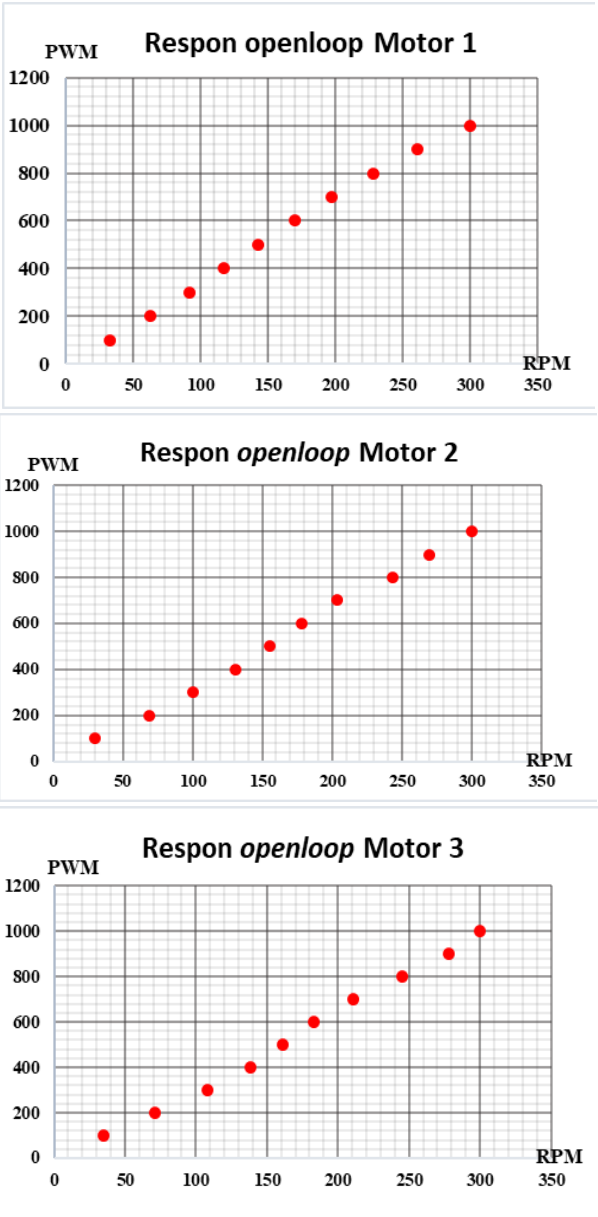
A. Pengujian openloop PWM setiap motor

Pengambilan nilai RPM dari 3 buah motor yang memiliki spesifikasi sama dilakukan secara *openloop* untuk masing – masing motor, dan didapatkan nilai seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian respon *openloop* masing – masing motor penggerak

PWM	**RPM**		
	Motor 1	***Motor 2***	***Motor 3***
100	33	30	35
200	63	69	71
300	92	100	108
400	117	131	138
500	143	155	161
600	170	178	183
700	197	204	211
800	228	243	245
900	261	270	278
1000	300	300	300

Berdasarkan pengambilan dataset yang ditunjukkan pada Tabel.1, terlihat bahwa dari pengujian *openloop* untuk masing – masing motor memiliki respon yang berbeda – beda. Hal ini dipengaruhi berbagai macam faktor internal dan eksternal. Mengacu pada data tersebut, dapat dilihat meski dengan pemberian nilai pwm yang sama, namun nilai rpm yang dihasilkan oleh setiap motor tidak sama, hal ini membuktikan bahwa diperlukan pemodelan regresi linier untuk masing – masing motor.



Bagan 1. Grafik respon pengujian *openloop* masing – masing motor penggerak robot

Untuk mempermudah membandingkan respon motor dapat dilihat respon motor dalam bentuk grafik pada Bagan 1.

B. Perhitungan Koefisien Regresi Setiap Motor

Berdasarkan respon masing – masing motor yang ditunjukkan pada Bagan. 1, selanjutnya adalah menentukan derajat regresi linier yang digunakan untuk membantu respon proporsional dari motor ketika robot bergerak. Pemilihan derajat polinomial dilakukan dengan membandingkan performa model pada berbagai derajat, menggunakan metrik evaluasi koefisien determinasi (R^2), hingga diperoleh derajat yang memberikan keseimbangan terbaik antara akurasi dan kompleksitas model. Untuk proses evaluasi R^2 digunakan:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \tag{18}$$

Dengan SS_{res} adalah jumlah kuadrat galat (residual), SS_{tot} adalah jumlah kuadrat total data. Dimana:

$$SS_{res} = \sum(y_i - \bar{y})^2 \tag{19}$$

$$SS_{tot} = \sum(y_i - \hat{y})^2 \tag{20}$$

$\bar{y}$ adalah rata – rata nilai aktual, dan $\hat{y}$ adalah nilai hasil prediksi linier regresi. Berdasarkan masing – masing data respon motor yang diolah dengan menggunakan (10) dan (11) dengan variasi derajat regresi 2 hingga 5, kemudian dibandingkan hasil koefisien determinasinya dengan (18). Berdasarkan pendekatan tersebut, didapatkan bahwa terdapat perbedaan orde regresi linier yang memberikan hasil terbaik untuk masing – masing motor yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai koefisien regresi berdasarkan orde regresinya untuk masing – masing motor

k_n	Motor		
	M1	M2	M3
k_0	1.744×10^{1}	-1.279×10^{1}	-1.454×10^{2}
k_1	2.033×10^{0}	5.044×10^{0}	1.130×10^{1}
k_2	1.662×10^{-2}	-5.882×10^{-2}	-1.633×10^{-1}
k_3	-5.938×10^{-5}	5.750×10^{-4}	1.322×10^{-3}
k_4	5.928×10^{-8}	-2.190×10^{-6}	-4.567×10^{-6}

k_5	0	2.864×10^{-8}	5.659×10^{-9}

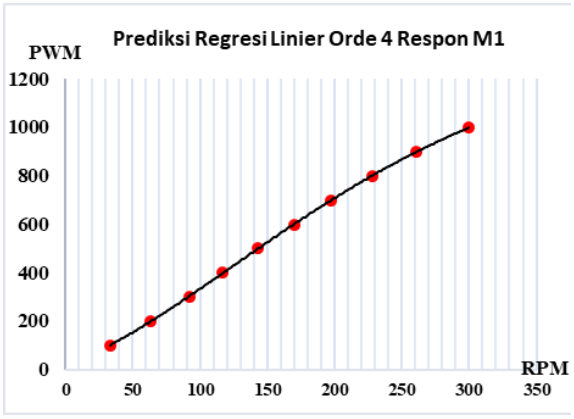
Berdasarkan data pada Tabel 2, nilai-nilai koefisien tersebut dapat disubstitusikan ke (9), didapatkan:

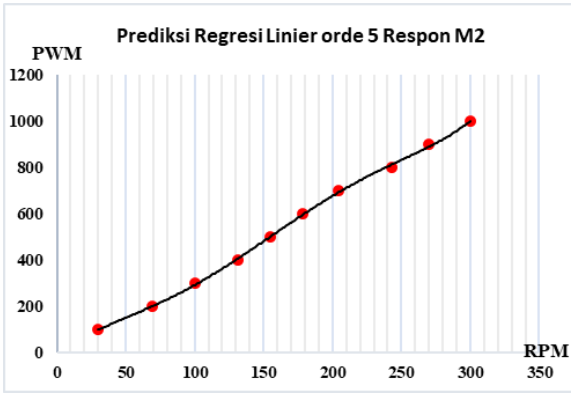
$$y_{m1} = 17.44 + 2.033x + 0.016x^2 - 0.059 \times 10^{-3}x^3 + 0.059 \times 10^{-6}x^4 \quad (21)$$

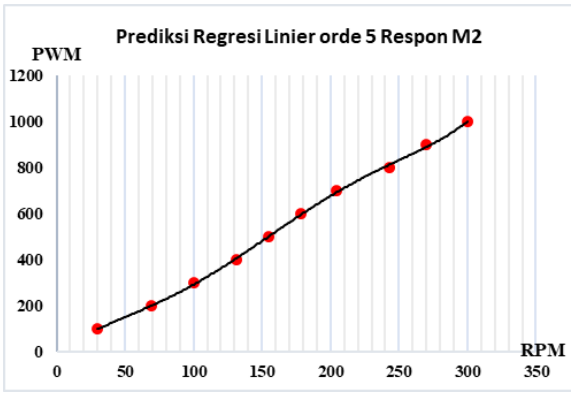
$$y_{m2} = -12.79 + 5.044\,x - 0.058\,x^2 + 0.057 \times 10^{-2}x^3 - 0.021 \times 10^{-4}x^4 + 0.028 \times 10^{-6}x^5 \quad (22)$$

$$y_{m3} = -145.4 + 11.3x - 0.163x^2 + 0.001x^3 - 0.045 \times 10^{-4}x^4 + 0.056 \times 10^{-7}x^5 \quad (23)$$

Persamaan (21) adalah model regresi linier untuk motor 1, (22) model regresi linier untuk motor 2, dan (23) model regresi linier untuk motor 3. Selanjutnya untuk mengetahui bentuk prediksi PWM dari pemodelan regresi linier tersebut, diinputkan nilai RPM masing – masing motor kedalam (21), (22), dan (23) dan didapatkan hasil prediksi PWM yang ada pada Bagan 2.

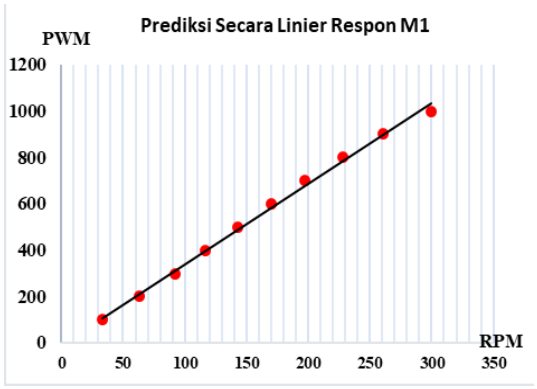


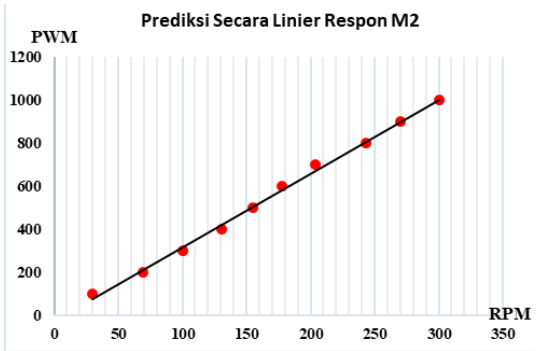


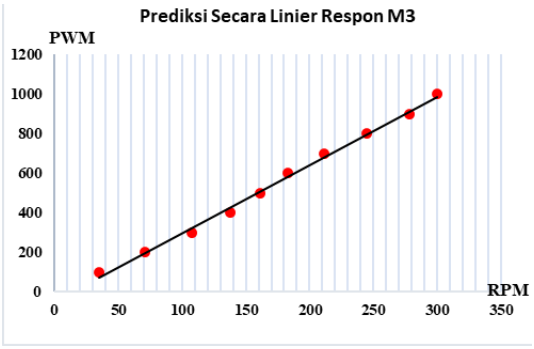


Bagan 2. Hasil prediksi nilai PWM berdasarkan RPM dengan pemodelan linier regresi

Bila dilihat pada Bagan 2 untuk nilai output PWM yang dibutuhkan, dapat disimpulkan bahwa nilai prediksi PWM dari pemodelan regresi linier masing – masing motor mampu memberikan nilai yang mendekati respon natural dari motor tersebut. Hal ini ditunjukkan dengan garis bewarna hitam yang mampu mengikuti kontur dari titik berwarna merah yang merepresentasikan titik sampling data yang digunakan. Sebagai pembanding berikut merupakan hasil dari prediksi PWM jika memaksakan menggunakan persamaan garis lurus pada respon motor yang ditunjukkan dengan Bagan 3.





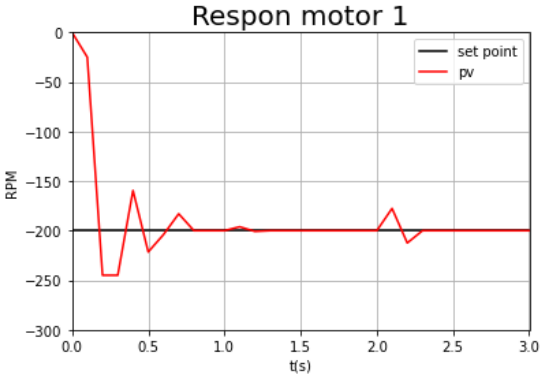


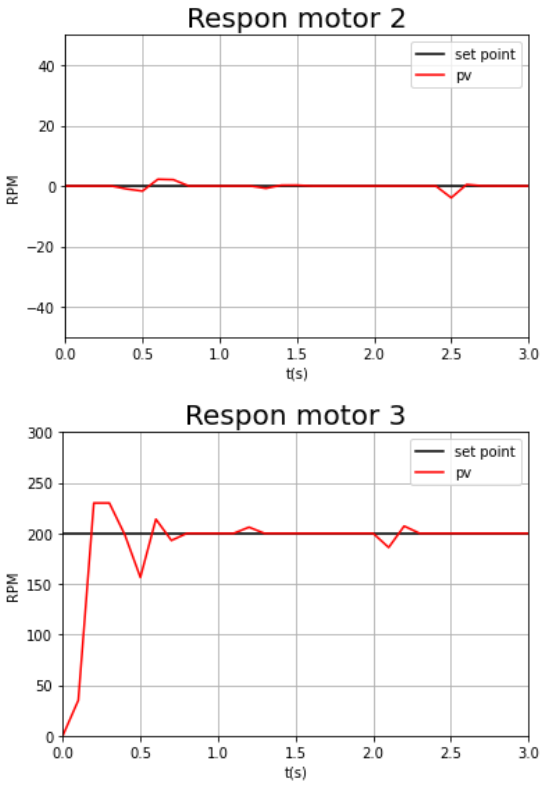
Bagan 3. Hasil prediksi nilai PWM berdasarkan RPM dengan pemodelan garis lurus

Jika dibandingkan hasil dari pemodelan regresi linier polynomial pada Bagan 2 dengan hasil pemodelan garis lurus pada Bagan 3, terlihat sekali perbedaan keakuratan hasil prediksi nilai PWM berdasarkan input RPM motor. Dimana hampir seluruh prediksi nilai PWM dari Bagan 3 tidak akurat dan memiliki nilai error yang cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan hasil dari Bagan 2. Berdasarkan hasil perbandingan ini dapat terlihat bahwa hasil prediksi nilai PWM dengan regresi linier polynomial mampu memberikan hasil yang lebih akurat.

C. Respon RPM Aktual Motor

Dalam pengujian ini, dibandingkan implementasi dari (16) dengan hasil respon murni kontrol proporsional pada motor. Untuk mendapatkan data yang lebih valid pada pengujian ini nilai setpoint dari masing – masing motor dibuat konsisten. Nilai setpoint ditentukan dengan mempertimbangkan arah gerak robot, dimana terdapat 2 pergerakan yang diujicobakan, yaitu bergerak lurus searah dengan orientasi robot dan Bergerak berputar ditempat.





Bagan 4. Respon motor dengan kendali proporsional dan regresi linier

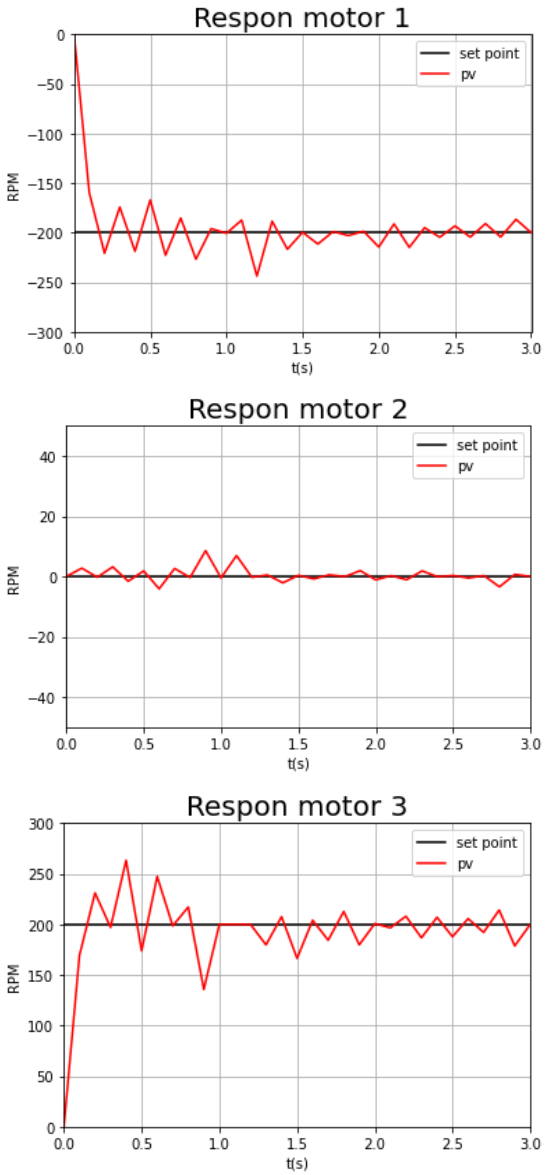
Nilai konstanta proporsional Kp dibuat konstan yaitu 5, nilai ini ditentukan berdasarkan uji coba agar nilai output dari kontroler proporsional mampu mencapai nilai setpoint yang dibutuhkan.

1. Respon motor saat robot bergerak maju

Untuk pengujian ini, setpoint untuk masing – masing motor adalah:

a. Motor 1 = -200, roda robot bergerak kearah CCW
b. Motor 2 = 0, roda robot tidak bergerak
c. Motor 3 = 200, roda robot bergerak searah CW

Berdasarkan setpoint yang telah ditentukan agar robot bergerak maju sesuai dengan arah orientasinya didapatkan hasil yang ditunjukkan pada Bagan 4. Sebagai pembanding, berikut respon yang didapatkan tanpa menggunakan regresi linier:



Bagan 5. Respon motor dengan kendali proporsional tanpa regresi linier

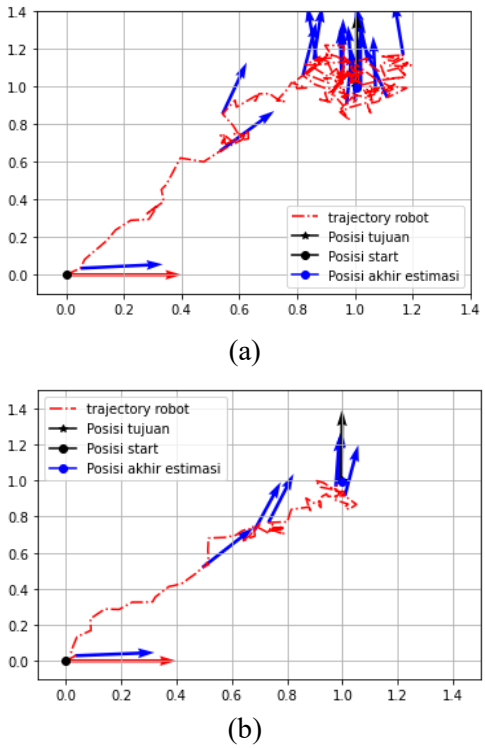
Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Bagan 5, terlihat bahwa ketiga motor dengan mendapatkan nilai setpoint yang sama serta dengan nilai Kp yang sama menghasilkan respon osilasi. Dari perbandingan tersebut, terlihat bahwa

D. Uji coba pergerakan robot

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui dampak kestabilan respon motor terhadap akurasi pergerakan dari robot. Dalam pengujian ini, robot diperintahkan untuk bergerak dari titik awal menuju titik tujuan yang telah ditentukan yaitu :

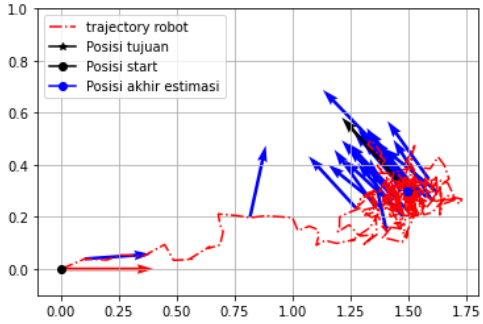
1. Tujuan 1: Koordinat target tujuan robot adalah 1m ke sumbu x dan 1m ke sumbu y dengan arah hadap sebesar 90^o.
2. Tujuan 2: Koordinat target tujuan adalah 1.5m ke sumbu x dan 0.4m ke sumbu y dengan arah hadap sebesar 135^o

Hasil pengujian membandingkan pergerakan robot dengan kendali motor proporsional yang dibantu regresi linier serta kendali motor dengan proporsional saja. Hasil yang didapat ditunjukkan pada Bagan 6 dan Bagan 7.

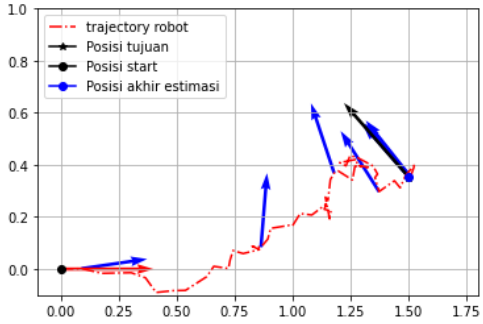


Bagan 6. Perbandingan pergerakan robot menuju titik tujuan 1 dengan dan tanpa linier regresi

Pada Bagan 6, dapat terlihat pengaruh dari respon motor yang stabil memberikan pergerakan robot yang lebih efisien, dimana robot mampu bergerak menuju ke target lebih cepat dibandingkan dengan pengujian tanpa bantuan pemodelan regresi linier, dari percobaan tersebut tercatat bahwa robot yang menggunakan kontrol proporsional yang dibantu dengan pemodelan regresi linier (b) mampu mencapai tujuan dalam waktu yang lebih singkat yaitu 9.38 detik dibandingkan dengan penggunaan kontrol proporsional saja (a) yang memakan waktu 19.07 detik.



(a)



(b)

Bagan 7. Perbandingan pergerakan robot menuju titik tujuan 2 dengan dan tanpa linier regresi

Berdasarkan Bagan 7, hasil yang didapatkan tidak berbeda dengan pengujian pada Bagan 6, dimana penggunaan kontrol proporsional yang dibantu dengan pemodelan regresi linier (b) memberikan hasil yang lebih efisien, yaitu robot mampu mencapai target dalam waktu 8.47 detik dan berbanding terbalik dengan penggunaan kontrol proporsional saja (a) yang membutuhkan waktu 27.14 detik. Berdasarkan hasil pengujian yang didapat, terbukti bahwa pengendalian motor yang menggunakan kontrol proporsional dan pemodelan regresi linier mampu memberikan respon yang lebih stabil dan berpengaruh terhadap pergerakan robot yang lebih efisien.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pengendalian motor dengan kontrol proporsional menjadi lebih optimal saat dikombinasikan dengan pemodelan regresi linier multivariat. Meskipun menggunakan motor dengan spesifikasi identik, terdapat variasi respon alami antar motor yang berhasil diminimalkan melalui pemodelan berbasis data openloop. Hasil pengujian pada kontrol motor memperlihatkan bahwa respon RPM aktual dengan bantuan regresi linier lebih cepat mencapai setpoint dan menghasilkan kurva yang lebih stabil, dibandingkan kontrol proporsional murni yang menunjukkan osilasi dan deviasi lebih besar.

Selain itu, uji pergerakan robot menuju titik tujuan juga menunjukkan peningkatan efisiensi signifikan, dengan waktu tempuh 9,38 detik dan 8,47 detik, jauh lebih cepat dibandingkan kontrol proporsional saja yang membutuhkan 19,07 detik dan 27,14 detik. Dengan demikian, pendekatan ini efektif meningkatkan stabilitas kontrol motor dan akurasi gerak robot holonomik

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih ditujukan pada Politeknik Negeri Malang yang telah membantu dalam bentuk sarana dan prasarana dalam pelaksanaan penelitian sehingga dapat terlaksana dengan baik. Ucapan terima kasih juga ditujukan pada pihak – pihak yang telah membantu dan terlibat dalam pelaksanaan penelitian sehingga penelitian dapat selesai dengan tepat waktu.

REFERENSI

[1] M. Alireza, D. Vincent and W. Tony, "Experimental study of path planning problem using EMCOA for a holonomic mobile robot," *Journal of Systems Engineering and Electronics,* vol. 32, pp. 1450-1462, 2021.

[2] S. Sungkono, G. A. Azhar, A. C. Kusuma and S. Izza, "Differential Drive Mobile Robot Motion Accuracy Improvement with Odometry-Compass Sensor Fusion Implementation," *ELKHA: Jurnal Teknik Elektro,* vol. 15, p. 24–31, 2022.

[3] G. A. Azhar, T. Winarno and S. Izza, "Implementasi g-h Filter Pada Sensor Kompas Sebagai Peningkatan Akurasi Trajectory Tracking Robot Differential Drive," *Journal of Mechanical and Electrical Technology,* vol. 1, 2022.

[4] R. M. Mayoral, A. Helmi, S. W. Logan and N. T. Fitter, "GoBot Go! Using a Custom Assistive Robot to Promote Physical Activity in Children," *IEEE Journal of Translational*

Engineering in Health and Medicine, vol. 12, pp. 613-621, 2024.

[5] G. A. Azhar, S. Sungkono, M. N. Achmadiyah and S. Izza, "Peningkatan Kestabilan Sistem Kontrol UGV melalui Optimalisasi Manajemen Core dan Free-RTOS pada ESP32," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri,* vol. 10, p. 253–263, 2023.

[6] S. Hajari and O. Ray, "A Dynamic Voltage-Based Current Estimation Technique for DC Motor Speed Control Applications," *IEEE Sensors Letters,* vol. 8, pp. 1-4, 2024.

[7] V. Araújo, E. Silva, J. G. Monteiro, R. Sousa, C. Silva, P. H. Santana and E. Barros, "Mechanical and Dynamic Analysis for Design and Development of a RoboCup SSL Dribbling Mechanism," in *2021 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2021 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2021 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, 2021.

[8] G. Passault, C. Gaspard and O. Ly, "Robot Soccer Kit: Omniwheel Tracked Soccer Robots for Education," in *2022 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, 2022.

[9] B. M. Dyer, T. R. Smith, S. A. Gadsden and M. Biglarbegian, "Filtering Strategies for State Estimation of Omniwheel Robots," in *2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2020.

[10] M. I. Amrullah, T. Winarno and G. A. Azhar, "Sistem Kontrol Mobile Robot Enam Roda Omni Wheels dengan Metode Position-Based Proportional," *Jurnal Elektronika Otomasi Industri,* vol. 11, pp. 640-650, 2024.

[11] I. Siradjuddin, L. Kamajaya, S. Wibowo, A. A. Rofiq, G. A. Azhar and M. Khairuddin, "Near Real Time Simulation of an Independent Steering Independent Driving Mobile Robot," in *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, 2021.

[12] I. Siradjuddin, G. Azhar, S. Wibowo, F. Ronilaya, C. Rahmad and R. O. H. A. D. I. Erfan, "A General Inverse Kinematic Formulation and Control Schemes for Omnidirectional Robots," *Engineering Letters,* vol. 29, 1 2022.

[13] C. Sandra, A. N. Amudhan, A. T. Mathew and A. P. Sudheer, "Trajectory Tracking of Omni Directional robot using Fuzzy Controller with Visual Feedback," in *2020 International Conference for Emerging Technology (INCET)*, 2020.

[14] I. Siradjuddin, T. Winarno, M. Khairuddin, M. N. Achmadiah, R. P. Wicaksono and G. Al Azhar, "An Exponential Decreased Kinematic and PID Low Level Control Schemes for an Omni-Wheeled Mobile Robot," in *2021 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT)*, 2021.

[15] M. Poyai, D. Maneetham and P. Sutyasadi, "LabVIEW Integrated with Python Machine Learning for DC Motor Drive," in *2024 4th International Conference of Science and Information Technology in Smart Administration (ICSINTESA)*, 2024.

[16] F. C. Perdana, N. Allu and H. E. Patoding, "Perancangan Dan Analisis Sistem Kendali Kecepatan Putar Motor DC Dengan Pengendali Proporsional," *Seminar SMIPT(Sinergitas Multidisiplin Ilmu Pengetahuan dan Teknologi),* vol. 7, 2024.

[17] M. Rojikin, A. Pracoyo and G. Al Azhar, "Kontrol Kecepatan Putar Motor DC Pada Proses Pengadukan Santan Dalam Pembuatan Virgin Coconut Oil," *Metrotech (Journal of Mechanical and Electrical Technology),* vol. 2, p. 120–125, 2023.