

Desain dan Implementasi Model Regresi Polinomial Kecepatan Motor DC Pada Mobile Robot

Arief Rahman Hidayat¹, Muhammad Imbarothur Mowaviq², Gillang Al Azhar³,
Dimas Rossiawan Hendra Putra⁴

e-mail: arhidayat@polinema.ac.id, muhammad.imbarothur@polinema.ac.id,
gillang_al_azhar@polinema.ac.id, dimas.rossi@polinema.ac.id

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jalan Soekarno Hatta No.9 Malang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 8 Mei 2025

Direvisi 27 Mei 2025

Diterbitkan 31 Mei 2025

Kata kunci:

Regresi Polinomial

Motor DC

Mobile Robot

ABSTRAK

Penelitian ini menjelaskan bagaimana model kecepatan Motor DC didapatkan dengan metode regresi polinomial. Metode ini dipilih sebagai alternatif dari pemodelan matematis yang bertumpu pada hukum-hukum fisika yang ada. Metode Regresi polinomial merupakan metode statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan nonlinier antara variabel masukan dan keluaran dengan menggunakan fungsi polinomial. Variabel masukan merupakan tegangan dengan menggunakan modulasi lebar pulsa. Sedangkan, variabel keluaran adalah kecepatan motor DC dengan menggunakan sensor rotary encoder. Model regresi polinomial yang dilakukan pada penelitian ini hingga orde-4. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa orde 4 memiliki korelasi mencapai 99% dengan standar estimasi kesalahan 11,47. Model ini berhasil menangkap karakteristik nonlinier motor DC yang disebabkan oleh pengaruh PWM dan variasi beban, yang tidak dapat dimodelkan dengan baik oleh regresi linier sederhana.

ABSTRACT

Keywords:

Polynomial Regression

DC Motor

Mobile Robot

This research explains how the speed model of a DC motor is obtained using the polynomial regression method. This method is chosen as an alternative to mathematical modeling based on existing physical laws. Polynomial regression is a statistical method used to model the nonlinear relationship between input and output variables using polynomial functions. The input variable is the voltage using pulse width modulation, while the output variable is the speed of the DC motor using a rotary encoder sensor. The polynomial regression model conducted in this study is up to the 4th order. The results obtained show that the 4th order has a correlation of 99% with a standard estimation error of 11.47. This model successfully captures the nonlinear characteristics of the DC motor caused by the effects of PWM and load variations, which cannot be modeled well by simple linear regression.

Penulis Korespondensi:

Arief Rahman Hidayat,

Jurusan Teknik Elektro,

Politeknik Negeri Malang,

Jl. Soekarno Hatta No. 9 Kota Malang, Jawa Timur, 65145

Email: arhidayat@polinema.ac.id

+62 821-4188-3792

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



9 772356 053009

1. PENDAHULUAN

Motor DC tetap menjadi komponen fundamental dalam otomasi industri dan robotika [1] karena kontrol kecepatannya yang mudah dan keandalannya yang tinggi. Kontrol kecepatan yang tepat sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja dan efisiensi dalam berbagai aplikasi. Terdapat beberapa metode dalam mengatur kecepatan motor DC seperti pengendalian flux, pengendalian resistansi armature, pengaturan tegangan armature dan penggunaan sinyal PWM. Metode pengendalian flux ini mengatur kecepatan dengan mengubah medan magnet (flux) melalui penambahan resistansi seri pada lilitan medan, sehingga mengurangi flux dan meningkatkan kecepatan motor. Metode ini efisien karena arus medan relatif kecil sehingga kerugian daya (I^2R) rendah. Metode selanjutnya yaitu metode resistansi armature, dimana pada metode ini pengaturan kecepatan dilakukan dengan menambah resistansi variabel pada rangkaian armatur. Penambahan resistansi ini menurunkan tegangan efektif pada armatur, sehingga menurunkan kecepatan motor. Metode ini mudah diimplementasikan namun mengurangi efisiensi karena kerugian daya meningkat. Selanjutnya metode pengendalian tegangan armatur dimana kecepatan dikendalikan dengan mengubah tegangan yang diberikan ke armatur menggunakan sumber DC yang dapat diatur tegangannya. Metode ini memberikan kontrol kecepatan yang halus dan efisien, khususnya untuk motor shunt DC. Metode lainnya yaitu dengan teknik modern seperti penggunaan PWM (Pulse Width Modulation) [2] dan kontrol berbasis logika fuzzy [3], sliding mode control [4], atau proporsional integral differensial (PID) [5] yang telah banyak dikembangkan untuk meningkatkan performa pengendalian kecepatan motor DC.

Dalam desain kendali Motor DC, diperlukan pemodelan dan identifikasi sistem agar mendapat desain kendali yang sesuai. Pemodelan motor menggambarkan kondisi motor DC dalam persamaan matematis. Pada umumnya, metode pemodelan motor DC menggunakan hukum-hukum fisika yang diturunkan menjadi persamaan diferensial tertentu. Metode yang juga dijelaskan pada [6], [7], [8] harus dilengkapi dengan data besaran induktansi, resistansi, momen inersia, koefisien gesek, dll. Sementara, seringkali data tersebut tidak tersedia dan mengharuskan untuk mendapatkan dengan beberapa eksperimen. Untuk mengatasi hal ini, terdapat metode pemodelan motor DC dengan memanfaatkan respon kecepatan motor dari tegangan yang berubah-ubah berdasarkan nilai PWM. Data respon sistem yang didapatkan kemudian dimodelkan secara numerik menggunakan metode tertentu, salah satunya adalah metode regresi polinomial.

Regresi polinomial merupakan metode statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan nonlinier antara variabel input dan output dengan menggunakan fungsi polinomial [9]. Dalam konteks pemodelan motor DC, regresi polinomial dapat menangkap karakteristik nonlinier antara tegangan input dan kecepatan motor yang tidak dapat dijelaskan dengan model linier sederhana. Beberapa keunggulan regresi polinomial yang pertama yaitu kemampuan menangkap hubungan nonlinier yang kompleks dengan derajat polinomial yang dapat disesuaikan. Keunggulan yang kedua yaitu implementasi yang relatif sederhana dan efisien, cocok untuk aplikasi real-time pada sistem kontrol motor. Keunggulan yang ketiga yaitu fleksibilitas dalam pemilihan orde polinomial yang memungkinkan trade-off antara akurasi model dan kompleksitas komputasi.

Pemodelan kecepatan motor DC menggunakan regresi polinomial telah terbukti efektif dalam beberapa penelitian. Model ini digunakan untuk memprediksi kecepatan motor berdasarkan variasi tegangan dan beban, dengan hasil yang menunjukkan peningkatan akurasi dibandingkan model linier tradisional. Misalnya, Hammoodi dkk. menggunakan model regresi untuk mendukung pengaturan PID dalam pengendalian kecepatan motor DC, menghasilkan respons yang lebih stabil dan cepat [10]. Selain itu, penelitian lain mengkombinasikan regresi polinomial dengan teknik sampling dan optimasi untuk tuning parameter kontrol PID, meningkatkan performa pengendalian.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang model regresi polinomial untuk memprediksi kecepatan motor DC secara akurat berdasarkan tegangan input dan kondisi beban. Data kecepatan motor dapat diperoleh dengan menggunakan sensor *rotary encoder* [11]. Dengan menganalisis data eksperimen dan menyesuaikan model polinomial dengan orde yang sesuai, penelitian ini berupaya memberikan model yang andal dan efisien untuk mendukung desain sistem kontrol yang lebih baik.



2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode pemodelan regresi polinomial untuk memprediksi kecepatan motor DC berdasarkan variabel input tegangan dan kondisi beban. Data yang digunakan merupakan hasil pengukuran kecepatan motor DC pada berbagai titik kerja dengan variasi tegangan input.

2.1 Pengumpulan data

Data kecepatan motor DC diukur menggunakan sistem pengaturan dengan memberikan sinyal PWM (Pulse Width Modulation) 8-bit dengan rentang 0-255. Setiap data terdiri dari nilai PWM dan kecepatan motor yang dihasilkan.

2.2 Model Regresi Linier

Regresi polynomial merupakan model regresi linier yang dibentuk dengan menjumlahkan pengaruh masing-masing variabel prediktor (x) yang dipangkatkan meningkat sampai orde ke- n . Regresi polynomial orde- n memiliki bentuk persamaan:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n + \varepsilon$$

Keterangan:

- y : variable respon atau hasil kalkulasi dari persamaan regresi polinomial
 a_0 : intersep
 $a_1, a_2, \dots, a_n$: koefisien-koefisien regresi polynomial
 x : variable predictor
 ε : variable error yang tidak dapat dijelaskan oleh model regresi

Bentuk matriks dan estimasi model regresi polynomial:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^0 & \sum_{i=1}^n x_i^1 & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\ \sum_{i=1}^n x_i^1 & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i x_i^0 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^1 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^m \end{bmatrix}$$

Keterangan:

- m : merupakan derajat polynomial
 n : merupakan jumlah data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data kecepatan motor dalam satuan rpm terhadap sinyal pwm yang dihasilkan dari mikrokontroler. Kemudian dilakukan analisis regresi polynomial dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh variabel-variabel bebas terhadap variabel terikat dan menguji koefisien-koefisien regresi tersebut. Pengaruh hasil kecocokan model terhadap data dapat diketahui dengan mengetahui hasil koefisien korelasi dan standar error estimasi

2.3 Analisis Regresi

Analisis regresi polinomial dilakukan untuk mengestimasi koefisien regresi. Model diuji dengan melihat nilai koefisien determinasi (r^2) dan koefisien korelasi (r) untuk menilai kecocokan model terhadap data. Model dengan nilai R^2 tertinggi dan residual error terkecil dipilih sebagai model terbaik.

2.3.1 Besaran Error



Besaran error ini dibutuhkan untuk mengetahui ukuran peningkatan atau pengurangan error regresi, dimana besaran error antara lain yaitu parameter besaran error S_t dan S_r . Parameter besaran error S_t merupakan jumlah total kuadrat pada area sekitar mean untuk variable dependen (y).

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

Parameter besaran error S_r merupakan jumlah kuadrat residual pada area sekitar garis

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 \dots - a_nx_i^n)^2$$

atau

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{model})^2$$

2.3.2 Standar Error Estimasi

Standar error estimasi digunakan untuk mengukur simpangan dari data aktual disekitar garis regresi. Jika garis regresi memberikan nilai standar error estimasi kecil, yang artinya garis regresi tersebut sangat mewakili data actual. Persamaan standar error estimasi :

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n - k}}$$

Dimana

$S_{y/x}$: merupakan standar error estimasi

k : merupakan jumlah variable bebas ditambah satu

n : merupakan jumlah data

2.3.3 Koefisien Determinasi

Koefisien determinasi atau disebut koefisien determinan (r^2) memberikan informasi kesesuaian data dengan model (akurasi terhadap model). Meskipun koefisien determinasi memberikan beberapa informasi yang berguna mengenai model regresi, dalam hal ini tidak hanya mengandalkan pengukuran tersebut dalam penilaian model statistik. Persamaan koefisien determinan:

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t}$$

2.3.4 Koefisien Korelasi

Koefisien korelasi (r) merupakan ukuran statistik kekuatan hubungan linear antara dua variabel. Nilainya dapat berkisar dari -1 hingga 1.

$$r = \sqrt{r^2} = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}}$$

2.3.5 Uji Global (Uji-F)

Uji global dapat mencari nilai F yang digunakan untuk menguji kesesuaian model fit (tepat atau tidak), sehingga nilai F disebut ukuran goodness of fit. Uji-F digunakan untuk menguji apakah variable bebas dalam model, mampu menjelaskan perubahan nilai variable terikat. Apabila nilai $F_{hitung} > F_{tabel}$ maka dapat disimpulkan bahwa model persamaan regresi yang terbentuk masuk kriteria yang cocok atau sesuai (fit)



$$F_{hitung} = \frac{\frac{r^2}{(k-1)}}{1 - \frac{r^2}{(n-k)}}$$

Dimana

F_{hitung} : parameter Uji-F untuk ukuran kesesuaian model

r^2 : koefisien determinasi

k : jumlah variable bebas ditambah satu

n : jumlah data

F_{tabel} diperoleh dari nilai $(k-1)$ sebagai numerator dan nilai $(n-k)$ sebagai denominator. Bentuk persamaan F_{tabel} :

$$F_{tabel} = F_{(k-1), (n-k)}$$

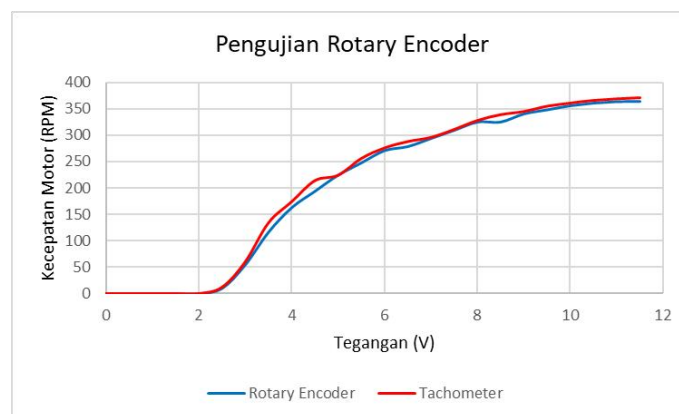
2.4 Validasi Model

Validasi model dilakukan dengan cara melakukan perbandingan antara data hasil pemodelan yang telah diperoleh dengan data aktual hasil pengujian motor DC.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Rotary Encoder

Pengujian rotary encoder dilakukan untuk memastikan bahwa alat dapat mengukur kecepatan dan posisi rotasi motor DC dengan akurat. Rotary encoder adalah komponen penting dalam sistem kontrol, karena menyediakan feedback yang diperlukan untuk pengendalian yang presisi. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kelinieran encoder dalam pembacaan putaran motor DC. Hasil perbandingan pembacaan kecepatan motor dengan rotary encoder dan alat ukur tachometer dapat dilihat seperti berikut:



Gambar 1. Pengujian Rotary Encoder

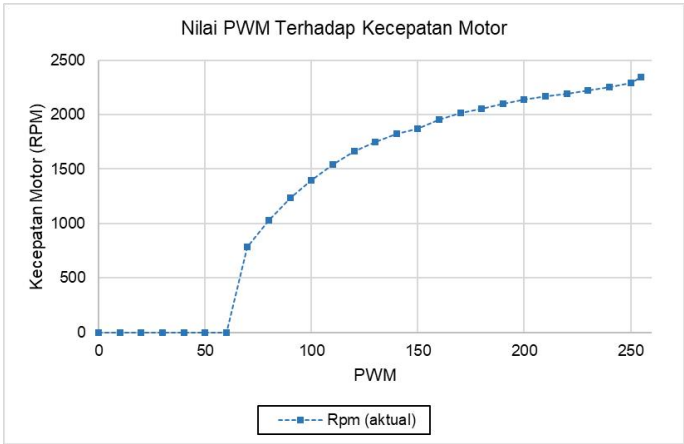
3.2 Pengujian Motor DC

Data pengujian motor merupakan data awal untuk dapat menentukan model regresi polinomial. Data pengujian ini berupa data kecepatan motor dalam satuan rpm yang dipengaruhi dari sinyal pwm. Sinyal pwm ini dihasilkan dari mikrokontroler berupa nilai konversi digital 8-bit dalam rentang antara 0-255.



Tabel 1. Data Pengujian Motor

No.	PWM 8-bit (0-255)	Kecepatan Motor (RPM)	No.	PWM 8-bit (0-255)	Kecepatan Motor (RPM)
1	0	0	15	140	1821
2	10	0	16	150	1871
3	20	0	17	160	1953
4	30	0	18	170	2015
5	40	0	19	180	2053
6	50	0	20	190	2103
7	60	0	21	200	2136
8	70	785	22	210	2171
9	80	1028	23	220	2193
10	90	1240	24	230	2221
11	100	1400	25	240	2253
12	110	1541	26	250	2290
13	120	1666	27	255	2345
14	130	1748			



Gambar 2. Pengujian Kecepatan Motor Terhadap Sinyal PWM

3.3 Analisis Regresi Polinomial

3.3.1 Model Polinomial Orde-1

Cara untuk memperoleh Model polynomial orde-1 dapat memasukkan data seperti dalam tabel berikut untuk memudahkan perhitungan matriks, dimana x adalah data kecepatan motor dan y adalah nilai PWM yang berasal dari hasil pengujian kecepatan motor.

Tabel 2: Pengolahan Data Hasil Uji Motor Untuk Mencari Model Orde-1

x	y	x^2	xy
0	0	0	0
0	10	0	0
0	20	0	0
0	30	0	0
0	40	0	0



0	50	0	0
0	60	0	0
785	70	6,16E+05	5,50E+04
1028	80	1,06E+06	8,22E+04
1240	90	1,54E+06	1,12E+05
.....			
2345	255	5,50E+06	5,98E+05
Σx:	Σy:	Σx^2:	Σxy:
36833	3505	7,15E+07	6,53E+06

Perhitungan mencari persamaan regresi polynomial orde-1

$$\begin{bmatrix} n & \Sigma x_i \\ \Sigma x_i & \Sigma x_i^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma y_i \\ \Sigma x_i y_i \end{bmatrix}$$

Nilai n merupakan jumlah data, diketahui $n = 27$ sehingga diperoleh:

$$\begin{bmatrix} 27 & 36833 \\ 36833 & 71541845 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3505 \\ 6532785 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 27 & 36833 \\ 36833 & 71541845 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 3505 \\ 6532785 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17,6223 \\ 0,0822 \end{bmatrix}$$

Sehingga diperoleh persamaan regresi polynomial model orde-1:

$$y_{model} = 17,6223 + 0,0822x$$

Selanjutnya menghitung parameter besaran error S_t dan S_r dengan cara mengolah data pengujian dan memperhitungan hasil dari model yang diperoleh.

Tabel 3. Pengolahan Data Uji dan Data Model Orde-1

x_i	y_i	y_{model}	e_i^2	$\bar{y}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$
0	0	17,62	310,55	129,81	-129,81	16851,89
0	10	17,62	58,10	129,81	-119,81	14355,59
0	20	17,62	5,65	129,81	-109,81	12059,29
0	30	17,62	153,21	129,81	-99,81	9963,00
0	40	17,62	500,76	129,81	-89,81	8066,70
0	50	17,62	1048,32	129,81	-79,81	6370,40
0	60	17,62	1795,87	129,81	-69,81	4874,11
785	70	82,15	147,61	129,81	-59,81	3577,81
1028	80	102,12	489,47	129,81	-49,81	2481,52
1240	90	119,55	873,22	129,81	-39,81	1585,22
.....						
2345	255	210,38	1990,83	129,81	125,19	15671,33
Σy_i:		Σe_i^2:		$\Sigma (y_i - \bar{y})^2$:		
3505		18493,46		162524,0741		

Menghitung besaran error S_t



$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 = 162524,0741$$

Menghitung besaran error S_r

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{model})^2 = 18493,46$$

Setelah diperoleh parameter besaran error, maka dapat menghitung standar error estimasi, koefisien determinasi dan koefisien korelasi. Hasil nilai standar error estimasi:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n-k}} = \sqrt{\frac{18493,46}{27-2}} = 27,19813231$$

Menghitung nilai koefisien determinasi:

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} = \frac{162524,0741 - 18493,46}{162524,0741} = 0,88621095$$

Menghitung nilai koefisien korelasi:

$$r = \sqrt{r^2} = \sqrt{0,88621095} = 0,941387779$$

Melakukan pengujian kesesuaian model dengan Uji-F

$$F_{hitung} = \frac{\frac{r^2}{(k-1)}}{1 - \frac{r^2}{(n-k)}} = \frac{\frac{0,88621095}{(2-1)}}{1 - \frac{0,88621095}{(27-1)}} = 0,917483405$$

$$F_{tabel} = \frac{(2-1)}{(27-2)} = \frac{1}{25} = 0,04$$

Hasil Uji-F diperoleh $F_{hitung} > F_{tabel}$ maka dapat disimpulkan model persamaan regresi yang terbentuk masuk kriteria yang cocok atau sesuai.

3.3.2 Model Polinomial Orde-2

Cara untuk memperoleh Model polynomial orde-2 dapat memasukkan data seperti dalam tabel berikut untuk memudahkan perhitungan matriks, dimana x adalah data kecepatan motor dan y adalah nilai PWM yang berasal dari hasil pengujian kecepatan motor.

Tabel 4: Pengolahan Data Hasil Uji Motor Untuk Mencari Model Orde-2

x	y	x^2	x^3	x^4	xy	x^2y
0	0	0	0	0	0	0
0	10	0	0	0	0	0
0	20	0	0	0	0	0
0	30	0	0	0	0	0
0	40	0	0	0	0	0
0	50	0	0	0	0	0
0	60	0	0	0	0	0
785	70	6,16E+05	4,84E+08	3,79E+11	5,50E+04	4,31E+07
1028	80	1,06E+06	1,09E+09	1,11E+12	8,22E+04	8,45E+07



1240	90	1,54E+06	1,91E+09	2,36E+12	1,12E+05	1,38E+08
.....						
2345	255	5,50E+06	1,29E+10	3,02E+13	5,98E+05	1,40E+09
Σx_i:	Σy_i:	Σx_i^2:	Σx_i^3:	Σx_i^4:	Σxy_i:	$\Sigma x_i^2 y_i$:
36833	3505	7,15E+07	1,44E+11	2,96E+14	6,53E+06	1,34E+10

Perhitungan mencari persamaan regresi polynomial orde-2

$$\begin{bmatrix} n & \Sigma x_i & \Sigma x_i^2 \\ \Sigma x_i & \Sigma x_i^2 & \Sigma x_i^3 \\ \Sigma x_i^2 & \Sigma x_i^3 & \Sigma x_i^4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma y_i \\ \Sigma x_i y_i \\ \Sigma x_i^2 y_i \end{bmatrix}$$

Nilai n merupakan jumlah data, diketahui $n = 27$ sehingga diperoleh:

$$\begin{bmatrix} 27 & 36833 & 71541845 \\ 36833 & 71541845 & 1,43839E+11 \\ 71541845 & 1,43839E+11 & 2,95988E+14 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3505 \\ 6532785 \\ 13368761085 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 27 & 36833 & 71541845 \\ 36833 & 71541845 & 1,43839E+11 \\ 71541845 & 1,43839E+11 & 2,95988E+14 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 3505 \\ 6532785 \\ 13368761085 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 32,1192 \\ -0,0184 \\ 0,0000463652980363632 \end{bmatrix}$$

Sehingga diperoleh persamaan regresi polynomial model orde-2:

$$y_{model} = 32,1192 - 0,0184x + (0,0000463652980363632)x^2$$

Selanjutnya menghitung parameter besaran error S_t dan S_r dengan cara mengolah data pengujian dan memperhitungkan hasil dari model orde-2 yang telah diperoleh.

Tabel 5: Pengolahan Data Uji dan Data Model Orde-2

x_i	y_i	y_{model}	e_i^2	$\bar{y}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$
0	0	32,11	0	0	0	0
0	10	32,11	0	0	0	0
0	20	32,11	0	0	0	0
0	30	32,11	0	0	0	0
0	40	32,11	0	0	0	0
0	50	32,11	0	0	0	0
0	60	32,11	0	0	0	0
785	70	46,24	4,84E+08	3,79E+11	5,50E+04	4,31E+07
1028	80	62,20	1,09E+09	1,11E+12	8,22E+04	8,45E+07
1240	90	80,59	1,91E+09	2,36E+12	1,12E+05	1,38E+08
.....						
2345	255	243,93	122,43	129,81	125,18	15671,33
Σy_i:		Σe_i^2:		$\Sigma (y_i - \bar{y})^2$:		
3505		5578,89		162524,0741		

Menghitung besaran error S_t



$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 = 162524,0741$$

Menghitung besaran error S_r

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{model})^2 = 5578,89$$

Setelah diperoleh parameter besaran error, maka dapat menghitung standar error estimasi, koefisien determinasi dan koefisien korelasi. Selanjutnya, menghitung nilai standar error estimasi:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n-k}} = \sqrt{\frac{5578,89}{27-3}} = 15,24644634$$

Menghitung nilai koefisien determinasi:

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} = \frac{162524,0741 - 5578,89}{162524,0741} = 0,965673399$$

Menghitung nilai koefisien korelasi

$$r = \sqrt{r^2} = \sqrt{0,965673399} = 0,982686827$$

Melakukan pengujian kesesuaian model dengan Uji-F

$$F_{hitung} = \frac{\frac{r^2}{(k-1)}}{1 - \frac{r^2}{(n-k)}} = \frac{\frac{0,965673399}{(3-1)}}{1 - \frac{0,965673399}{(27-3)}} = 0,503078774$$

$$F_{tabel} = \frac{(3-1)}{(27-3)} = \frac{2}{24} = 0,0833$$

Hasil Uji-F diperoleh $F_{hitung} > F_{tabel}$

3.3.3 Model Polinomial Orde-3

Berdasarkan data awal pengujian sinyal pwm terhadap kecepatan motor, maka dapat memasukkan data tersebut ke dalam matriks (seperti pada persamaan 0000), sehingga diperoleh persamaan regresi polynomial model orde-3.

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i^3 y_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i^3 y_i \end{bmatrix}$$

Berdasarkan perhitungan matriks diperoleh hasil:



$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 29,90 \\ 0,11575 \\ -0,00011 \\ 4,3944 \end{bmatrix}$$

Sehingga diperoleh bentuk model regresi polynomial orde-3:
 $y_{model} = 29,90 + 0,11575x + (-0,00011)x^2 + (4,3944)x^3$

Besaran error S_t

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 = 162524,07$$

Besaran error S_r

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{model})^2 = 3069,132266$$

Nilai standar error estimasi:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n-k}} = \sqrt{\frac{3069,13}{27-4}} = 11,551646$$

Nilai koefisien determinasi:

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} = 0,98111583$$

Nilai koefisien korelasi:

$$r = \sqrt{r^2} = 0,990512913$$

Pengujian kesesuaian model dengan Uji-F

$$F_{hitung} = \frac{\frac{r^2}{(k-1)}}{1 - \frac{r^2}{(n-k)}} = 0,341610772$$

$$F_{tabel} = \frac{3}{23} = 0,130434783$$

Hasil Uji-F diperoleh $F_{hitung} > F_{tabel}$

3.3.4 Model Polinomial Orde-4

Berdasarkan data awal pengujian sinyal pwm terhadap kecepatan motor, maka dapat memasukkan data tersebut ke dalam matriks sesuai persamaan 000, sehingga diperoleh persamaan regresi polynomial model orde-4.

Bentuk model regresi polynomial orde-4:

$$y_{model} = 29,90 + 0,11575x + (-0,00011)x^2 + (4,3944)x^3$$

Besaran error S_t

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 = 162524,07$$



Besaran error S_r

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{model})^2 = 3027,248707$$

Nilai standar error estimasi:

$$S_{y/x} = 11,4725546$$

Nilai koefisien determinasi:

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} = 0,981373537$$

Nilai koefisien korelasi:

$$r = \sqrt{r^2} = 0,990642992$$

Pengujian kesesuaian model dengan Uji-F

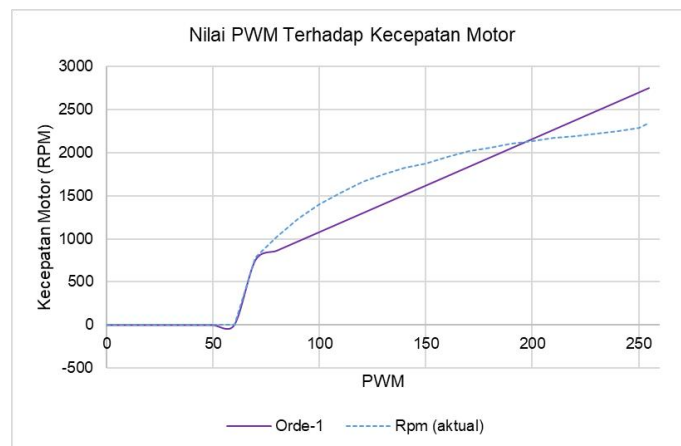
$$F_{hitung} = 0,256798629$$

$$F_{tabel} = 0,181818182$$

Hasil Uji-F diperoleh $F_{hitung} > F_{tabel}$

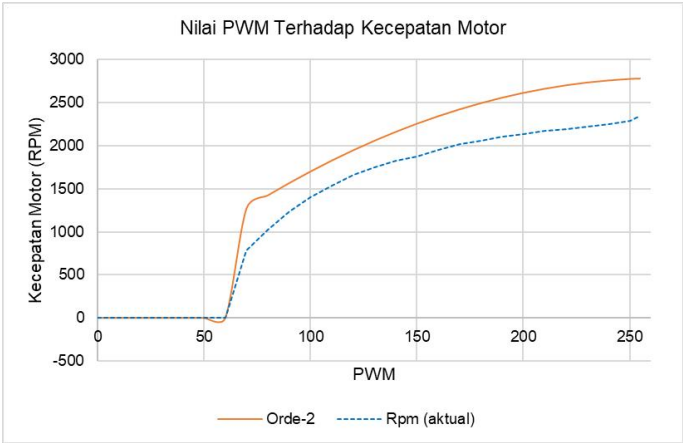
3.4 Validasi Model

Hasil uji validasi model dilakukan dengan cara melakukan perbandingan antara data hasil pemodelan yang telah diperoleh dengan data aktual hasil pengujian motor DC.

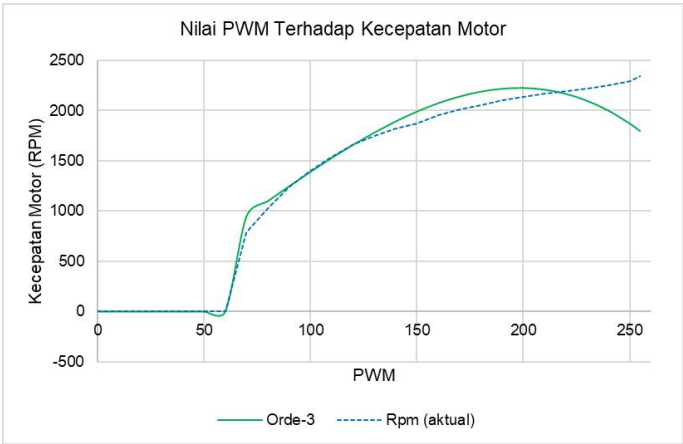


Gambar 3. Pengujian model orde-1 dengan Data Aktual

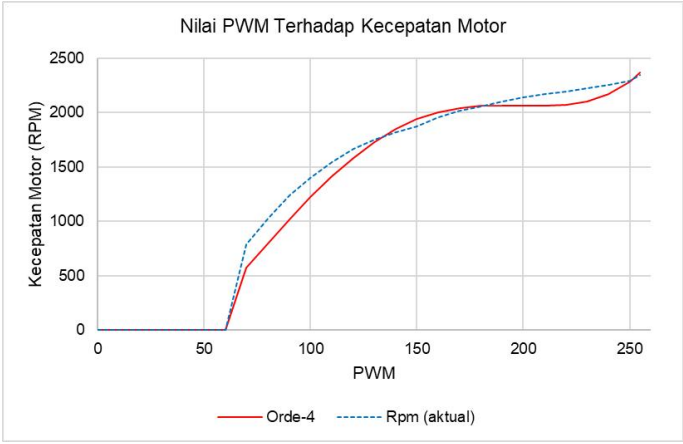




Gambar 4. Pengujian model orde-2 dengan Data Aktual

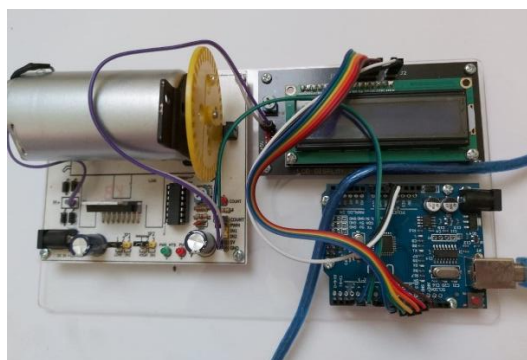


Gambar 5. Pengujian model orde-3 dengan Data Aktual



Gambar 6. Pengujian model orde-4 dengan Data Aktual





Gambar 7. Alat Pengujian Kecepatan Motor DC

Berdasarkan data dan perhitungan yang telah dibuat untuk melakukan pemeriksaan model yang baik digunakan pada analisis regresi dan memperhitungkan standar error estimasi dan koefisien korelasi. Perbandingan standar error estimasi dan nilai koefisien korelasi secara keseluruhan dari masing-masing model dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 6: Perbandingan Standar Error dan Koefisien Korelasi Pada Masing-Masing Model

Model Regresi Polinomial	Standar error estimasi	Koefisien korelasi (%)
Orde-1	27,19	94 %
Orde-2	15,24	98 %
Orde-3	11,55	99 %
Orde-4	11,47	99 %

4. KESIMPULAN

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa metode regresi polynomial dapat digunakan sebagai metode pemodelan kecepatan motor terhadap tegangan atau terhadap nilai PWM. Berdasarkan uji validasi model, analisis regresi polinomial menunjukkan bahwa model dengan orde yang lebih tinggi memberikan kecocokan untuk memprediksi kecepatan motor DC berdasarkan sinyal PWM yang diberikan. Semakin tinggi orde yang digunakan semakin tinggi pula korelasi yang didapatkan dengan error estimasi semakin rendah. Metode regresi polynomial ini dapat digunakan untuk melakukan pemodelan tanpa perlu menurunkan persamaan matematis berdasarkan hukum fisika yang ada.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Diriba, H. #1, P. Wang, and Z. #2, "Design and Control for Differential Drive Mobile Robot," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 6, no. 10, pp. 327–334, Oct. 2017, [Online]. Available: www.ijert.org
- [2] Muhammad Hilal Mthboob, H. ALRikabi, and I. A. Aljazeera, "A concepts and techniques related to the DC motor speed control system design: Systematic Review," *Wasit Journal of Computer and Mathematics Science*, vol. 2, no. 1, pp. 59–73, Mar. 2023, doi: 10.31185/wjcm.121.
- [3] Nasrul, "Pengendalian Kecepatan Motor DC dengan Metoda Fuzzy Logic Berbasis Mikrokontroler," *Elektron*, p. 1, Dec. 2009.
- [4] A. Zebardast, H. Ghadiri, A. Zebardast, and H. Ghadiri, "DC Motor Control Using Sliding Mode Method," 2013. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/281442384>
- [5] Handy Wicaksono and Josaphat Pramudijanto, "Kontrol PID Untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC Dengan Metode Tuning Direct Synthesis," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 4, pp. 10–17, Mar. 2004.
- [6] A. Okubanjo, O. Oluwadamilola, O. Olaluwoye, and A. Olateju, "Modeling and Simulation of DC Motor Using Simelectronics and Simulink," 2019, doi: 10.30855/gmbd.2019.01.09.
- [7] D. Pal, "Modeling, Analysis and Design of a DC Motor based on State Space Approach." [Online]. Available: <http://www.ijert.org>
- [8] Yusnaini Arifin and Ardi Amir, "Pemodelan dan Pengendalian motor DC Menggunakan Simulasi Matlab," *Mektek*, vol. 2, pp. 129–137, May 2010.
- [9] Eva Ostertagova, "modelling using polynomial regression," *Procedia Eng*, vol. 48, pp. 500–506, 2012.



- [10] Salman Jasim Hammoodi, Kareem Sayegh Flayyih, and Ahmed Refaat Hamad, "Design and Implementation Speed Control System of DC Motor Based on PID Control and Matlab Simulink," *International Journal of Power Electronics and Drive System*, vol. 11, pp. 127–134, Mar. 2020.
- [11] J. Jumiyatun, "PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR DC MENGGUNAKAN SENSOR ENCODER DENGAN KENDALI PI," *Jurnal ECOTIPE*, vol. 4, no. 1, pp. 23–27, Apr. 2017, doi: 10.33019/ecotipe.v4i1.15.

