

# Analisis Perbandingan Sistem Kendali PID dan Sistem Kendali *Fuzzy* PID pada Pengontrolan Kecepatan Motor DC

## Comparative Analysis of PID Control System and *Fuzzy* PID Control System in DC Motor Speed Control

Budi Subarta<sup>1</sup>, Hamzah Eteruddin<sup>2</sup>, David Setiawan<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning

Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

Email: budisubarta35@gmail.com, hamzah@unilak.ac.id, dsetia@unilak.ac.id

**Abstrak** – Pada sistem pengendali kecepatan motor DC, menjaga kestabilan kecepatan putaran dan mencapai respon sistem yang optimal merupakan hal yang penting. Untuk mencapai tujuan tersebut, diperlukan pengendali yang dapat menjaga kinerja motor DC agar tetap stabil. Salah satu metode yang digunakan adalah Self-tuning fuzzy PID. Dengan menggunakan metode Self-tuning fuzzy PID, diharapkan sistem pengendalian mampu menghasilkan kecepatan putaran motor DC yang stabil dan respon sistem yang optimal. Nilai Error dan Delta Error yang diperoleh dari sistem kendali PID saat menggunakan Set point 8100 digunakan sebagai acuan dalam menentukan domain fungsi keanggotaan Input Error dan Delta Error pada perencanaan sistem kendali Fuzzy PID. Penetapan aturan dalam tahap Inferensi juga berperan penting dalam menentukan hasil keputusan akhir pada tahap Defuzifikasi. Parameter PID dengan nilai  $K_p = 0,2$ ,  $K_i = 0,25$ , dan  $K_d = 0,12$  yang digunakan dalam sistem kendali PID menjadi acuan dalam menentukan domain fungsi keanggotaan Output  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  pada perencanaan sistem kendali Fuzzy PID. Penalaan parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  menggunakan Fuzzy Logic akan beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan nilai Error dan Delta Error, sehingga menjaga stabilitas kecepatan motor DC dari perubahan yang disebabkan oleh beban. Jika dibandingkan dengan pengujian Sistem Kendali PID, Sistem Kendali Fuzzy PID dalam penelitian ini menghasilkan peningkatan parameter respons sistem, seperti Settling time sebesar 7,04 detik yang lebih cepat 1,4 detik daripada sistem kendali PID yang menghasilkan Settling time sebesar 8,44 detik atau terjadi kenaikan waktu Settling time sebesar 19,89%, Rise time sebesar 3,58 detik lebih cepat 0,08 detik daripada sistem kendali PID yang menghasilkan Rise time sebesar 3,66 detik atau terjadi kenaikan waktu Rise time sebesar 2,19%, Overshoot sebesar 1,2963%, dan Steady State Error = 0. Hasil ini menunjukkan bahwa Sistem Kendali Fuzzy PID memberikan kinerja yang lebih baik daripada Sistem Kendali PID.

**Kata Kunci:** Motor DC, PID, Fuzzy Logic, Respon Sistem, Sistem Kendali.

**Abstract** – In the control system of a DC motor speed, maintaining speed stability and achieving optimal system response are crucial. To achieve these goals, a controller is needed to maintain the performance of the DC motor and ensure its stability. One of the methods used is Self-tuning fuzzy PID. By utilizing the Self-tuning fuzzy PID method, it is expected that the control system can achieve a stable DC motor speed and optimal system response. The Error and Delta Error values obtained from the PID control system when using a Setpoint of 8100 are used as references to determine the membership function domains of Input Error and Delta Error in the design of the Fuzzy PID control system. The establishment of rules in the Inference stage also plays a crucial role in determining the final decision in the Defuzzification stage. The

TELKA, Vol.10, No.2, Juli 2024, pp. 178~192

ISSN (e): 2540-9123

ISSN (p): 2502-1982

*PID parameters with values of  $K_p = 0.2$ ,  $K_i = 0.25$ , and  $K_d = 0.12$  used in the PID control system serve as references to determine the membership function domains of Output  $K_p$ ,  $K_i$ , and  $K_d$  in the design of the Fuzzy PID control system. The tuning of  $K_p$ ,  $K_i$ , and  $K_d$  parameters using Fuzzy Logic dynamically adapts to changes in Error and Delta Error values, thus maintaining the stability of the DC motor speed in response to load changes. When compared to the testing of the PID Control System, the Fuzzy PID Control System in this study resulted in improved system response parameters. For instance, the settling time was 7.04 seconds, which is 1.4 seconds faster than the PID control system that had a settling time of 8.44 seconds, representing an increase of 19.89%. The rise time was 3.58 seconds, 0.08 seconds faster than the PID control system with a rise time of 3.66 seconds, indicating a rise time increase of 2.19%. The overshoot was 1.2963%, and the steady-state error was 0. This result indicates that the Fuzzy PID Control System provides better performance than the PID Control System.*

**Keywords:** DC Motor, PID, Fuzzy Logic, System Response, Control System.

## 1. Pendahuluan

Dalam penggunaan yang optimal, kecepatan motor DC perlu tetap stabil dan dapat diatur sesuai kebutuhan. Namun, seringkali kecepatan putaran motor DC menjadi tidak stabil karena adanya pembebanan saat motor dioperasikan [1]. Salah satu metode yang digunakan untuk mengatur kestabilan kecepatan motor DC adalah kendali PID. Pemahaman tentang kinerja dan penerapan pengontrol PID sangat penting dalam menganalisis performansi suatu sistem kendali [2].

Kecepatan motor DC dengan beban tetap dapat dikendalikan menggunakan Sistem Kendali PID dan Sistem Kendali Fuzzy PID. Dalam Sistem Kendali PID, parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  tidak berubah untuk setiap beban dalam menjaga kestabilan kecepatan motor. Namun, jika beban berubah, kestabilan motor terganggu karena parameter tersebut tidak dapat beradaptasi dengan perubahan beban. Sistem Kendali Fuzzy PID, dapat menyesuaikan parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  secara dinamis berdasarkan perubahan Error dan Delta Error. Hal ini menawarkan solusi untuk menjaga kestabilan kecepatan motor meskipun beban berubah. Oleh karena itu, penting untuk membandingkan kinerja kedua sistem untuk memastikan Sistem Kendali Fuzzy PID tetap efektif dalam menjaga respon sistem yang baik.

Dalam pengimplementasiannya, proses penalaan atau *tuning* kendali PID merupakan langkah penting. Penalaan kendali PID secara empiris seringkali menghasilkan hasil yang kurang optimal [3]. Berdasarkan hasil simulasi MATLAB pada penelitian oleh Umesh Kumar Bansal dan Rakesh Narvey, pendekatan penalaan otomatis fuzzy pada struktur PID konvensional terbukti mampu mengendalikan kecepatan motor DC [4]. Oleh karena itu dalam penelitian ini digunakan penalaan kendali PID menggunakan Logika *Fuzzy* yang dapat menghasilkan parameter PID yang dinamis sesuai dengan perubahan kecepatan motor DC dengan metode penelitian yang dipilih adalah eksperimen langsung, bukan berdasarkan simulasi seperti yang telah dilakukan pada penelitian oleh Umesh Kumar Bansal dan Rakesh Narvey, melainkan melalui pengujian langsung menggunakan Rangkaian Pengendali Kecepatan Motor DC berbasis Arduino Mega 2560.

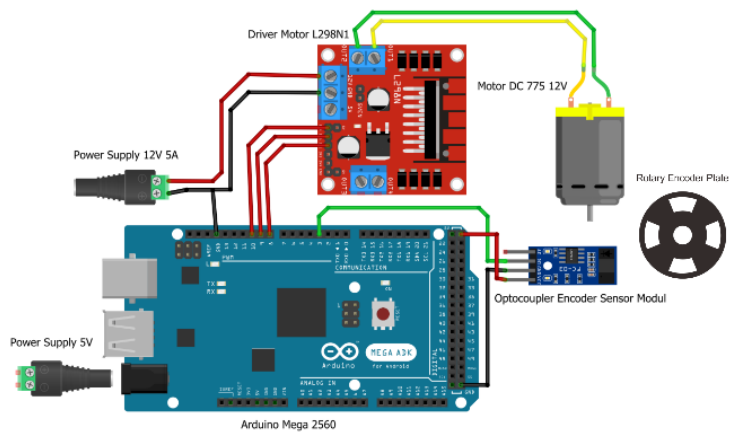
## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Perencanaan Sistem

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian eksperimen. Percobaan yang dilakukan menggunakan Rangkaian Pengendali Kecepatan Motor DC berbasis Arduino Mega 2560. Gambar 1 merupakan rangkaian kendali untuk mengendalikan kecepatan motor DC berbasis Arduino Mega 2560.

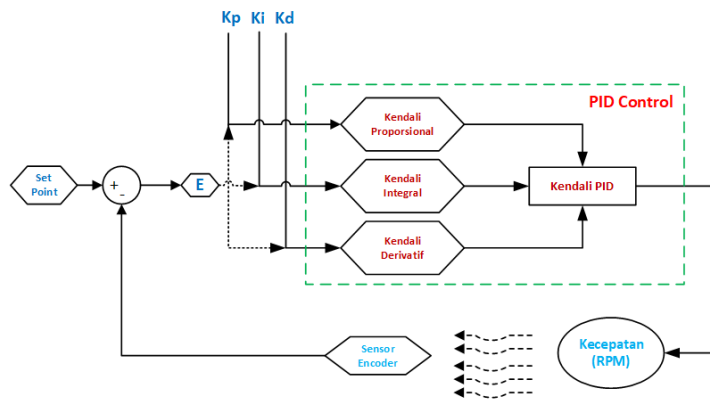
Rangkaian tersebut digunakan untuk memperoleh data kecepatan motor DC dalam RPM. Untuk mengambil data percobaan digunakan 3 program kendali dalam bentuk Source Code IDE Arduino. Program tersebut adalah:

1. Program untuk Sistem Kendali Loop Terbuka
2. Program untuk Sistem Kendali PID
3. Program untuk Sistem Kendali Fuzzy PID

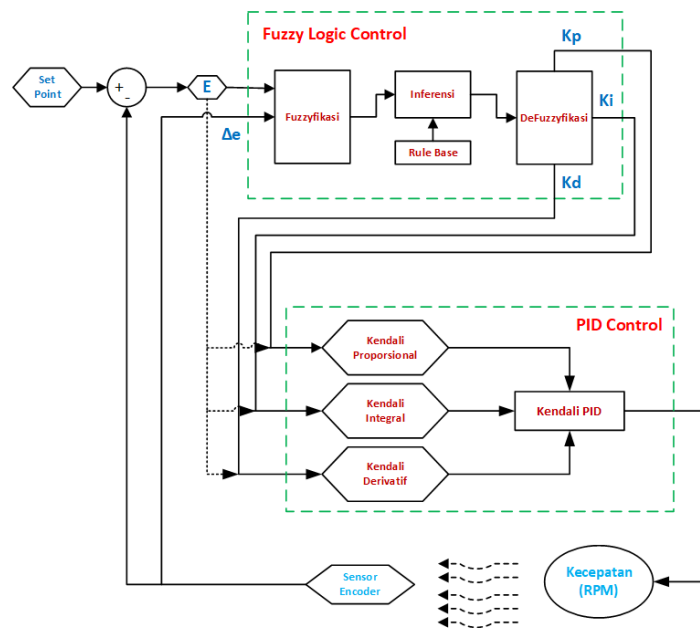


Gambar 1. Rangkaian Kendali berbasis Arduino Mega 2560.

Gambar 2 merupakan blok diagram Pemrograman Sistem Kendali PID dan Gambar 3 merupakan blok diagram Pemrograman Sistem Kendali *Fuzzy* PID



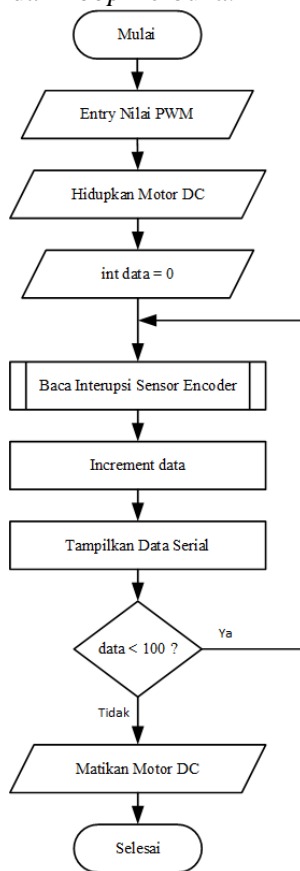
Gambar 2. Blok Diagram Pemrograman Sistem Kendali PID.



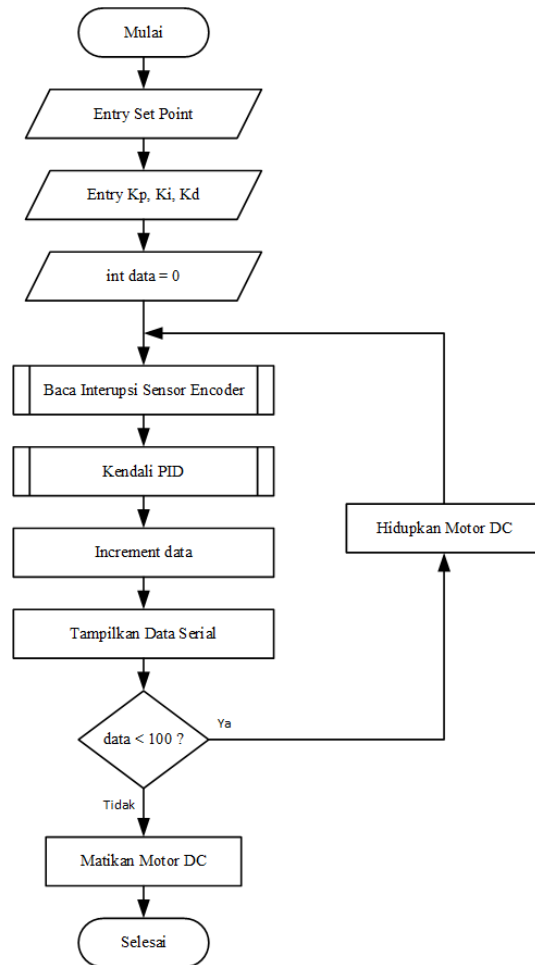
Gambar 3. Blok Diagram Pemrograman Sistem Kendali *Fuzzy* PID.

2.2. Perancangan Sistem Fuzzy

Program Sistem Kendali *Loop* Terbuka digunakan untuk menentukan nilai kecepatan maksimum motor DC yang dapat dicapai oleh sistem. Untuk menentukan nilai kecepatan maksimum, beberapa nilai PWM akan dikombinasikan sebagai nilai *input*. PWM minimal yang digunakan adalah 50, dan jika PWM berada di bawah 50, motor DC tidak akan berputar dan hanya akan mengeluarkan suara dengung [5]. Semakin tinggi nilai PWM maka kecepatan motor DC yang dihasilkan akan semakin besar [6]. Nilai kecepatan maksimum ini akan menjadi nilai *Set point* untuk digunakan dalam Sistem Kendali PID. Data sampel yang diperoleh dari percobaan Sistem Kendali *Loop* Terbuka akan diidentifikasi menggunakan *System Identification Tool*. Pemodelan motor DC melalui identifikasi sistem adalah pendekatan yang baik dalam memodelkan sistem dengan menggunakan *input* dan *output* sistem. Pendekatan ini menghasilkan model yang mendekati sistem sebenarnya [7]. Gambar 4 menggambarkan *Flowchart* program Sistem Kendali *Loop* Terbuka.



Gambar 4. *Flowchart* program Sistem Kendali *Loop* Terbuka.

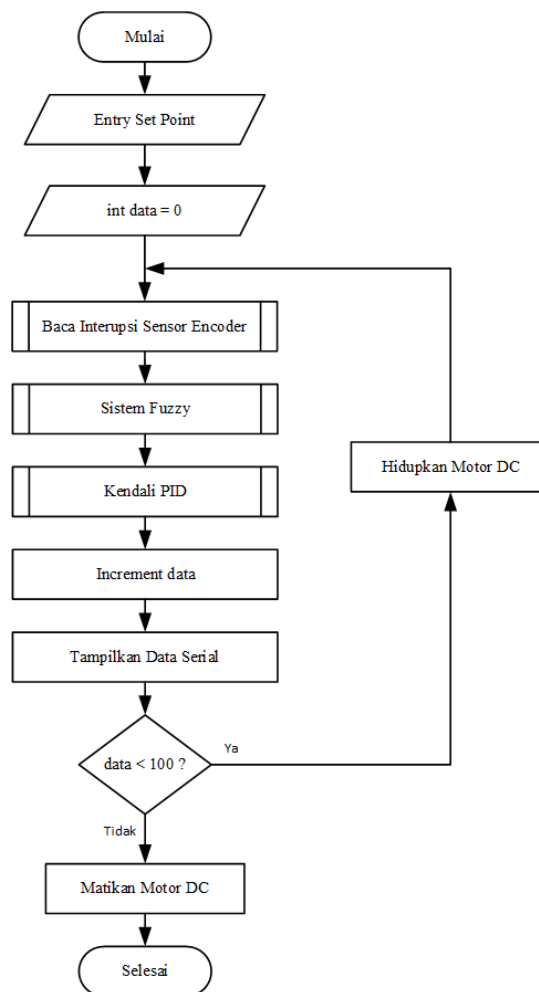


Gambar 5. *Flowchart* program Sistem Kendali PID.

Program Sistem Kendali PID digunakan untuk mengambil data kecepatan motor DC untuk mendapatkan nilai *Error* dan *Delta Error* paling besar pada kecepatan motor DC untuk *Set point* Maksimal. Nilai *Error* dan *Delta Error* paling besar ini akan menjadi patokan nilai fungsi keanggotan *Input* dalam perancangan sistem *fuzzy* untuk Sistem Kendali *Fuzzy* PID. Sedangkan nilai parameter *Kp*, *Ki*, dan *Kd* pada Sistem Kendali PID ini akan digunakan sebagai patokan untuk nilai fungsi keanggotan *Output* dalam perancangan sistem *Fuzzy* untuk Sistem Kendali *Fuzzy* PID. Penyetelan atau penalaan PID umumnya dilakukan melalui metode *trial and error* untuk menentukan nilai *tuning* yang akan digunakan pada *gain* *Kp*, *Ki*, dan *Kd* [8]. Meskipun

secara teoritis nilai-nilai parameter kendali PID dapat diatur secara independen, namun dalam praktiknya, penyetelan atau *tuning* yang dilakukan pada salah satu parameter kendali biasanya membutuhkan penyesuaian ulang pada parameter lainnya [9]. Gambar 5 menggambarkan *Flowchart* program Sistem Kendali PID.

Program Sistem Kendali *Fuzzy* PID digunakan untuk menentukan nilai Parameter PID yaitu parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang merupakan fungsi keanggotaan *Output* dari Sistem Kendali *Fuzzy* PID. Nilai parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  ini akan berubah secara dinamis sesuai dengan perubahan kecepatan berdasarkan besar *Error* dan *Delta Error* kecepatan motor yang terjadi. Nilai *Error* merupakan selisih antara nilai *Set point* dalam rps dan kecepatan motor DC yang terbaca oleh sensor *encoder* dalam rps. Sedangkan nilai *Delta Error* adalah perbedaan nilai *Error* saat ini dengan nilai *Error* sebelumnya. Gambar 6 menggambarkan *Flowchart* program Sistem Kendali *Fuzzy* PID.



Gambar 6. *Flowchart* program Sistem Kendali *Fuzzy* PID.

Perancangan sistem *fuzzy* untuk Sistem Kendali *Fuzzy* PID terdiri atas tahapan Fuzzifikasi, Inferensi, dan Defuzzifikasi berdasarkan sistem *Fuzzy* dengan metode Mamdani. Pada tahap Fuzzifikasi akan ditetapkan fungsi keanggotaan *Input* dan fungsi keanggotaan *Output*. Fungsi keanggotaan *Input* berupa variabel *Error* dan variabel *Delta Error*. Fungsi keanggotaan variabel *Error* dibagi menjadi 5 fungsi keanggotaan yaitu fungsi keanggotaan  $E_{SK}$ ,  $E_K$ ,  $E_M$ ,  $E_B$ , dan  $E_{SB}$ . Selanjutnya Fungsi keanggotaan variabel *Delta Error* dibagi menjadi 5 fungsi keanggotaan yaitu fungsi keanggotaan  $dE_{SK}$ ,  $dE_K$ ,  $dE_M$ ,  $dE_B$ , dan  $dE_{SB}$ . Fungsi keanggotaan *Output* berupa nilai parameter kendali PID yaitu nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Masing-masing parameter dibagi menjadi 7 fungsi keanggotaan yaitu  $Kx_{SSK}$ ,  $Kx_{SK}$ ,  $Kx_K$ ,  $Kx_M$ ,  $Kx_B$ ,  $Kx_{SB}$ ,  $Kx_{SSB}$ . Dimana  $x$  merupakan parameter  $p$ ,  $i$ , atau  $d$ .

Tahap Inferensi melibatkan pemetaan variabel *Input* dan variabel *Output* sistem *Fuzzy*. Pemetaan dilakukan dengan membuat aturan-aturan *Fuzzy* (*Fuzzy Rules*) yang menggambarkan hubungan antara fungsi keanggotaan *input* dan fungsi keanggotaan *Output*. Dalam sistem kendali *Fuzzy* PID ini, terdapat tiga *Fuzzy Rules* yaitu *Fuzzy Rule* untuk *Kp*, *Fuzzy Rule* untuk *Ki*, dan *Fuzzy Rule* untuk *Kd*. Terdapat 25 aturan dimana setiap aturan dalam basis pengetahuan *fuzzy* terkait dengan relasi *fuzzy*. Bentuk umum aturan dalam fungsi implikasi adalah: "IF x is A THEN y is B" dengan x dan y adalah skalar, dan A dan B adalah himpunan *fuzzy*. Bagian yang mengikuti "IF" disebut sebagai anteseden, sedangkan bagian yang mengikuti "THEN" disebut sebagai konsekuen. Tabel 1 merupakan tabel *Fuzzy Rule* parameter *Kp*, Tabel 2 merupakan tabel *Fuzzy Rule* parameter *Ki*, dan Tabel 3 merupakan tabel *Fuzzy Rule* parameter *Kd*.

Tabel 1. *Fuzzy Rules* parameter *Kp*.

E/dE	dE_SB	dE_B	dE_M	dE_K	dE_SK
E_SK	Kp_SSB	Kp_SSB	Kp_SSB	Kp_SSB	Kp_SSB
E_K	Kp_B	Kp_B	Kp_B	Kp_SB	Kp_SSB
E_M	Kp_SSK	Kp_SSK	Kp_SK	Kp_K	Kp_K
E_B	Kp_B	Kp_B	Kp_B	Kp_SB	Kp_SSB
E_SB	Kp_SSB	Kp_SSB	Kp_SSB	Kp_SSB	Kp_SSB

Tabel 2. *Fuzzy Rules* parameter *Ki*.

E/dE	dE_SB	dE_B	dE_M	dE_K	dE_SK
E_SK	Ki_M	Ki_M	Ki_M	Ki_M	Ki_M
E_K	Ki_K	Ki_K	Ki_K	Ki_K	Ki_K
E_M	Ki_SK	Ki_SK	Ki_SSK	Ki_SK	Ki_SK
E_B	Ki_K	Ki_K	Ki_K	Ki_K	Ki_K
E_SB	Ki_M	Ki_M	Ki_M	Ki_M	Ki_M

Tabel 3. *Fuzzy Rules* parameter *Kd*.

E/dE	dE_SB	dE_B	dE_M	dE_K	dE_SK
E_SK	Kd_SSK	Kd_K	Kd_M	Kd_SB	Kd_SSB
E_K	Kd_K	Kd_B	Kd_SB	Kd_SSB	Kd_SSB
E_M	Kd_M	Kd_SB	Kd_SB	Kd_SSB	Kd_SSB
E_B	Kd_B	Kd_SSB	Kd_SSB	Kd_SSB	Kd_SSB
E_SB	Kd_SSB	Kd_SSB	Kd_SSB	Kd_SSB	Kd_SSB

*Fuzzy rules* digunakan sebagai dasar untuk proses Implikasi pada Tahap Inferensi sistem *Fuzzy*. Metode yang digunakan dalam sistem *fuzzy* adalah Metode Mamdani dengan menggunakan metode min untuk proses Implikasi.

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (1)$$

Proses inferensi dengan menggunakan metode "Max" dengan persamaan untuk komposisi aturan metode Max adalah [7]:

$$\mu_{sf}(x_i) = \max(\mu_{sf}(x_i), \mu_{kf}(x_i)) \quad (2)$$

Dimana :

$\mu_{sf}(x_i)$  = nilai keanggotaan solusi *Fuzzy* sampai aturan ke-i

$\mu_{kf}(x_i)$  = nilai keanggotaan konsekuen *Fuzzy* sampai aturan ke-i

Proses defuzzifikasi mengambil himpunan *fuzzy* yang dihasilkan dari komposisi aturan-aturan *fuzzy* sebagai *input*, dan menghasilkan *output* berupa sebuah bilangan pada domain himpunan *fuzzy* tersebut. Metode yang digunakan adalah metode *Defuzzy Weighted Average* Pada metode ini, solusi konkret diperoleh dengan menjumlahkan perkalian setiap titik ( $\alpha$ -Predikat)

dengan bobotnya (derajat keanggotaan), kemudian dibagi dengan jumlah total bobot ( $\alpha$ -Predikat), dapat dirumuskan dengan rumusan [10]:

$$Output = \frac{\sum(\alpha\text{-Predikat} \cdot \text{Derajat Keanggotaan})}{\sum \alpha\text{-Predikat}} \tag{3}$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

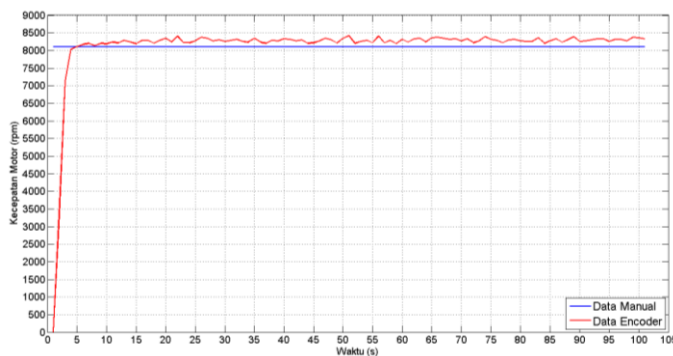
#### 3.1. Percobaan Sistem Kendali Loop Terbuka

Percobaan Sistem Kendali Loop Terbuka digunakan untuk mendapatkan hasil pembacaan nilai kecepatan motor DC dalam RPM dengan memberikan nilai PWM maksimal atau nilai PWM 255 ke dalam program Sistem Kendali Loop Terbuka. Dari hasil pengukuran menggunakan Tachometer, kecepatan putaran motor DC adalah 8100 rpm. Tabel 4 adalah tabel data kecepatan motor DC untuk input PWM 255 untuk menganalisa kualitas respon sistemnya.

Tabel 4. Data kecepatan Motor DC dengan input PWM 255.

t (s)	RPM	t (s)	RPM	t (s)	RPM	t (s)	RPM	t (s)	RPM
0	0								
1	3345	21	8400	41	8265	61	8325	81	8250
2	7140	22	8220	42	8295	62	8340	82	8355
3	8040	23	8220	43	8205	63	8235	83	8205
4	8115	24	8265	44	8220	64	8355	84	8265
5	8175	25	8370	45	8265	65	8370	85	8325
6	8205	26	8340	46	8340	66	8340	86	8235
7	8145	27	8265	47	8295	67	8310	87	8295
8	8205	28	8295	48	8205	68	8325	88	8385
9	8190	29	8250	49	8340	69	8265	89	8250
10	8235	30	8280	50	8415	70	8325	90	8265
11	8220	31	8310	51	8205	71	8220	91	8295
12	8280	32	8250	52	8250	72	8265	92	8325
13	8235	33	8235	53	8280	73	8385	93	8325
14	8190	34	8340	54	8220	74	8310	94	8250
15	8280	35	8235	55	8400	75	8280	95	8310
16	8280	36	8205	56	8220	76	8220	96	8310
17	8205	37	8280	57	8280	77	8295	97	8265
18	8280	38	8265	58	8190	78	8310	98	8370
19	8340	39	8325	59	8310	79	8265	99	8355
20	8235	40	8310	60	8235	80	8250	100	8325

Gambar 7 adalah grafik kecepatan motor DC untuk nilai PWM 255 yang direpresentasikan dari data kecepatan motor DC pada Tabel 4. Dari grafik, dapat dilihat bahwa Respon Sistem nilai kecepatan putaran Motor DC sudah cukup baik, tetapi terdapat *Overshoot* yang relatif besar dan *Settling time* yang tidak terbaca. Hal ini berarti kestabilan nilai RPM belum tercapai. Tabel 5 menjelaskan parameter respon sistem yang terjadi untuk nilai PWM 255.



Gambar 7. Grafik Kecepatan Motor DC input PWM 255.

Tabel 5. Parameter Respon Sistem Kecepatan Motor DC dengan input PWM 255.

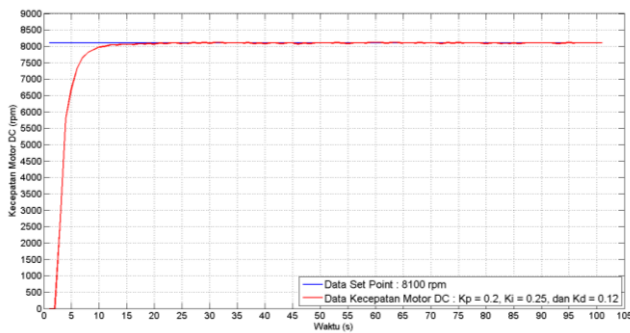
No	Parameter Respon Sistem	Nilai
1	Rise Time	1,9245 detik
2	Settling time	-
3	Overshoot	3,8889 %
4	Peak	8415 rpm
5	Peak Time	50 detik

### 3.2. Percobaan Sistem Kendali PID

Berdasarkan hasil pengukuran pada percobaan Sistem Kendali *Loop* Terbuka, maka nilai *Set point* yang digunakan untuk pengambilan data pada percobaan Sistem Kendali PID adalah nilai 8100 rpm. Dari penentuan nilai parameter PID untuk mendapatkan respon sistem yang baik, didapat nilai parameter PID  $K_p = 0,2$ ,  $K_i = 0,25$ , dan  $K_d = 0,12$ . Selanjutnya, data kecepatan putaran Motor yang dihasilkan selama pengujian dicatat dalam Tabel 6 yang merupakan hasil pengujian Sistem kendali PID untuk Kecepatan Motor DC dengan *Set point* 8100.

Tabel 6. Data kecepatan Motor DC Sistem Kendali PID dengan *Set point* 8100 rpm.

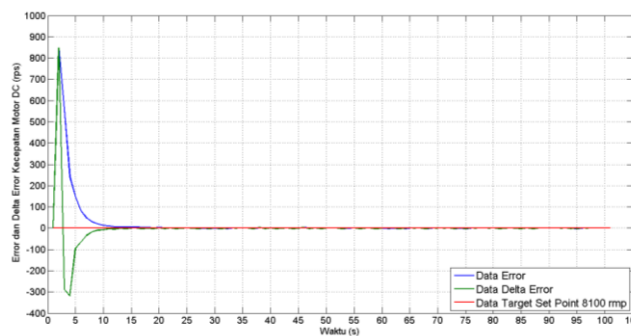
t (s)	RPM	t (s)	RPM	t (s)	RPM	t (s)	RPM	t (s)	RPM
0	0								
1	0	21	8085	41	8100	61	8100	81	8100
2	2760	22	8100	42	8085	62	8115	82	8085
3	5805	23	8100	43	8100	63	8115	83	8085
4	6705	24	8085	44	8100	64	8100	84	8100
5	7320	25	8085	45	8070	65	8100	85	8085
6	7650	26	8115	46	8100	66	8100	86	8100
7	7815	27	8100	47	8085	67	8115	87	8100
8	7905	28	8115	48	8100	68	8100	88	8100
9	7980	29	8100	49	8100	69	8100	89	8100
10	7995	30	8115	50	8100	70	8100	90	8100
11	8040	31	8115	51	8100	71	8085	91	8100
12	8040	32	8100	52	8115	72	8115	92	8085
13	8055	33	8100	53	8100	73	8100	93	8100
14	8055	34	8100	54	8085	74	8115	94	8115
15	8055	35	8100	55	8100	75	8100	95	8100
16	8070	36	8115	56	8100	76	8100	96	8100
17	8070	37	8085	57	8100	77	8100	97	8100
18	8085	38	8100	58	8115	78	8100	98	8100
19	8070	39	8085	59	8115	79	8085	99	8100
20	8100	40	8100	60	8115	80	8100	100	8100



Gambar 8. Grafik Kecepatan Motor DC Sistem Kendali PID dengan *Set point* 8100.

Tabel 7. Parameter Respon Sistem Kecepatan Motor DC Sistem Kendali PID dengan *Set point* 8100.

No	Parameter Respon Sistem	Nilai
1	Rise Time	3,6577 detik
2	Settling time	8,4400 detik
3	Overshoot	0,1852 %
4	Peak	8115 rpm
5	Peak Time	26 detik



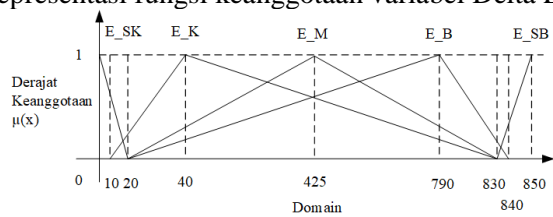
Gambar 9. Grafik Data *Error* dan *Delta Error* Sistem Kendali PID *Set point* 8100.



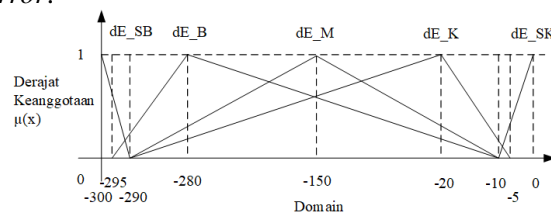
Gambar 8 adalah grafik kecepatan motor DC Sistem Kendali PID dengan *Set point* 8100 menggunakan parameter  $K_p = 0,2$ ,  $K_i = 0,25$ , dan  $K_d = 0,12$  yang direpresentasikan dari data kecepatan motor DC pada Tabel 6. Dari grafik, dapat dilihat bahwa Respon Sistem nilai kecepatan putaran Motor DC sudah sangat baik, terlihat dari nilai *Overshoot* yang kecil dan nilai *Settling time* sudah terbaca. Hal ini berarti kestabilan nilai RPM sudah tercapai. Tabel 7 menjelaskan parameter respon sistem yang terjadi untuk Sistem Kendali PID dengan nilai parameter PID  $K_p = 0,2$ ,  $K_i = 0,25$ , dan  $K_d = 0,12$ . Grafik pada Gambar 9 merupakan grafik data *Error* dan *Delta Error* Sistem Kendali PID untuk *Set point* 8100 yang menggambarkan pencapaian target *Error* dan *Delta Error* pada Sistem Kendali PID dengan *Set point* 8100 di mana target *Error* dan *Delta Error* yang diinginkan adalah 0. Dari grafik tersebut, dapat dilihat bahwa *Error* dan *Delta Error* yang dihasilkan untuk setiap kecepatan Motor DC mendekati nilai 0.

### 3.3. Percobaan Sistem Kendali Fuzzy PID

Fungsi keanggotaan *Input* Sistem Fuzzy terdiri atas dua fungsi keanggotaan yaitu nilai *Error* dan *Delta Error* yang patokannya diambil dari nilai *Error* dan *Delta Error* kecepatan motor DC pada percobaan Sistem Kendali PID. Nilai *Error* paling besar 848,23 dan nilai *Error* paling kecil -1,57. Oleh karena itu, ditentukan rentang *input* variabel *Error* untuk Fuzzy\_PID, yaitu dari 0 hingga 850. Rentang ini dibagi menjadi 5 fungsi keanggotaan yang masing-masing direpresentasikan dengan representasi segitiga. Gambar 10 adalah grafik representasi fungsi keanggotaan variabel *Error*. Nilai *Delta Error* terkecil adalah 0, sedangkan yang terbesar adalah -318,87. Range *input* variabel *Delta Error* ditetapkan antara -300 hingga 0, dan dibagi menjadi 5 fungsi keanggotaan yang direpresentasikan dengan representasi segitiga. Gambar 11 adalah grafik representasi fungsi keanggotaan variabel *Delta Error*.



Gambar 10. Grafik representasi fungsi keanggotaan variabel *Error*.



Gambar 11. Grafik representasi fungsi keanggotaan variabel *Delta Error*.

Fungsi keanggotaan  $E\_SK$  (*Error Sangat Kecil*) dengan nilai parameter  $[0 ; 0 ; 20]$ , Derajat keanggotaannya adalah:

$$\mu(x) = \begin{cases} (20 - x)/(20 - 0), & 0 \leq x \leq 20 \\ 0, & x \geq 20 \\ 1, & x \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Fungsi keanggotaan  $E\_K$  (*Error Kecil*) dengan nilai parameter  $[10 ; 40 ; 830]$ , Derajat keanggotaannya adalah:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 10 \text{ atau } x \geq 830 \\ (x - 10)/(40 - 10), & 10 \leq x \leq 40 \\ (830 - x)/(830 - 40), & 40 \leq x \leq 830 \end{cases} \quad (5)$$

Fungsi keanggotaan  $E\_M$  (*Error Menengah*) dengan nilai parameter  $[20 ; 425 ; 830]$ , Derajat keanggotaannya adalah:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 20 \text{ atau } x \geq 830 \\ (x - 20)/(425 - 20), & 20 \leq x \leq 425 \\ (830 - x)/(830 - 425), & 425 \leq x \leq 830 \end{cases} \quad (6)$$

Fungsi keanggotaan  $E\_B$  (*Error Besar*) dengan nilai parameter  $[20 ; 790 ; 840]$ , Derajat keanggotaannya adalah:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 20 \text{ atau } x \geq 840 \\ (x - 20)/(790 - 20), & 20 \leq x \leq 790 \\ (840 - x)/(840 - 790), & 790 \leq x \leq 840 \end{cases} \quad (7)$$

Fungsi keanggotaan E\_SB (*Error Sangat Besar*) dengan nilai parameter [830 ; 850 ; 850], Derajat keanggotaannya adalah:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 830 \\ (x - 830)/(850 - 830), & 830 \leq x \leq 850 \\ 1, & x \geq 850 \end{cases} \quad (8)$$

Fungsi keanggotaan dE\_SB (*delta Error Sangat Besar*) dengan nilai parameter [-300 ; -300 ; -290], Derajat keanggotaannya adalah:

$$\mu(x) = \begin{cases} ((-290) - x)/((-290) - (-300)), & -300 \leq x \leq -290 \\ 0, & x \geq -290 \\ 1, & x \leq -300 \end{cases} \quad (9)$$

Fungsi keanggotaan dE\_B (*delta Error Besar*) dengan nilai parameter [-295 ; -280 ; -10], Derajat keanggotaannya adalah:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -295 \text{ atau } x \geq -10 \\ (x - (-295))/((-280) - (-295)), & -295 \leq x \leq -280 \\ ((-10) - x)/((-10) - (-280)), & -280 \leq x \leq -10 \end{cases} \quad (10)$$

Fungsi keanggotaan dE\_M (*delta Error Menengah*) dengan nilai parameter [-290 ; -150 ; -10], Derajat keanggotaannya adalah:

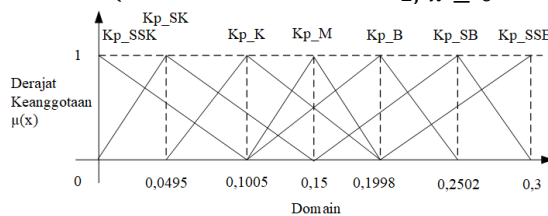
$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -290 \text{ atau } x \geq -10 \\ (x - (-290))/((-150) - (-290)), & -290 \leq x \leq -150 \\ ((-10) - x)/((-10) - (-150)), & -150 \leq x \leq -10 \end{cases} \quad (11)$$

Fungsi keanggotaan dE\_K (*delta Error Kecil*) dengan nilai parameter [-290 ; -20 ; -5], Derajat keanggotaannya adalah:

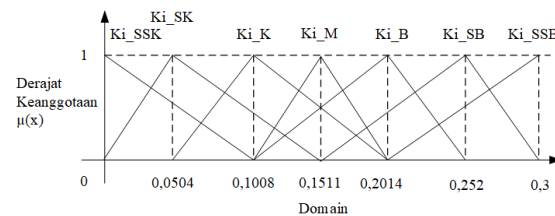
$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -290 \text{ atau } x \geq -5 \\ (x - (-290))/((-20) - (-290)), & -290 \leq x \leq -20 \\ ((-5) - x)/((-5) - (-20)), & -20 \leq x \leq -5 \end{cases} \quad (12)$$

Fungsi keanggotaan dE\_SK (*delta Error Sangat Kecil*) dengan nilai parameter [-10 ; 0 ; 0], Derajat keanggotaannya adalah:

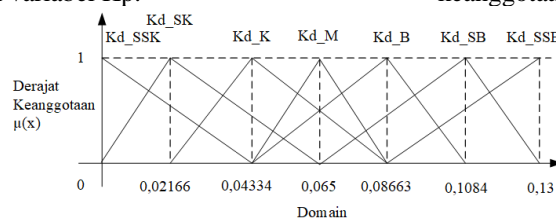
$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -10 \\ (x - (-10))/(0 - (-10)), & -10 \leq x \leq 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$



Gambar 12. Grafik representasi fungsi keanggotaan variabel Kp.



Gambar 13. Grafik representasi fungsi keanggotaan variabel Ki.



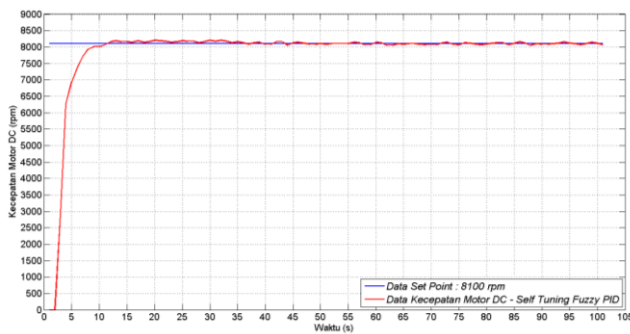
Gambar 14. Grafik representasi fungsi keanggotaan variabel Kd.

Gambar 12 adalah grafik representasi fungsi keanggotaan variabel Kp. Nilai parameter Ki yang ditetapkan adalah 0,25. Berdasarkan data tersebut, range besar variabel Ki dalam fungsi keanggotaan *Output* adalah 0 hingga 0,3, yang terbagi menjadi 7 fungsi keanggotaan dalam bentuk representasi segitiga. Gambar 13 adalah grafik representasi fungsi keanggotaan variabel Ki. Nilai parameter Kd yang ditetapkan adalah 0,12. Berdasarkan data tersebut maka untuk fungsi keanggotaan *Output* variabel Kd besar range-nya adalah 0 – 0,13, yang dibagi menjadi 7 fungsi keanggotaan yang masing-masingnya direpresentasikan dengan representasi segitiga. Gambar 14 adalah grafik representasi fungsi keanggotaan variabel Kd.

Dengan menggunakan rangkaian kendali pada Gambar 1, dilakukan percobaan Sistem Kendali *Fuzzy* PID untuk mengambil data kecepatan putaran motor. Data kecepatan putaran Motor yang dihasilkan selama pengujian dicatat dalam Tabel 8 yang merupakan hasil pengujian Sistem Kendali *Fuzzy* PID. Selanjutnya, data tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik Hasil Pengujian Sistem Kendali *Fuzzy* PID untuk Kecepatan Motor DC maksimum dengan *Set point* 8100. Gambar 15 adalah grafik kecepatan motor DC Sistem Kendali *Fuzzy* PID yang direpresentasikan dari data kecepatan motor DC pada Tabel 8.

Tabel 8. Data kecepatan Motor DC Sistem Kendali *Fuzzy* PID.

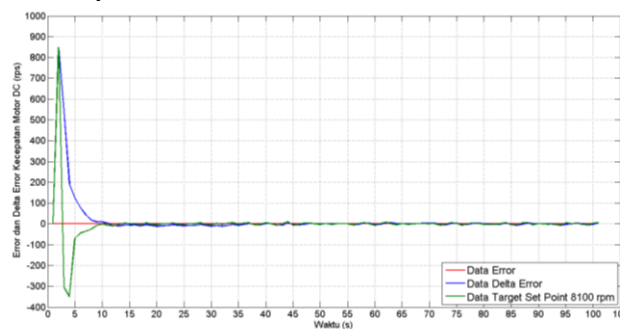
t (s)	RPM	t (s)	RPM	t (s)	RPM	t (s)	RPM	t (s)	RPM
0	0								
1	0	21	8175	41	8160	61	8055	81	8130
2	2925	22	8145	42	8160	62	8055	82	8130
3	6270	23	8160	43	8055	63	8100	83	8070
4	6930	24	8190	44	8130	64	8085	84	8115
5	7350	25	8175	45	8145	65	8100	85	8160
6	7695	26	8175	46	8115	66	8100	86	8115
7	7935	27	8130	47	8085	67	8085	87	8055
8	8010	28	8160	48	8085	68	8070	88	8100
9	8010	29	8205	49	8100	69	8070	89	8085
10	8070	30	8175	50	8085	70	8070	90	8085
11	8160	31	8205	51	8100	71	8130	91	8100
12	8190	32	8175	52	8100	72	8145	92	8115
13	8160	33	8130	53	8100	73	8085	93	8160
14	8160	34	8160	54	8100	74	8070	94	8115
15	8145	35	8130	55	8145	75	8130	95	8100
16	8190	36	8085	56	8130	76	8115	96	8070
17	8145	37	8130	57	8070	77	8085	97	8100
18	8160	38	8145	58	8070	78	8070	98	8145
19	8205	39	8085	59	8145	79	8085	99	8115
20	8190	40	8085	60	8130	80	8115	100	8070



Gambar 15. Grafik Kecepatan Motor DC Sistem Kendali *Fuzzy* PID.

Tabel 9. Parameter Respon Sistem Kecepatan Motor DC Sistem Kendali *Fuzzy* PID.

No	Parameter Respon Sistem	Nilai
1	Rise Time	3,5802 detik
2	Settling Time	7,0400 detik
3	Overshoot	1,2963 %
4	Peak	8205 rpm
5	Peak Time	19 detik



Gambar 16. Grafik Data *Error* dan *Delta Error* Sistem Kendali *Fuzzy* PID.

Kecepatan Motor DC yang dihasilkan dalam percobaan Sistem Kendali Fuzzy PID mampu memberikan respon sistem yang baik. Dari grafik yang ditampilkan, dapat dilihat bahwa Respon Sistem nilai kecepatan putaran Motor DC sudah optimal, terlihat dari nilai *Overshoot* yang kecil dan nilai *Settling Time* sudah terbaca. Hal ini berarti kestabilan nilai RPM sudah tercapai. Tabel 9 menjelaskan parameter respon sistem yang terjadi untuk Sistem Kendali Fuzzy PID. Gambar 16 menggambarkan pencapaian target *Error* untuk sistem Kendali Fuzzy PID maksimum atau *Set point* 8100.

Dari grafik tersebut, dapat dilihat bahwa *Error* dan delta *Error* yang dihasilkan untuk setiap kecepatan Motor DC mendekati nilai 0. Tabel 10 merupakan Sampel data *Error* dan delta *Error* hasil pengujian Sistem Kendali Fuzzy PID maksimum atau *Set point* 8100. Data sampel yang ditampilkan hanya 45 data dari 100 data yang diambil sebagai hasil pengujian Sistem Kendali Fuzzy PID maksimum atau *Set point* 8100.

Tabel 10. Sampel data *Error* dan delta *Error* hasil pengujian (45 dari 100 data).

t (s)	E	dE	t (s)	E	dE	t (s)	E	dE
0	0	0						
1	848,23	848,23	16	-9,42	-4,71	31	-11	-3,14
2	541,92	-306,31	17	-4,71	4,71	32	-7,85	3,14
3	191,64	-350,29	18	-6,28	-1,57	33	-3,14	4,71
4	122,52	-69,12	19	-11	-4,71	34	-6,28	-1,57
5	78,54	-43,98	20	-9,42	1,57	35	-3,14	3,14
6	42,41	-36,13	21	-7,85	1,57	36	1,57	4,71
7	17,28	-25,13	22	-4,71	3,14	37	-3,14	-4,71
8	9,42	-7,85	23	-6,28	-1,57	38	-4,71	-1,57
9	9,42	0	24	-9,42	-3,14	39	1,57	6,28
10	3,14	-6,28	25	-7,85	1,57	40	1,57	0
11	-6,28	-9,42	26	-7,85	0	41	-6,28	-7,85
12	-9,42	-3,14	27	-3,14	4,71	42	-6,28	0
13	-6,28	3,14	28	-6,28	-3,14	43	4,71	11
14	-6,28	0	29	-11	-4,71	44	-3,14	-7,85
15	-4,71	1,57	30	-7,85	3,14	45	-4,71	-1,57

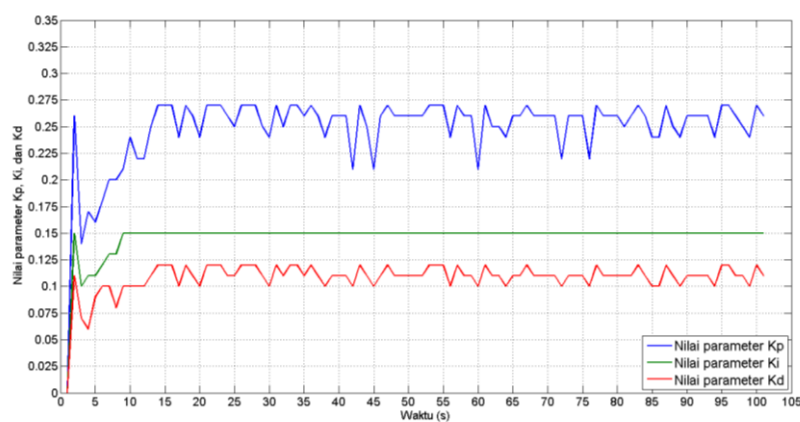
Tabel 11. Perubahan Nilai Parameter Kp, Ki, Kd Sistem Kendali Fuzzy PID dengan *Set point* 8100.

t (s)	Kp	Ki	Kd	t (s)	Kp	Ki	Kd	t (s)	Kp	Ki	Kd	t (s)	Kp	Ki	Kd
0	0	0	0												
1	0,26	0,15	0,11	26	0,27	0,15	0,12	51	0,26	0,15	0,11	76	0,27	0,15	0,12
2	0,14	0,1	0,07	27	0,27	0,15	0,12	52	0,27	0,15	0,12	77	0,26	0,15	0,11
3	0,17	0,11	0,06	28	0,25	0,15	0,11	53	0,27	0,15	0,12	78	0,26	0,15	0,11
4	0,16	0,11	0,09	29	0,24	0,15	0,1	54	0,27	0,15	0,12	79	0,26	0,15	0,11
5	0,18	0,12	0,1	30	0,27	0,15	0,12	55	0,24	0,15	0,1	80	0,25	0,15	0,11
6	0,2	0,13	0,1	31	0,25	0,15	0,11	56	0,27	0,15	0,12	81	0,26	0,15	0,11
7	0,2	0,13	0,08	32	0,27	0,15	0,12	57	0,26	0,15	0,11	82	0,27	0,15	0,12
8	0,21	0,15	0,1	33	0,27	0,15	0,12	58	0,26	0,15	0,11	83	0,26	0,15	0,11
9	0,24	0,15	0,1	34	0,26	0,15	0,11	59	0,21	0,15	0,1	84	0,24	0,15	0,1
10	0,22	0,15	0,1	35	0,27	0,15	0,12	60	0,27	0,15	0,12	85	0,24	0,15	0,1
11	0,22	0,15	0,1	36	0,26	0,15	0,11	61	0,25	0,15	0,11	86	0,27	0,15	0,12
12	0,25	0,15	0,11	37	0,24	0,15	0,1	62	0,25	0,15	0,11	87	0,25	0,15	0,11
13	0,27	0,15	0,12	38	0,26	0,15	0,11	63	0,24	0,15	0,1	88	0,24	0,15	0,1
14	0,27	0,15	0,12	39	0,26	0,15	0,11	64	0,26	0,15	0,11	89	0,26	0,15	0,11
15	0,27	0,15	0,12	40	0,26	0,15	0,11	65	0,26	0,15	0,11	90	0,26	0,15	0,11
16	0,24	0,15	0,1	41	0,21	0,15	0,1	66	0,27	0,15	0,12	91	0,26	0,15	0,11
17	0,27	0,15	0,12	42	0,27	0,15	0,12	67	0,26	0,15	0,11	92	0,26	0,15	0,11
18	0,26	0,15	0,11	43	0,25	0,15	0,11	68	0,26	0,15	0,11	93	0,24	0,15	0,1
19	0,24	0,15	0,1	44	0,21	0,15	0,1	69	0,26	0,15	0,11	94	0,27	0,15	0,12
20	0,27	0,15	0,12	45	0,26	0,15	0,11	70	0,26	0,15	0,11	95	0,27	0,15	0,12
21	0,27	0,15	0,12	46	0,27	0,15	0,12	71	0,22	0,15	0,1	96	0,26	0,15	0,11
22	0,27	0,15	0,12	47	0,26	0,15	0,11	72	0,26	0,15	0,11	97	0,25	0,15	0,11
23	0,26	0,15	0,11	48	0,26	0,15	0,11	73	0,26	0,15	0,11	98	0,24	0,15	0,1
24	0,25	0,15	0,11	49	0,26	0,15	0,11	74	0,26	0,15	0,11	99	0,27	0,15	0,12
25	0,27	0,15	0,12	50	0,26	0,15	0,11	75	0,22	0,15	0,1	100	0,26	0,15	0,11

Selain itu, hasil pengujian ini juga memberikan informasi dalam bentuk data tentang bagaimana nilai parameter PID yang dihasilkan oleh sistem *fuzzy* berubah secara dinamis sesuai dengan kondisi *Error* dan delta *Error* yang terjadi. Setiap perubahan yang terjadi akan menyesuaikan nilai *Error* yang dihasilkan oleh sistem. Karena nilai *Error* merupakan selisih antara nilai *Set point* dan nilai RPM, maka nilai *Error* akan semakin mendekati 0.

Nilai *Error* menjadi faktor penentu untuk setiap parameter PID ( $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ ) dalam sistem *fuzzy*. Oleh karena itu, setiap perubahan nilai *Error* akan mempengaruhi perubahan parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang dihasilkan. Perubahan nilai *Error* akan mengadaptasi parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang sesuai. Tabel 11 menunjukkan perubahan dinamis nilai parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  pada sistem kendali *Fuzzy* PID dengan *Set point* 8100.

Dari data parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang terdapat di Tabel 11, grafik pada Gambar 17 menunjukkan perubahan dinamis dari parameter-parameter tersebut. Nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  merupakan hasil keputusan sistem *fuzzy* berdasarkan nilai *Error* dan delta *Error* yang telah diproses melalui tahap fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi.



Gambar 17. Grafik perubahan nilai parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  Sistem Kendali *Fuzzy* PID.

### 3.4. Perbandingan antara Sistem Kendali PID dengan Sistem Kendali *Fuzzy* PID

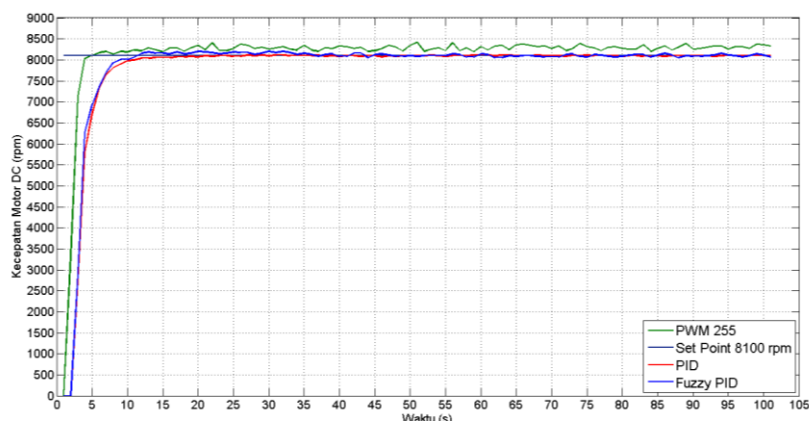
Untuk membandingkan respon sistem antara Sistem Kendali PID dan Sistem Kendali *Fuzzy* PID, respon sistem PWM 255 digunakan sebagai sampel untuk respon sistem yang dihasilkan dari sebuah Sistem Kendali *Loop* Terbuka dimana respon sistem yang dihasilkan belum optimal. Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa nilai *Settling time* dari respon sistem tersebut masih belum terbaca. Sedangkan respon sistem untuk Sistem Kendali *Loop* Tertutup dalam hal ini Sistem Kendali PID dan Sistem Kendali *Fuzzy* PID, nilai parameter respon sistem yang dihasilkan sudah lebih bagus dari respon sistem yang dihasilkan oleh PWM 255, seperti yang terlihat pada Tabel 7 dan Tabel 9. Tabel 12 adalah Tabel perbandingan parameter Respon Sistem untuk semua sistem, yaitu Sistem Kendali *Loop* Terbuka, Sistem Kendali PID, dan Sistem Kendali *Fuzzy* PID.

Tabel 12. Perbandingan parameter Respon Sistem untuk semua sistem.

No	Respon Sistem	Parameter Respon Sistem					SSE
		Rise Time (detik)	Settling Time (detik)	Overshoot (%)	Peak rpm	Peak Time (detik)	
1	PWM255	1,9245	-	3,8889	8415	50	-
2	PID	3,6577	8,4400	0,1852	8115	26	0
3	<i>Fuzzy</i> PID	3,5802	7,0400	1,2963	8205	19	0

Dengan mengacu pada parameter yang tercantum dalam Tabel 12, dapat dilihat bahwa sistem kendali *Fuzzy* PID memiliki nilai *Settling time* terbaik. *Settling time* adalah waktu yang

dibutuhkan oleh sistem untuk mencapai kestabilan. Gambar 18 menggambarkan grafik respon sistem untuk ketiga sistem tersebut.



Gambar 18. Grafik Perbandingan Respon Sistem untuk semua sistem.

Nilai parameter PID pada sistem kendali PID tetap dan tidak berubah untuk setiap *Set point*. Jika terjadi gangguan pada sistem kendali PID, respon sistem akan menurun dan sulit untuk kembali ke kondisi stabil. Namun berbeda dengan nilai parameter PID pada sistem kendali *Fuzzy PID*, parameter PID pada sistem kendali *Fuzzy PID* selalu berubah secara dinamis sesuai dengan perubahan nilai *Error* yang terjadi saat terjadi gangguan sehingga dapat untuk mengembalikan sistem ke kondisi stabil.

#### 4. Kesimpulan

Respon sistem hasil pengujian Sistem Kendali PID untuk kecepatan Motor DC dengan *Set point* 8100 sudah baik. *Settling time* yang terjadi adalah 8,44 detik, *Rise time* sebesar 3,66 detik, *Overshoot* sebesar 0,1852%, dan *Steady State Error* = 0. Respon sistem hasil pengujian Sistem Kendali *Fuzzy PID* untuk kecepatan Motor DC maksimum atau *Set point* 8100 juga sudah baik. *Settling time* yang terjadi adalah 7,04 detik, lebih cepat daripada *Settling time* yang dihasilkan oleh sistem kendali PID. Selanjutnya, *Rise time* sebesar 3,58 detik, *Overshoot* sebesar 1,2963%, dan *Steady State Error* = 0. Nilai *Overshoot* pada pengujian Sistem Kendali PID dan Sistem Kendali *Fuzzy PID* masih dalam batas toleransi kestabilan, yaitu 5% dari nilai *Set point* atau 405 rpm. Pada pengujian Sistem Kendali PID, terjadi *Peak* maksimal sebesar 8115 rpm, yang berarti terdapat perbedaan sebesar 15 rpm dengan nilai *Set point* (8100 rpm), namun masih dalam batas toleransi. Pada pengujian Sistem Kendali *Fuzzy PID*, terjadi *Peak* maksimal sebesar 8205 rpm, yang berarti terdapat perbedaan sebesar 105 rpm dengan nilai *Set point* (8100 rpm), namun juga masih dalam batas toleransi. Jika dibandingkan antara respon sistem pengujian Sistem Kendali PID dan Sistem Kendali *Fuzzy PID* dalam penelitian ini, dapat dilihat bahwa terdapat peningkatan pada parameter *Settling time* dan *Rise time* dalam pengujian Sistem Kendali *Fuzzy PID*. Hal ini menunjukkan bahwa Sistem Kendali *Fuzzy PID* lebih baik daripada Sistem Kendali PID.

#### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis sampaikan kepada Tim TELKA yang telah meluangkan waktu untuk membuat template ini.

#### Referensi

- [1] Nurhayati, A., Jaya, S. N., Aliansyah, A. N., Pagiling, L., Alam, W. O. S. N., & Nur, M. N. A. (2022). Analisis *Tuning* Parameter PID Menggunakan Algoritma Genetika pada Pengontrolan Kecepatan Motor DC. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 21(2), 287–296. <https://doi.org/10.24843/MITE.2022.v21i02.P17>
- [2] Hidayat, D., As'ari, E. S., & Syafei, N. S. (2017). Implementasi Pengontrol PID Pada Model Fisis Elektronik. *EKSAKTA*, 18(02), 178–185.

- <https://doi.org/10.24036/eksakta/vol18-iss02/75>
- [3] Khadari, I., Subiyanto, S., & Prastiyanto, D. (2019). Simulasi Kontroler PID *Tuning* Menggunakan Logika *Fuzzy* dan Algoritma Genetika Sebagai Pengendali Kecepatan Motor DC. *Jurnal Ilmiah Setrum*, 8(2), 186–196.
- [4] Bansal, U. K., & Narvey, R. (2013). Speed Control of DC Motor Using *Fuzzy* PID Controller. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 3(9), 1209–1220. <http://www.ripublication.com/aeee.htm>
- [5] Ma'arif, A., Istiarno, R., & Sunardi, S. (2021). Kontrol Proporsional Integral Derivatif (PID) pada Kecepatan Sudut Motor DC dengan Pemodelan Identifikasi Sistem dan *Tuning*. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 9(2), 374–388. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v9i2.374>
- [6] Kurniawan, F. F., Endramawan, P., & Hardiyanto, D. (2022). Rancang Bangun Pengatur Kecepatan Motor DC Dengan PWM Berbasis Arduino Nano. *JUPITER (Jurnal Pendidikan Teknik Elektro)*, 07(02), 9–16.
- [7] Fahmizal, F., Fathuddin, F., & Susanto, R. (2018). Identifikasi Sistem Motor DC dan Kendali Linear Quadratic Regulator Berbasis Arduino-Simulink Matlab. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 17(2), 299–306. <https://doi.org/10.24843/mite.2018.v17i02.p20>
- [8] Anggraini, S. F., Ma'arif, A., & Puriyanto, R. D. (2020). Pengendali PID pada Motor DC dan *Tuning* Menggunakan Metode Differential Evolution. *TELKA*, 6(2), 147–159.
- [9] Setiawan, I. (2008). *Kontrol PID Untuk Proses Industri*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo.
- [10] Kusumadewi, S., & Purnomo, H. (2010). *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan* (2nd ed.). Yogyakarta: Graha Ilmu.