

Implementasi *Fuzzy Logic Controller* sebagai Pengendali Posisi Motor Servo

Sigit Sasongko

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Informasi dan Elektro

Universitas Teknologi Yogyakarta

Jl. Ringroad Utara Jombor Sleman Yogyakarta

E-mail : siko.spade31@gmail.com

ABSTRAK

Fuzzy Logic Controller memberikan alternatif lain dalam sistem kendali. Begitu banyak sistem kendali industri pada tahun 1940 dan 1950 menggunakan pengendali PID untuk mengendalikan tekanan, suhu, dan sebagainya. Namun, dalam implementasinya masih banyak parameter-parameter pada PID yang masih kurang dalam hal peningkatan kualitas, maka dari itu diperlukan sebuah sistem yang mampu memenuhi hal tersebut. Proses *fuzzy inference* dalam *Fuzzy Logic Controller* terdiri atas 3 bagian yaitu fuzzifikasi, evaluasi *rule* dan defuzzifikasi. Fuzzifikasi mengubah nilai *crisp* input menjadi nilai *fuzzy input*. Proses evaluasi *rule* mengolah *fuzzy input* sehingga menghasilkan *fuzzy output*. Defuzzifikasi mengubah *fuzzy output* menjadi nilai *crisp output*. Metode yang digunakan mencakup Mamdani pada sisi fuzzifikasi dan Sugeno pada sisi output proses defuzzifikasi. PID Controller menggunakan metode Ziegler-Nichols *Quadrature Amplitude Decay* dalam menentukan parameter K_p , K_i , dan K_d . Hasil yang diperoleh pada proyek akhir ini adalah dalam hal *Time Constant*, *Rise Time*, *Settling Time*, dan *Delay Time*, *Fuzzy Logic Controller* memiliki waktu rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan *PID Controller*, hal ini menyebabkan respon transien dari metode fuzzy lebih lambat dibanding dengan Waktu *Steady State* PID mencapai 26.15625 ms, sedangkan waktu *Steady State* pada FLC mencapai 22.71625 ms, dalam hal ini fuzzy lebih lambat dibanding PID, akan tetapi fuzzy mampu menangani *overshoot* yang terjadi jauh lebih baik. Perbandingan antara parameter PID dan *Fuzzy Logic Controller* patut dianalisis dan dilakukan pembuktian secara mendalam untuk mengetahui mana yang lebih handal. Pengaplikasian *Fuzzy Logic Controller* mampu menyaingi kendali PID dalam ranah pemetaan kondisi dengan berbagai macam metode.

Kata kunci: *Fuzzy Logic Controller*, *PID*, *Motor Servo*, *Transient Response*

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir ini, terjadi peningkatan pesat terhadap performa khususnya dalam bidang otomasi. Tingkatan produktivitas dunia industri tidak dapat lepas dari peningkatan performa sistem kendali, maka dari itu pengembangan peralatan yang otomatis dan mempunyai tingkat kecerdasan yang tinggi semakin lama menggantikan peralatan manual. Presisi, kecepatan, dan kestabilan dalam sistem kendali otomatis menjadi suatu kewajiban yang harus dipenuhi dalam proses produksi. Pengembangan sistem kendali membutuhkan daya analisis dan teori yang kuat terhadap dasar sistem kendali. Begitu banyak sistem kendali industri pada tahun 1940 dan 1950 menggunakan pengendali PID untuk mengendalikan tekanan, suhu, dan sebagainya. Namun, dalam implementasinya masih banyak parameter-parameter pada PID yang masih kurang dalam hal peningkatan kualitas, maka dari itu diperlukan sebuah sistem yang mampu memenuhi hal tersebut. Pada tahun 1965, Dr. Lotfi Zadeh dari Universitas California memperkenalkan Logika Fuzzy, sebuah konsep baru yang berhadapan dengan konsep kebenaran sebagian. Konsep logika fuzzy dapat dikembangkan dalam kemajuan sistem kendali dan mampu bersaing dengan kendali PID konvensional. Aplikasi motor servo yang dikendalikan dengan *Fuzzy Logic Controller* memungkinkan sistem untuk mencapai *settling time* yang lebih cepat, *overshoot* yang lebih baik, dan *steady state error* yang lebih kecil. Perancangan sistem umumnya menggunakan *software* MATLAB sebagai media analisis. Perangkat mikrokontroler yang sering digunakan pada pengembangannya adalah Arduino. *Fuzzy Logic Controller* berpotensi memberikan performa yang lebih baik dan diperlukan sebuah analisis yang lebih mendalam. Pengembangan dan referensi yang mengangkat implementasi *Fuzzy Logic Controller* di dunia industri sangat sedikit, maka dari itu penulis mengangkat konsep ini untuk dijadikan sebagai proyek akhir.

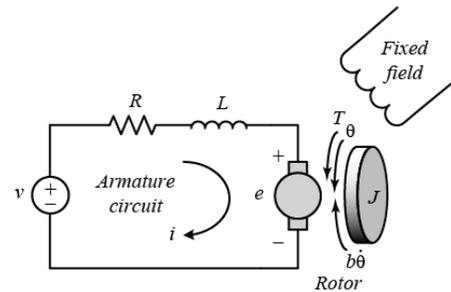
2. LANDASAN TEORI

Sistem kendali merupakan implementasi dari kehidupan masyarakat modern. Nise, Norman S.[1] menyatakan banyak aplikasi sistem kendali di sekitar kita, seperti : Roket Api, Pesawat luar angkasa yang mengelilingi bumi, Perangkat pengantar barang otomatis dalam sebuah pabrik perakitan, dan sebagainya. Itu hanya beberapa contoh sistem kendali otomatis yang dapat diciptakan sendiri. Kita bukan satu-satunya pencipta sistem kendali otomatis, sistem otomatis juga dapat tercipta oleh alam. Dalam tubuh kita sendiri banyak sistem kendali seperti pankreas untuk mengatur gula darah, detak jantung (adrenalin)

saat lari, tangan saat memindahkan benda, mata yang mengikuti objek untuk disimpan dalam memori otak dan sebagainya. Sistem kendali terdiri dari *subsystem* dan proses (*plant*) yang dibangun untuk mendapatkan keluaran yang diinginkan sesuai dengan nilai *setpoint*. Dalam dasar sistem kendali, terdapat dua sistem konfigurasi utama dan yang sering digunakan adalah sistem *Open Loop* dan *Close Loop*[2] Sistem kendali yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem *close loop* yang di mana nilai keluaran posisi akan di-*feedback* menggunakan sebuah sensor dan dilakukan perbandingan terhadap nilai referensi.

2.1. Motor DC Servo

Aktuator yang sering digunakan dalam sistem kendali adalah motor DC. Poros pada motor DC memberikan gerakan putar, dan jika ditambahkan dengan roda atau beban lainnya akan mengakibatkan gerakan translasi.[3] Rangkaian ekuivalen dari armatur dan diagram pada rotor dapat ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1: Rangkaian ekuivalen armatur dan diagram pada rotor

Proyek akhir ini fokus pada pengamatan posisi sebagai *output*, posisi dapat diperoleh dengan mengintegrasikan kecepatan. Persamaan fungsi alih ditransformasikan dalam bentuk persamaan Laplace untuk mempermudah analisis. Nilai keluaran posisi dan kecepatan dibandingkan untuk mendapatkan persamaan fungsi alih motor DC seperti berikut.

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s((Js+b)(Ls+R)+K^2)}$$

Dengan parameter fisik motor DC sebagai berikut.

- J = *Moment of inertia of the rotor* ($\text{Kg m}^2/\text{s}^2$)
- b = *Motor viscous friction constant* (Nms)
- K_e = *Electromotive force constant* (V/rad/sec)
- K_t = *Motor Torque Constant* (Nm/Amp)
- R = *Electric Resistance* (Ω)
- L = *Electric Inductance* (H)

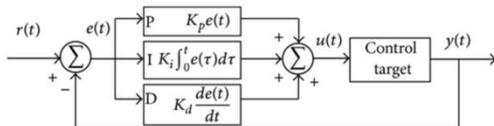
Parameter fisik dapat diperoleh dari berbagai referensi dan hasil eksperimen seperti menggunakan metode *Trial and Error*, *Recursive Least Square*, dan sebagainya. Persamaan juga dapat dinyatakan dalam bentuk *state-space* dengan menentukan posisi motor, kecepatan motor dan arus jangkar sebagai variabel. Tegangan armatur dianggap sebagai *input* dan posisi dianggap sebagai *output*.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} \\ 0 & -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix}$$

2.2. PID Controller

PID merupakan sebuah pengendali untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut. Komponen kontrol PID ini terdiri dari tiga jenis yaitu Proportional, Integratif dan Derivatif. Ketiganya dapat dipakai bersamaan maupun sendiri-sendiri tergantung dari respon yang diinginkan terhadap suatu *plant*. [4] *Plant* yang digunakan pada proyek akhir ini adalah sebuah motor DC. Blok diagram perancangan PID Controller dapat dilihat pada Gambar 2 sebagai berikut.



Gambar 2: PID Controller

PID Controller menggunakan parameter K_p , K_i , dan K_d untuk menentukan nilai PWM sebagai penguat kecepatan untuk menggerakkan poros motor DC. Masing-masing parameter mempunyai fungsi untuk menentukan karakteristik respon yang akan digunakan.

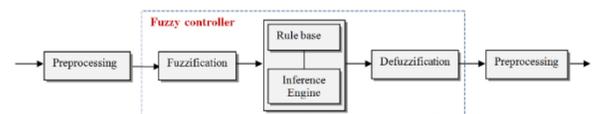
- K_p dapat menambah dan mengurangi kestabilan motor dalam mencapai *setpoint*.
- K_i dapat menghilangkan *steady state error* akan tetapi respon motor lebih lambat.
- K_d dapat meredam osilasi sehingga dapat memperbesar pemberian nilai K_p . Dalam hal ini motor dapat mencapai *setpoint* dengan kecepatan

yang lebih tinggi dan *overshoot* yang lebih rendah.

Tuning parameter dilakukan untuk menentukan nilai PID yang sesuai dengan karakteristik motor yang digunakan. Metode *tuning* Ziegler-Nichols sangat banyak digunakan dalam sistem kendali PID seperti *tuning* kurva reaksi, osilasi, dan QAD (Quarter Amplitude Decay). Penelitian ini menggunakan metode QAD untuk mendapatkan parameter PID.

2.3. Fuzzy Logic Controller

Fuzzy Logic Controller memberikan alternatif lain dalam sistem kendali. Dalam *Fuzzy Logic Controller* tidak diperlukan model matematika dari sistem karena bekerja berdasarkan rule-rule yang diekstrak sesuai dengan pemikiran dan pengetahuan manusia baik sebagai operator maupun ahli. Dalam penelitian ini disajikan implementasi *Fuzzy Logic Controller* untuk pengaturan kecepatan motor universal. H. Samsul Bachri M. [5] mendefinisikan bahwa proses *fuzzy inference* dalam *Fuzzy Logic Controller* terdiri atas 3 bagian yaitu fuzzifikasi, evaluasi rule dan defuzzifikasi. Fuzzifikasi mengubah nilai *crisp input* menjadi nilai *fuzzy input*. Proses evaluasi rule mengolah *fuzzy input* sehingga menghasilkan *fuzzy output*. Defuzzifikasi mengubah *fuzzy output* menjadi nilai *crisp output*. Metode Fuzzy yang paling sering digunakan adalah Mamdani, Tsukamoto dan Sugeno. Blok perancangan FLC pada penelitian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 3 sebagai berikut.



Gambar 3: Fuzzy Logic Controller

Sistem menggunakan *step respon* sebagai nilai masukan untuk mengatur posisi motor. *Step time* diatur sebesar 1 ms agar grafik yang ditampilkan pada MATLAB tidak mengalami *delay time* yang cukup tinggi. *Crisp value* hasil keluaran proses defuzzifikasi selanjutnya akan dikuatkan dan mengatur nilai PWM motor DC sesuai dengan *setpoint*. Proses Fuzzy Logic Controller dapat dijabarkan sebagai berikut.

• Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses perubahan nilai *crisp* yang ada ke dalam fungsi keanggotaan. Penentuan derajat keanggotaan umumnya menggunakan persamaan Triangular, Trapezoidal, Gaussian, dan sebagainya.

- Implication & Rule Base

Proses implikasi dalam menalar nilai masukan guna penentuan nilai keluaran sebagai bentuk pengambil keputusan. Salah satu model penalaran yang banyak digunakan adalah penalaran max-min. Dalam penalaran max-min proses pertama yang dilakukan adalah melakukan operasi min sinyal keluaran lapisan fuzzyfication, yang diteruskan dengan operasi max untuk mencari nilai keluaran yang selanjutnya akan di-fuzzyfication sebagai bentuk keluaran pengendali.

Aturan dasar (*Rule Based*) pada *Fuzzy Logic Controller* merupakan suatu bentuk aturan relasi "If-Then" seperti pada pernyataan berikut: "JIKA" X=A DAN "JIKA" Y=B "MAKA" Z=C.

- Defuzzyfikasi

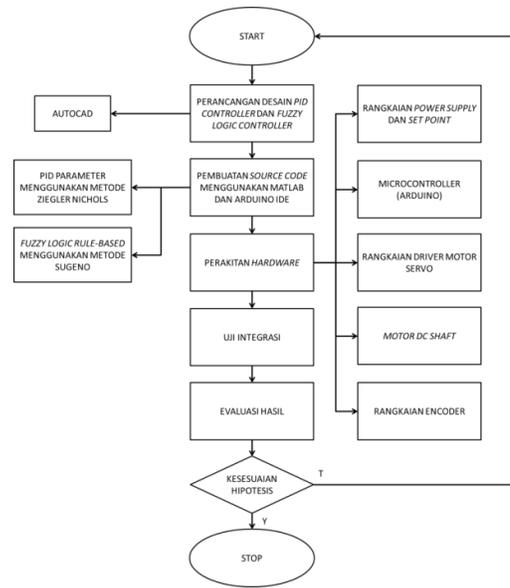
Proses defuzzyfikasi bertujuan untuk mengubah nilai fuzzy menjadi nilai *crisp*, metode yang paling umum digunakan adalah metode Sugeno. Rumus dari penalaran Sugeno dapat ditunjukkan sebagai berikut.

$$z^* = \frac{\sum \mu_c(\bar{z}) \cdot \bar{z}}{\sum \mu_c(\bar{z})}$$

Nilai $\mu_c(\bar{z})$ didapatkan dari nilai min antara *input error* dengan *change of error*, sedangkan nilai \bar{z} didapatkan dari *single-ton PWM*.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian menekankan hasil riset yang telah dilakukan sebelumnya dan membandingkan performa antara dua sistem kendali yaitu *PID Controller* dan *Fuzzy Logic Controller*. Penelitian diawali dengan perancangan desain kendali posisi pada motor DC kemudian diikuti dengan pembuatan *source code* pada MATLAB dan perakitan *hardware*. Diagram alur penelitian dapat ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4: Alur Penelitian

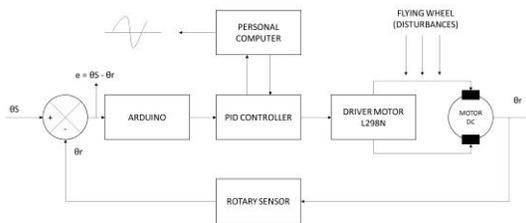
Perancangan desain menggunakan *software* Autocad untuk membantu memberikan gambaran tata letak dari masing-masing komponen. Pembuatan *source code* yang digunakan pada penelitian ini mencakup satu metode pada masing-masing implementasi sistem kendali. Kendali PID menggunakan metode Ziegler Nichols untuk menentukan nilai dari parameter K_p , T_i , dan T_d . [6] *Fuzzy Logic Controller* menggunakan metode Sugeno untuk menentukan *Rule-Based* yang akan digunakan untuk mengendalikan posisi poros motor DC. *Software* Matlab dan Arduino IDE digunakan untuk membuat sistem embedded pada penelitian ini. Perakitan hardware terdiri dari beberapa bagian, di antaranya Rangkaian Power Supply dan Pengaturan Parameter *Set Point*, Mikrokontroler, Rangkaian Driver Motor DC, Motor DC *Shaft*, dan Rangkaian Encoder. Setelah tiap unit rangkaian berhasil dirakit, maka selanjutnya akan dilakukan uji integrasi. Uji integrasi bertujuan untuk menguji sistem dari proyek ini secara keseluruhan mulai dari pengambilan data nilai tegangan yang akan digunakan, nilai *set point* yang diatur, tingkat presisi sudut poros motor terhadap nilai *set point* yang diatur, dan nilai *feedback* dari sensor *rotary* dan akan dilakukan evaluasi terhadap hasil dari uji integrasi, analisis perbandingan antara kedua sistem kendali akan dilakukan pada tahap ini. Apabila terdapat ketidaksesuaian data dengan hipotesis yang telah dibuatkan, maka akan dilakukan pengecekan kembali mulai dari awal diagram alur penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Perancangan Hardware

a. Perancangan *PID Controller*

Perancangan sistem pada penelitian ini memerlukan nilai parameter yang akan digunakan. Dalam *PID Controller* seperti pada Gambar 5, sistem perlu menentukan nilai K_p , K_i , dan K_d terlebih dahulu. PWM yang dihasilkan pada *board* Arduino mempunyai *range* 0-5V, jika lebih atau kurang dari nilai tersebut, maka program yang dijalankan akan dihentikan secara otomatis oleh MATLAB.



Gambar 5: Perancangan sistem *PID Controller* motor DC

Jenis motor yang digunakan pada proyek akhir ini adalah JGA25-370 dengan spesifikasi yang telah dijelaskan pada bab 3. Berdasarkan informasi yang didapatkan baik dari sisi penjual menggunakan tabel *nameplate*, informasi yang didapatkan melalui berbagai buku referensi, internet, perhitungan fisika, dan eksperimen, parameter yang terdapat pada motor DC yang digunakan dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Motor DC JGA25-370

No	Parameter yang digunakan	Simbol	Nilai
1	Moment of inertia of the rotor ($\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)	J	0,01
2	Motor viscous friction constant (Nms)	b	0,1
3	Electromotive force constant ($\text{V}/\text{rad}/\text{sec}$)	K_e	0,01
4	Motor Torque Constant (Nm/Amp)	K_t	0,0735
5	Electric Resistance (Ω)	R	11
6	Electric Inductance (H)	L	0,5

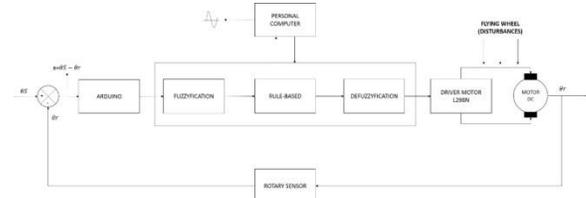
Parameter PID telah diperoleh melalui perhitungan yang dilakukan berdasarkan parameter fisik yang ada pada motor. Persamaan fungsi alih motor diperoleh menggunakan metode Ziegler-Nichols *tuning* QAD.

$$T.F. = \frac{K_p}{0,068S^3 + 2,18S^2 + 15,03S + K_p}$$

Nilai K_p yang diperoleh sebesar 289, K_i sebesar 1376,211 dan K_d sebesar 15,17. Hasil penelitian dilakukan lebih lanjut dan nilai yang diperoleh tersebut dibuat optimal dengan cara dibagi dengan 1000 agar dapat disesuaikan dengan *range* sinyal PWM yang dihasilkan.

b. Perancangan *Fuzzy Logic Controller*

Perancangan sistem pada *Fuzzy Logic Controller* memanfaatkan beberapa prosedur dan fungsi sesuai dengan tahapan sistem. Berbeda dengan *PID Controller*, sistem *Fuzzy Logic Controller* menggunakan tahapan *fuzzification*, *implication*, dan *defuzzification* untuk memberikan kesimpulan nilai PWM yang sesuai dengan keadaan sistem. PWM yang dihasilkan pada *board* Arduino mempunyai *range* 0-5, jika lebih atau kurang dari nilai tersebut, maka program akan melakukan *constrain* terhadap nilai PWM agar tetap berada dalam batasan *range* yang diizinkan. *Fuzzy Logic Controller* mengizinkan nilai toleransi *error* yang persentasenya diatur berdasarkan tingkat ketajaman sistem dalam menentukan *actual_position*.

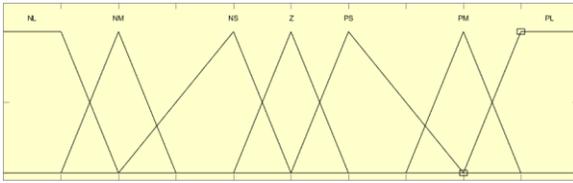


Gambar 6: Perancangan sistem *Fuzzy Logic Controller* motor DC

Tahapan metode dalam fuzzy dapat dijabarkan sebagai berikut.

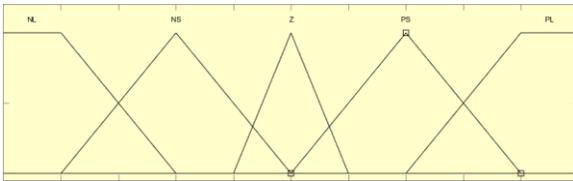
- Fuzzyfikasi

Proses Fuzzyfikasi dilakukan dengan membuat fungsi keanggotaan terhadap sudut *error* dan sudut *change of error*. Nilai masukan *error* dibagi menjadi 7 fungsi keanggotaan yang mempunyai batas-batas derajat keanggotaan di antaranya Negative Large (NLL), Negative Medium (NM), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS), Positive Medium (PM), Positive Large (PL). Pengelompokan fungsi keanggotaan *error* dapat dilihat pada Gambar 7 sebagai berikut.



Gambar 7: Fungsi Keanggotaan error, $\mu_e(x1)$

sedangkan masukan *change of error* dibagi menjadi 5 fungsi keanggotaan di antaranya Negative Large (NL), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS), Positive Large (PL) seperti yang dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8: Fungsi Keanggotaan change of error, $\mu_{ce}(x2)$

- Rule Based

Matriks *Fuzzy-Rule-Based* digunakan sebagai algoritma *Fuzzy Logic Controller* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Baris atas dan kolom kiri dari matriks mengindikasikan himpunan fuzzy dari variabel e dan ce . Terdapat $7 \times 5 = 35$ aturan yang terdapat dalam matriks. Sistem inference mamdani dan sugeno diterapkan dalam sistem kendali pada penelitian ini.

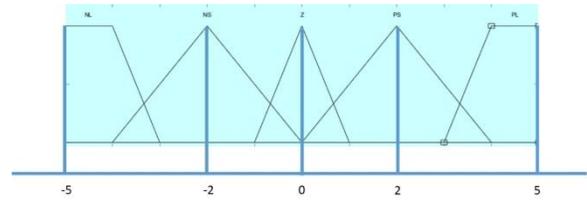
Tabel 2. *Fuzzy Rule Based*

$e \backslash ce$	NL	NS	Z	PS	PL
NL	NL	NL	NL	NS	NS
NM	NL	NL	NS	NS	Z
NS	NL	NS	NS	Z	Z
Z	NS	Z	Z	Z	PS
PS	Z	Z	PS	PS	PL
PM	Z	PS	PS	PL	PL
PL	PS	PS	PL	PL	PL

- Defuzzyfikasi

Penentuan nilai *output* menggunakan metode Sugeno memanfaatkan *center of single-ton* yang di mana dapat diperoleh melalui hasil rata-rata masing-masing fungsi keanggotaan pada variabel PWM. Hal ini merupakan sebuah kasus khusus yang mengikuti implementasi perbaikan sudut pada poros motor.

Nilai *single-ton* yang didapatkan dapat dilihat pada Gambar 9 sebagai berikut.



Gambar 9: Single-tone output PWM

c. Perancangan *Hardware*

Hasil perancangan komponen pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada Gambar 10 sebagai berikut.



Gambar 10: Perancangan *Hardware*

d. Perancangan Program

Perancangan menggunakan software Arduino IDE maupun MATLAB. Fungsi utama dalam *PID Controller* adalah fungsi *PIDCalculation()* yang berisi program sebagai berikut.

```
void PIDcalculation(){
error = setpoint - actual_position;
changeError = error - last_error;
totalError += error;
pidTerm = ((Kp * error) + (Ki * totalError) + (Kd * changeError))/1000000;
pidTerm_scaled = abs(pidTerm);
pidTerm = constrain(pidTerm, 0, 2);
}
```

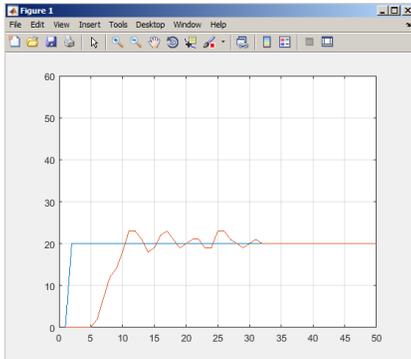
Sedangkan untuk *Fuzzy Logic Controller* mempunyai beberapa fungsi utama sebagai berikut.

```
void fuzzyLogicController() {
error = setpoint - actual_position;
if(error<0||error>0){
changeError += error;}
else {changeError=0;}
```

```
fuzzyfication();
implication();
defuzzyfication();
last_error = error;
}
```

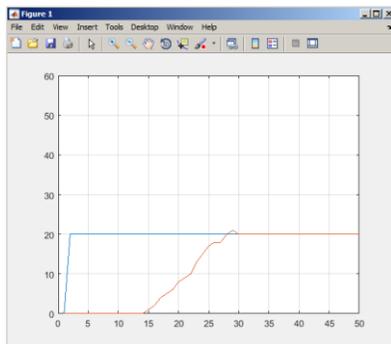
e. Hasil Pengujian

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, di dapatkan hasil pengujian *transient response* pada *PID Controller* sebagai berikut.



Gambar 11: Pengujian *Transient Response* *PID Controller*

Hasil pengujian (Gambar 11) dilakukan dan didapatkan hasil respon memiliki waktu delay yang tinggi dan waktu untuk mencapai respon *steady state* lebih lama dari sebelumnya, dibutuhkan waktu sekitar 3,25 detik sampai motor benar-benar berhenti. *Setpoint* yang diatur 20^0 dengan *Load* sebanyak 3. Hasil pengujian *transient response* *Fuzzy Logic Controller* dapat dilihat pada Gambar 12 sebagai berikut.



Gambar 12: Pengujian *Transient Response* *Fuzzy Logic Controller*

Hasil pengujian dilakukan dan didapatkan hasil respon memiliki waktu delay yang lebih tinggi dari pengujian transien pada PID akan tetapi waktu untuk mencapai respon *steady state* lebih cepat dan *overshoot* yang terjadi tidak terlalu banyak,

dibutuhkan waktu sekitar 3 detik sampai motor benar-benar berhenti. *Setpoint* yang diatur 200 dengan *Load* sebanyak 3. Berikut dijabarkan perbandingan hasil pengujian *transient response* yang telah dilakukan seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan hasil pengujian *transient response*

No	<i>Transient Response</i>	<i>PID Controller</i>	<i>Fuzzy Logic Controller</i>	<i>Difference</i>
1	<i>Time Constant (ms)</i>	9.6435	16.905	8.369
2	<i>Rise Time (ms)</i>	12.107	21.001	12.6425
3	<i>Steady State Time (ms)</i>	26.15625	22.71625	27.52
4	<i>Settling Time (ms)</i>	25.375	26.8125	9.6875
5	<i>Delay Time</i>	7.62	12.25	5.495
6	<i>Maximum Overshoot (%)</i>	42.5	8.75	33.75

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, *time constant* atau waktu sistem Kecepatan respon yang diukur mulai dari $t = 0$ sampai dengan respon mencapai 63,2% dari respon *steady state*. Waktu yang dibutuhkan sistem saat menggunakan metode PID memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan dengan *Fuzzy Logic Controller*, hal ini dapat dilihat dari Gambar 5.38. *Rise Time* atau waktu kenaikan dihitung dari 5% sampai dengan 95% pergerakan motor hingga mencapai respon *steady state*, *Fuzzy Logic Controller* memiliki waktu yang lebih cepat jika dibandingkan dengan *PID Controller*, selisih rata-rata yang dialami mencapai 8,894 ms tentunya hal ini sangat baik akan tetapi dapat menimbulkan *overshoot* dan daya osilasi yang tinggi pada sistem, akan tetapi hal itu tergantung dari waktu kenaikan yang terjadi saat mencapai *steady state*. Semakin tinggi *rise time* yang dialami maka akan semakin sulit sistem untuk stabil, akan tetapi semakin lama waktu kenaikan maka semakin lama sistem mencapai *steady state*. *Settling Time* rata-rata dari *Fuzzy Logic Controller* hampir sama dengan *PID Controller* yaitu berkisar 26.8125 ms yang merupakan waktu 5% hingga mencapai kondisi *steady state*. PID sedikit lebih lambat dalam hal menangani waktu *settle*. Waktu tunda yang diperlukan bagi *Fuzzy Logic Controller* lebih tinggi sehingga tingkat keterlambatan respon sistem lebih tinggi dibandingkan *PID Controller*. *Overshoot* yang

dialami *PID Controller* jauh lebih besar dibandingkan dengan *Fuzzy Logic Controller*, persentase osilasi yang terjadi antara PID dengan *Fuzzy Logic* mempunyai selisih rata-rata yang berkisar antara 33,75 derajat. Hal ini membuktikan bahwa dengan menggunakan metode *Fuzzy Logic Controller* yang memanfaatkan *rule* yang lebih fleksibel mampu meng-handle *overshoot* yang terjadi pada sistem.

5. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Setelah melakukan perencanaan dan pembuatan sistem kemudian dilakukan pengujian dan analisisnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan tentang sistem kerja alat, yaitu sebagai berikut:

- a. Pengaturan posisi motor DC menggunakan *Fuzzy Logic Controller* dilakukan dengan cara mengatur nilai sudut referensi (*setpoint*), kemudian motor akan berputar dengan menyesuaikan kecepatan dan posisi melalui berbagai proses, yaitu dengan menentukan fungsi keanggotaan terhadap *error* dan *change of error* yang terjadi (*Fuzzyfication*), menentukan aturan dasar (*rule base*) dengan membandingkan nilai *error* dan *change of error* yang didapatkan, serta mengestimasi hasil penguatan nilai *z* atau PWM pada motor dengan menggunakan metode Sugeno (*Defuzzyfication*).
- b. Sistem yang dihasilkan memiliki time setting 0 hingga 20 detik dan *maximum overshoot* yang dihasilkan sistem PID sebesar 0-50⁰, sedangkan *Fuzzy Logic Controller* menghasilkan sebesar 0-40⁰ pada tegangan kerja 2-5 V
- c. Dalam hal *Time Constant*, *Rise Time*, *Settling Time*, dan *Delay Time*, *Fuzzy Logic Controller* memiliki waktu rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan *PID Controller*, hal ini menyebabkan respon transien dari metode fuzzy lebih lambat dibanding dengan PID. Akan tetapi fuzzy mampu menangani *overshoot* yang terjadi jauh lebih baik.
- d. Pada sistem *Fuzzy Logic Controller*, pengaturan parameter pengendalian posisi dilakukan dengan cara menganalisis nilai minimal dan maksimal *error* yang terjadi, kemudian nilai tersebut dikelompokkan menjadi sebuah fungsi keanggotaan *error* dan *change of error*. Jumlah variabel keanggotaan ditentukan dengan mempertimbangkan besarnya *error*, semakin besar nilai *error* maka semakin banyak aturan dasar yang perlu digunakan untuk mencapai keakuratan.

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada proyek akhir ini, terdapat beberapa saran yang diberikan baik dari segi kekurangan maupun untuk peneliti selanjutnya sebagai berikut:

- a. Tegangan *rate* yang bekerja pada motor hanya sebatas 12 V, dianjurkan dapat bekerja lebih tinggi untuk mendapatkan respon yang maksimal.
- b. Parameter fisik pada motor masih menggunakan metode estimasi dan belum menekankan dari hasil eksperimen, diharapkan penelitian ini mampu mendapatkan parameter fisik yang lebih akurat.
- c. *Software* yang digunakan belum sepenuhnya menggunakan Simulink sebagai media analisis dikarenakan keterbatasan spesifikasi dari komputer yang digunakan, diharapkan mampu dianalisis dengan media yang memadai.
- d. Sistem pada proyek akhir ini masih memanfaatkan karet sebagai *gear* untuk mengatur sensor posisi, hal ini tentunya mempengaruhi keakuratan sensor dalam membaca posisi poros motor, maka dari itu perlu dilakukan *upgrade* terhadap sistem untuk menggunakan *gear* berupa gigi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nise, Norman S. 2011. "Control Systems Engineering 6th edition," New York
- [2] Ogata, Katsuhiko (2010), Modern Control Engineering fifth edition. New York: PrenticeHall, Inc.
- [3] Ringo Kusditya Nugraha (2009), "Sistem Keamanan Rumah Berbasis Pengenalan Wicara Menggunakan DSK TMS320C6713 (Perangkat Keras)". Proyek Akhir :T. Elektronika PENS – ITS.
- [4] Royyan, M. (2015), "Implementation of Kalman Filter and PID Controller for Inverted Pendulum Robot". Bandung. Telkom University.
- [5] Bahri, Samsul H. (2004), Sistem Kendali Hybrid PID - Logika Fuzzy pada Pengaturan Kecepatan Motor DC, vol 8, 25-34.
- [6] Hartono, Budi, N. (2017), "Pengaturan Posisi Motor Servo DC dengan Metode P, PI, dan PID". Surabaya.