

ANALISIS PENGGUNAAN *INVERTED PENDULUM* DENGAN MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC*

Devita Yuliani (mahasiswa)¹, Agus Suprajitno (Pembimbing 1)², Dr. Hj. Sri Arttini D P, MSi (Pembimbing 2)³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA)

^{1,2,3} Jl. Kaligawe Raya No.KM. 4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112

¹ devita.yuliani@std.unissula.ac.id

Abstrak - *Inverted pendulum merupakan sistem dinamik yang tidak stabil. Dengan penggunaan umpan balik, sistem ini dapat distabilkan dan dikendalikan. Alasan dibalik pembelajaran mengenai pendulum adalah berdasarkan pada fakta bahwa banyak rekayasa sistem yang dimodelkan sebagai pendulum. Misalnya dalam vektor kendali pendorong roket, dinamika lapangan roket dapat didekati dengan pendulum sederhana.*

Penelitian ini membahas tentang analisa penggunaan inverted pendulum dengan menggunakan fuzzy logi. Didalam penelitian tersebut membahas tentang mekanik elektronika yang digunakan terdiri dari potensiometer, motor dc, driver motor hingga software-nya yaitu proses yang meliputi pengontrolan robot yang menggunakan arduino. Sistem kontrol yang digunakan adalah bahasa pemrograman fuzzy logic dengan metode mamdani.

Dari hasil penelitian dan hasil pengujian alat didapatkan bahwa input terdiri dari sudut dan delta sudut sedangkan untuk outputnya terdiri dari arah dan kecepatan. Sudut dan delta sudut didapatkan nilai 70° (kiri) $\geq x \geq 70^\circ$ (kanan) berdasarkan pengukuran sudut dan nilai $-80 \geq \text{Nilai ADC} \geq 80$. Arah dan kecepatan menghasilkan bahwa semakin besar sudut pada pengukuran maka semakin besar nilai PWM dan semakin cepat putaran motornya. Selain itu, alat tersebut belum mampu menyeimbangkan tongkat atau pendulum sendiri pada titik 0° . Hal itu dikarenakan, adanya waktu henti atau delay pada fuzzy saat pembacaan program.

Kata Kunci : *Pendulum, Inverted Pendulum, Sistem Kontrol, Fuzzy Logic, Mamdani*

Abstract - *Inverted pendulum is an unstable dynamic system. With the use of feedback, this system can be stabilized and controlled. The reason behind learning about the pendulum is based on the fact that a lot of engineering systems are modeled as pendulums. For example in the rocket driving vector control, the dynamics of the rocket field can be approached with a simple pendulum.*

This study discusses the analysis of the use of inverted pendulums using fuzzy logic. In this research, the electronic mechanics used consist of potentiometers, dc motors, motor drivers and software, which is a process that includes controlling robots that use Arduino. The control system used is the fuzzy logic programming language with the Mamdani method.

From the results of research and testing results obtained that the input consists of angles and delta angles while the output consists of direction and speed. Angular angles and deltas obtained values of 70° (left) $\geq x \geq 70^\circ$ (right) based on measurement of angle and value of $-80 \geq \text{ADC value} \geq 80$. Direction and speed produce that the greater the angle value of the measurement, the greater the PWM value and the more quickly turn the motor. In addition, the device has not been able to balance its own stick or pendulum at 0° . That is because, there is a downtime or delay in fuzzy when reading the program.

Keywords: *Pendulum, Inverted Pendulum, Control System, Fuzzy Logic, Mamdani*

I. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang Masalah

Alasan dibalik pembelajaran mengenai pendulum adalah berdasarkan pada fakta bahwa banyak rekayasa sistem yang dimodelkan sebagai pendulum. Misalnya dalam vektor kendali pendorong roket, dinamika lapangan roket dapat didekati dengan pendulum sederhana. Dalam dunia biomekanik, pendulum digunakan untuk memodelkan bipedal yang berjalan dinamis dan juga digunakan dalam studi gerak roda dan mekanisme penyeimbangan.

Konsep sederhana dari *inverted pendulum* itu sendiri adalah ketika kita menyeimbangkan sebuah tongkat diatas telapak tangan, maka tangan akan bergerak merespon gerakan dari tongkat untuk menyeimbangkan posisi dari tongkat tersebut. Sistem kontrol yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fuzzy logic* atau logika *fuzzy*.

Oleh karena itu, pada Tugas Akhir ini dilakukan suatu analisis penggunaan *inverted pendulum* dengan menggunakan *fuzzy logic* agar keseimbangan gerak arah pendulum bisa diatur dan tetap terjaga arah geraknya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah, perumusan masalah pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana cara kerja *fuzzy logic* didalam *inverted pendulum*?

2. Bagaimana kerja potensiometer dalam menentukan titik kesetimbangan pada *inverted pendulum*?
3. Bagaimana *rule* atau aturan penggunaan *fuzzy logic* pada *inverted pendulum*?
4. Bagaimana kinerja sistem kontrol *fuzzy logic* dengan PID pada *inverted pendulum*?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyederhanakan permasalahan pada Tugas Akhir ini, maka diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Inverted pendulum dengan desain sebagai berikut:
 - Baterai Li-Po 3cell 8volt
 - Setpoint PWM motor ± 255
 - Tongkat Setinggi 35cm
2. Pergerakan tongkat dengan arah gerak motor berupa maju (Kanan) dan mundur (Kiri).
3. Potensiometer digunakan sebagai pengatur kesetimbangan.
4. Perhitungan matematis pada *inverted pendulum* tidak diperlu diperhatikan.
5. *Fuzzy Logic* yang digunakan adalah metode Mamdani dengan *defuzifikasi Centroid Diskrit*.
6. Terdiri dari 3 pengujian yaitu pengujian potensiometer berdasarkan sudut, pengujian potensiometer berdasarkan arduino, dan pengujian arah dan kecepatan motor.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang masalah, tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Mampu memahami dan mengerti cara kerja *fuzzy logic* dalam *inverted pendulum* sederhana.
2. Mampu mengerti dan memahami cara kerja sensor potensio pada kesetimbangan *inverted pendulum*.
3. Mampu mengerti dan memahami *rule* atau aturan penggunaan program *fuzzy logic* pada *inverted pendulum*.
4. Mampu mengerti dan memahami kinerja sistem kontrol *fuzzy logic* dengan PID pada *inverted pendulum*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan penulis dari penelitian ini adalah:

- Bagi Penulis
 1. Sebagai jalur untuk mempraktikkan pengetahuan yang telah dipelajari dibidang sistem kontrol atau kendali.
 2. Memperoleh ilmu pengetahuan dan wawasan baru dari penggunaan sistem kontrol *fuzzy logic* dengan metode Mamdani pada *inverted pendulum*.
- Bagi Pembaca
 1. Sebagai ruang untuk saling berbagi pikiran didalam penggunaan *inverted pendulum* dengan menggunakan sistem kontrol *fuzzy logic*.
 2. Memperluas arah ruang gerak untuk bereksperimen lebih kreatif dalam penggunaan *inverted pendulum*.
 3. Mendapatkan hasil dan pengetahuan baru dari hasil penggunaan *inverted pendulum* dengan menggunakan *fuzzy logic*.
- Bagi Kampus

Penelitian ini memungkinkan bisa untuk dilanjutkembangkan menjadi penelitian yang sesuai dengan ilmu dan permasalahan yang ada.

II. TINJAUAN PUSTAKA/LANDASAN TEORI

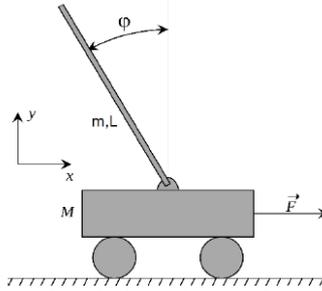
2.1 Pendulum

Pendulum merupakan sistem fisis yang didalamnya terkandung gejala fisika yang sangat menarik untuk dikaji. Pendulum sederhana terdiri dari seutas tali ringan dan sebuah bola kecil (bola pendulum) bermassa m yang digantungkan pada ujung tali, sebagaimana tampak pada gambar dibawah ini. Dalam menganalisis gerakan pendulum sederhana, (Bandul, 2017), bahwa perioda (lama gerak osilasi satu ayunan, T) dipengaruhi oleh panjang tali dan percepatan gravitasi.

Dalam kasus sederhana, gerakan pendulum mengabaikan kehadiran gaya gesekan dan diasumsikan bahwa sudut simpangan sangat kecil. Gerakan yang dihasilkan dari pendulum dengan kondisi semacam ini berupa gerak harmonik sederhana. Fitur utama dari gerak ini dimiliki pula oleh banyak sistem yang bersolasi.

2.2 Inverted Pendulum

Inverted pendulum adalah pendulum yang memiliki titik pusat masa diatas titik porosnya. Pada proses menyeimbangkan pendulum dititik tengah (sudut = 0°) diperlukan penggunaan sistem kontrol. Sistem kontrol yang sering digunakan adalah *PID controllers*, *neural networks*, *fuzzy control*, *genetic algorithms* dll.



Gambar 1 Contoh sederhana inverted pendulum

2.3 Fuzzy Logic

Soft Computing merupakan inovasi baru dalam membangun sistem cerdas. Sistem cerdas ini merupakan sistem yang memiliki keahlian seperti manusia pada domain tertentu, mampu beradaptasi dan belajar agar dapat bekerja lebih baik jika terjadi perubahan lingkungan. Sistem *fuzzy* secara umum terdapat 5 langkah dalam melakukan penalaran, yaitu:

1. Memasukkan input *fuzzy*.
2. Mengaplikasikan operator *fuzzy*.
3. Mengaplikasikan metode *implikasi*.
4. Komposisi semua output.
5. *Defuzzifikasi*.

Fuzzy logic adalah suatu cara yang tepat untuk memetakan suatu ruang input ke dalam ruang output. Untuk sistem yang sangat rumit, penggunaan logika *fuzzy* (*fuzzy logic*) adalah salah satu pemecahannya. Sistem tradisional dirancang untuk mengontrol keluaran tunggal yang berasal dari beberapa masukan yang tidak saling berhubungan.

Karena ketidaktergantungan ini, penambahan masukan yang baru akan memperumit proses kontrol dan membutuhkan proses perhitungan kembali dari semua fungsi.

2.4 Metode Mamdani

Metode Mamdani bekerja berdasarkan aturan-aturan linguistik. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim H. Mamdani pada tahun 1975. Untuk mendapatkan *output* (hasil), diperlukan 4 tahapan yaitu :

1. Pembentukan himpunan fuzzy
2. Aplikasi fungsi implikasi
3. Komposisi aturan

Ada 3 metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem *fuzzy*, yaitu :

- a. Metode *Max* (*Maximum*)
- b. Metode *Additive* (*Sum*)
- c. Metode Probabilistik (*probor*)

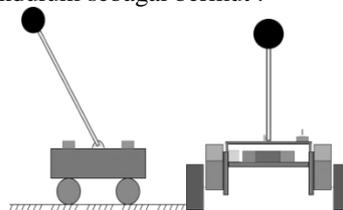
4. Defuzzifikasi

Input dari proses penegasan adalah suatu himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy, sedangkan output yang dihasilkan merupakan suatu bilangan real yang tegas. Sehingga jika diberikan suatu himpunan fuzzy dalam range tertentu, maka harus dapat diambil suatu nilai tegas tertentu sebagai output.

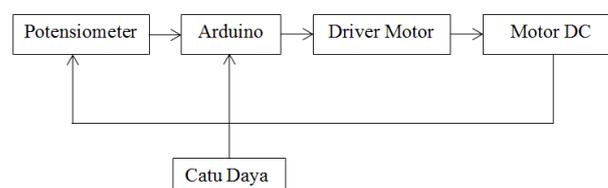
III. METODE PENELITIAN/EKSPERIMEN

3.1 Perancangan Hardware

Adapun penampang desain inverted pendulum sebagai berikut :



Gambar 2 Pemodelan inverted pendulum tampak bagian samping dan depan

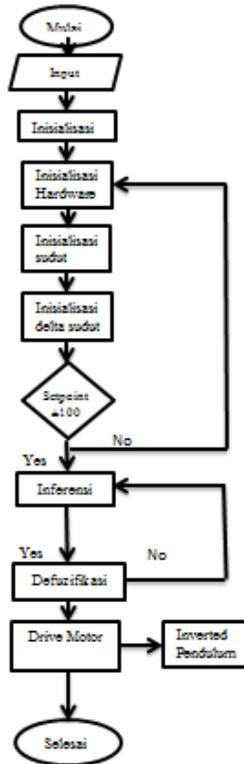


Gambar 3 Blok diagram *inverted* pendulum

3.2 Perancangan Software

Arduino Uno membutuhkan suatu software agar dapat menjadi suatu alat kendali untuk mengendalikan hardware yang telah dibuat. Pada perancangan hardware ini diperlukan adanya tahap demi tahap pada tiap rangkaian yang terdiri dari penentuan posisi pendulum terhadap arah gerak motor dan penentuan respon motor terhadap pendulum dengan posisi sudut sebelumnya untuk menentukan hasil output yang berupa cepat atau lambatnya gerak putaran motornya.

3.2.1 Flowchart Alur



3.3 Aturan/ Rule Base Pada Inverted Pendulum

Aturan/Rules

Tabel 1 Aturan/Rule Base Inverted Pendulum

Pendulum Delta_	Ki	AKi	T	Aka	Ka
N	BJSC	BJSC	BJC	BJS	H
C	BJC	BJS	H	SJS	SJC
P	H	SJS	SJC	SJSC	SJSC

1. If (sudut is Ki) and (delta_sudut is N) then (arah dan kecepatan is BJSC)
2. If (sudut is Ki) and (delta_sudut is C) then (arah dan kecepatan is BJC)
3. If (sudut is Ki) and (delta_sudut is P) then (arah dan kecepatan is H)
4. If (sudut is AKi) and (delta_sudut is N) then (arah dan kecepatan is BJSC)
5. If (sudut is AKi) and (delta_sudut is C) then (arah dan kecepatan is BJS)
6. If (sudut is AKi) and (delta_sudut is P) then (arah dan kecepatan is SJS)
7. If (sudut is T) and (delta_sudut is N) then (arah dan kecepatan is BJC)
8. If (sudut is T) and (delta_sudut is C) then (arah dan kecepatan is H)
9. If (Pendulum is T) and (delta_sudut is P) then (arah dan kecepatan is SJC)
10. If (sudut is AKA) and (delta_sudut is N) then (arah dan kecepatan is BJS)
11. If (sudut is AKA) and (delta_sudut is C) then (arah dan kecepatan is SJS)
12. If (sudut is AKA) and (delta_sudut is P) then (arah dan kecepatan is SJSC)
13. If (sudut is Ka) and (delta_sudut is N) then (arah dan kecepatan is H)
14. If (sudut is Ka) and (delta_sudut is C) then (arah dan kecepatan is SJC)
15. If (sudut is Ka) and (delta_sudut is P) then (arah dan kecepatan is SJSC)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Prototype Inverted Pendulum

Setelah semua alat atau komponen dirangkai sesuai dengan gambar diatas, maka menghasilkan sebuah alat *inverted* pendulum sebagai berikut :



Gambar 4 Bentuk *prototype* dari *inverted* pendulum

4.1.1 Rangkaian Potensiometer Sebagai Pengatur Keseimbangan

Dalam hal ini potensiometer digunakan sebagai pengatur keseimbangan posisi, karena memiliki kelebihan antara lain:

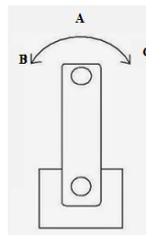
Dari segi mekanik, potensiometer dapat diletakkan pada sisi yang diinginkan karena dilihat dari bentuknya yang simple dan juga mendukung mekanik. Potensiometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah potensiometer *multiturn wirewound* 10K Ω .



Gambar 5 Potensiometer *wirewound multiturn*

Dari segi elektronik, penggunaan potensiometer sebagai pengatur keseimbangan cukup cocok digunakan karena hanya membutuhkan satu tegangan eksitasi dan biasanya tidak membutuhkan pengolahan sinyal yang rumit.

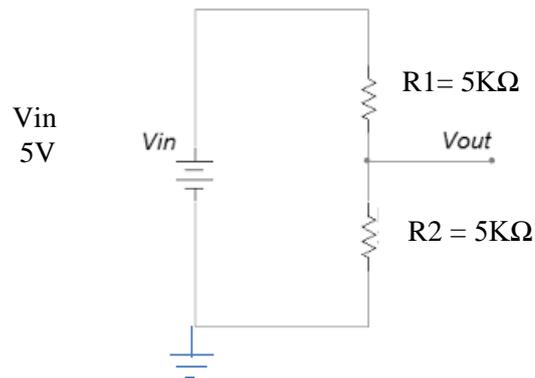
Dari segi *programming*, perubahan posisi potensiometer dapat diukur dari perubahan resistansi yang dimiliki potensiometer yang sebelumnya telah dikonversi menjadi sinyal *input* yang sesuai dengan sistem kontrol.



Gambar 6 Tongkat pendulum

Perubahan resistansi potensiometer pada tongkat pendulum digunakan untuk menentukan nilai ADC pada sistem kontrol. Misalkan pada saat resistansi potensiometer bernilai rendah maka letak *end effector* berada pada titik B (kiri), ketika nilai potensiometer bernilai sedang maka posisi *end effector* maka berada dititik A dan ketika nilai resistansi bernilai tinggi maka posisi *end effector* berada di titik C (kanan).

Rangkaian potensiometer pengatur keseimbangan



Gambar 7 Rangkaian potensiometer dengan pembagi tegangan

$$\begin{aligned}
 V_{out} = V_2 &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} \\
 &= \frac{5K\Omega}{5K\Omega + 5K\Omega} \times 5V \\
 &= \frac{5K\Omega}{10K\Omega} \times 5V \\
 &= \frac{5K\Omega}{2K\Omega} \\
 &= 2.5V
 \end{aligned}$$

Jadi untuk menentukan tegangan kanan, tengah, dan kiri dengan persamaan, yaitu =

Kiri → $V_{out} > 2.5V$

Tengah → $V_{out} = 2.5V$

Kanan → $V_{out} < 2.5V$

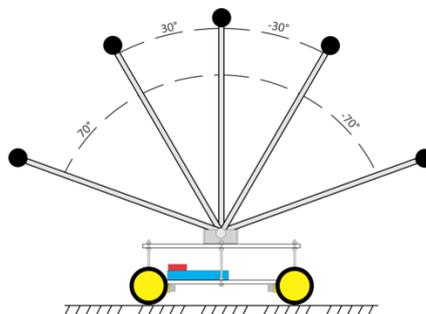
4.2 Pengujian Titik Setpoint Input dan Output Data

Didalam mendesain *fuzzy logic* diperlukan adanya menentukan titik *setpoint* dan fungsi keanggotaan. Tujuan dari menentukan titik *setpoint* dan fungsi keanggotaan adalah agar lebih memahami dan mampu menentukan batas-batas keanggotaan yang akan digunakan dalam membuat aturan atau *rule base* pada *fuzzy logic* didalam program arduino dan simulasi MATLAB.

Didalam menentukan setpoint pada *inverted* pendulum, dilakukan pengujian potensiometer sebagai *input* (masukan) data dengan 2 cara, yaitu : Pengujian potensiometer berdasarkan sudut potensiometer dan pengujian potensiometer berdasarkan *arduino*. Selain dari pengujian potensiometer dilakukan juga pengujian arah dan kecepatan motor sebagai *output* data

4.2.1 Pengujian Potensiometer berdasarkan sudut potensiometer

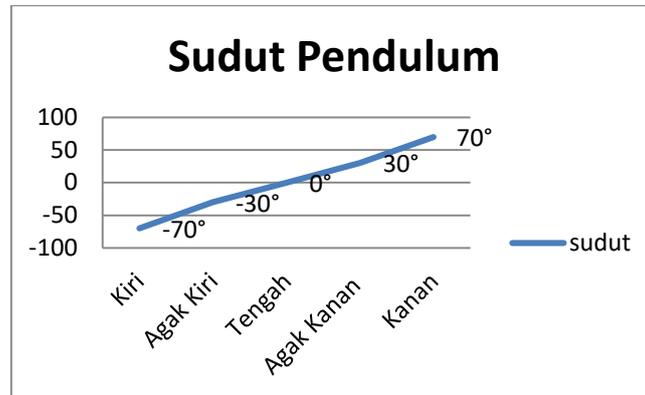
Pengujian potensiometer berdasarkan sudut potensiometer dilakukan dengan cara melakukan pengukuran langsung dengan menggunakan sudut potensio. Didalam pengujian ini, dibagi menjadi 5 sudut yaitu sudut -70° , sudut -30° , sudut 0° , sudut 30° , sudut 70° .



Gambar 8 Pengujian Potensiometer Berdasarkan Sudut
Tabel 2 Pengujian Potensiometer Berdasarkan Sudut

Variabel	Nilai Potensio
Kiri	-70°
Agak Kiri	-30°
Tengah	0°

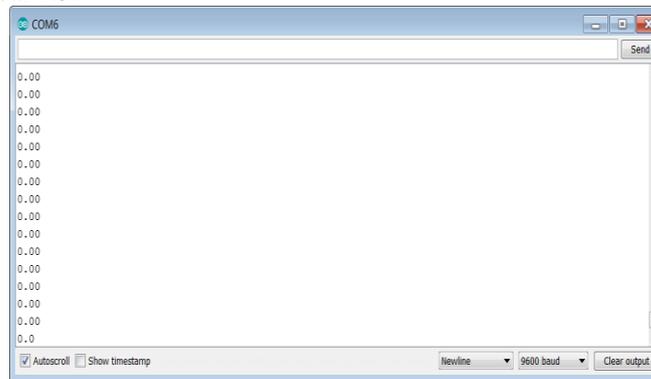
Agak Kanan	30°
Kanan	70°



Gambar 9 Pengujian Potensiometer Berdasarkan Sudut

4.2.2 Pengujian Potensiometer Berdasarkan Arduino

Didalam menentukan setpoint pada *inverted* pendulum, dilakukan pengujian potensiometer berdasarkan arduino. Didalam arduino terdapat beberapa sumbu yaitu : sumbu X (kanan), sumbu Y (kiri) dan nilai 0 sebagai titik tengah . Sumbu tersebut dapat dilakukan dengan cara melihat melalui menu dari *serial monitor* di software *arduino* yang bisa dilihat pada gambar 4.5.

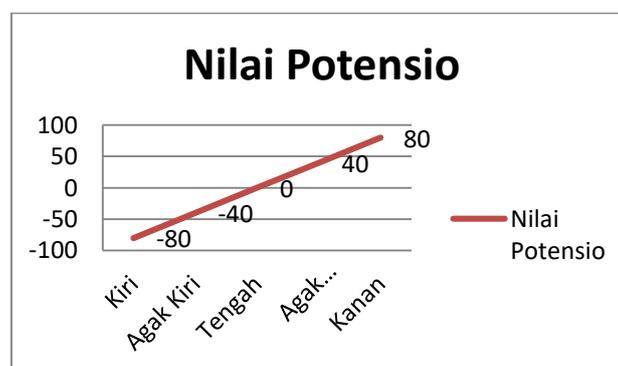


Gambar 10 Set Point nilai 0 di Serial Monitor Pada Aplikasi Arduino

Pengujian ini dilakukan dengan cara menghubungkan kabel USB dari port arduino ke port yang ada pada PC dengan memposisikan tongkat pendulum pada sudut 0° dan nilai ADC yang diperoleh pada sudut 0°, untuk mengetahui nilai ADC tersebut dapat dilihat melalui *serial monitor* COM6 seperti yang ditunjukkan pada pada gambar 4.4

Tabel 3 Pengujian Potensiometer Berdasarkan Arduino

Variabel	Nilai ADC Potensio
Kiri	-80
Agak Kiri	-40
Tengah	0
Agak Kanan	40
Kanan	80

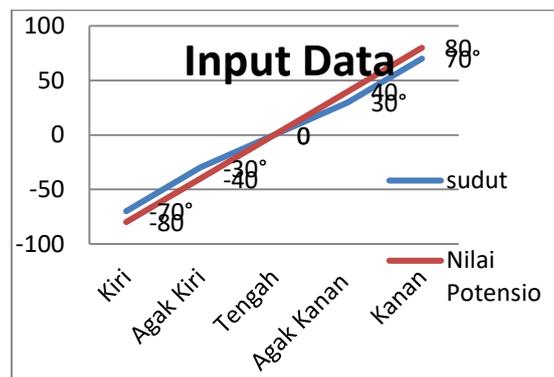


Gambar 11 Pengujian Potensiometer Berdasarkan Arduino

Setelah dilakukan pengujian potensiometer berdasarkan pengukuran sudut dan pengujian potensiometer berdasarkan arduino maka telah didapatkan tabel perbandingan dari pengujian tersebut.

Tabel 4 Perbandingan Potensio Berdasarkan Sudut dan Arduino

Variabel	Sudut Potensio	Nilai ADC Potensio
Kiri	-70°	-80
Agak Kiri	-30°	-40
Tengah	0°	0
Agak Kanan	30°	40
Kanan	70°	80



Gambar 12 Pengujian Potensiometer Berdasarkan Input Data

4.2.3 Pengujian Arah dan Kecepatan Motor Sebagai Output Data

Selain menentukan setpoint pada potensiometer, dilakukan penentuan arah dan kecepatan putaran motor. Arah dan kecepatan motor dalam penelitian ini difungsikan sebagai actuator yang mana output dari suatu sistem. Penentuan kecepatan motor dibagi menjadi 5 kategori yaitu BJSC, BJC, BJS, H, SJS, SJC, SJSC.

Kategori Motor BJ (Beda Arah Jarum Jam (CCW)):

1. BJSC (Beda Arah Jam Sangat Cepat)
2. BJC (Beda Arah Jam Cepat),
3. BJS (Beda Arah Jam Sedang),

Kategori Motor Diam

1. H (Henti),

Kategori Motor SJ (Searah Jarum Jam (CW))

1. SJS (Searah Jarum Jam Sedang)
2. SJC (Searah Jarum Jam Cepat)
3. SJSC (Searah Jarum Jam Sangat Cepat)

Tabel 5 Nilai PWM pada Pengaturan Arah dan Kecepatan

Arah dan Kecepatan	Nilai Defuzzifikasi	Nilai PWM
BJSC	-60	255
BJC	-35	150
BJS	-12	100
H	0	0
SJS	+12	100
SJC	+35	150
SJSC	+60	255

Contoh perhitungan untuk mencari nilai defuzzifikasi

1. Pengujian 2 = pengujian *inverted* pendulum dengan input 1 (sudut) yang mempunyai nilai 11 kemudian input 2 (delta sudut) yang mempunyai nilai 16 maka arah dan kecepatannya adalah sebagai berikut:

Input 1 (sudut)

$$x = 11$$

$$x \text{ berada pada } \rightarrow \frac{(x-0)}{(12-0)}, 0 \leq x \leq 12$$

$$\text{Agak Kanan} = \frac{11}{12}$$

$$= 0.91$$

Input 2 (Delta Sudut)

$$x = 16$$

$$x \text{ berada pada } \rightarrow \frac{(40-x)}{(40-0)}, \quad 0 \leq x \leq 40$$

$$\begin{aligned} \text{Center} &= \frac{(40-16)}{40} \\ &= \frac{24}{40} \\ &= 0.6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Defuzzifikasi} &= (11*0.91) + (16*0.6) / (0.91+0.6) \\ &= (10.01+1.6)/1.51 \\ &= 17.22 \end{aligned}$$

Nilai PWM = 100 (dapat dilihat pada tabel 4.4)

2. Pengujian 2 = pengujian *inverted* pendulum dengan input 1 (sudut) yang mempunyai nilai 2 kemudian input 2 (deltasudut) yang mempunyai nilai 7 maka arah dan kecepatannya adalah sebagai berikut:

Input 1 (sudut)

$$x = 2$$

$$x \text{ berada pada } \rightarrow \frac{x}{12}, \quad 0 \leq x \leq 12$$

maka

$$\begin{aligned} \text{Agak kiri} &= \frac{x}{12} \\ &= \frac{2}{12} \\ &= 0.16 \end{aligned}$$

Input 2 (deltasudut)

$$x = 7$$

$$x \text{ berada pada } \rightarrow 0, x \leq 10$$

maka

$$\text{Positive} = 0$$

$$\begin{aligned} \text{Defuzzifikasi} &= (2*(0.16) + (7*0)) / (0.16+0) \\ &= (0.32)/(0.16) \\ &= 2 \end{aligned}$$

Nilai PWM = 0 (Dapat dilihat pada tabel 4.4)

3. Pengujian 3 = pengujian *inverted* pendulum dengan input 1 (sudut) yang mempunyai nilai 1 kemudian input 2 (delta sudut) yang mempunyai nilai 6 maka arah dan kecepatannya adalah sebagai berikut:

Input 1 (sudut)

$$x = 1$$

$$x \text{ berada pada } \rightarrow \frac{x}{12}, \quad 0 \leq x \leq 12$$

maka

$$\begin{aligned} \text{Agak kiri} &= \frac{x}{12} \\ &= \frac{1}{12} \\ &= 0.08 \end{aligned}$$

Input 2 (deltasudut)

$$x = 6$$

$$x \text{ berada pada } \rightarrow 0, x \leq 10$$

maka

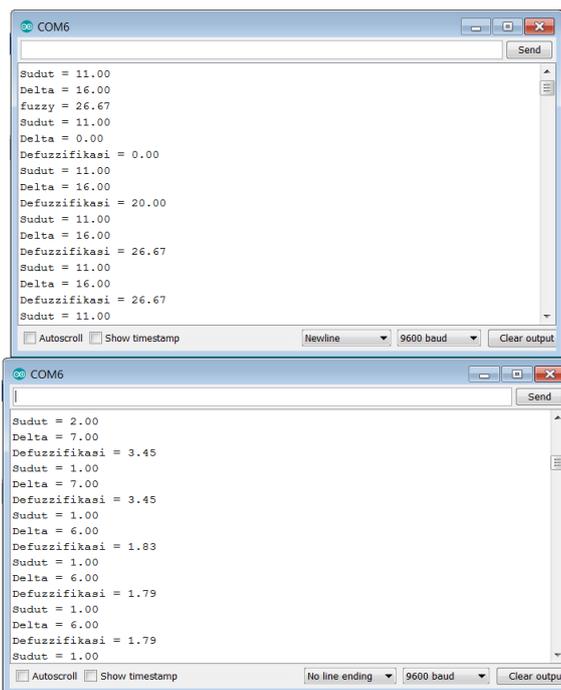
$$\text{Positive} = 0$$

$$\begin{aligned} \text{Defuzzifikasi} &= (1*(0.08) + (6*0)) / (0.08+0) \\ &= (0.08)/(0.08) \\ &= 1 \end{aligned}$$

Nilai PWM = 0 (Dapat dilihat pada tabel 4.4)

4.5 Pengujian dan Analisa Hasil Pengujian

Prototype *inverted* pendulum dilakukan pengujian terhadap pemrograman dengan logika *fuzzy* untuk membuktikan bahwa pergerakan *inverted* pendulum sesuai dengan aturan/*rule base* yang telah direncanakan. Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh hasil yang sesuai.

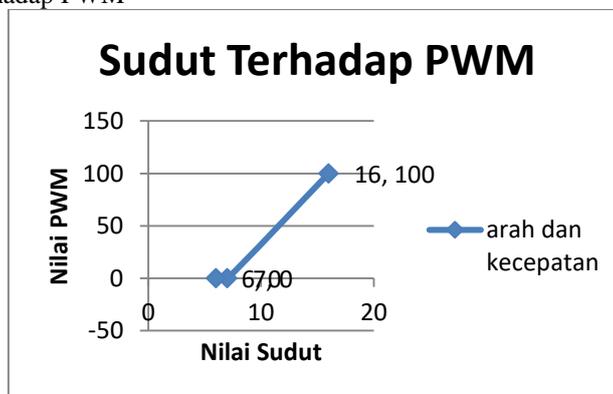


Gambar 13 Serial Monitor dari Program *Fuzzy* di Arduino

Tabel 4. 1Tabel Pengujian antara perhitungan dengan software arduino

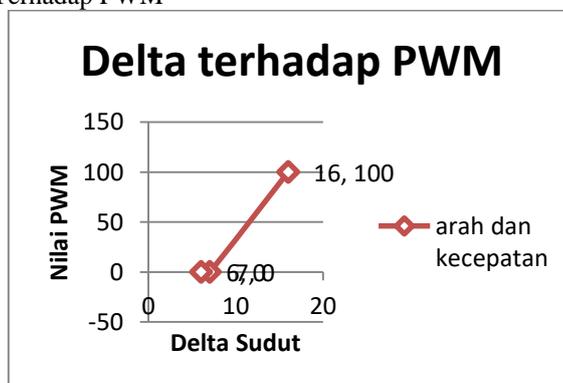
Pengujian	Sudut	Delta Sudut	PWM
I	11	16	100
II	2	7	0
III	1	6	0

Grafik Pengujian Sudut Terhadap PWM



Gambar 14 Grafik pengujian sudut terhadap nilai PWM

Grafik Pengujian Delta Sudut Terhadap PWM



Gambar 15 Grafik Pengujian delta sudut terhadap nilai PWM

4.6 Perbandingan Pengujian Fuzzy Logic dengan PID

Pada saat pengujian dilakukan dalam menentukan nilai setpoint yang diinginkan maka perlu dilakukan pengujian selama 10 detik. Dan berikut adalah tabel pengujian nilai Proporsional (Kp).

Tabel 6 Pengujian terhadap nilai proporsional

PID			Keterangan
Kp	Kd	Ki	
0	0	0	Kondisi <i>inverted</i> pendulum maju dan mundur dengan PWM 255 tetapi tidak bisa kembali lagi ketitik setpoint, karena <i>inverted</i> pendulum tidak bisa menahan beban dan tingkat sensitivitas tinggi.
0.5	0	0	Kondisi <i>inverted</i> pendulum dapat bertahan pada titik setpoint selama 1.25 detik dan dapat berusaha kembali menyeimbangkan pendulum pada titik setpoint (tidak stabil) dengan kondisi yang sedang atau agak lambat.
1.5	0	0	Kondisi <i>inverted</i> pendulum dapat bertahan pada titik setpoint selama 2.35 detik, dan dapat berusaha kembali pada titik setpoint (kondisi tidak stabil) dengan cepat.
2	0	0	Kondisi <i>inverted</i> pendulum dapat bertahan pada titik setpoint selama 2.75 dan dapat berusaha kembali pada titik setpoint (kondisi tidak stabil) dengan sangat cepat.
5	0	0	Kondisi <i>inverted</i> pendulum tidak dapat menyetabilkan kondisinya karena pergerakan yang sangat cepat

Menentukan nilai derivatif (Kd) untuk mengatur respon ayunan pada tongkat pendulum yaitu pada saat merespon untuk menuju nilai titik *setpoint*. Berikut adalah tabel 4.8 pada pengujian nilai derivatif.

Tabel 7 Pengujian Nilai Derivatif (Kd)

PID			Keterangan
Kp	Kd	Ki	
0.5	0.2	0	Kondisi <i>inverted</i> pendulum dapat bertahan pada titik <i>setpoint</i> selama 2.23 detik. Kondisi berjalan maju dan mundur dengan PWM ± 255 tetapi tidak mampu kembali pada titik setpoint karena alat tidak mampu menahan beban
0.5	0.4	0	Kondisi <i>inverted</i> pendulum dapat bertahan pada titik setpoint selama 2.67 detik dengan kondisi <i>inverted</i> pendulum mampu berjalan maju dan mundur dengan nilai PWM ± 255 . Akan tetapi <i>inverted</i> pendulum belum mampu mencapai titik kesetimbangan pada tongkat karena tidak mampu menahan beban.
0.5	0.8	0	Kondisi <i>inverted</i> pendulum dapat bertahan pada titik <i>setpoint</i> selama 3.33 detik dan mampu berjalan maju dan mundur dengan nilai PWM ± 255 . <i>Inverted</i> pendulum mampu mencapai kesetimbangan tongkat pada titik <i>setpoint</i> (kondisi tidak stabil) dengan kondisi yang lambat tetapi setelah itu tidak bisa kembali pada titik <i>setpoint</i> , karena tidak mampu menahan beban.
0.5	1.0	0	Kondisi <i>inverted</i> pendulum dapat bertahan pada titik <i>setpoint</i> selama 3.56 detik dan mampu berjalan maju dan mundur dengan nilai PWM ± 255 . <i>Inverted</i> pendulum mampu mencapai kesetimbangan tongkat pada titik <i>setpoint</i> (kondisi tidak stabil) dengan kondisi yang cepat tetapi setelah itu tidak bisa kembali pada titik <i>setpoint</i> , karena tidak mampu menahan beban.

Untuk menentukan nilai integral (Ki) untuk mengatur respon ayunan pendulum dari *inverted* pendulum pada saat merespon menuju nilai titik *setpoint*.

Berikut adalah pengujian nilai integral (Ki).

Tabel 8 Pengujian nilai integral (Ki)

PID			Keterangan
Kp	Kd	Ki	
0.5	0.8	1.4	Kondisi <i>inverted</i> pendulum dapat bertahan pada titik <i>setpoint</i> 2.11 detik dan dapat berusaha kembali pada titik <i>setpoint</i> . Akan tetapi, setelah itu tidak bisa kembali pada titik <i>setpoint</i> , karena tidak mampu menahan beban.
0.5	0.8	1.8	Kondisi <i>inverted</i> pendulum dapat bertahan selama tahap pengujian maksimal selama 5 detik dan mengalami sedikit ayunan pada tongkat pendulum dan mampu menahan beban pada tongkat pendulum.

Pada tabel 4.8 didapatkan bahwa $K_p = 0.5$, $K_d = 0.8$, dan $K_i = 1.8$ karena diperlukan ayunan pada pendulum yang normal agar tidak mengalami getaran yang berlebihan yang mengakibatkan tongkat pendulum cepat jatuh. Karena jika $K_d < 1.8$ maka ayunan pada tongkat pendulum sangat lebar sehingga mengakibatkan ayunan tongkat pendulum akan sangat cepat dan tongkat pendulum tidak bisa cepat mencapai kesetimbangan pada titik setpoint dan tongkat

pendulum lebih cepat jatuh kebawah. Sedangkan jika $K_d > 1.8$ maka ayunan tongkat pendulum akan sangat rendah yang mengakibatkan pendulum sangat lambat dan susah dalam mencapai titik kesetimbangan.

Setelah menentukan nilai K_p , K_d , dan K_i pada pengujian berikutnya adalah melihat kesetimbangan pada *inverted* pendulum, apakah titik pada settingan PID dengan titik pada *setpoint* sudah akurat sesuai dengan teori pada *inverted* pendulum yang menghasilkan tongkat pendulum mampu mencapai kesetimbangan.

Tabel 9 Pengujian PID dengan titik *setpoint*

No	Nilai sudut	No	Nilai Sudut	No	Nilai Sudut
1	-3	5	3	9	-2.66
2	2	6	-2	10	1.30
3	-1	7	1	11	0
4	0	8	0	12	0

V. SIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa dan hasil pengujian pada bab sebelumnya, maka diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Cara Kerja *Fuzzy Logic* didalam *inverted* pendulum adalah dengan cara mengubah masukan analog dari *input* (masukan) data ke dalam bentuk digital dengan metode mamdani melalui 3 tahap proses yaitu *fuzzifikasi*, *inferensi* dan *defuzzifikasi* yang disesuaikan dengan batas keanggotaan pada *rule base* dengan aturan $-100 \geq \text{setpoint} \leq 100$ dan dengan PWM motor ± 255
2. Cara Kerja Potensiometer dalam menentukan titik keseimbangan adalah dengan cara menentukan titik-titik pengukuran dan pengujian yang akan dijadikan sebagai *setpoint* dari kesetimbangan pendulum. Pengukuran busur mendapatkan sudut antara $-70^\circ \leq x \leq 70^\circ$. Sedangkan pada penentuan menggunakan arduino mendapatkan titik $-60 \leq x \leq 60$, yang mana *setpoint*nya berada pada nilai 0. Potensio sebagai media untuk menyetimbangkan pendulum.
3. Aturan/*Rule Base* dari program *fuzzy logic inverted* pendulum terdiri dari 15 rule dengan 2 input yang masing-masing inputannya terdapat 5 kategori dan 3 kategori. Sedangkan untuk outputannya terdapat 7 kategori.
4. Penggunaan sistem kontrol PID lebih mampu menyeimbangkan pendulum hanya pada titik antara $-3 \geq \text{setpoint} \leq 3$ dengan tingkat sensitivitas yang tinggi daripada penggunaan sistem kontrol *fuzzy logic* yang belum mampu menyeimbangkan tongkat sesuai dengan aturan / *rulebase*.

5.2 Saran

1. Masih bisa dikembangkan menjadi penelitian yang serupa, akan tetapi dengan menggunakan metode yang berbeda, agar dapat diperoleh hasil yang lebih akurat.
2. Selain dari penggunaan metode yang berbeda, sebaiknya pemodelan desain pada *inverted* pendulum dibuat dengan lebih baik lagi. Agar susunan kabel dan komponennya tidak mempengaruhi kinerja dari alat *inverted* pendulum itu sendiri,

DAFTAR PUSTAKA

- [1]G. Bobby, E. Susanto, and F. Y. Suratman. (2015). Perancangan Dan Implementasi Robot Keseimbangan Beroda Dua Berbasis Mikrokontroler. *Peranc. Dan Implementasi Robot Keseimbangan Beroda Dua Berbas. Mikrokontroler*, vol. 2, no. 3, pp. 1-8.
- [2]Fahmizal, Galih Setyawan, Muhammad Arrofiq, Afrizal Mayub. (2017). Logika Fuzzy Pada Robot Inverted Pendulum Beroda Dua. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (JTIIK)*, vol. 2, no. 4, hlm. 244-252.
- [3]Thiang, Hendrik Thiehunan. (2000). Implementasi Kendali Logika Fuzzy pada Pendulum Terbalik Rotasional. *Proceeding, Industrial Electronic Seminar 2000 (IES 2000)*.
- [4]Mochamad Mobed Bachtiar, Bima Sena Bayu D, A. R. Anom Besari. (2011). Sistem Kontrol Inverted Pendulum Pada Balancing Motor. *Industrial Electronics Seminar 2011 (IES 2011)*.
- [5]Wikipedia, 2017, Bandul, <https://id.wikipedia.org/wiki/Bandul> (diakses 19 April 2019).
- [6]Wikipedia, 2019, Inverted Pendulum, https://en.wikipedia.org/wiki/Inverted_pendulum (diakses 23 April 2019).
- [7]Binus University School Of Computer Sains, 2012, Pemodelan Dasar Sistem Fuzzy, <https://socs.binus.ac.id/2012/03/02/pemodelan-dasar-sistem-fuzzy/> (diakses 23 April 2019).