



TESIS - TF142510

**IMPLEMENTASI *FUZZY-PID* UNTUK KENDALI  
*FOUR-WHEELED MOBILE ROBOTIC* :  
Studi Kasus Pada Jalan Tanjakan**

BRIAN RAAFIU  
NRP. 02311650012004

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI INDUSTRI  
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018

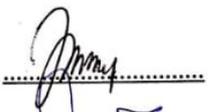
**LEMBAR PENGESAHAN**

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Oleh :

**Brian Raafiu**  
NRP. 02311650012004

Tanggal Ujian : 16 Juli 2018  
Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh :

1. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito., M.Sc.  
NIP. 19600901 198701 1 001  (Pembimbing)
2. Dr. Imam Abadi., S.T., M.T  
NIP. 19761006 199903 1 002  (Penguji)
3. Ir. Harsono., M.T., Ph.D  
NIP. 19600119 198601 1 001  (Penguji)



Dekan Fakultas Teknologi Industri,

  
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.

NIP. 19690507 199512 1 001

**IMPLEMENTASI FUZZY-PID UNTUK KENDALI  
FOUR-WHEELED MOBILE ROBOT :  
Studi Kasus Pada Jalan Tanjakan**

Nama Mahasiswa : Brian Raafiu  
Mahasiswa ID : 02311650012004  
Pembimbing : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc

**ABSTRAK**

Salah satu teknologi yang berpotensi dalam perkembangan sistem otomasi dan instrumentasi adalah *Four-Wheeled Mobile Robot*. *Wheeled Mobile Robot* menjadi pilihan dengan berbagai fungsi di industri dan penerapan lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang serta membangun *Four-Wheeled Mobile Robot* dengan metode *Fuzzy-PID controller* dalam mengantisipasi permasalahan jalan menanjak. Variasi sudut kemiringan dan variasi beban pada jalan menanjak digunakan untuk menguji kinerja sistem kendali pada FWMR. *Parametric uncertainties* di kontrol menggunakan *Fuzzy-PID* sehingga kecepatan putar lebih stabil ketika melewati variasi kemiringan dan variasi beban. Sistem kontrol dengan kriteria respon cepat dan stabil saat beroperasi pada variasi sudut kemiringan jalan dan variasi beban, menjadi permasalahan yang penting untuk diangkat. *Embedded system human machine interface* dengan komunikasi *wireless* digunakan untuk menunjang pengembangan *Mobile Robotic*. Penelitian ini dibagi menjadi tiga tahap meliputi; rancang bangun sistem, identifikasi sistem, dan pengujian sistem pada variasi sudut kemiringan jalan dan variasi beban. Rancang bangun sistem terbagi menjadi dua, yaitu perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Penelitian ini menggunakan tiga struktur model dalam proses identifikasi sistem, yaitu Fungsi Transfer, ARX dan ARMAX model. Hasil terbaik model FWMR ditunjukkan oleh Fungsi Transfer (TF) model dengan nilai (FIT=95,45%). Respon sistem pengendali kecepatan putar dengan metode kontrol *fuzzy-PID* memiliki performansi yang baik, karena mampu mengantisipasi berbagai variasi sudut kemiringan mulai dari  $5^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$  hingga  $30^{\circ}$ . Indeks performansi saat mengatasi kemiringan  $30^{\circ}$  dan gaya berat 13,85N adalah waktu tunak M1:1,87s, M2:2,64s, M3:5,71s, M4:2,51s, M1:1,87s, *Max overshoot* M1:228%, M2:188,5%, M3:36%, M4:65,5% dan waktu tempuh 12,04s. Waktu tercepat saat kondisi sudut kemiringan terbesar  $30^{\circ}$  adalah 8s dengan panjang lintasan 6m.

Kata kunci : *Four-Wheeled Mobile Robot (WMR)*, *Fuzzy-PID control*, *Inclined Terrain*, *Sudut Kemiringan Lintasan*.



**IMPLEMENTATION OF FUZZY-PID CONTROL FOR  
FOUR-WHEELED MOBILE ROBOT:  
The Case Study on the Road Climbs**

*Student Name* : Brian Raafiu  
*NRP* : 02311650012004  
*Supervisor* : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

**ABSTRACT**

*One of the technologies that are potentially in the development of instrumentation and automation systems is a Four-Wheeled Mobile Robot. Wheeled Mobile Robot is an option with a variety of functions in the industry and the application of the other. This research aims to design and build a Four-Wheeled Mobile Robot with the method of a Fuzzy-PID controller in anticipation of problems the road uphill. Slope angle variation and variation of load on an uphill road used to test the performance of the system control at FWMR. Parametric uncertainties in control using Fuzzy-PID so that the playback speed is more stable when passing through variation of the tilt and load variations. Control system with quick response and stable criteria when operating on roads and slope angle variations of load, important issues to be raised. Embedded systems human-machine interface with wireless communication used to support the development of Mobile Robotic. This research is divided into three phases include; system architecture, system identification, and testing the system on a variation of the angle of the slope of the ramp and load variations. The system architecture is divided into two, namely the design of hardware and software. This research uses three structure models in the process of the identification of the system Transfer function, i.e., ARX and ARMAX models. Best results FWMR model indicated by the Transfer function (TF) model with a value (FIT = 95,45%). Playback speed control system response with the method of fuzzy-PID control to have a good performance, being able to anticipate a variety of slopes ranging from  $30^0$  to  $5^0, 10^0, 20^0$ . Index performance when tackling the slope of  $30^0$  and heavy style 13,85N is settling time M1:1,87s, M2:2,64s, M3:5,71s, M4:2,51s, M1:1,87s, Max overshoot M1:228%: 188,5%, M2, M3, M4:36%: 65,5% and it takes 12,04s. The fastest time when the condition of the slope angle of the largest  $30^0$  is 8s with 6 m track length.*

*Kata kunci : Four-Wheeled Mobile Robot (WMR), Fuzzy-PID control, Inclined Terrain*



## KATA PENGANTAR

Puja dan puji syukur ke hadirat Allah SWT atas kenikmatan rahmat yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini, yang merupakan hasil penelitian selama menempuh studi program magister di Departemen Teknik Fisika Bidang Keahlian Instrumentasi Industri, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Penyelesaian tesis ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu baik dalam proses penelitian maupun selama penulisan tesis. Ucapan terima kasih ini disampaikan kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc., selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, koreksi dan motivasi selama penyusunan tesis ini serta atas ilmu yang diberikan selama masa studi. Teriring rasa hormat serta apresiasi dan do'a, semoga Allah SWT yang akan memberikan ganjaran.
2. Bapak Dr. Imam Abadi, S.T., M.T., dan Bapak Ir. Harsono.,M.T.,Ph.D selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu untuk memberikan evaluasi, koreksi dan masukan yang bermanfaat pada proses penyempurnaan tesis ini. Semoga Allah SWT memberikan ganjaran.
3. Bapak / Ibu dosen Program Studi Pascasarjana Teknik Fisika (PSMTF) yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas ilmu yang telah disampaikan selama masa studi magister.
4. Kedua orang tua penulis (Ibunda Ernani Ridhowati dan Bapak Edy Siswanto), Kakak penulis (Adytira Rahman dan Dewi Mamluatul) atas kepercayaan, kesabaran, dukungan moril dan materi serta semangat yang tidak pernah berhenti sehingga menjadi kekuatan selama menyelesaikan studi magister teknik fisika.
5. Mahra Rizvani Pratama, Ibunda Elies Rahmawati, Bapak Mahar Girindro yang telah sabar, memberikan semangat, motivasi dan doa untuk penulis.

6. Teman-teman satu perjuangan PSMTF untuk keceriaan dan kenangan serta telah menjadi bagian dalam perjalanan studi ini.
7. Teman-teman ruang belajar S2 Teknik Fisika, Mas Wildan, Mas Alex, Mas Khamim, Mas Nyoman, Mas Iwan, Mas Wafi, Mas Kholid, Ibu Erna, Ibu Martha, dan teman teman semua atas banyaknya forum dan diskusi yang telah dilaksanakan.
8. Staf akademik dan administrasi PSMTF, atas bantuannya dalam mengurus keperluan akademik dan administrasi selama penulis melaksanakan studi.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

*“Ibarat tiada gading yang tak retak”*, penulis menyadari bahwa dalam penelitian tesis ini masih terdapat banyak kekurangan. Masukan berupa kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata, penulis berharap semoga tesis ini memberikan manfaat bagi pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang Teknik Fisika khususnya bidang keahlian instrumentasi industri. Amin.

Surabaya, 16 Juli 2018

Brian Raafiu

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK .....	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR .....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR NOTASI .....	xix
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Relevansi .....	4
1.6. Target Luaran .....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1. Teori Penunjang.....	5
2.1.1. <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> .....	5
2.1.2. Pemilihan Motor DC Sebagai Motor Penggerak <i>Robot</i> .....	9
2.1.3. Kinerja <i>Display System</i> .....	11
2.1.4. Metode Kontrol <i>Fuzzy-PID</i> .....	12
2.2. Studi Penelitian Sebelumnya ( <i>State of the Art</i> ) .....	19
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN.....</b>	<b>23</b>
3.1. Prosedur Penelitian.....	23

3.2.	Perancangan Perangkat Keras <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> .....	25
3.2.1.	Perancangan Bodi <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> .....	27
3.2.2.	Perancangan <i>Hardware Driver</i> Motor DC .....	27
3.2.3.	Perancangan Rangkaian <i>Main Controller Unit</i> .....	28
3.3.	Perancangan Perangkat Lunak <i>Display System</i> .....	28
3.4.	Identifikasi Sistem <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> .....	29
3.4.1.	Desain Sistem Identifikasi <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> .....	31
3.4.2.	<i>Auto Regressive Exogenous</i> (ARX).....	33
3.4.3.	<i>Auto Regressive Moving Average Exogenous</i> (ARMAX).....	35
3.4.4.	Pemodelan Fungsi Transfer .....	36
3.5.	Perancangan Logika <i>Fuzzy-PID</i> .....	37
3.5.1.	Fuzzifikasi .....	39
3.5.2.	Komposisi aturan ( <i>Rule base</i> ) FPID .....	42
3.5.3.	<i>DeFuzzyfikasi</i> .....	43
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....		45
4.1.	Hasil Desain dan Spesifikasi <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> .....	45
4.1.1.	Hasil Desain Perangkat Keras .....	46
4.1.2.	Hasil Desain Perangkat Lunak .....	48
4.2.	Hasil Kalibrasi Sensor Kecepatan Putar pada Motor DC .....	49
4.3.	Hasil Pengujian <i>Input-Output FWMR</i> .....	51
4.4.	Hasil Simulasi Perbandingan Kendali <i>Fuzzy-PID</i> dengan <i>Fuzzy-PI</i> .....	55
4.5.	Hasil Pengujian Kendali <i>Fuzzy-PID</i> pada <i>Four-Wheeled Mobile Robot</i> dengan Variasi Sudut Kemiringan Jalan .....	58
4.5.1.	Hasil Pengujian <i>Fuzzy-PID</i> FWMR pada Variasi Sudut Kemiringan Jalan $5^0$ , $10^0$ , $20^0$ .....	58

4.5.2. Hasil Pengujian Fuzzy-PID FWMR pada Variasi Sudut Kemiringan Jalan 30 <sup>0</sup> .....	65
4.6. Hasil Pengujian Kendali <i>Fuzzy-PID</i> pada <i>Four-Wheeled Mobile Robot</i> dengan Variasi Beban pada Jalan Menanjak.....	69
BAB 5 PENUTUP.....	77
5.1 Kesimpulan.....	77
5.2 Saran.....	77
DAFTAR PUSTAKA .....	79
LAMPIRAN Desain Perangkat Keras Elektronik.....	A
LAMPIRAN Desain Perangkat Keras Bodi.....	C
LAMPIRAN <i>Source Code</i> Proses Identifikasi Sistem ARX dan ARMAX.....	E
LAMPIRAN <i>Simulink Matlab</i> Simulasi Perbandingan Metode Kontrol.....	I
<i>Fuzzy-PID</i> dengan <i>Fuzzy-PI</i> .....	I
LAMPIRAN Variasi Sudut Kemiringan .....	K
LAMPIRAN Variasi Beban Pada Kemiringan 30 <sup>0</sup> .....	M
LAMPIRAN Biodata Peneliti .....	O

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Mobile Robot</i> digunakan oleh Amazon (“amazon-is-now-using-a-whole-lot-more-of-the-robots-from-the-company-it-bought-for-775-million,” n.d.) .....	5
Gambar 2. 2 <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> (Fan et al., 2017),(Huynh Xuan, 2016)	6
Gambar 2. 3 Contoh <i>Mobile Robot</i> (Huynh Xuan, 2016) .....	7
Gambar 2. 4 Tampak samping Robot beroperasi <i>track</i> naik (Zhu et al., 2011).....	8
Gambar 2. 5 Tampak atas Robot (Zhu et al., 2011) .....	8
Gambar 2. 6 Motor induksi (kiri) dan motor magnet permanen dengan dua desain yang berbeda (tengah dan kanan) (Raafiu, 2017a).....	9
Gambar 2. 7 Penampang PM-DC dan beberapa variabel (Raafiu, 2017a) .....	10
Gambar 2. 8 Motor DC <i>gearbox</i> (Erc, 2016) .....	11
Gambar 2.9 Logo <i>Visual Studio</i> (Visual, 2017) .....	12
Gambar 2. 10. Diagram blok <i>fuzzy-PID</i> kontrol motor DC (Abhinav, 2012).....	14
Gambar 2.11 Skema arsitektur logika Fuzzy (Rojas, Ponce, & Molina, 2014)...	15
Gambar 2.12 Fungsi keanggotaan logika <i>Fuzzy</i> untuk (a) variabel <i>error</i> (rpm); (b) variabel <i>delta error</i> (rpm) (Musyafa & Ibrohim, 2013).....	16
Gambar 2.13 Mesin inferensi pada logika Fuzzy (Robandi & Kharisma, 2009). 17	
Gambar 2.14 Metode Defuzzifikasi pada aturan mamdani.....	18
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	23
Gambar 3. 2 Diagram blok tanpa sistem kendali ( <i>open loop system</i> ).....	24
Gambar 3. 3 Diagram blok dengan sistem kendali ( <i>close loop system</i> ).....	24
Gambar 3.4. (a) Desain bodi (b) desain perangkat keras <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> .....	25
Gambar 3.5. Struktur perangkat keras penelitian <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> ...	26
Gambar 3.6 Skematik driver empat motor DC .....	27
Gambar 3.7 Rangkaian skematik <i>main controller unit</i> .....	28
Gambar 3.8 <i>Flowchart</i> identifikasi sistem (Jahaya et al., 2011).....	31
Gambar 3.9 Experimen <i>Loop</i> terbuka dari sistem <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> ..	32
Gambar 3.10 Perbandingan struktur model ARX dengan validasi .....	33
Gambar 3.11 Seleksi pemilihan struktur model ARX .....	34

Gambar 3.12 Struktur umum model ARX MISO (Jahaya et al., 2011) .....	35
Gambar 3.13 Perbandingan struktur model ARMAX dengan data validasi .....	35
Gambar 3.14 Struktur umum model ARMAX MISO (Jahaya et al., 2011).....	36
Gambar 3.15 <i>View model output best fit</i> model fungsi transfer .....	37
Gambar 3.16 Gambaran Umum Sistem <i>Fuzzy</i> yang dibangun.....	38
Gambar 3.17 Fungsi keanggotaan <i>variable error</i> . .....	40
Gambar 3.18 Fungsi keanggotaan <i>variable deltaerror</i> .....	41
Gambar 3.19 Fungsi keanggotaan <i>output</i> $K_{p1}$ .....	41
Gambar 3.20 Fungsi keanggotaan <i>output</i> $K_{i1}$ .....	42
Gambar 3.21 Fungsi keanggotaan <i>output</i> $K_{d1}$ .....	42
Gambar 4. 1 Tampilan bodi Robot <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> (tampak depan)	46
Gambar 4. 2 Tampilan perangkat keras Robot <i>Four Wheeled Mobile Robot</i> (tampak dalam).....	47
Gambar 4. 3 Tampilan perangkat keras rangkaian <i>driver</i> motor DC .....	48
Gambar 4. 4 Hasil perangkat lunak .....	49
Gambar 4. 5 Informasi antar muka yang akan ditampilkan. ....	49
Gambar 4. 6 Grafik pengujian sensor kecepatan <i>encoder optic</i> .....	51
Gambar 4. 7 Hubungan <i>pulse width modulation</i> dengan kecepatan (rpm) .....	54
Gambar 4. 8 Hubungan arus (mA) dengan kecepatan putar (rpm) .....	55
Gambar 4. 9 Hasil Simulasi perbandingan metode kendali <i>fuzzy-PID</i> dengan <i>fuzzy-PI</i> . .....	57
Gambar 4. 10 (a) Validasi sudut kemiringan, (b) saat melewati tanjakan $5^{\circ}$ .....	59
Gambar 4. 11 Respon sistem pengendalian <i>fuzzy-PID</i> pada tanjakan $5^{\circ}$ .....	59
Gambar 4. 12 Respon tanpa sistem kontrol dengan sudut kemiringan jalan $10^{\circ}$ ..	60
Gambar 4. 13 Respon kendali <i>fuzzy-PID</i> dengan sudut kemiringan jalan $10^{\circ}$ .....	61
Gambar 4. 14 Respon tanpa sistem kontrol dengan sudut kemiringan jalan $20^{\circ}$ ..	62
Gambar 4. 15 Respon kendali <i>fuzzy-PID</i> dengan sudut kemiringan jalan $20^{\circ}$ .....	63
Gambar 4. 16 Dokumentasi FWMR dalam mengatasi tanjakan $30^{\circ}$ .....	65
Gambar 4. 17 <i>Human Machine Interface</i> untuk menyajikan antarmuka FWMR .	66
Gambar 4. 18 Respon tanpa metode kendali dengan sudut kemiringan $30^{\circ}$ .....	67
Gambar 4. 19 Respon sistem pengendalian <i>fuzzy-PID</i> pada tanjakan $30^{\circ}$ .....	68
Gambar 4. 20 Respon tanpa sistem kendali pada variasi beban 1 .....	71

Gambar 4. 21 Respon sistem pengendalian <i>fuzzy-PID</i> pada variasi beban 1.....	72
Gambar 4. 22 Respon tanpa sistem kendali pada variasi beban 2 .....	73
Gambar 4. 23 Respon sistem pengendalian <i>fuzzy-PID</i> pada variasi beban 2.....	74
Gambar 4. 24 Respon sistem pengendalian <i>fuzzy-PID</i> pada variasi beban 3.....	74

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Pengaruh $K_p, K_i, K_d$ terhadap respon (Muhyiddin Bin Yusof, 2013) ....	13
Tabel 2. Tabel State of the Art .....	19
Tabel 3. Validasi struktur model ARX .....	34
Tabel 4. Validasi struktur model ARMAX .....	36
Tabel 5. Fungsi keanggotaan input .....	39
Tabel 6. Fuzzy rule base untuk $K_{p1}$ .....	42
Tabel 7. Fuzzy rule base untuk $K_{i1}$ .....	43
Tabel 8. Fuzzy rule base untuk $K_{d1}$ .....	43
Tabel 9 . Kalibrasi Sensor Kecepatan Putar yang digunakan .....	50
Tabel 10. Spesifikasi Motor DC yang digunakan dalam penelitian.....	52
Tabel 11. Data input output motor DC.....	53
Tabel 12. Karakteristik parameter PID (Muhyiddin Bin Yusof, 2013) .....	56
Tabel 13. Hasil Performansi Tanggapan Sistem Fuzzy-PID dengan Fuzzy-PI ....	57
Tabel 14. Hasil waktu tempuh melewati variasi sudut kemiringan jalan .....	58
Tabel 15. Hasil Performansi Sistem Kontrol Fuzzy-PID.....	64
Tabel 16. Hasil Performansi Tanggapan Sistem Pengendalian dengan Fuzzy-PID .....	69
Tabel 17. Variasi beban yang digunakan .....	70
Tabel 18. Hasil waktu tempuh melewati tanjakan dengan variasi beban .....	70
Tabel 19. Hasil Gabungan Variasi Beban Terhadap Performansi Sistem. ....	75

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR NOTASI

$m$	=	Massa (kg)
$W$	=	Gaya berat (N)
$\dot{v}_{bx}$	=	Percepatan bodi <i>Robot</i> arah x (longitudinal) (m/s <sup>2</sup> )
$v_x$	=	Kecepatan arah x (longitudinal) (m/s)
$v_y$	=	Kecepatan arah y (lateral directions) (m/s)
$F_{xi}$	=	Gaya arah x (longitudinal) pada i <sup>th</sup> roda (N)
$F_{yi}$	=	Gaya arah y (lateral force) pada i <sup>th</sup> roda (N)
$F_{zf}$	=	Gaya normal didepan <i>Wheeled</i> (N)
$F_{zr}$	=	Gaya normal dibelakang <i>Wheeled</i> (N)
$I_{yy}$	=	Momen inersia tentang sumbu Y (Kg m <sup>2</sup> )
$I_{zz}$	=	Momen inersia tentang sumbu Z (Kg m <sup>2</sup> )
$I_w$	=	Momen inersia dari roda (Kg m <sup>2</sup> )
$L_r$	=	Jarak pusat roda belakang dengan pusat tengah <i>Robot</i> (m)
$L_f$	=	Jarak pusat roda depan dengan pusat tengah <i>Robot</i> (m)
$L_w$	=	Jarak lebar antara pusat roda 3 dengan pusat roda 4 (m)
$h$	=	Diameter roda (m)
$M_{res}$	=	Koefesien damping Yaw (Estimasi $\pm 0.3$ )
$\theta$	=	Sudut pitch (rad)
$\gamma$	=	Yaw rate (tingkat yaw) (rad)
$\omega_i$	=	Kecepatan Sudut dari i <sup>th</sup> roda (rad/s)
$\dot{\omega}_i$	=	Percepatan Sudut dari i <sup>th</sup> roda (rad/s <sup>2</sup> )
$b_w$	=	Koefesien damping roda (N m/s)
$T_i$	=	Torsi dari i <sup>th</sup> roda (Nm)
$T_{r\ xi}$	=	Torsi dari i <sup>th</sup> roda belakang terhadap sumbu x (Nm)
$P_M$	=	Daya (W)
$V_T$	=	Volume total (m <sup>3</sup> )
$p$	=	Jumlah pole PMDC
$Q$	=	Energy (J)
$T$	=	Waktu (s)

$C$	= <i>Output</i> koefisien daya
$K_w$	= Faktor lilitan
$n_s$	= Kecepatan (rpm)
$D$	= Diameter (mm)
$L$	= Panjang aksial motor (mm)
$\tau$	= Pole pitch (mm)
$B$	= Pembebanan magnet spesifik (T)
$a_c$	= Pembebanan elektrik spesifik (A/m)
$h_{bs}$	= Panjang besi penahan stator belakang (mm)
$h_s$	= Panjang slot (mm)
$y$	= Data keluaran (rpm)
$\hat{y}$	= Estimasi data keluaran
$\bar{y}$	= Rata-rata dari data keluaran
$p$	= <i>Number of parameters</i>
$N$	= <i>Number of data</i>
$a$	= Koefisien keluaran
$b$	= Koefisien masukan
$c$	= Koefisien <i>error</i>
$na$	= <i>Number</i> koefisien dari $a$
$nb$	= Nomer koefisien dari $b$
$nc$	= Nomer koefisien dari $c$
$d$	= <i>Delay</i>
$u(t)$	= Masukan dari sistem
$y(t)$	= Keluaran dari sistem
$e(t)$	= <i>Error</i>
$(\Delta e)$	= <i>Delta error</i>
$U^{PID}$	= <i>output control</i> dari kendali PID
$K_p$	= Nilai inisialisasi <i>gain parameters p</i> 2,25
$K_i$	= Nilai inisialisasi <i>gain parameters i</i> 0,05
$K_d$	= Nilai inisialisasi <i>gain parameters d</i> 0,005
$K_{p1}, K_{i1}, K_{d1}$	= <i>Variable output fuzzy tuner</i>

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Teknologi *mobile robot* memiliki potensi luar biasa dalam perkembangan ilmu sistem otomasi dan instrumentasi. Keuntungan yang didapatkan sangat banyak, dari sisi penerapan kehidupan sehari-hari seperti contoh dalam bidang otomotif seperti *vehicle automation mobile parking* milik Audi (Youcar, 2013) atau penelitian *autonomous parking control* sampai dengan penerapan pada teknologi industri yang terlihat dalam penelitian (ApS, 2017). Penelitian yang dilakukan oleh (Fan, Qiu, & Meng, 2017) *mobile robot* sebagai pengganti kerja manual menjadi kerja otomatis, seperti contoh teknologi *transporter* dalam dunia industri. Pemanfaatan lain yaitu pada teknologi *electric vehicle*. (Guodong, Ruifeng, & Ning, 2017) melakukan penelitian tentang kontrol kecepatan *Four-Wheeled electric vehicle*. *Mobile robot* juga berkembang dalam teknologi pertanian *agricultural*, ditunjukkan dalam penelitian (Fan et al., 2017) dan masih banyak penerapan teknologi dibidang lainnya.

*Tracking incline* atau jalanan menanjak pada kinerja *mobile robot* menjadi peluang penelitian yang tidak banyak disentuh. Kelemahan penggerak motor listrik sebagai aktuator *mobile robot* beroda, adalah saat beroperasi di jalanan menanjak. Kelemahan sistem *non linier* pada motor DC menjadi inti permasalahan. Kondisi dinamis diakibatkan dari berubahnya *track* yang dilalui *mobile robot* ketika jalanan menanjak (Zhu, Qiu, Guo, & Zhang, 2011). Kelemahan selanjutnya adalah kondisi slip motor *Four-Wheeled* yang sering terjadi ketika *Mobile-Robot* dengan penggerak inti motor listrik beroperasi, dalam penelitian (Zhu et al., 2011) mendapatkan estimasi metode baru untuk mengantisipasi slip dan *tire force* ketika *Four-Wheeled Mobile Robot* beroperasi di *track* tanjakan atau *inclined terrain*. *Robot* beroda yang akan dibangun merupakan cabang dari teknologi *Mobile Robots* dengan sistem mekanik simpel dan banyak diterapkan dalam teknologi *vehicle*. Aktuator utama yang banyak digunakan dalam teknologi *Robot beroda* adalah motor listrik dengan tipe motor DC, karena penggunaan motor DC yang handal dan

murah dibandingkan dengan motor listrik lainnya (Ma, Zhang, Gu, Li, & Lu, 2009). Sistem *nonlinier* merupakan ciri khas dari aktuator motor DC. Metode kendali dengan algoritma konstan tidak akan efektif terutama ketika *Mobile Robot* beroda ini berjalan pada kecepatan yang telah ditentukan (Filatov, Serykh, Kopichev, & Weinmeister, 2016). Algoritma konstan yang dimaksud adalah metode kontrol konvensional *PID*, metode kontrol ini tidak dapat mengatasi perubahan *track* yang dinamis saat *Robot* berjalan (Zhu et al., 2011), sehingga sulit mendapatkan kinerja yang efektif untuk kestabilan sistem kontrol, namun sudah terbukti bahwa metode kontrol *PID* tetap handal digunakan dalam teknologi kendali motor DC (Meshram & Kanojiya, 2012), (Ma et al., 2009), (Kwak, Ahn, & Lee, 2014).

Penggunaan logika kontrol *fuzzy* merupakan metode yang efektif jika digunakan dalam sistem yang kompleks dan sistem *non linier*, terutama sistem yang sulit membangun analitis model matematika (Xu, Guo, & Lee, 2013). Logika *fuzzy* juga telah banyak dikembangkan untuk kontrol *Four-Wheeled Mobile Robot* seperti pada penelitian (Hibban, Pramudijanto, & Gamayanti, 2015) yang telah mengembangkan desain kontroler *fuzzy PID Gain Sceduling* untuk pengaturan kecepatan motor DC dan menghasilkan performansi tanggapan sistem pengendalian yang baik dengan *overshoot*  $\pm 1\%$ , *rise time* 2,6s, dan *settling time* 3,6s, sehingga metode kendali tersebut dapat dikembangkan dalam pengendalian empat motor DC pada sistem FWMR. Penelitian (Xu et al., 2013) telah mengembangkan metode *fuzzy sugeno* pada aplikasi keseimbangan *two wheeled mobile robot* dengan prinsip kinerja independen pada masing-masing motor. Penelitian (Weihua, Ping, & Haiyan, 2016) yang telah mendesain dan mengimplementasikan *four wheeled mobile robotic* menggunakan sistem kendali *fuzzy*. Penelitian (Hashemi, Ghaffari, & Ghaffari, 2011) telah meneliti kinerja metode kontrol gabungan *PI-Fuzzy* pada *Mobile Robot* dengan aktuator *omni-directional* dan mendapatkan hasil optimal bagi masukan *driver* aktuator *Robot*.

Memfaatkan pendekatan baru perencanaan *controller Fuzzy-PID* pada *robot* beroda *Four-Wheeled* dengan motor DC, maka penelitian ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan yang belum banyak di teliti yaitu, permasalahan pada jalan menanjak hingga sudut kemiringan  $30^0$  dan variasi beban yang di tambahkan, selain itu penelitian ini mempunyai tujuan berkontribusi memperoleh hasil kontrol *Mobile*

*Robot* dan kinerja motor DC yang lebih baik daripada menggunakan metode kontrol tunggal *PID* atau *Fuzzy*. Penelitian ini akan memberikan sumbangsih besar dalam keilmuan kontrol modern pada sistem *nonlinier* empat motor DC.

Penelitian ini merancang sebuah *Four-Wheeled Mobile Robot* motor DC dengan yang diuji pada *track* menanjak atau *inclined terrain*. Kontrol *Four Wheeled* yang dicouple dengan penggerak motor DC menjadi fokus utama saat beroperasi di berbagai *track*. Metode kontrol gabungan antara metode konvensional *PID* dengan metode kontrol modern *Fuzzy* menjadi fokus penelitian kontrol *Four Wheeled mobile robot* untuk mengatasi operasi dinamis saat *robot* berjalan di jalan menanjak (*track inclined terrain*).

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. bagaimana mendesain dan mengimplementasikan *Four Wheeled Mobile Robot* dengan metode kontrol *fuzzy-PID* yang tepat pada studi kasus variasi sudut kemiringan jalan dan variasi beban ?
- b. bagaimana pengaruh variasi sudut kemiringan dan variasi beban terhadap performansi tanggapan sistem pengendalian kecepatan putar pada *Four Wheeled Mobile Robot* dengan metode kontrol *fuzzy-PID* ?

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Mengimplentasikan sistem kontrol *fuzzy-PID* yang tepat pada FWMR dengan studi kasus variasi sudut kemiringan jalan dan variasi beban.
- b. *Four Wheeled Mobile Robot* dapat mengatasi permasalahan operasi jalan menanjak dengan variasi sudut kemiringan jalan & variasi beban, dan mengetahui pengaruh performansi tanggapan sistem pengendalian kecepatan putar *Four Wheeled Mobile Robot* dengan metode pengendali *fuzzy-PID*.

#### 1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. FWMR hanya di uji pada lintasan lurus menanjak dengan variasi sudut kemiringan dan variasi beban.
2. FWMR hanya bergerak pada bidang dengan permukaan tekstur rata dan tidak licin dan keempat roda menyentuh permukaan lintasan.

#### 1.5. Relevansi

Relevansi dari penelitian ini dapat ditinjau dari dua aspek sebagai berikut:

1. Tema penelitian yang disusulkan ini terkait erat dengan perlombaan bertaraf internasional tentang studi permasalahan robot berjalan pada jalan menanjak dan kebutuhan akan teknologi instrumentasi *robotika* beroda, yang mampu beroperasi dalam *case* permasalahan jalan menanjak. Metoda kontrol modern yang diterapkan diharapkan menyelesaikan permasalahan kinerja *Four Wheeled Mobile robot*.
2. Tema penelitian ini juga sejalan dengan tema unggulan penelitian yang diusung oleh salah satu pusat studi di ITS, yaitu Pusat Studi Teknologi Informasi dan Komunikasi dan *Robotika*, dimana salah satu temanya adalah terkait dengan *robot* untuk otomatisasi industry, ([http://lppm.its.ac.id/?page\\_id=558](http://lppm.its.ac.id/?page_id=558)).

#### 1.6. Target Luaran

Target luaran yang dicanangkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Prototip (purwarupa) dari *Four Wheeled Mobile Robot*, yang telah diidentifikasi untuk dapat digunakan pada kajian metode kendali modern serta studi eksploratif terkait teknologi *Mobile Robot* lebih lanjut yang memanfaatkan empat penggerak motor listrik,
- b. Publikasi makalah ilmiah pada jurnal internasional terindex SCOPUS.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Teori Penunjang

Beberapa teori penunjang yang digunakan pada penelitian ini meliputi: sistem kontrol *Four Wheeled Mobile Robot*, motor DC, dan analisis data melalui sistem HMI.

##### 2.1.1. *Four Wheeled Mobile Robot*

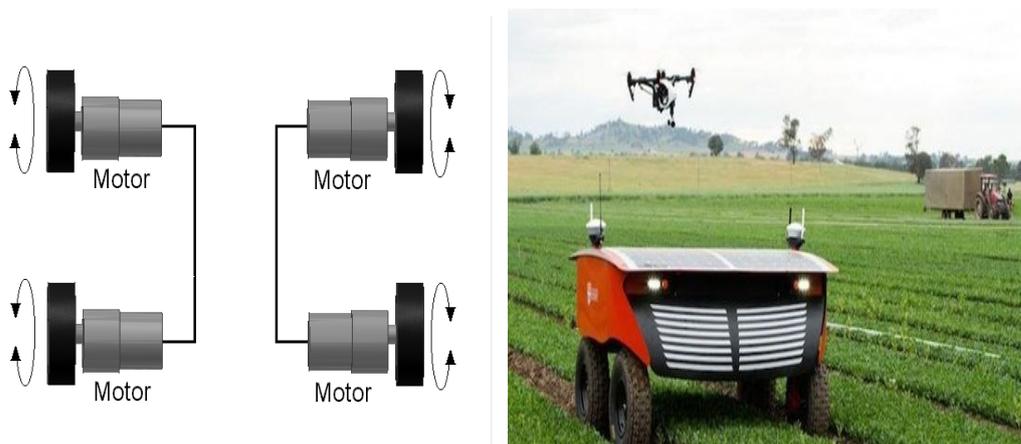
*Wheeled Robot* atau *Robot* beroda adalah *Robot* yang beroperasi di tanah menggunakan roda bermotor listrik untuk mendorong maju atau mundur saat beroperasi (Phuong Nam, Manh Hung, Trung Ty, Van Hau, & Thanh Long, 2017). Desain *Wheeled Robot* lebih sederhana daripada *Robot* dengan tipe berkaki, *Robot* dengan *Wheeled* lebih mudah untuk diterapkan, dirancang, dibangun, dan diprogram untuk operasi kinerja di medan datar (Ding et al., 2017).

Kerugian atau kelemahan *Wheeled Robot* adalah sulitnya penerapan navigasi dalam semua hambatan *track*/jalan yang akan dilalui, seperti medan penurunan dan tanjakan yang tajam atau daerah dengan gesekan rendah (Dutta & Dasgupta, 2017) (Fan et al., 2017). *Wheeled Robots* paling populer di kalangan konsumen pasar teknologi dengan biaya yang lebih ekonomis dibanding dengan jenis *Robot* lainnya.



**Gambar 2.1** *Mobile Robot* digunakan oleh Amazon (“amazon-is-now-using-a-whole-lot-more-of-the-robots-from-the-company-it-bought-for-775-million,” n.d.)

*Wheeled Robot* memiliki sejumlah roda, dengan hanya dua roda saja cukup untuk keseimbangan statis dan dinamis seperti penelitian *Robot balancing* (Iagnemma & Dubowsky, 2011), namun kinerja menggunakan dua roda tidak akan efektif jika digunakan dalam aplikasi teknologi industri dan aplikasi *electric vehicle*, yang secara umum menggunakan *Four-Wheeled* dalam aplikasi industri *Mobile electric car* (Silva, Magall, Angelo, & Garcia, 2006). *Four Wheeled* diperlukan untuk menjaga semua roda tetap beroperasi berjalan dengan baik, ketika daerah *track* tidak lagi landai. *Wheeled Robot* yang akan dirancang bangun pada penelitian ini adalah jenis *Robot* empat roda *powered*. Hal tersulit propulsi dari 4 roda *powered* ini adalah mendapatkan kecepatan putar yang sama dari keempat roda, jika roda tidak berjalan dengan kecepatan yang sama, yang lebih lambat akan tergelincir (tidak efisien) dan *Robot* tidak akan mampu berjalan mendorong lurus. Rancangan yang baik akan menciptakan *Mobile Robot* yang sempurna dengan empat roda bekerja keseluruhan (Kutaiba & Wajdi, 2016).



**Gambar 2. 2** *Four Wheeled Mobile Robot* (Fan et al., 2017),(Huynh Xuan, 2016)

*Four-Wheeled Mobile Robot* merupakan kendaraan listrik berarsitektur kendali algoritma otomatis, berbasis energi listrik dengan penggerak motor listrik, Gambar 2.2 penggerak yang digunakan menggunakan motor listrik berjumlah empat untuk penggerak semua roda (Larminie & Lowry, 2003). Sistem kontrol

*Mobile Robot* sangat berbeda dari sistem *Mobile manual*. *Mobile Robot* memiliki visi tersendiri dalam sistemnya dan teknologi ini banyak diaplikasikan pada moda transportasi yang sedang dikembangkan untuk menyediakan solusi potensial untuk masalah-masalah transportasi (Lee, Lee, Hwang, & Suh, 2014).

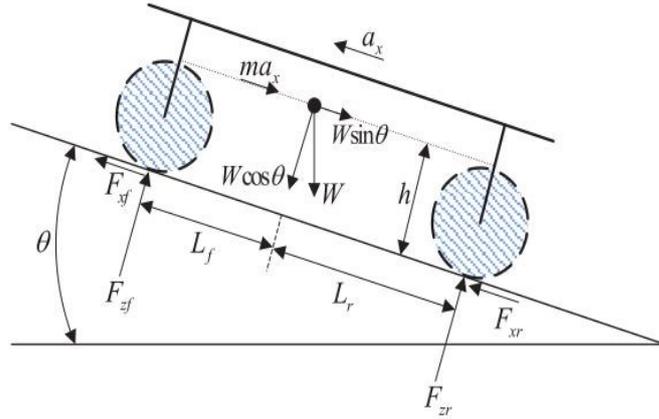


**Gambar 2. 3** Contoh *Mobile Robot* (Huynh Xuan, 2016)

Permasalahan dari kinerja *Mobile Robot* ini adalah kondisi dinamis ketika beroperasi di *track* menanjak. Kontrol terbaik dalam mengendalikan motor penggerak, yaitu motor DC menjadi prioritas dalam penelitian ini, dengan kondisi dinamis yang dijalani oleh *Mobile Robot* memiliki konfigurasi *Four-Wheeled drive* dari *Mobile Robot* ditampilkan didalam Gambar 2.4 dan Gambar 2.5. *Robot* memiliki dua sumbu dan empat karet ban berbahan silikon beroperasi di jalan tanjakan. Koordinat badan *Robot* dan parameter geometris ditampilkan dalam Gambar 2.4. gaya dorong *Wheeled* untuk setiap sumbu terdiri dari komponen normal dan komponen *longitudinal*. Hal ini diasumsikan bahwa massa badan *Robot* terletak di pusat gravitasi, maka dinamika *Robot* dapat di gambarkan sebagai berikut (Zhu et al., 2011)

$$\dot{v}_{bx} = v_y \gamma + \frac{1}{m} (F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} - W \sin \theta) \quad (2.1)$$

$$\dot{v}_{by} = -v_x \gamma + \frac{1}{m} (F_{y1} + F_{y2}) \quad (2.2)$$



**Gambar 2. 4** Tampak samping *Robot* beroperasi *track* naik (Zhu et al., 2011)

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{I_{yy}} [F_{zr}L_r - F_{zf}L_f - (F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4})h] \quad (2.3)$$

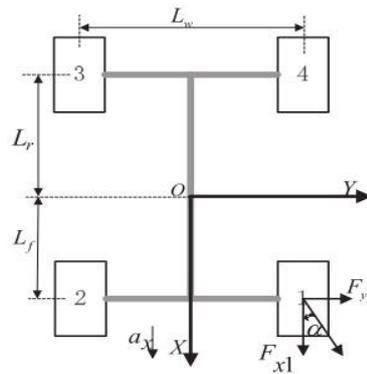
$$\dot{\gamma} = \frac{1}{I_{zz}} [(F_{x2} + F_{x3} - F_{x1} - F_{x4}) \frac{Lw}{2} + F_{y1}L_f - F_{y2}L_r - M_{res}\gamma] \quad (2.4)$$

$$\dot{\omega}_1 = \frac{1}{I_w} [T_1 - T_{rx1} - b_w\omega_1] \quad (2.5)$$

$$\dot{\omega}_2 = \frac{1}{I_w} [T_2 - T_{rx2} - b_w\omega_2] \quad (2.6)$$

$$\dot{\omega}_3 = \frac{1}{I_w} [T_3 - T_{rx3} - b_w\omega_3] \quad (2.7)$$

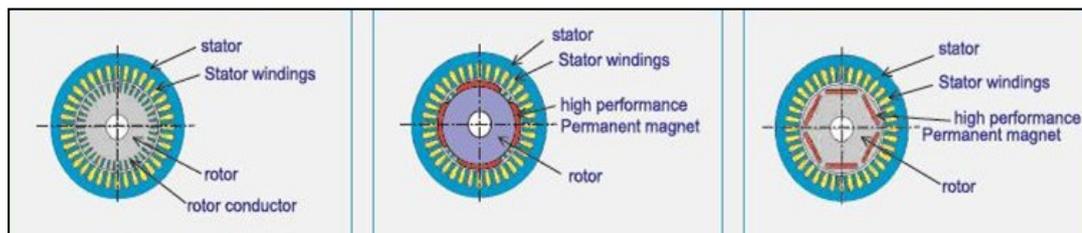
$$\dot{\omega}_4 = \frac{1}{I_w} [T_4 - T_{rx4} - b_w\omega_4] \quad (2.8)$$



**Gambar 2. 5** Tampak atas *Robot* (Zhu et al., 2011)

### 2.1.2. Pemilihan Motor DC Sebagai Motor Penggerak *Robot*

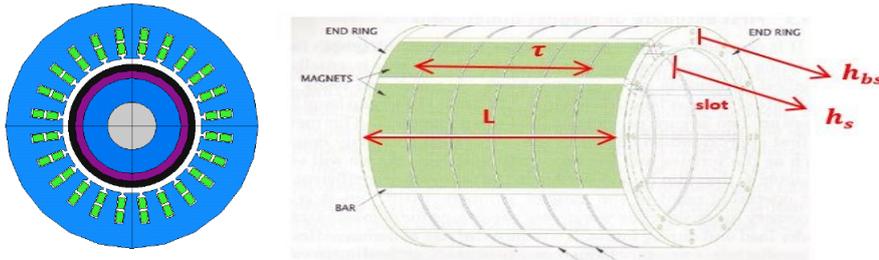
Motor DC magnet permanen adalah salah satu motor yang sering digunakan pada dunia industri. Motor DC magnet permanen memiliki kelebihan yaitu, harga yang lebih murah, efisiensinya cukup tinggi, beratnya lebih ringan, ukurannya lebih kecil, serta torsi yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan jenis motor induksi. Faktor penentu dari performa motor magnet permanen adalah desain suatu magnet permanen yang digunakan (Raafiu, 2017a). Desain pada motor magnet permanen mirip dengan motor induksi multifasa, namun yang membedakan adalah terdapat suatu magnet permanen pada bagian rotor. Desain sebuah motor magnet permanen telah menjadi perhatian untuk menuju tiga hal yang disebutkan sebelumnya. Salah satu jenis motor magnet permanen adalah motor arus searah (DC). Motor ini banyak digunakan karena memiliki performa paling baik dibandingkan dengan motor magnet permanen lainnya. Salah satu faktor utama adalah nilai torsi yang lebih besar (Raafiu, 2017a)



**Gambar 2. 6** Motor induksi (kiri) dan motor magnet permanen dengan dua desain yang berbeda (tengah dan kanan) (Raafiu, 2017a)

Keunggulan dari motor magnet permanen arus searah (PM-DC) adalah dalam segi efisiensi, torsi, dan beratnya lebih ringan untuk daya yang sama. Efisiensi motor dapat diperoleh melalui parameter yang merugikan yang dihasilkan komponen motor. Rugi tersebut antara lain adalah *copper loss* (rugi karena tembaga), *core loss* (rugi pada inti motor), rugi mekanik dan rugi friksi. Karakteristik penting lainnya yakni *power density* (PD). *Power density* merupakan hasil perbandingan daya motor terhadap *volume* (dimensi) total dari motor. Pada prinsipnya, ukuran motor semakin kecil semakin menguntungkan khususnya dari segi biaya produksi. Desain optimasi pada PM-DC bisa melalui dua parameter,

yakni *power efisiensi* dan *power density*. Dipaparkan terkait optimasi nilai *power density* pada magnet permanen yang terdapat pada motor berdasarkan parameter-parameter desain dari motor DC. Parameter yang dioptimasi yaitu diameter stator dalam ( $D$ ), panjang aksial motor ( $L$ ), pole pitch ( $\tau$ ), pembebanan magnet spesifik ( $B$ ), pembebanan elektrik spesifik ( $a_c$ ), panjang besi penahan stator belakang ( $h_{bs}$ ) dan panjang slot yang digunakan ( $h_s$ ). Parameter tersebut bisa dilihat pada Gambar 2.6



**Gambar 2. 7** Penampang PM-DC dan beberapa variabel (Raafiu, 2017a)

Model daya *output* dan volume pada desain mesin elektrik

$$P_M = \frac{Q}{t} = \frac{c D^2 L n_s}{t} \quad (2.6)$$

$$C = 1.11 p^2 B a_c K_w \quad (2.7)$$

$$V_T = \frac{\pi}{d} [D + 2(h_s + h_{bs})]^2 L \cdot 10^{-3} \quad (2.8)$$

Motor DC mempunyai variabel fisis yang menjadi *input* dan ouput sistem dalam penelitian ini. *Variable* fisis ouput dalam penelitian ini adalah kecepatan motor DC. Penelitian harus mengetahui persamaan state space dari sistem tersebut yaitu kecepatan motor DC. State space kecepatan motor DC dapat dijabarkan sebagai berikut

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b & K \\ -J & J \\ -K & -R \\ -L & -L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ l \end{bmatrix} V \quad (2.9)$$

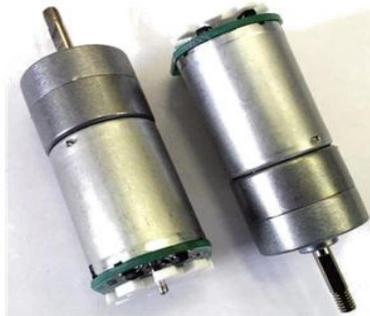
$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \phi \\ i \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Persamaan *state space* diatas memiliki bentuk standart yang ditampilkan dibawah ini dengan vektor  $x$  = matriks theta dot i dan *input*  $u = V$ .

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.11)$$

$$y = Cx \quad (2.12)$$

Motor DC *gearbox* dengan *rasio* 17,1:1 dan menghasilkan kecepatan *shaft* sebesar 400 rpm pada tegangan 6 Volt. Torsi luaran nominal dari motor adalah sebesar 0,4 Kgcm. Motor juga dilengkapi dengan rotary encoder jenis *incremental* sebanyak 2 kanal dengan resolusi sebesar 8 pulsa per rotasi. Motor Bekerja pada tegangan nominal sebesar 6 sampai dengan 9 Volt dengan arus nominal sebesar 400 mA. (Raafiu, 2017b)



**Gambar 2. 8** Motor DC *gearbox* (Erc, 2016)

### **2.1.3. Kinerja *Display System***

*Display System* untuk meningkatkan interaksi antara mesin dan manusia melalui tampilan layar komputer dan memenuhi kebutuhan pengguna terhadap informasi sistem. Membuat desain pada HMI yang sesuai dengan sistem kerja dapat memberikan kemudahan untuk dapat *monitoring* dan menganalisa sistem kerja tersebut. Konsep HMI pada industri adalah sebagai media untuk komunikasi antara bagian operator dengan perencanaan serta perancangan sistem dengan maksimum serta sebagai sarana bagi operator untuk mengakses sistem kerja dilapangan (Ardiansyah & Prasetyawan, 2014). Adapun fungsi dari HMI dijabarkan sebagai berikut (Filatov et al., 2016):

1. *Monitoring* dan Analisa,  
dapat melakukan *monitoring* kondisi sistem kerja dilapangan secara *real time* tanpa harus melihat langsung kelapangan sehingga bisa menghemat waktu dan tenaga.
2. Kendali *real time*,  
dapat mengendalikan sistem kerja dengan seketika melalui *HMI*. Sistem ini dapat menghemat waktu dan tenaga kerja untuk *memonitoring* dan mengendalikan setiap sistem kerja produksi.
3. Efisien,  
dapat menjalankan suatu proses atau mematikan suatu sistem hanya dengan mengatur melalui *HMI*. Software untuk *HMI* saat ini sudah banyak yang digunakan.

Penelitian ini direncanakan menggunakan rancang bangun *software Visual Studio* yang nantinya menggunakan komunikasi *wireless* antara *Four-Wheeled Mobile Robot* dengan *HMI* yang terpasang pada komputer.



**Gambar 2.9** Logo *Visual Studio* (Visual, 2017)

#### **2.1.4. Metode Kontrol *Fuzzy*-PID**

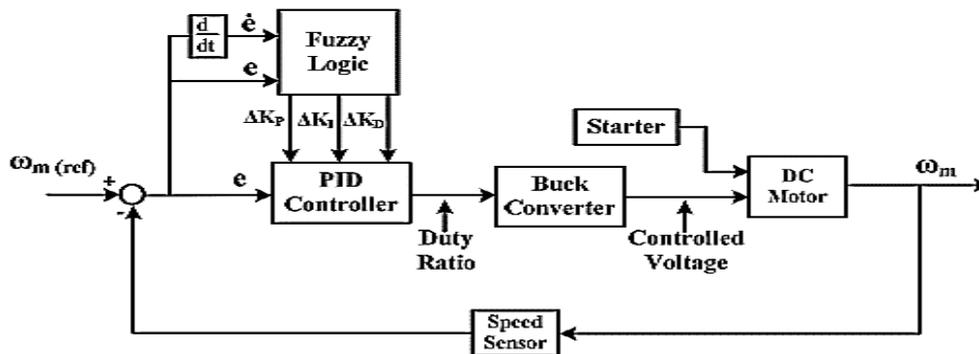
Kontroler PID memiliki kekurangan dan kelebihan, ketiga parameter yaitu parameter P, parameter I, dan parameter D saling menutupi kekurangan masing-masing dengan cara menggabungkan ketiga parameter. Kontroler *PID* merupakan kontroler berumpan balik yang memiliki 3 buah *controller* yaitu *controller P* (*Proportional*), *controller I* (*Integral*), dan *controller D* (*Derivative*) yang masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mengatur respon dari sebuah sistem, menghilangkan *offset*, dan menghasilkan perubahan awal yang besar (Wei & Guo, 2010). Kontroler *PID* merupakan hasil penjumlahan dari *output* kontroler P, *output* kontroler I, dan *output* kontroler D.

Karakteristik kontroler *PID* merupakan metode kendali konvensional sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar ketiga parameter dari P, I dan D yaitu nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  (Aisjah, 2017). Penyetelan konstanta  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  akan mengakibatkan reaksi dari respon yang berbeda-beda. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat disetel lebih menonjol dibanding yang lain. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan. Parameter-parameter tersebut tidak bersifat independen, sehingga pada saat salah satu nilai konstantanya diubah, maka mungkin sistem tidak akan bereaksi seperti yang diinginkan. (Hibban et al., 2015)

**Tabel 1.** Pengaruh  $K_p, K_i, K_d$  terhadap respon (Muhyiddin Bin Yusof, 2013)

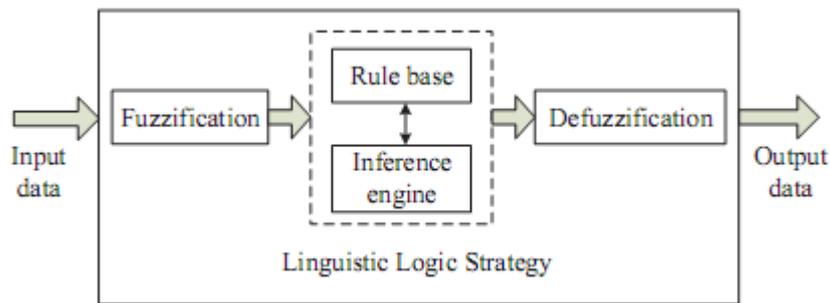
<b>Respon</b> <b>Close loop</b>	<b>Rise time</b>	<b>Overshoot</b>	<b>Setting time</b>	<b>SS error</b>
<b><math>K_p</math></b>	Turun	Naik	Perubahan kecil	Turun
<b><math>K_i</math></b>	Turun	Naik	Naik	Hilang
<b><math>K_d</math></b>	Perubahan Kecil	Turun	Turun	Perubahan Kecil

*Tuning* dari parameter parameter *PID* akan dikondisikan oleh logika *fuzzy* sesuai dengan dinamisnya kinerja pada *Four-Wheeled Mobile Robot*. Logika *Fuzzy* sudah banyak digunakan dalam berbagai bidang. Penelitian ini kontroler *PID* akan dipakai sebagai kontroler utama dari sistem pengaturan kecepatan *Four-Wheeled* motor DC. Nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  harus sangat diperhatikan. Pemberian nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  sangat berpengaruh terhadap respon yang akan keluar dari motor DC ini. Pengendali proporsional  $K_p$  akan memberikan efek mengurangi waktu naik tetapi tidak menghapus kesalahan keadaan tunak. Pengendali integral  $K_i$  akan memberikan efek menghapus kesalahan keadaan tunak tetapi berakibat memburuknya tanggapan *transient*. Pengendali *derivatif*  $K_d$  akan memberikan efek meningkatnya stabilitas sistem, mengurangi lewatan maksimum dan menaikkan tanggapan fungsi alih. Efek dari setiap pengendali dalam sistem *close loop* dapat dilihat pada tabel 1.



**Gambar 2. 10.** Diagram blok *fuzzy-PID* kontrol motor DC (Abhinav, 2012)

Gambar 2.10 menunjukkan bahwa terdapat logika *fuzzy* dengan dua input  $e$  dan  $\Delta e$ . *Fuzzy logic* berfungsi sebagai *turner* parameter PID untuk mengendalikan nilai *duty ratio* (PWM). *Buck converter* berfungsi sebagai *driver* untuk mengendalikan arus dan tegangan yang akan masuk ke motor DC. *Feedback* hasil pengukuran kecepatan putar motor DC akan di *sensing* oleh sensor kecepatan putar sehingga menghasilkan nilai *error* yang telah dibandingkan dengan kecepatan putar *setpoint*. Perancangan logika *fuzzy* tidak memerlukan persamaan matematik dari objek yang akan dikendalikan (Aisjah, Arifin, Masroeri, & Saiko, 2011). Logika *fuzzy* terdiri dari beberapa komponen, yaitu *fuzzifier*, *Fuzzy rule base*, *Fuzzy inference mechanisme* atau *Fuzzy inference engine*, dan *defuzzifier* *Fuzzy rule base* berisi pernyataan-pernyataan logika *Fuzzy* (*Fuzzy statement*), yang berbentuk pernyataan *IF-THEN* (Muhyiddin Bin Yusof, 2013). *Fuzzifier* digunakan untuk memetakan nilai/harga variabel di dunia nyata kedalam himpunan *Fuzzy* (*Fuzzy sets*) (Aisjah, 2017). Pemetaannya dilakukan dengan menggunakan fungsi yang disebut fungsi keanggotaan. Terdapat beberapa metode *fuzzifier*, 3 diantaranya yaitu *singleton fuzzifier*, *gaussian fuzzifier* dan *triangular fuzzifier*. *Defuzzifier* mengembalikan hasil perhitungan *Fuzzy* (himpunan *Fuzzy*) menjadi variabel sesuai rentangnya di dunia nyata, sama dengan *fuzzifier*, *defuzzifier* juga menggunakan fungsi keanggotaan untuk memetakan nilai himpunan *Fuzzy* menjadi variabel nyata (Lin & Wang, 2017). Terdapat beberapa metode *defuzzifier*, contohnya yaitu *Center of gravity defuzzifier*, *Center average defuzzifier* (Hibban et al., 2015).



**Gambar 2.11** Skema arsitektur logika *Fuzzy* (Rojas, Ponce, & Molina, 2014)

Penerepan logika *Fuzzy* sebagai aksi kendali, terdapat beberapa bagian yaitu fuzzifikasi, kaidah, mesin inferensi, tipe reduksi, dan defuzzifikasi (Aisjah et al., 2011).

- Fuzzifikasi

Fuzzifikasi proses pengubahan nilai numerik (tegas) ke dalam fungsi keanggotaan *Fuzzy*. Di dalam fuzzifikasi, terdapat komponen-komponen dari logika *Fuzzy*, yaitu :

1. Variabel *Fuzzy*

Variabel *Fuzzy* merupakan variabel yang digunakan dalam logika *Fuzzy*. Sebagai contoh variabel *Fuzzy* adalah *error* “e” dan *delta error* “de”.

2. Himpunan *Fuzzy*

Himpunan *Fuzzy* merupakan grup yang mewakili kondisi tertentu dalam suatu variabel *Fuzzy*. Sebagai contoh, variabel *error* dibagi menjadi tiga, dengan himpunan *Fuzzy*: rendah, sedang, tinggi

3. Semesta pembicaraan

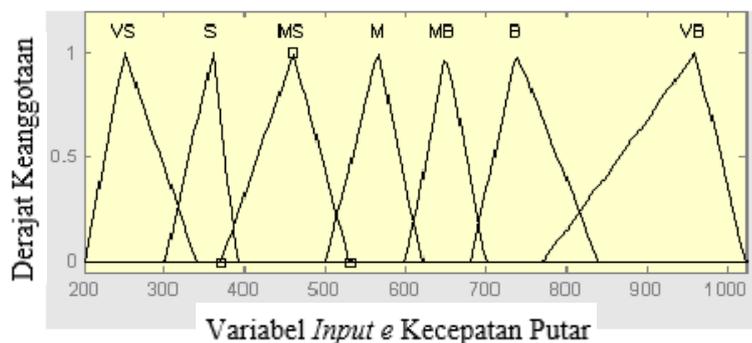
Semesta pembicaraan merupakan keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel *Fuzzy*. Sebagai contoh, semesta pembicaraan variabel *error* adalah  $[-1,1]$

4. Domain

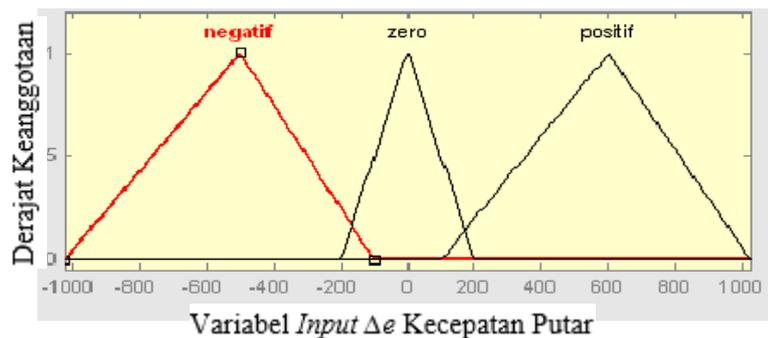
Domain merupakan keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu himpunan *Fuzzy*. Sebagai contoh, *error* rendah =  $[-1;-0,5]$ ; *error* sedang =  $[0,5;0,5]$ ; *error* tinggi =  $[0,5;1]$

5. Fungsi keanggotaan *Fuzzy*

Fungsi keanggotaan *Fuzzy* merupakan hubungan antara nilai derajat keanggotaan dengan variabel *Fuzzy* (numerik). Fungsi keanggotaan *Fuzzy* juga dapat menentukan nilai derajat keanggotaan dengan himpunan *Fuzzy* berdasarkan variabel *Fuzzy* (numerik). Logika *Fuzzy* sebagai aksi kendali pada parameter-parameter *PID* memiliki keanggotaan *Fuzzy* berbentuk segitiga, yang ditampilkan pada Gambar 2.5.



(a)



(b)

**Gambar 2.12** Fungsi keanggotaan logika *Fuzzy* untuk (a) variabel *error* (*rpm*); (b) variabel *delta error* (*rpm*) (Musyafa & Ibrohim, 2013)

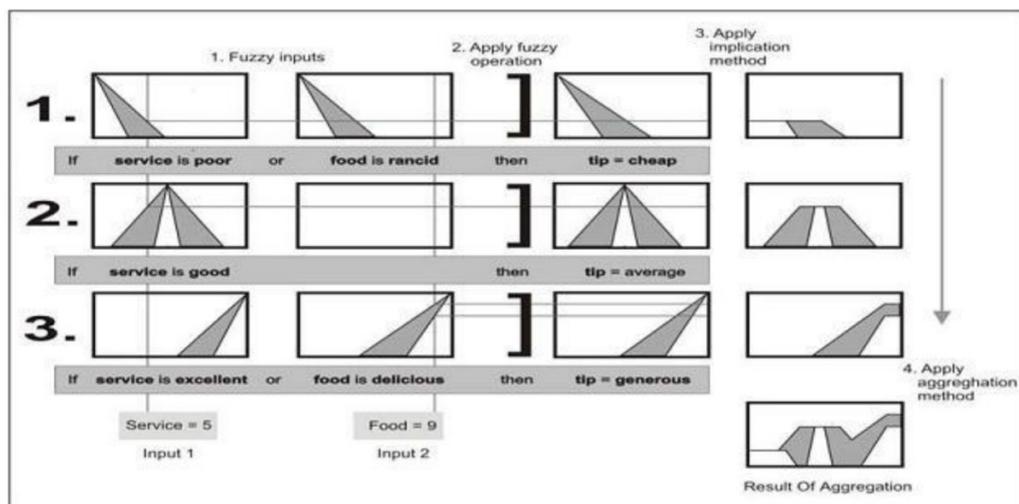
- Kaidah

Kaidah merupakan suatu bentuk aturan relasi/implikasi jika-maka (*if-then*). Di dalam kaidah logika *Fuzzy* terdapat operasi himpunan *Fuzzy*, yaitu operasi yang mengombinasikan dan memodifikasi dua atau lebih himpunan *Fuzzy*. Terdapat tiga operasi dasar pada himpunan *Fuzzy* yaitu *OR* (*union*),

*AND* (intersection), dan *NOT* (complement). Hasil dari dua atau lebih himpunan *Fuzzy* akan mempunyai nilai keanggotaan baru hasil operasi dua himpunan yang disebut *firing strength* atau  $\alpha$  predikat. Operasi himpunan *Fuzzy* sebagai aksi kendali pada parameter parameter yang digunakan adalah *AND* (intersection) (Martinez, Hissel, & Péra, 2012)(Musyafa & Ibrohim, 2013).

- Mesin inferensi

Mesin inferensi merupakan proses implikasi dalam menalar nilai masukan untuk menentukan nilai keluaran sebagai bentuk pengambil keputusan. Mesin inferensi terdiri dari proses implikasi dan agregasi. Implikasi yaitu proses menentukan derajat keanggotaan keluaran dari masing-masing kaidah dengan menggunakan operator himpunan *Fuzzy*. Proses selanjutnya adalah agregasi yaitu proses mengkombinasikan semua derajat keanggotaan keluaran masing-masing kaidah menjadi derajat keanggotaan tunggal (Castillo & Melin, 2008).



**Gambar 2.13** Mesin inferensi pada logika *Fuzzy* (Robandi & Kharisma, 2009)

- Tipe reduksi

Tipe reduksi merupakan langkah pertama pengolahan keluaran mesin inferensi dengan menghitung *centroid* dari logika *Fuzzy*. Tipe reduksi dapat diselesaikan dengan beberapa metode antara lain:

1. Reduksi tipe *centroid* (*center-of-sums*)

*Centroid* dihitung dari kombinasi area keluaran yang sebelumnya didapatkan dari aktivasi setiap kaidah berdasarkan *firing strength*.

2. Reduksi tipe pusat himpunan (*center-of-sets*)

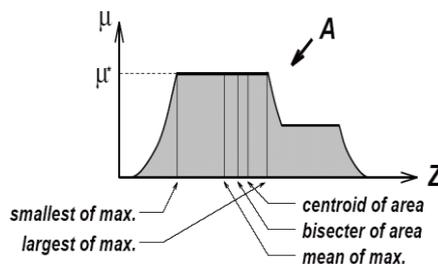
Metode ini menghitung *centroid* setiap konsekuen dari kaidah yang aktif .

3. Reduksi tipe ketinggian (*height*)

Keluaran setiap kaidah digantikan dengan singleton pada titik maksimum keanggotaan lalu dihitung *centroid*-nya.

• *Defuzzifikasi*

*Defuzzifikasi* merupakan proses mengubah derajat keanggotaan hasil agregasi menjadi nilai analog keluaran. *Input* dari proses *defuzzifikasi* adalah suatu himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan *fuzzy*, sedangkan *output* yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada *domain* himpunan *fuzzy* tersebut, sehingga jika diberikan suatu himpunan *fuzzy* dalam *range* tertentu, maka harus dapat diambil suatu nilai *crisp* tertentu sebagai keluarannya. Ada beberapa metode *defuzzifikasi* pada komposisi aturan Mamdani, diantaranya yaitu metode COA, bisektor, MOM, dan LOM, seperti pada Gambar 2.14. (Sutikno, 2011). Metode COA, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil titik pusat daerah *fuzzy*. Metode bisektor, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai pada domain *fuzzy* yang memiliki nilai keanggotaan setengah dari jumlah total nilai keanggotaan pada daerah *fuzzy*. Metode MOM, solusi *crisp* yang diperoleh dengan cara mengambil nilai rata-rata *domain* yang memiliki nilai keanggotaan maksimum. Metode LOM, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai terbesar dari *domain* yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.



Gambar 2.14 Metode *defuzzifikasi* pada aturan mamdani

## 2.2. Studi Penelitian Sebelumnya (*State of the Art*)

**Tabel 2.** Tabel *State of the Art*

Tahun	Peneliti	Aplikasi	Algoritma Pengendalian	Keterangan	Hasil
2017	(Fan et al., 2017)	<i>Four-Wheeled Mobile Robot</i>	Logika <i>Fuzzy</i>	Dilakukan desain dan eksperimen dengan aksi kendali logika <i>Fuzzy</i>	Logika <i>Fuzzy</i> dapat mengatasi ketidakpastian
2017	(Jayasree, Jayasree, & Vivek, 2017)	<i>Four-Wheeled Mobile Robot</i>	<i>Tracking optimal patch planning technique</i>	Tracking lokasi dinamis pada <i>Four Wheeled Mobile Robot</i>	Menemukan desain simulasi terbaik menemukan tracking pada <i>Mobile Robot</i>
2017	(Sato, Horie, & Ishiwaka, 2017)	<i>Two-Wheeled Mobile Robot</i>	<i>Robust adaptive</i>	<i>Two Wheeled Mobile Robot trajectory</i> menggunakan <i>adaptive robust</i> sistem kontrol	Sukses penelitian sistem kontrol robust pada two WMR
2017	(Masood et al., 2017)	<i>Climbing Robot</i>	<i>Semi Autonomous</i>	Desain dan rancang bangun <i>Robot</i> panjat pada anak tangga ( <i>rough terrains</i> )	Menggunakan sistem image processing dalam kinerja <i>Robot rough terrains</i>
2017	(Ding et al., 2017)	<i>Mobile Robot</i>	NN	<i>Adaptive Neural Network-Based Tracking Control for Full-State Constrained WMR System</i>	Kontron adaptif NN dapat disimulasikan tracking kendali roda pada <i>Mobile Robot</i>

**Tabel 2** Tabel *State of the Art* (lanjutan)

Tahun	Peneliti	Aplikasi	Algoritma	Keterangan	Hasil
<b>Pengendalian</b>					
2017	(Chen, Hu, Li, & Zhang, 2017)	<i>Automatic Parking</i>	<i>Fuzzy-PID</i>	<i>Fuzzy-PID</i> kendali pedal mobil konvensional.	Penerapan kinerja <i>fuzzy-PID</i> sangat baik dalam penerapan <i>automatic parking</i> kendali pedal mobil konvensional
2017	(Wang, Lv, Er, & Chen, 2017)	<i>Trajectory tracking control</i>	<i>Unmodelled Dynamics and Disturbances</i>	Pemodelan matematis dalam kinerja <i>Robot</i> menentukan titik koordinat ( <i>trajectory tracking</i> )	Model matematis untuk menciptakan sebuah <i>Robot</i> dalam <i>trajectory tracing</i>
2017	(Sharma & Palwalia, 2017)	<i>Adaptive Fuzzy PID</i>	<i>Simulink matlabs</i>	Kendali adaptive <i>fuzzy</i> pid pada motor DC	Model matematis motor DC dan hasil kendali <i>fuzzy</i> pid
2016	(Kutaiba & Wajdi, 2016)	Performa <i>Mobile Robot Wheels</i>	Desain rancangan metode baru	Analisa performa kinerja dari <i>Mobile Robots</i> bertipe beroda. <i>Mobile Robot Wheels</i>	Medapatkan desain terbaik untuk performa <i>Mobile Robot Wheels</i>

**Tabel 2** Tabel *State of the Art* (lanjutan)

Tahun	Peneliti	Aplikasi	Algoritma	Keterangan	Hasil
			<b>Pengendalian</b>		
2016	(Filatov et al., 2016)	<i>Four Wheeled Mobile Robot</i>	<i>Fuzzy mamdani</i>	Autonomous sistem parking otomatis <i>Mobile Robot Four wheels</i>	Aksi kendali logika <i>Fuzzy</i> dapat digunakan dalam operasi <i>Mobile Robot</i> dalam visi <i>parking automation Mobile</i>
2016	(Weihua et al., 2016)	<i>Four Wheeled Mobile Robot</i>	Logika <i>Fuzzy</i>	Logika <i>fuzzy</i> dalam sistem kendali <i>Mobile Robot Variable Universe Control</i>	<i>Mobile Robot</i> sistem dinamis dapat dikendalikan dengan <i>fuzzy variable universe control</i>
2016	(Roozegar & Mahjoob, 2016)	<i>Two Wheeled spherical Robot dengan pendulum</i>	<i>Fuzzy-PID</i>	Kontrol <i>Fuzzy-PID</i> kendali <i>two Wheeled speherical</i> dalam <i>track</i> tanjakan	Modellingdan control berhasil dalam kontrol <i>two Wheeled spherical Robot</i> dengan metode <i>Fuzzy-PID</i>

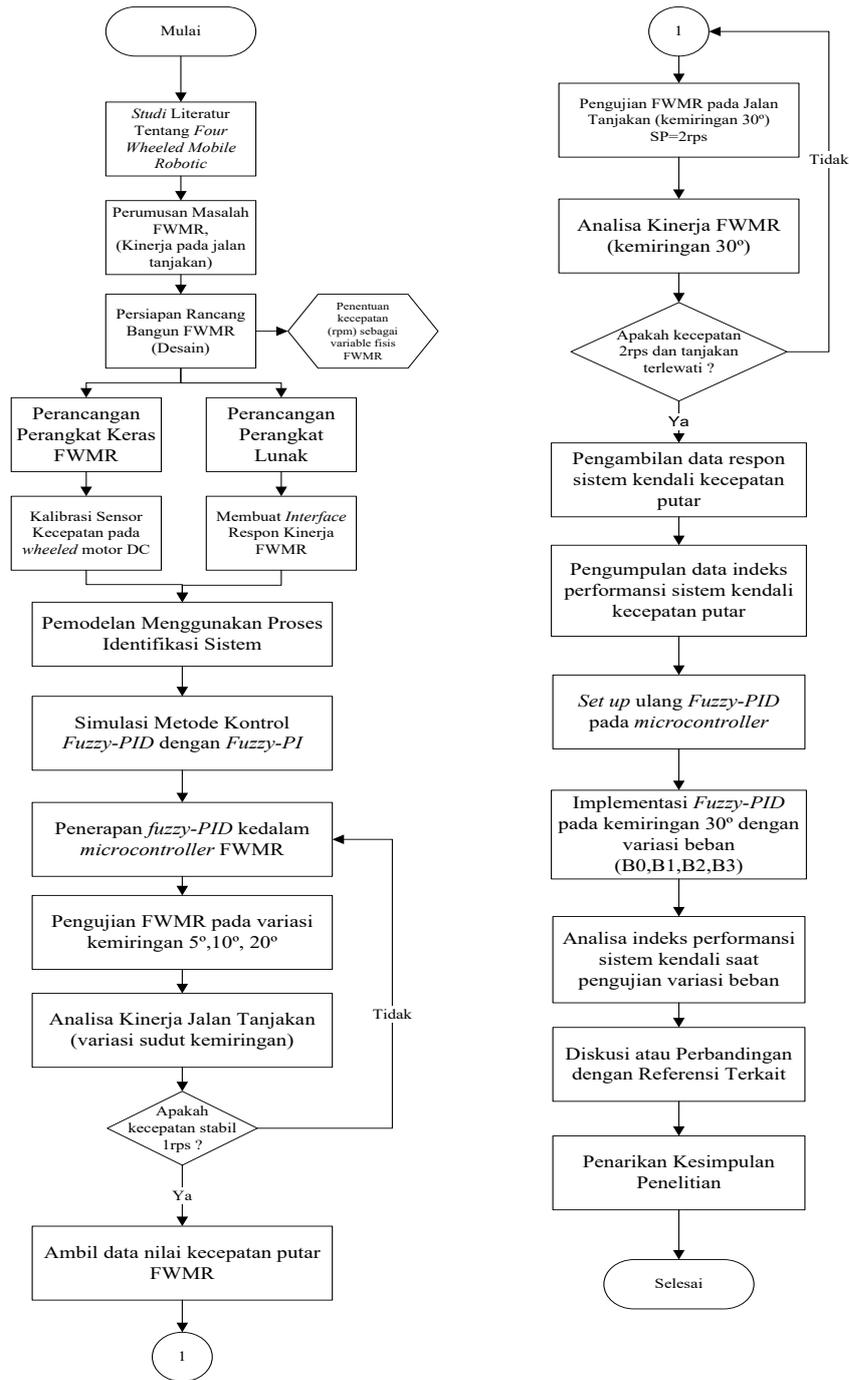
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB 3

### METODE PENELITIAN

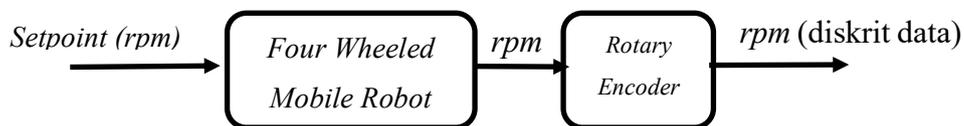
#### 3.1. Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini, secara garis besar alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



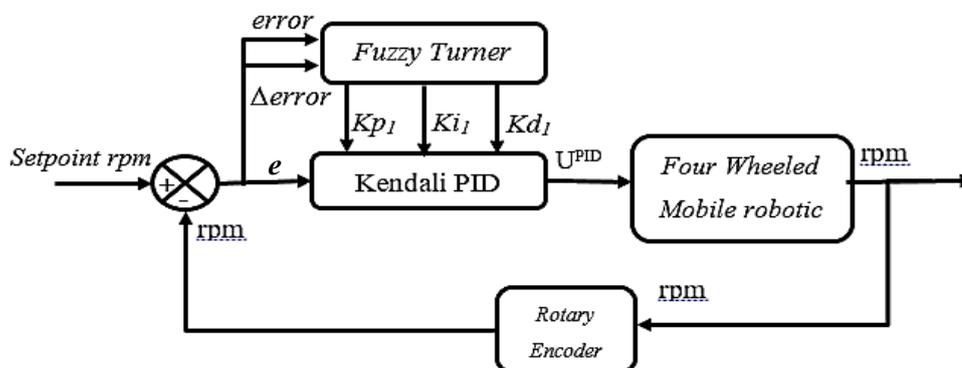
**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

Kendali *Fuzzy*-PID mampu mengatasi kinerja *robot* yang beroperasi di jalan menanjak, serta menciptakan solusi aktual *robot* beroda dengan empat motor penggerak motor DC, yang mampu bekerja secara *independent*. Sebuah perancangan dan implementasi sistem kontrol otomatis membutuhkan dasar sistem melalui diagram blok. Diagram blok mempresentasikan variabel-variabel dan instrumen yang dibutuhkan dalam membuat sistem kendali otomatis. Gambar 3.2 menunjukkan diagram blok tanpa sistem kendali (*open loop system*), diagram blok ini dibuat untuk menguji performansi sistem FWMR tanpa sistem kendali. Gambar 3.3 merupakan diagram blok dengan sistem kendali (*close loop system*) *fuzzy tuning* parameter PID.



**Gambar 3. 2** Diagram blok tanpa sistem kendali (*open loop system*).

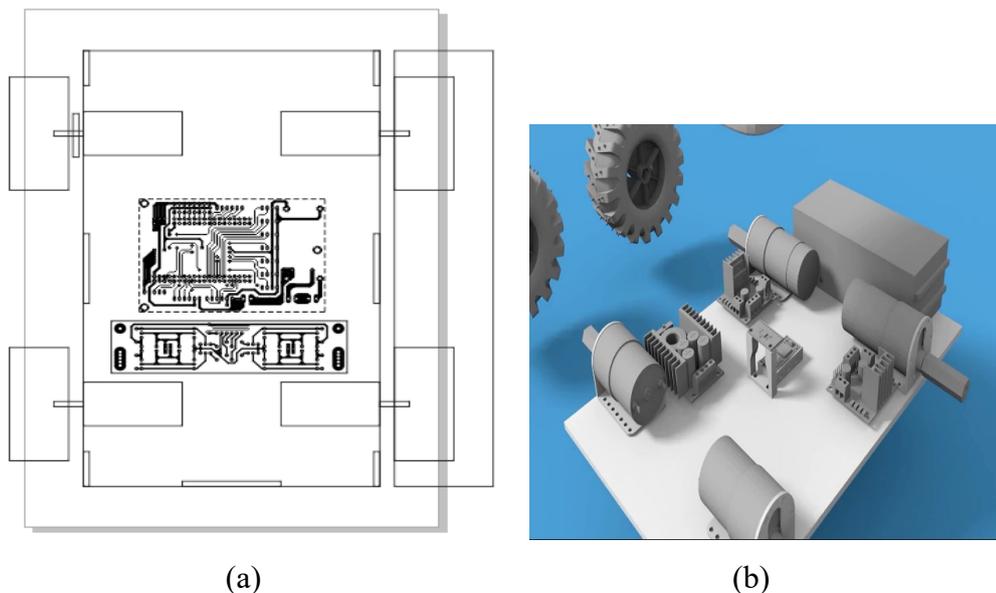
Pengujian sistem tanpa kendali ini dibuat untuk mengetahui performansi keempat motor DC pada FWMR yang bekerja pada jalan dengan variasi sudut kemiringan atau dengan variasi beban. Penelitian (Binugroho, Pratama, Syahputra, & Pramadihanto, 2016) telah membahas kinerja motor DC untuk aktuator sistem *mobile robot* dengan dua roda sebagai sistem keseimbangan, penelitian ini menunjukkan bahwa kontrol PID dibutuhkan untuk menstabilkan sudut keseimbangan dari sistem *balancing robot*. Penelitian tersebut dikembangkan melalui, implementasi sistem kontrol yang berbeda pada sistem *mobile robotic* dengan permasalahan yang berbeda.



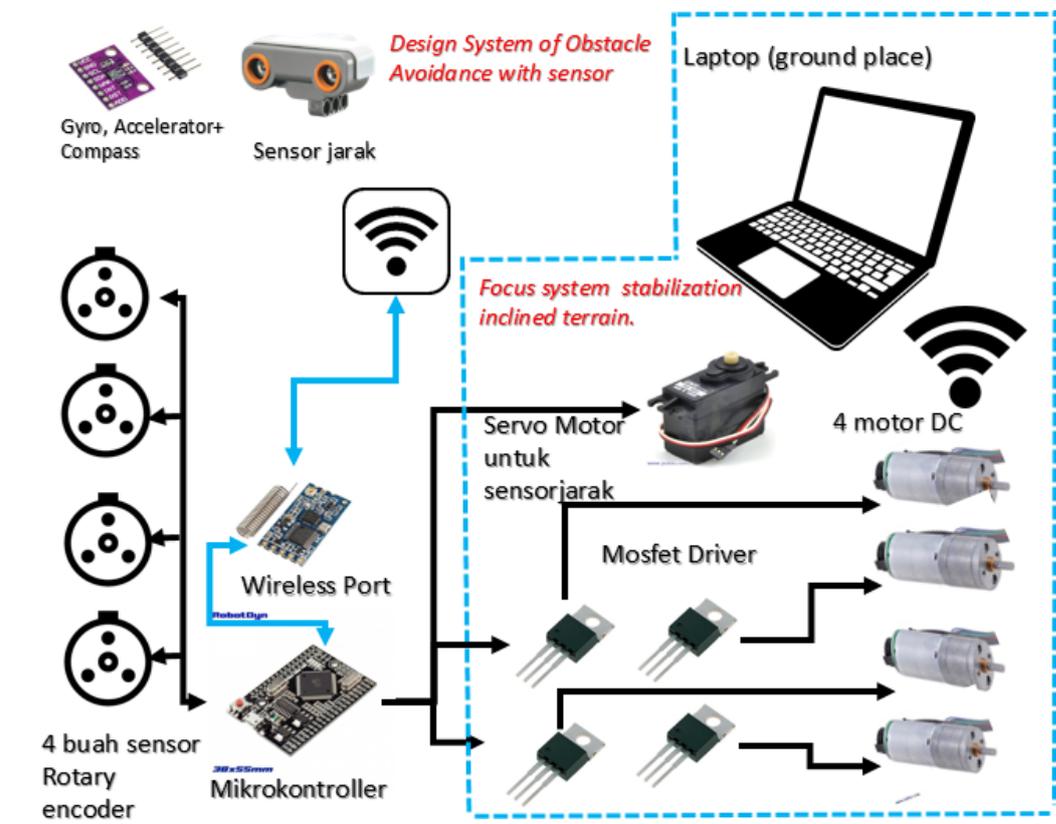
**Gambar 3. 3** Diagram blok dengan sistem kendali (*close loop system*)

### 3.2. Perancangan Perangkat Keras *Four Wheeled Mobile Robot*

*Four Wheeled Mobile Robot* yang akan di desain dalam penelitian ini memiliki ukuran panjang 25cm lebar 15cm. Prinsip kerja *mobile robot* ini yaitu menggunakan penggerak motor listrik bertipe motor DC. *Four Wheeled* yang dimaksud adalah motor DC yang digunakan berjumlah empat yang *dicouple* dengan roda (Weihua et al., 2016). Tantangan besar *Four Wheeled* pada *Mobile Robot* adalah empat motor DC dapat dikendalikan secara *independent* dan dioperasikan pada jalan tanjakan (*inclined terrain*). Tantangan yang harus dihadapi adalah sistem ketidakpastian dan sistem *non linier* saat *mobile robot* beroperasi pada *inclined terrain* (Zhu et al., 2011) (Kim, Yook, & Son, 2017) (Sharma & Palwalia, 2017). Tujuan *Four Wheeled Mobile Robot* ini adalah berjalan stabil dengan kecepatan yang diinginkan (*setpoint*). Ilustrasi dari sistem *Four Wheeled Mobile Robot* bisa dilihat pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5. Penelitian (Zhu et al., 2011) berhasil mengestimasi *slip* dan *tire forces* untuk kinerja *four-wheel drive mobile robot* pada *inclined terrains*. Simulasi yang dihasilkan pada nilai acuan dari *tire force* memvalidasi teknik yang digunakan pada penelitian (Zhu et al., 2011). Distribusi kendali empat motor DC bekerja secara *independent* namun harus mencapai satu tujuan, visi dan misi yang sama merupakan kajian unggulan penelitian ini.



**Gambar 3.4.** (a) Desain bodi (b) desain perangkat keras *Four Wheeled Mobile Robot*



**Gambar 3.5.** Struktur perangkat keras penelitian *Four Wheeled Mobile Robot*

*Four Wheeled Mobile Robot* dalam operasi *inclined terrain* berpotensi mempunyai masalah dalam *slip force*, sehingga membuat kinerja *Mobile Robot* tidak sempurna bahkan tidak berfungsi dengan baik. Kajian ini merupakan pengembangan metode distribusi kontrol (Jayasree et al., 2017) yang terus dikembangkan dalam sistem kontrol modern. Penelitian (Zhu et al., 2011) menyajikan metode baru dalam mengatasi *slip* dan *tire force Mobile Robot* jenis berada pada *inclined terrain*.

Solusi hemat biaya menggunakan *microcontroller* untuk mengendalikan kecepatan motor DC dengan sistem SISO dapat diimplementasikan dalam penelitian (Chu, Wang, & Liang, 2016). Biaya fabrikasi yang murah merupakan hal terpenting agar dapat di manfaatkan oleh berbagai pihak. Penelitian terdahulu yang telah mengkaji persoalan tentang perancangan perangkat keras pada *mobile robot* ini akan menjadi acuan dalam menyelesaikan penelitian *Four-Wheeled Mobile*

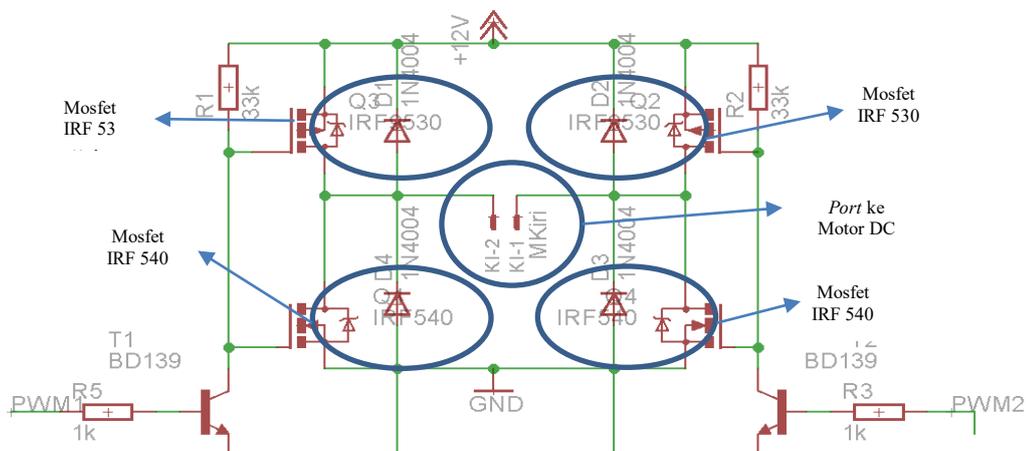
*Robot* dalam operasi *inclined terrain*. Penelitian ini mempunyai perbedaan besar dalam pengembangan *Four-Wheeled Mobile Robot*. Perancangan perangkat keras disajikan dalam Gambar 3.4 dan Gambar 3.5. Sensor kecepatan putar motor digunakan pada masing-masing motor *Four-Wheeled*, sebagai informasi *feedback mobile robot* pada *inclined terrain*.

### 3.2.1. Perancangan Bodi *Four Wheeled Mobile Robot*

Perancangan bodi *Robot* dalam penelitian ini menggunakan jenis bahan akrilik mengikuti desain pada Gambar 3.4. Bagian-bagian bodi *Wheeled Mobile Robot* dibentuk sesuai dengan desain pada Gambar 3.4 dengan menggunakan alat *cutting laser*, selanjutnya bagian-bagian bodi *Robot* tersebut dirakit sehingga terbentuk *Wheeled Mobile Robot* yang diinginkan. Komponen *hardware* seperti *main controller*, *driver* motor DC, empat motor DC, dan sensor *encoder* sebagai sensor kecepatan sudut di masukan kedalam bodi *Wheeled Mobile Robot* pada Gambar 4.2.

### 3.2.2. Perancangan *Hardware Driver Motor DC*

*Driver* motor menggunakan sistem rangkaian *H Bridge*, dimana motor menjadi titik tengah dengan dua jalur yang bisa dibuka tutup untuk melewati arus pada motor tersebut. Komponen inti dari *driver* motor dengan rangkaian *H bridge* ini adalah *power mosfet* IRF540. Rangkaian *driver* pada penelitian ini terlihat pada Gambar 3.6.

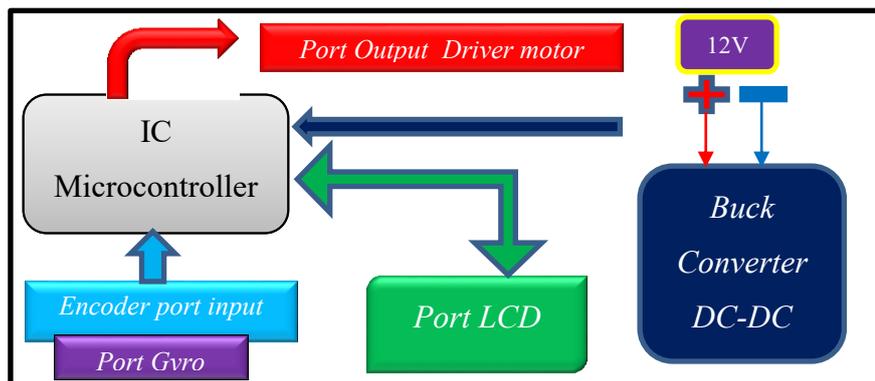


**Gambar 3.6** Skematik *driver* empat motor DC

Jumlah *power mosfet* IRF540 yang digunakan untuk mengendalikan setiap motor DC berjumlah 2 dan IRF 530 berjumlah 2. Sehingga seluruh *power mosfet* yang digunakan untuk 4 motor berjumlah enam belas. Hasil *board* rangkaian sesudah dicetak dalam bentuk PCB terlihat pada bagian Lampiran.

### 3.2.3. Perancangan Rangkaian *Main Controller Unit*

Rangkaian *main controller* unit dibuat dengan tujuan untuk menyederhanakan penempatan berbagai komponen *hardware* yang dibutuhkan, mulai dari *microcontroller*, kabel penghubung, *port input output*, LED sebagai indikator dan lain sebagainya. Penempatan *main controller* ini pada posisi tengah bodi *Wheeled Mobile Robot*. Bahan yang digunakan adalah fiber PCB yang dicetak berdasarkan desain rangkaian dari perangkat lunak *eagle 7.2.0*, dimulai dari perancangan skematik rangkaian hingga perancangan *board* rangkaian.



**Gambar 3.7** Rangkaian skematik *main controller unit*

Gambar 3.7 menunjukkan *part main controller unit* terdiri dari beberapa komponen seperti *microcontroller* IC ATMEGA, *buck converter* sebagai penurun tegangan dari *power supply* baterai 12V menjadi 5V untuk *supply main controller*, dan *port* lain untuk *input* dan *output*. Rangkaian ini menggunakan *double layer* PCB untuk meminimalkan dimensi dari *main control unit*.

### 3.3. Perancangan Perangkat Lunak *Display System*

Pengembangan *display system* pada *Four Wheeled Mobile Robot* ini dimulai dari *embedded system* menggunakan perangkat lunak *Visual Studio 2010*. *Embedded system display system* berfungsi untuk mendapatkan *interface data*

kinerja *mobile robot* saat beroperasi. *Display system* ini terdiri dari *monitoring* data respon metode kontrol, dan *monitoring* data motor DC (rpm). Penelitian (Bayoume, El-geliel, & Rezeka, 2016) menggunakan perangkat lunak *LabVIEW* untuk membangun basis perilaku kontrol WMR. Perangkat lunak *LabVIEW* memiliki kemampuan *interface* yang baik untuk mengendalikan berbagai *Robot* yang berbeda (Bayoume et al., 2016).

Sehingga pada penelitian ini, membangun *display system* menggunakan perangkat lunak yang berbeda yaitu *Visual Studio* menjadi tantangan besar. Komunikasi *Four Wheeled Mobile Robot* dengan *display system* menggunakan komunikasi *wireless* sehingga tidak diperlukan kabel untuk media komunikasi, mempermudah dalam analisa pengujian WMR dan mendapatkan informasi yang akurat dari kinerja *Four Wheeled Mobile Robot*.

### **3.4. Identifikasi Sistem *Four Wheeled Mobile Robot***

Sistem *Four Wheeled Mobile Robot* mempunyai empat motor DC yang bekerja secara independen, masing masing motor bekerja sendiri-sendiri dengan tujuan yang sama yaitu berjalan lurus dengan kecepatan yang sama. Sistem identifikasi mempunyai prosedur untuk memodelkan dinamika sistem yang terlihat pada Gambar 3.6. Proses identifikasi sistem diperlukan untuk mendapatkan model dari *Four Wheeled Mobile Robot* proses identifikasi menggunakan data aktual *input* dan *output*. Pemodelan merupakan hal terpenting dalam penelitian untuk membuat atau mengembangkan sistem agar dapat di analisa lebih dalam (Jahaya, Nawawi, & Ibrahim, 2011), namun pemodelan bukan pekerjaan yang mudah. Proses pemodelan sistem dapat diselesaikan dengan dua metode, metode *analytical modeling* dan identifikasi sistem. Metode *analytical modeling* adalah metode yang menggunakan pengetahuan tentang sistem dan penerapan hukum-hukum fisika yang bekerja pada sistem tersebut dengan pendekatan model matematis. Pemodelan sulit dilakukan, jika sistem tersebut adalah sistem dengan permasalahan kompleks dan pengetahuan tentang hukum fisika sangat terbatas, namun metode identifikasi sistem memiliki alternatif untuk menyelesaikan pemodelan. Metode identifikasi di kenalkan oleh Zadeh (Pan & Zhou, 2017). Permasalahan sistem diselesaikan dengan mencari hubungan pada *black box* model atau pemodelan berbasis pada data *input* dan

*output*. Metode ini sangat berguna dalam pemodelan dengan parameter pada sistem yang tidak diketahui dan sulit untuk diketahui dalam hukum fisika.

Proses identifikasi sistem *Four Wheeled Mobile Robot* diteliti melalui dua model *linier parametric* yaitu *autoregressive exogenous (ARX)* dan *autoregressive moving average exogenous (ARMAX)*. Kedua model identifikasi ini akan dipilih yang terbaik dengan menggunakan 3 kriteria terbaik. Kriteria tersebut antara lain *best fit (FIT)* lebih dari 80%, *mean square error (MSE)*, dan *final prediction error (FPE)*. Kriteria FIT, MSE, dan FPE masing-masing dapat dilihat pada persamaan (3.1),(3.2) dan (3.3) (Jahaya et al., 2011)

$$FIT = \left[ 1 - \frac{|\hat{y} - y|}{|y - \bar{y}|} \right] \times 100\% \quad (3.1)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y - \hat{y})^2 \quad (3.2)$$

$$FPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y - \hat{y})^2 \left( \frac{1 + \frac{p}{N}}{1 - \frac{p}{N}} \right) \quad (3.3)$$

$y$  merupakan data keluaran,  $\hat{y}$  estimasi data keluaran,  $\bar{y}$  adalah rata-rata dari data keluaran,  $p$  adalah *number of parameters* dan  $N$  adalah *number of data*. Model struktur ARX dapat dilihat pada persamaan (3.4) dan model struktur ARMAX dapat dilihat pada persamaan (3.5).

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) + e(t) \quad (3.4)$$

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})e(t) \quad (3.5)$$

Dimana

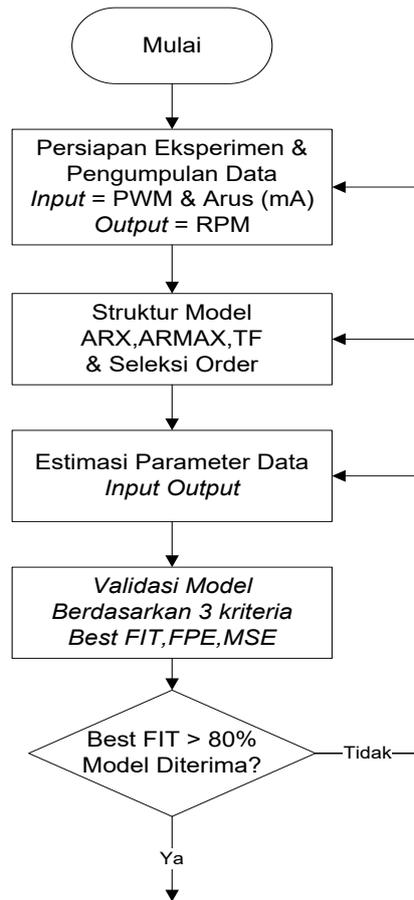
$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na} \quad (3.6)$$

$$B(z^{-1}) = b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb+1-d} \quad (3.7)$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{nc} z^{-nc} \quad (3.8)$$

$a$  adalah koefisien keluaran,  $b$  adalah koefisien masukan,  $c$  adalah koefisien *error*,  $na$  adalah number koefisien dari  $a$ ,  $nb$  adalah nomer koefisien dari  $b$ ,  $nc$  adalah

nomer koefisien dari  $c$ ,  $d$  adalah delay,  $u(t)$  adalah masukan dari sistem,  $y(t)$  adalah keluaran dari sistem dan  $e(t)$  adalah *error* (Jahaya et al., 2011). Proses identifikasi sistem ini bertujuan untuk menemukan model yang tepat untuk *Four Wheeled Mobile Robot* sehingga proses penelitian selanjutnya dapat menemukan nilai parameter PID yang tepat.

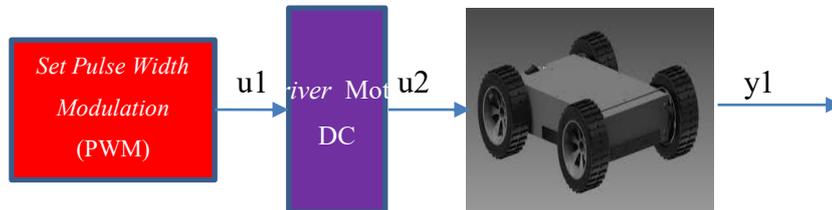


**Gambar 3.8** Flowchart identifikasi sistem (Jahaya et al., 2011)

### 3.4.1. Desain Sistem Identifikasi *Four Wheeled Mobile Robot*

Tahap ini adalah bagian yang vital dari sebuah sistem identifikasi *Four Wheeled Mobile Robot*, karena menganalisa sistem dalam menentukan *variable input* dan *output*. Sistem *loop* terbuka disajikan dalam Gambar 3.9. Sistem ini merupakan sistem *multi input single output (MISO)*. *Set up* nilai PWM dengan sistem random dari nilai 255 sampai dengan 10 pada perangkat lunak yang sudah dibuat, *set up* diterapkan kedalam sistem dengan nilai PWM sebagai berikut;  $u_l$

sebagai *input1*, dan nilai arus *u2* sebagai *input2*, dan nilai RPM dari roda sebagai nilai *output* yaitu *y*. Nilai *input u1* dengan data arus pada masing masing motor DC.



**Gambar 3.9** Experimen *Loop* terbuka dari sistem *Four Wheeled Mobile Robot*

Model sistem FWMR diperoleh menggunakan data pengukuran *input-output* dari data pengujian *Four Wheeled Mobile Robot*. Set data *input-output* terlihat dalam Gambar 3.9 yang terdiri dari data *input* yaitu PWM, arus pada motor dan data *output* adalah kecepatan dengan satuan (rpm). Pemodelan sistem FWMR ini diperoleh berdasarkan struktur ARX, ARMAX dan fungsi transfer. Hasil dari ketiga model ini akan dibandingkan berdasarkan 3 kriteria. Parameter estimasi menggunakan teknik LSE. Performansi model dari ARX, ARMAX, ditunjukkan dalam tabel 10 dan tabel 11, dengan tiga kriteria untuk menerima model yang terbaik. Hasil *best fitness* yang dipilih sebagai indikator model yang terbaik adalah lebih dari 80% (Jahaya et al., 2011).

Seluruh model ARX menghasilkan lebih dari 80% *best fitnesses*. Model ARX dengan struktur order pertama memiliki nilai *best fitnesses* terbesar yaitu (FIT= 91.81%). Perbandingan grafik antara model ARX dengan struktur order kedua dan data validasi ditunjukkan pada Gambar 3.11. Semua model ARMAX juga memiliki *best fitnesses* lebih dari 80%. Model ARMAX dengan struktur orde keempat menghasilkan nilai *best fitnesses* terbesar yaitu (FIT = 86.06%). Nilai terkecil dari *mean square error* dan *final prediction error* menjadi kriteria kedua dan ketiga dalam pemilihan model yang terbaik dalam sistem ini (FIT,MSE,FPE). Kriteria yang ditentukan berdasarkan kriteria yang juga di pilih dalam penelitian proses identifikasi sistem, seperti dalam penelitian (Jahaya et al., 2011) dan penelitian (Azlan, 2009). Pemodelan dapat diperoleh menggunakan model parametrik di dalam proses identifikasi sistem. Model terbaik adalah model ARX dengan struktur

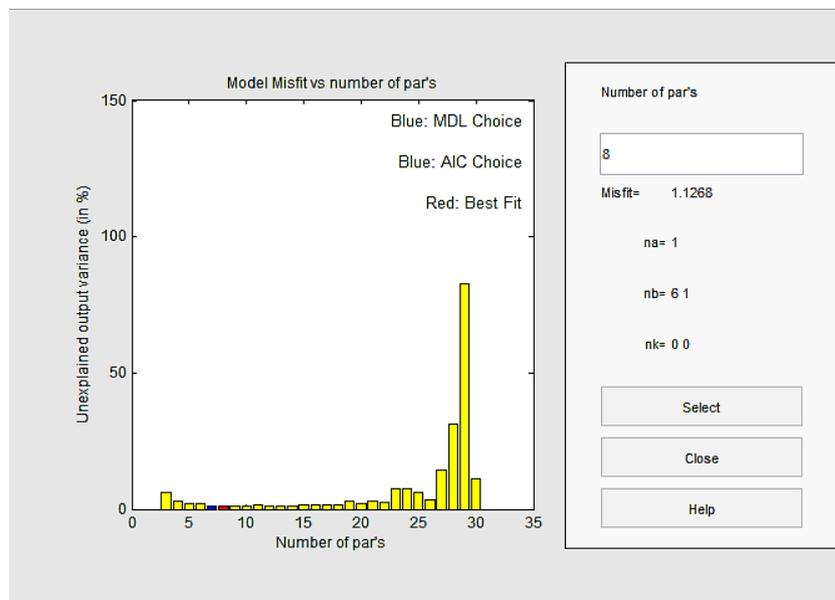
orde  $na=1$   $nb=[6 \ 1]$   $nk=[0 \ 0]$  (FIT=91,81%) validasi dan model terbaik dari ARMAX adalah model ARMAX dengan struktur orde kedua (FIT= 86.06%), dan struktur fungsi transfer (FIT=95,45%). Model dari sistem ini yang paling baik adalah dengan struktur fungsi transfer dengan nilai FIT validasi = 95,45%.

### 3.4.2. *Auto Regressive Exogenous (ARX)*

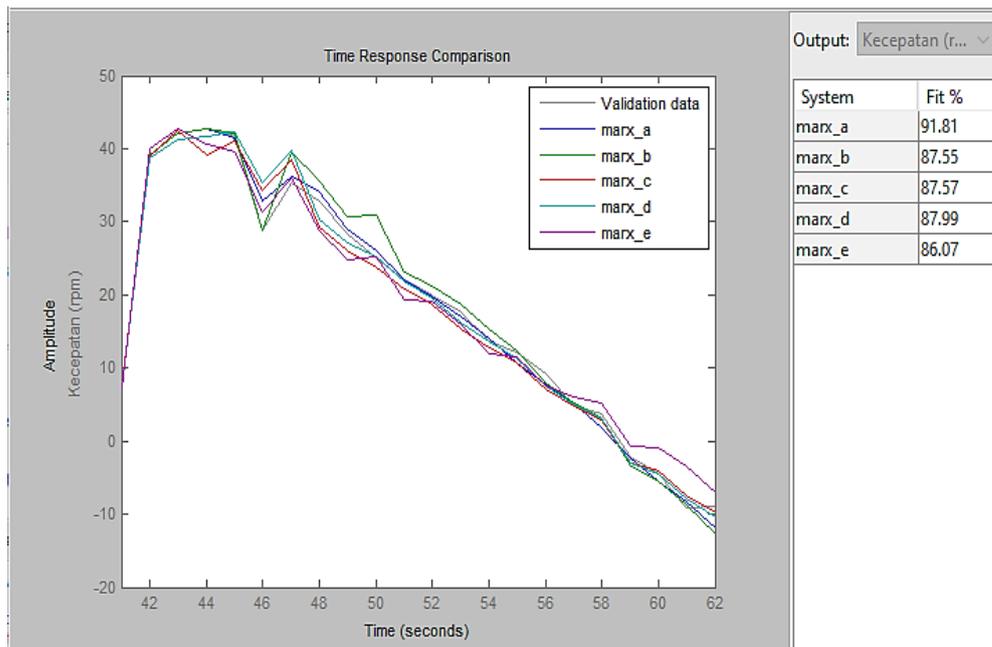
Nilai grafik pada gambar 3.11 yang dihasilkan dari identifikasi sistem menggunakan struktur model ARX mendapatkan nilai FIT validasi terbesar adalah 91.81%. Keterangan kurva pada gambar 4.9 dijelaskan dibawah ini :

- a. Marx\_a = Polinomial orders na 1, nb [6 1]
- b. Marx\_b = Polinomial orders na 2, nb [6 6]
- c. Marx\_c = Polinomial orders na 3, nb [3 3]
- d. Marx\_d = Polinomial orders na 4, nb [4 4]
- e. Marx\_e = Polinomial orders na 5, nb [5 5]

Nilai FIT terbaik ditemukan pada Polinomial *orders* na 1, nb [6 1]. Nilai orders terbaik ini ditemukan dari *source code* untuk simulasi pemilihan *orders*. Sehingga otomatis proses simulasi akan mencari orders dengan FIT yang tebaik. Terlihat dalam Gambar 3.11.



**Gambar 3.10** Perbandingan struktur model ARX dengan validasi



**Gambar 3.11** Seleksi pemilihan struktur model ARX

Seleksi ini mencari nilai orders terbaik dari nilai *Mis fit* terkecil. Model struktur terbaik ditunjukkan pada kurva berwarna merah *number of par's* ke 8 dengan nilai *Mis fit* 1,1268. Nilai terbaik yaitu pada orders  $na=1$ ,  $nb=[6 \ 1]$ ,  $nk=[0 \ 0]$  dan FIT validasi yang didapat dengan nilai terbaik yaitu 91.81%.

**Tabel 3.** Validasi struktur model ARX

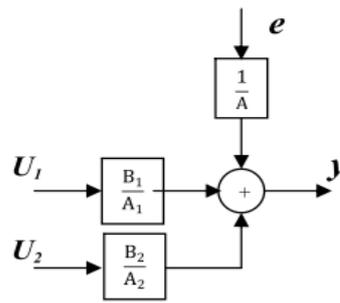
Orde	FIT (validation data)	FIT (estimation data)	MSE	FPE
1	91.81 %	85.73 %	38.11	73.95
2	87.55 %	89.95 %	48.60	80.55
3	87.57 %	87.40 %	108.1	76.44
4	87.99 %	87.60 %	74.02	115.5
5	86.07 %	90.31 %	44.82	76.47

Sesuai dengan struktur model ARX *discrete time* Gambar 3.11, maka dengan hasil terbaik nilai validasi 91.81% model ARX adalah sebagai berikut :

$$A(z) = 1 - 0.07293 z^{-1}$$

$$B1(z) = 0.9672 + 0.04316 z^{-1} - 0.01862 z^{-2} + 0.09995 z^{-3} - 0.09975 z^{-4} + 0.1512 z^{-5}$$

$$B2(z) = 0.1013 ; e = 0$$



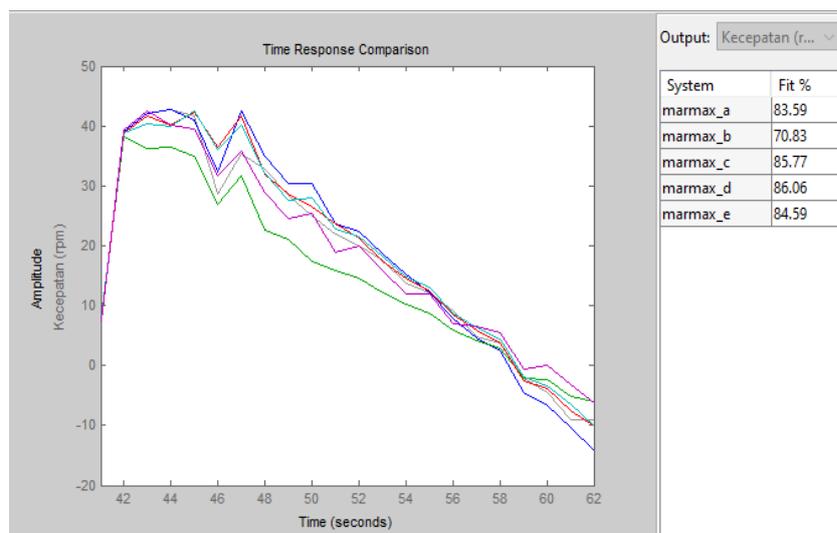
**Gambar 3.12** Struktur umum model *ARX MISO* (Jahaya et al., 2011)

### 3.4.3. *Auto Regressive Moving Average Exogenous (ARMAX)*

Nilai grafik pada gambar 3.13 yang dihasilkan dari identifikasi sistem menggunakan struktur model ARMAX mendapatkan nilai FIT validasi terbesar adalah 86.06%. Keterangan kurva pada gambar 3.13 dijelaskan dibawah ini :

- Marx\_a = Polinomial orders na 1, nb [1 6], nc [1], nk [0 0]
- Marx\_b = Polinomial orders na 2, nb [2 2], nc [2], nk [0 0]
- Marx\_c = Polinomial orders na 3, nb [3 3], nc [3], nk [0 0]
- Marx\_d = Polinomial orders na 4, nb [4 4], nc [4], nk [0 0]
- Marx\_e = Polinomial orders na 5, nb [5 5], nc [5], nk [0 0]

Nilai FIT terbaik ditemukan pada *Polinomial orders* na 4, nb [4 4], nc [4], nk [0 0]. Nilai *orders* terbaik ini ditemukan dari *trial and error* pemilihan *orders*. Terlihat dalam Gambar 3.13.



**Gambar 3.13** Perbandingan struktur model ARMAX dengan data validasi

**Tabel 4.** Validasi struktur model ARMAX

Orde	FIT (validation data)	FIT (estimation data)	MSE	FPE
1	83.59 %	88.00 %	69.33	116.9
2	70.83 %	84.32 %	118.4	165.5
3	85.77 %	88.29 %	65.99	96.49
4	86.06 %	90.19 %	46.31	84.13
5	84.59 %	91.43 %	35.38	80.52

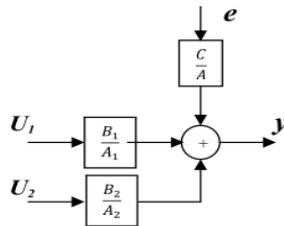
Sesuai dengan struktur model ARMAX *discrete time* pada Gambar 3.13, maka dengan hasil terbaik nilai FIT validasi 86.06%, MSE 46.31, FPE 84.13 model ARMAX adalah sebagai berikut :

$$A(z) = 1 + 0.165 z^{-1} - 0.2406 z^{-2} - 0.2677 z^{-3} + 0.03833 z^{-4}$$

$$B_1(z) = 0.9322 + 0.3013 z^{-1} - 0.223 z^{-2} - 0.1885 z^{-3}$$

$$B_2(z) = 0.05965 + 0.2458 z^{-1} - 0.09353 z^{-2} - 0.1641 z^{-3}$$

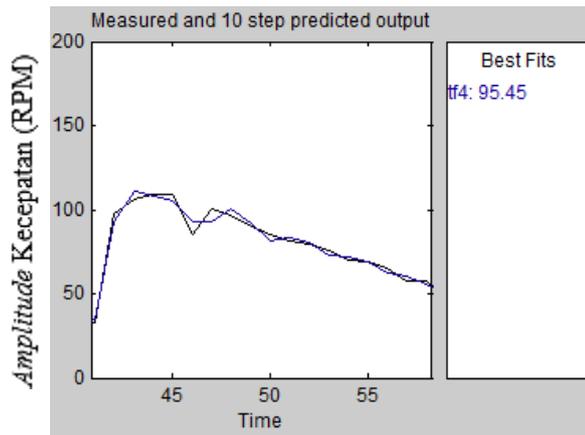
$$C(z) = 1 + 0.4848 z^{-1} - 0.4082 z^{-2} - 0.5436 z^{-3} - 0.533 z^{-4} ; e = 0$$



**Gambar 3.14** Struktur umum model ARMAX MISO (Jahaya et al., 2011)

### 3.4.4. Pemodelan Fungsi Transfer

Struktur model lain yang digunakan untuk menyelesaikan pemodelan sistem, menggunakan struktur fungsi transfer. Pemodelan *Four Wheeled Mobile Robot* menggunakan metode *transfer function identification*. Berdasarkan data *input* dan *output* yang telah ada, mencoba menemukan fungsi transfer *Four Wheeled Mobile Robot* berdasarkan sistem SISO dengan *input*  $U(s)$  adalah arus (mA) dan *output*  $Y(s)$  adalah kecepatan putar (RPM). Diagram blok ditunjukkan pada gambar 3.2. Metode ini menggunakan proses simulasi dan menemukan *best fits* 95.45% dengan jumlah pole [2 2] dan jumlah zero [1 1]. Metode ini membuktikan bahwa sistem ini merupakan sistem *non linier* yang mempunyai kesulitan dalam sistem kendali. Grafik *best fit* hasil pemodelan fungsi transfer terlihat pada Gambar 3.15.



**Gambar 3.15** View model output best fit model fungsi transfer

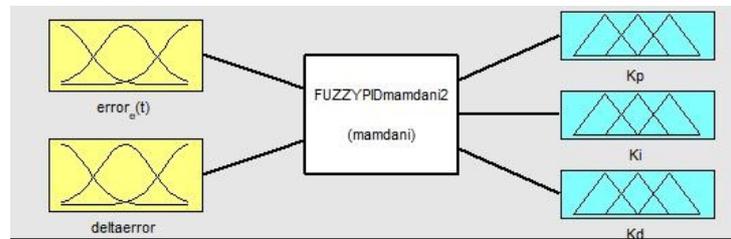
Hasil fungsi transfer berdasarkan data *input* dan *output* eksperimen motor DC sebagai aktuator dari sistem FWMR, *input* (U) yang digunakan adalah Arus (mA) dan *output* (Y) yang digunakan adalah kecepatan putar (RPM) terlihat dibawah ini.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0.01}{0.005s^2 + 0.06s + 0.1001}$$

### 3.5. Perancangan Logika Fuzzy-PID

*Fuzzy-PID* merupakan proses penalaan *gain* atau parameter pengendali yang dikenal dengan istilah *gain scheduling* (Abadi, 2015). Masalah utama dalam merancang sistem PID dengan *fuzzy* adalah untuk mendapatkan *variabel scheduling* yang sesuai (Abadi, 2015). Pengendali *fuzzy-PID* merupakan salah satu aplikasi dari teori himpunan *fuzzy*. Logika *fuzzy* dibuat sedemikian rupa sehingga dapat menjadwalkan dan *mentuning* parameter-parameter dalam pengendali PID, hingga sinyal kesalahan dapat dihilangkan sampai pada batas yang diinginkan, bahkan sampai nol (Abadi, 2015) (Zhao, Tomizuka, & Isaka, 1993). Logika *fuzzy* PID *controller* sangat sesuai dalam *men-tuning* parameter parameter handal dari PID, yaitu untuk memaksimalkan performansi sistem, umumnya teori *Ziegler* and *Nichols* sangat populer digunakan dalam menentukan parameter PID, menggantikan teori *trial and error* (Sharma & Palwalia, 2017). Perancangan kendali logika *Fuzzy-PID* dengan metode penalaran *Mamdani*, mempunyai himpunan *fuzzy* pada keluaran sistem, yaitu berupa *rule base* berbentuk *segitiga (trims)* untuk

menentukan keluaran yang ingin dicapai. Penalaran dengan metode Mamdani hampir sama dengan penalaran sugeno. Keluaran system pada penalaran sugeno tidak berupa himpunan *Fuzzy*, melainkan berupa konstanta atau persamaan linear (*konsekuen*). Metode ini diperkenalkan oleh Takagi-sugeno Kang pada tahun 1985. Gambar 3.16 menunjukkan sistem *fuzzy* yang dibangun terdiri dari dua masukan yaitu *error* (*e*) dan *delta error* (*de*) serta menghasilkan tiga keluaran parameter *PID* untuk membangkitkan sinyal PWM. Perancangan aksi kendali logika *Fuzzy* ini didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Martinez et al., (2012). Gambaran umum dari sistem logika *Fuzzy* yang dibangun ditampilkan pada Gambar 3.16 (Saeed & Mehrdadi, 2012).



**Gambar 3.16** Gambaran Umum Sistem *Fuzzy* yang Dibangun

Sistem pengendalian logika *fuzzy*-PID merupakan sistem *loop* tertutup dengan *setpoint* kecepatan putar *Mobile Robot* dengan satuan rpm. Diagram blok terlihat dalam gambar 3.3, dua *input* pengendalian logika *fuzzy* penelitian ini adalah *variable error* dan *variable deltaerror*. *Deltaerror* didapat dari nilai *error* saat ini dengan nilai *error* sebelumnya (Saeed & Mehrdadi, 2012). Diagram blok gambar 3.3 menunjukkan bahwa, *input* PID adalah *e* dan *output control* dari kendali PID setelah di *tuning* akan menghasilkan  $U^{PID}$ . Nilai  $U^{PID}$  merupakan penjabaran dari persamaan 3.6.

$$U^{PID} = K_{p2}e(t) + K_{i2} \int e(t) + K_{d2} \frac{de(t)}{dt} \quad (3.9)$$

$$K_{p2} = K_p \times K_{p1} \quad (3.10)$$

$$K_{i2} = K_i \times K_{i1} \quad (3.11)$$

$$K_{d2} = K_d \times K_{d1} \quad (3.12)$$

$K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , adalah nilai inisialisasi *gain parameters* dengan harga  $K_p=2.25$ ,  $K_i=0.05$ ,  $K_d=0.005$ . *Variable input* yang digunakan adalah *speed error* ( $e$ ) dan *speed deltaerror* ( $\Delta e$ ) dan *variable output* adalah  $K_{p1}$ ,  $K_{i1}$ , dan  $K_{d1}$ . Lima istilah lingustik untuk *input* dan *output* dalam pengembangan logika *fuzzy* dijabarkan dibawah ini :

**Tabel 5.** Fungsi keanggotaan *input*

<b>NB</b>	<i>Negative Big</i>
<b>NS</b>	<i>Negative Small</i>
<b>Z</b>	<i>Zero</i>
<b>PS</b>	<i>Positive</i>
<b>PB</b>	<i>Positive Big</i>

Nilai *input* di normalisasi interval antara  $[-1,1]$  dan interval nilai *output* adalah  $[0,2]$ . Nilai sinyal *output* mengikuti dari *rules* lingustik *fuzzy*. *Rules* lingustik *fuzzy* disediakan oleh data yang berasal dari *rule base* dan hasil kuputusan lingustik *output* didapat dari perpotongan data *output* oleh defuzzifikasi. *Membership function input* dan *ouput* disajikan dalam Gambar 3.10 dan Gambar 3.11, untuk dapat membangun sistem *Fuzzy* hingga dapat mengeluarkan nilai parameter *PID*, dilakukan tahapan pembuatan sistem *Fuzzy* yaitu,

- b. Fuzzifikasi
- c. Komposisi aturan (*Rule base*)
- d. Penegasan (*defFuzzifikasi*)

### 3.5.1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi dalam perancangan pengendali ini adalah merubah nilai dari ADC sensor *rotary encoder* menjadi nilai masukan *Fuzzy*. Pembentukan himpunan *Fuzzy* dilakukan dengan membagi variabel masukan menjadi beberapa fungsi keanggotaan (*membership function*). Masukan untuk sistem *Fuzzy* ini terdiri dari dua variabel yaitu *error* ( $e$ ) dan *delta error* ( $de$ ), *error* disini didefinisikan sebagai hasil pengurangan dari nilai *setpoint* dengan rpm yang terbaca sensor.

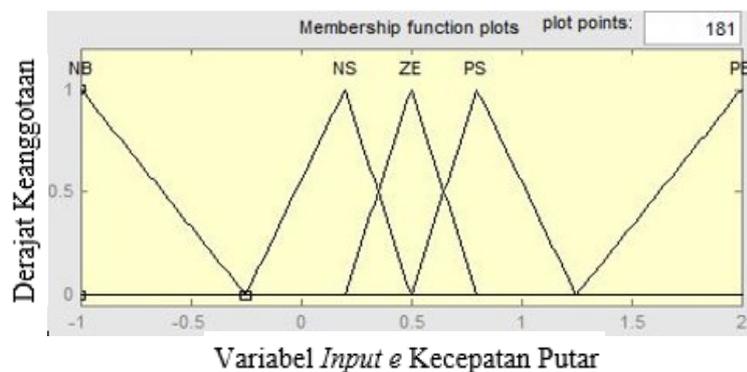
Fungsi keanggotaan dari masukan *error* dan *deltaerror* dibagi menjadi lima bagian dengan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dengan nilai *range* sebesar

nilai rpm yang akan diprogram pada *microcontroller*. Sistem kendali logika *fuzzy* menentukan parameter PID yaitu nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  diawali dengan proses *cluterring* nilai-nilai fungsi keanggotaan *input* dan *output*.

### 3.5.1.1. *Input Fuzzy*

*Input* yang digunakan ada dua yaitu *variable error* dan *deltaerror* terlihat dalam Gambar 3.17 dan Gambar 3.18. Keanggotaan *error* memiliki rentang fungsi berdasarkan jumlah potensi *error* yang dapat dibentuk. Berikut ini pembagian lima bagian fungsi keanggotaan *variable error* :

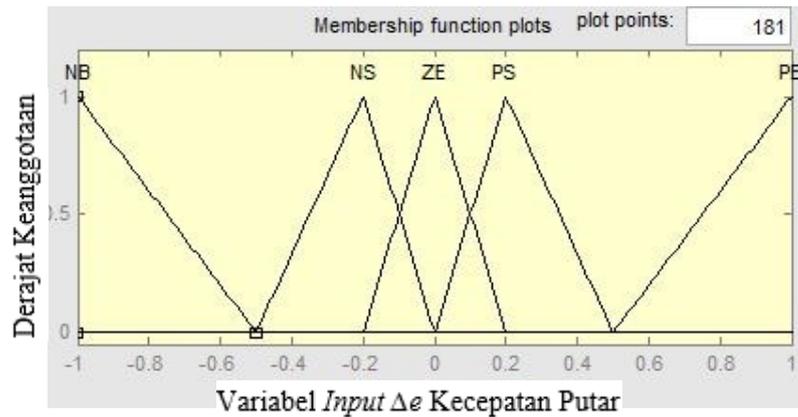
<i>Negative Big</i>	= [-1 -1 -0.25]
<i>Negative Small</i>	= [-0.25 0.2 0.5]
<i>Zero</i>	= [0.2 0.5 0.8]
<i>Positive Small</i>	= [0.4921 0.7921 1.242]
<i>Positive Big</i>	= [1.25 2 6.5]



**Gambar 3.17** Fungsi keanggotaan *variable error*.

Berikut ini pembagian tujuh bagian fungsi keanggotaan *variable deltaerror*

<i>Negative Big</i>	= [-1 -1 -0.25]
<i>Negative Small</i>	= [-0.25 0.2 0.5]
<i>Zero</i>	= [0.2 0.5 0.8]
<i>Positive Small</i>	= [0.4921 0.7921 1.242]
<i>Positive Big</i>	= [1.25 2 6.5]



**Gambar 3.18** Fungsi keanggotaan *variable deltaerror*

*Input* pertama berupa *error*, merupakan selisih nilai antara kecepatan putar motor aktual terhadap acuan,

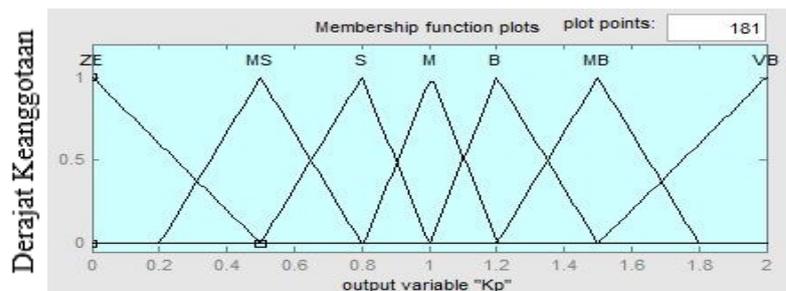
$$e = \Delta\omega = \omega_{measured} - \omega_{reference}$$

*Input* kedua berupa *deltaerror* yang merupakan selisih *error* saat pengukuran terhadap sebelumnya,

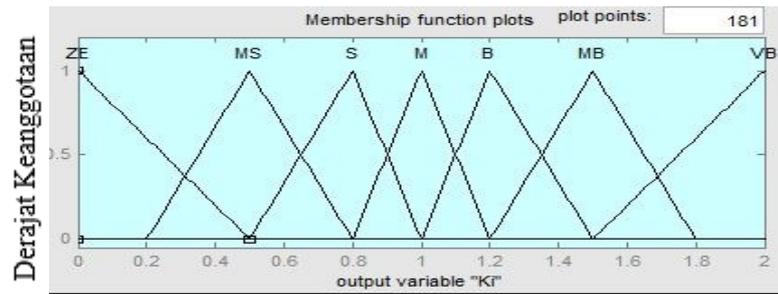
$$\Delta e = \delta(\Delta\omega) = \Delta\omega_n - \Delta\omega_{n-1} \text{ (Musyafa' \& Al., 2010)}$$

### 3.5.1.2. *Output Fuzzy*

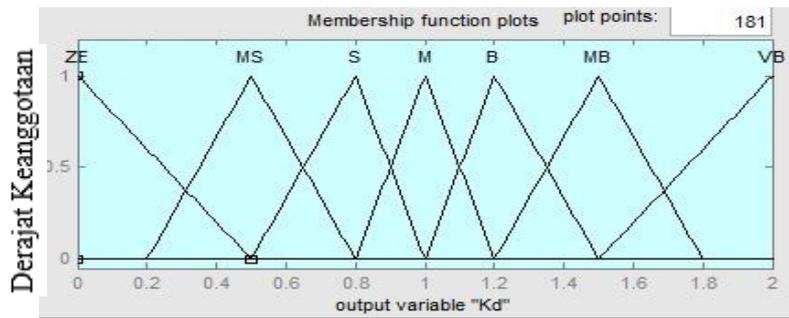
Nilai fungsi keanggotaan *output* ini beranggotakan 7 identitas (ZE, MS, S, M, B, MB, VB) dibuat dengan tujuan untuk mendapatkan nilai  $K_p, K_i, K_d$ . Proses untuk mendapatkan nilai  $K_p, K_i, K_d$  harus melalui penalaran peraturan yang dibuat (*rule base*) dan pengambilan keputusan (*de fuzzifikasi*). Fungsi keanggotaan *output* disajikan dalam ilustrasi Gambar 3.19 sampai Gambar 3.21. Setelah membuat fungsi keanggotaan, selanjutnya membuat *rule base* untuk penentuan aksi berdasarkan masukan *error* dan *delta error*. Aturan-aturan yang dibentuk dalam perancangan ini disebut dengan *rule base* (Saeed & Mehrdadi, 2012).



**Gambar 3.19** Fungsi keanggotaan *output*  $K_{p1}$



Gambar 3.20 Fungsi keanggotaan output  $K_{i1}$



Gambar 3.21 Fungsi keanggotaan output  $K_{d1}$

### 3.5.2. Komposisi aturan (*Rule base*) FPID

Pembuatan *rule base* untuk menentukan aksi dari masukan *error* dan *delta error* didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh (Sharma & Palwalia, 2017). Aturan-aturan yang dibentuk dalam perancangan ini memiliki 25 *rule base*. Salah satu sintak didefinisikan dari *fuzzy rule base* tabel 2, tabel 3, tabel 4 adalah sebagai berikut : *If (error is NB) and (deltaerror is NB) then (Kp is VB) (Ki is M) (Kd is ZE)*. Sintak ini yang akan dikonfersikan kedalam pemograman mikrokontroller pada sistem *Four Wheeled Mobile Robot*. Tabel 6 sampai dengan Tabel 8 adalah tabel *rule* untuk perancangan sistem kontrol *fuzzy-PID*.

Tabel 6. *Fuzzy rule base* untuk  $K_{p1}$

$\Delta e/e$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	VB	VB	VB	VB	VB
NS	B	B	B	MB	VB
ZE	ZE	ZE	MS	S	S
PS	B	B	B	MB	VB
PB	VB	VB	VB	VB	VB

**Tabel 7.** *Fuzzy rule base* untuk  $K_{i1}$

$\Delta e/e$	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>ZE</b>	<b>PS</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	M	M	M	M	M
<b>NS</b>	S	S	S	S	S
<b>ZE</b>	MS	MS	ZE	MS	MS
<b>PS</b>	S	S	S	S	S
<b>PB</b>	M	M	M	M	M

**Tabel 8.** *Fuzzy rule base* untuk  $K_{d1}$

$\Delta e/e$	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>ZE</b>	<b>PS</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	ZE	S	M	MB	VB
<b>NS</b>	S	B	MB	VB	VB
<b>ZE</b>	M	MB	MB	VB	VB
<b>PS</b>	B	VB	VB	VB	VB
<b>PB</b>	VB	VB	VB	VB	VB

### 3.5.3. *DeFuzzyfikasi*

Tahap *deFuzzyfikasi* dalam perancangan sistem *Fuzzy* ini dilakukan dengan merubah nilai keluaran sistem *Fuzzy* menjadi nilai parameter *PID* atau nilai yang tegas dan sebenarnya. Metode yang digunakan untuk *deFuzzyfikasi* adalah metode LOM (*Largest of Maximum*). Pemilihan metode *Largest of Maximum (LOM)* ini berdasarkan penelitian (Sutikno, 2011). Hasil LOM sebagai metode untuk mempercepat waktu tunak (ts) dan memperkecil nilai *overshoot*.

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_1)^\circ \dots^\circ (x_N \text{ is } A_N) \text{ THEN } z = p_1 * x_1 + \dots + p_N * x_N + q \quad (3.8)$$

Persamaan 3.7 mendefinisikan perancangan pada *Fuzzyfikasi* dan *rule base*, sehingga didapatkan A adalah *error (e)* dan *delta error (de)* sebagai anteseden,  $^\circ$  adalah operator *Fuzzy AND*,  $p_i$  adalah suatu konstanta (tegas) ke- $i$  dan  $q$  juga merupakan konstanta dalam konsekuen. Sehingga jika diberikan suatu himpunan *fuzzy* dalam *range* tertentu, maka harus dapat diambil suatu nilai *crisp* tertentu sebagai *output*, sesuai dengan prinsip metode *Largest of Maximum (LOM)* solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menjelaskan lebih lanjut mengenai hasil dan pembahasan tiga tahap penelitian yang meliputi; rancang bangun sistem *Four Wheeled Mobile Robot*, identifikasi sistem *Four Wheeled Mobile Robot* berbasis model *parametric*, dan pengujian aktual sistem kendali *fuzzy-PID* terhadap *Four Wheeled Mobile Robot* pada variasi sudut kemiringan jalan dan variasi beban pada jalan tanjakan. Bagian awal dipaparkan desain dan spesifikasi *Four Wheeled Mobile Robot* yang telah dirancang. Bagian kedua memaparkan hasil kalibrasi sensor dan pembahasan empat motor DC beserta *driver*, empat sensor *encoder* dan komunikasi *robot* dengan *personal computer* untuk membangun sistem *Human Machine Interface*. Bagian ketiga penulis memaparkan proses identifikasi sistem menggunakan tiga struktur model yaitu Fungsi Transfer, ARX dan ARMAX, dipilih berdasarkan tiga kriteria yang terbaik dalam menemukan model *Four Wheeled Mobile Robot*. Bagian keempat menerapkan *fuzzy-PID*, menentukan *rule*, fuzzifikasi untuk membangun sistem *fuzzy* dan selanjutnya memaparkan hasil pengujian sistem kendali modern *fuzzy-PID* pada *Four Wheeled Mobile Robot* saat beroperasi di jalan tanjakan. Proses analisa performansi tanggapan sistem pengendalian disajikan pada sistem *Human Machine Interface* melalui perangkat lunak *Visual Studio 2010*.

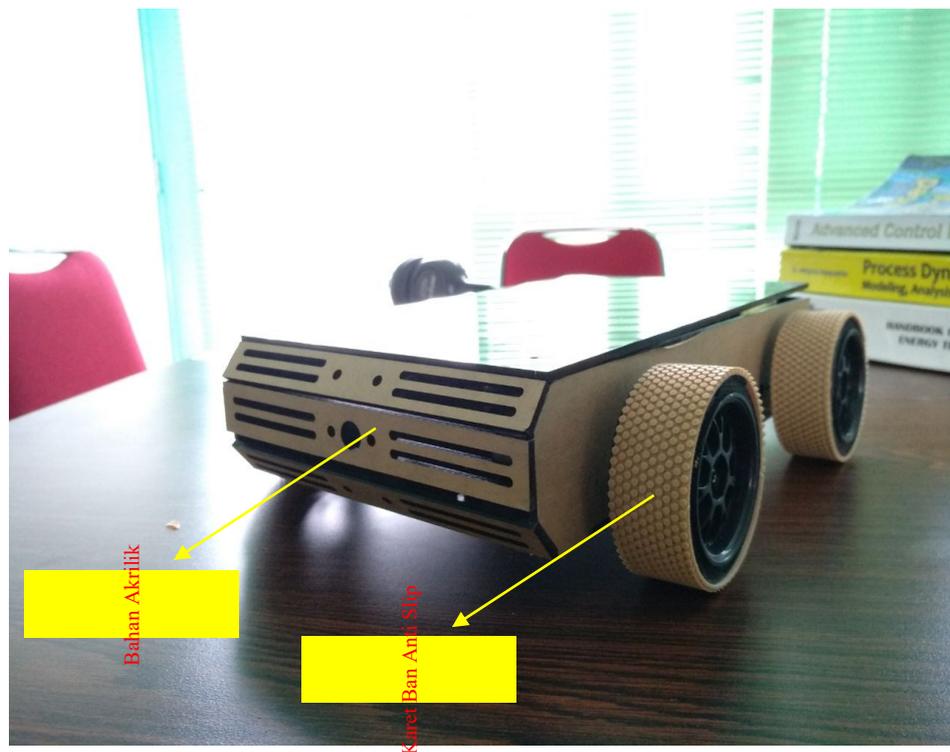
#### **4.1. Hasil Desain dan Spesifikasi *Four Wheeled Mobile Robot***

Sistem *Four Wheeled Mobile Robot* pada umumnya, menggunakan empat roda sebagai alat penggerak yang bekerja secara independen, dengan strategi metode kendali yang sudah diterapkan dalam berbagai penelitian. Penelitian (Saputra et al., 2011) dengan kinerja *independent 4-wheel drive platform Robot rev-11* menerapkan empat motor DC yang bekerja secara *independent* menggunakan *microcontroller* dan penelitian tersebut belum menguji kehandalan pada jalan menanjak atau bidang miring. Sistem *Four Wheeled Mobile Robot* yang telah penulis rancang terbagi menjadi dua hasil perancangan, yaitu perancangan perangkat keras dan perancangan perangkat lunak. Sistem perangkat keras pada penelitian ini menggunakan kinerja empat motor DC yang bekerja secara

*independent* dengan satu *microcontroller* sebagai *controller* dan 16 mosfet power IRF 540 sebagai *driver* 4 motor DC menggunakan sistem rangkaian *H-Bridge*, dan penerapan sensor sensor yang dibutuhkan dalam menghasilkan respon *feedback* ke *controller*. Sistem perangkat lunak penelitian ini bertujuan menghasilkan respon kinerja sistem kendali pada *Four Wheeled Mobile Robot*.

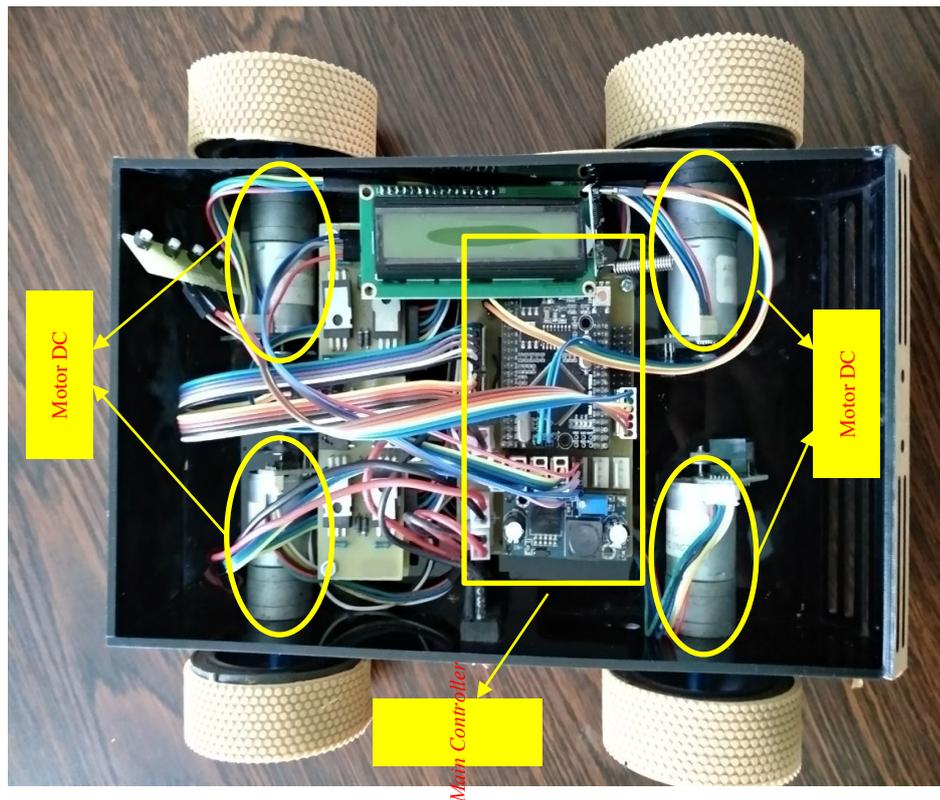
#### 4.1.1. Hasil Desain Perangkat Keras

Hasil perangkat keras yang telah dibuat berdasarkan desain pada Gambar 3.4 dan struktur perangkat keras pada Gambar 3.5 menghasilkan perangkat keras *Mobile Robot* dengan ukuran panjang 26cm dan lebar 15cm dengan bahan bodi adalah akrilik berwarna hitam. Hasil perangkat keras terlihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



**Gambar 4. 1** Tampilan bodi *Robot Four Wheeled Mobile Robot* (tampak depan)

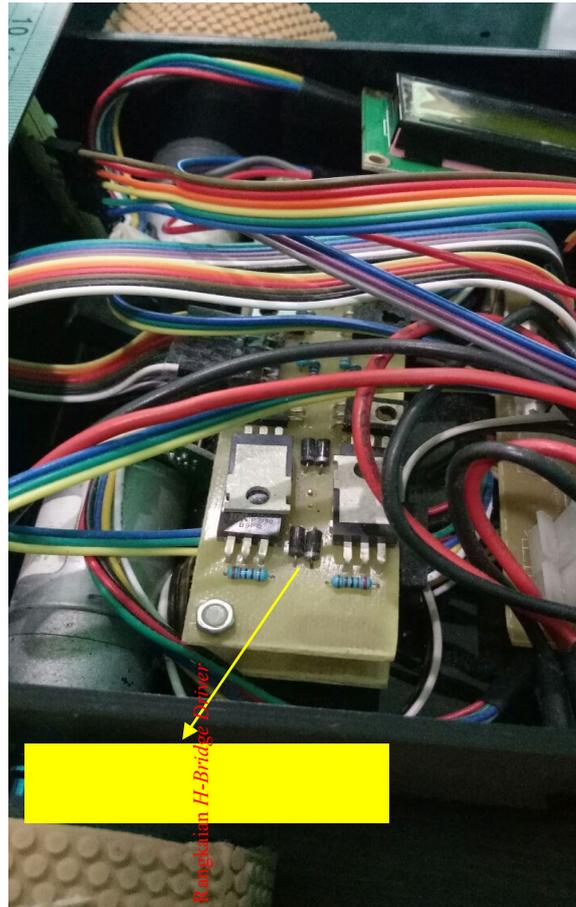
Terlihat dalam gambar 4.2, bahwa dalam pemilihan sebuah ban untuk mengatasi *slip force*, penulis menggunakan lembaran karet anti slip. Perangkat ini digunakan dengan analisa kekesatan pada lintasan yang akan dilalui *Robot*. Metode yang digunakan berdasarkan pengalaman dari penulis ketika merancang *Mobile Robot*.



**Gambar 4. 2** Tampilan perangkat keras *Robot Four Wheeled Mobile Robot* (tampak dalam)

Penelitian mengenai estimasi ban *Robot* dalam mengatasi slip di sajikan dalam penelitian (Zhu et al., 2011), hasil dari penelitian tersebut adalah metode baru menggunakan sebuah *extended kalman filter (EKF)* untuk mengestimasi *slip* dan *tire force* dari *Four-Wheeled drive Mobile Robot* dalam tanjakan. Penulis mencoba menggunakan sebuah perangkat keras dalam mengatasi *slip*. Metode kontrol *fuzzy-PID* digunakan dalam mengantisipasi kinerja *Mobile Robot* dalam kinerja *inclined terrains*. Komunikasi *robot* dengan personal komputer menggunakan sebuah perangkat keras, dengan tipe *HC-12 wireless microcontroller*. Jarak maksimal jangkauan komunikasi ini adalah 1000m dengan antena yang terpasang. Perangkat keras ini dimanfaatkan dalam komunikasi data satu jalur *Robot* ke personal komputer sebagai tujuan untuk mendapatkan informasi kinerja dari FWMR. Tegangan yang dibutuhkan dalam *HC-12 wireless* ini adalah 3.3V sampai dengan 5.5V DC, dan operasi frekuensi yang digunakan adalah 433.3 s/d 473.0 MHz, dengan *baudrate default factory 9600bps*.

Hasil dari rangkaian *driver* motor DC menggunakan rangkaian *H-bridge* *power mosfet* IRF540 terlihat pada Gambar 4.3. Rangkaian ini didesain dengan ukuran panjang 11cm dan lebar 3.5cm. Dua rangkaian ini terdiri dari, satu rangkaian pada posisi atas dan satu rangkaian pada posisi bawah, masing-masing *driver* menggunakan 8 *power mosfet* IRF 540.

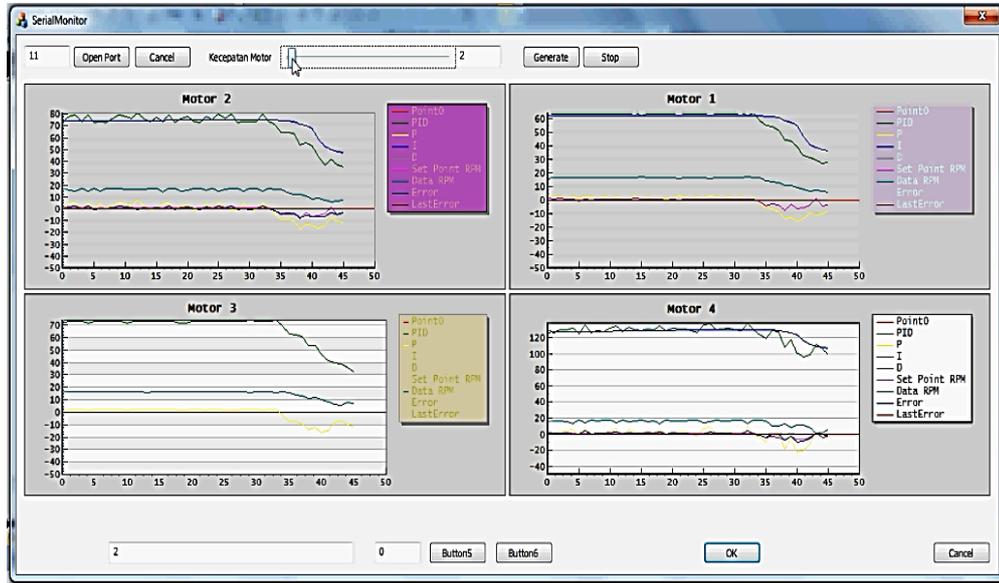


**Gambar 4. 3** Tampilan perangkat keras rangkaian *driver* motor DC

#### **4.1.2. Hasil Desain Perangkat Lunak**

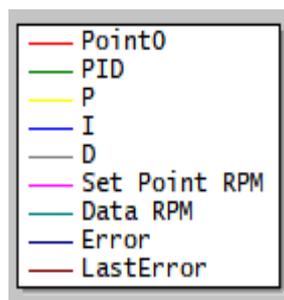
Subbab ini penulis memaparkan hasil perangkat lunak untuk sistem *Four Wheeled Mobile Robot*. Hasil perangkat lunak ini dibuat menggunakan *Visual Studio 2010*. Perangkat lunak bertujuan sebagai *interface* respon kinerja dari *Four Wheeled Mobile Robot*. *Interface* ini disebut dengan sistem *Display System*. Hasil perangkat lunak ini merupakan *embeded system* pada personal komputer dengan

komunikasi *wireless* dari perangkat keras HC-12. Hasil perangkat lunak diperlihatkan dalam Gambar 4.4



**Gambar 4. 4** Hasil perangkat lunak

Antarmuka sistem yang dibangun akan menunjukkan respon dari keempat sistem kontrol dari motor DC yang digunakan pada *Four Wheeled Mobile Robot*. *Detail* dari informasi yang akan dimunculkan dalam antarmuka ini antara lain, *point 0*, nilai PID, nilai parameter P, parameter I, parameter D, Setpoin RPM, Data RPM, *Error*, dan *Last Error*. Terlihat pada Gambar 4.5



**Gambar 4. 5** Informasi antar muka yang akan ditampilkan.

#### 4.2. Hasil Kalibrasi Sensor Kecepatan Putar pada Motor DC

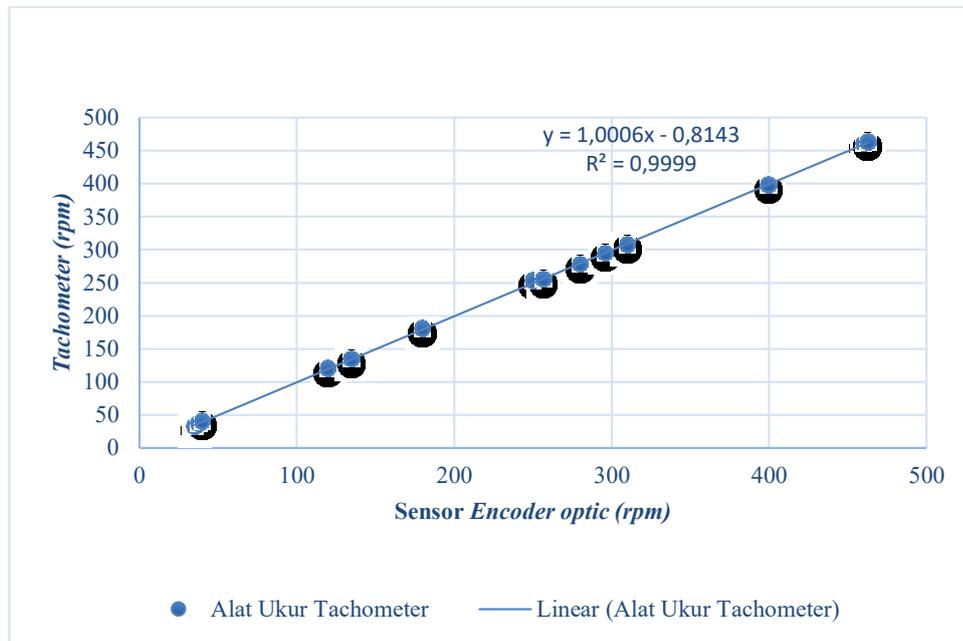
Sensor kecepatan yang digunakan adalah jenis sensor *encoder optic* yang sudah terpasang dalam motor DC. Spesifikasi sensor kecepatan yang digunakan adalah 360 ppr dengan tegangan yang dibutuhkan 5V. Sensor ini digunakan pada

keempat motor DC sebagai aktuator *Four Wheeled Mobile Robot*. Sensor kecepatan putar bertujuan untuk mengukur besaran fisis kecepatan putar roda *Robot* dengan satuan RPM. Sensor ini digunakan sebagai respon umpan balik ke dalam *controller*. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa pengukuran yang dilakukan oleh sensor sesuai dengan pengukuran pada alat ukur yang sudah mempunyai *standart* pengukuran. Alat ukur yang akan digunakan adalah *Tachometer Dekko 2234BL*. Hasil perbandingan pengukuran sensor dengan pengukuran *Tachometer Dekko 2234BL* di sajikan dalam Tabel 9. Gambar 4.6 menunjukkan kecepatan putar motor DC yang telah di *couple* dengan sensor *encoder optic*, memberikan hasil *linier* dengan perbandingan pengukuran *tachometer*. Lima belas pengujian yang telah dilakukan dapat disimpulkan, bahwa kalibrasi sensor memiliki rata-rata *error* 0,35 %. Tabel 9 menunjukkan bahwa hasil pengukuran menggunakan *encoder optic* mendekati dengan hasil pengukuran *tachometer*. Hasil tersebut dapat dilihat dari *error* yang kecil, *error* dalam perhitungan pada Tabel 7 menggunakan persamaan absolut dalam persamaan 4.1

$$\%error = ABS\left(\frac{Alatukur - Sensor}{Alatukur} X100\%\right) \quad (4.1)$$

**Tabel 9 .** Kalibrasi Sensor Kecepatan Putar yang digunakan

Pengujian Ke-	Pembacaan Sensor <i>Encoder optic</i> (Rpm)	Pembacaan <i>Tachometer</i> (Rpm)	<i>Error</i>
1.	35	35	0 %
2.	38	38	0 %
3.	40	40	0 %
4.	120	120	0 %
5.	135	134	0.74 %
6.	180	180	0 %
7.	250	253	1.18 %
8.	257	255	0.78 %
9.	280	278	0.71 %
10.	296	295	0.33 %
11.	310	308	0.65 %
12.	400	398	0.50 %
13.	460	461	0.22 %
14.	463	462	0.22 %
15.	463	463	0 %



**Gambar 4. 6** Grafik pengujian sensor kecepatan *encoder optic*

Hasil *error* pada pengukuran sensor ini diakibatkan dari kepekaan dari sensor *encoder optic* yang terlalu cepat dalam menghitung kecepatan putar pada motor DC. Sensor *encoder* ini tepat digunakan dalam penelitian FWMR, dan sesuai spesifikasi motor DC yang digunakan, motor DC bertipe *geared* dengan supply *max* 12V dengan maksimal 463RPM.

#### 4.3. Hasil Pengujian *Input-Output FWMR*

Penelitian *Four Wheeled Mobile Robot* ini menggunakan kinerja motor DC sebagai aktuator, motor DC yang dipakai berjumlah empat buah dengan satu *controller* dan sensor kecepatan terpasang pada masing masing motor DC. Sub Bab ini menyajikan data *input output* pada sistem *Four Wheeled Mobile Robot* (FWMR) yang bertujuan untuk mencari model melalui metode identifikasi sistem. *Variable* fisis sebagai *input* pada penyajian data ini adalah arus dengan satuan (mA) pada masing masing motor DC, dan *variable* fisis pada *output* adalah kecepatan putar dengan satuan (rpm). Nilai *output* diukur menggunakan sebuah sensor kecepatan *encoder optic* yang telah dikalibrasi. Data *input* diukur dengan alat ukur *manual* yaitu *ampere meter*. *Ampere meter* dirangkai seri pada rangkaian *driver power mosfet*, yang terhubung dengan motor DC. Sinyal *input* yang digunakan untuk

membangkitkan arus (mA) pada aktuator motor DC menggunakan sinyal *input* berupa *Pulse Width Modulation (PWM)*. Besar nilai sinyal PWM ini berkisar dari nilai maksimal 255 sampai dengan nilai minimal 10. Data ini akan dipakai untuk mengetahui pemodelan FWMR, melalui perbandingan struktur model ARX, srtuktur model ARMAX dan struktur model fungsi transfer.

Data yang dihasilkan terlihat pada Tabel 11 dan spesifikasi motor DC yang dipakai dalam penelitian terlihat pada Tabel 10. Spesifikasi motor DC membantu dalam proses pengambilan data. Keempat motor DC yang digunakan memiliki tipe dan spesifisifikasi yang sama. Tabel 10 menunjukkan spesifikasi motor DC dengan tipe *JGA25-371*.

**Tabel 10.** Spesifikasi Motor DC yang digunakan dalam penelitian

Tegangan (Volt)	Kecepatan (rpm)		Torsi (Kg.cm)	Daya (W)	Berat (gr)	Stall Torque (Kg.cm)
	No Load	Load				
12Volt	463rpm	370rpm	1.1kg.cm	1.25W	99gram	5.5kg.cm

Hasil dari Tabel 11 menunjukkan pengukuran nilai bit PWM, arus (mA), dan nilai kecepatan (rpm). Nilai PWM dan Arus (mA) merupakan data *input*, dan nilai kecepatan (rpm) merupakan data *output* pada sistem motor DC. Nilai *random* PWM di masukan dalam *source code mikrokontroller* dengan *range bit* dari 255 sampai 10. Disaat pengujian dilakukan ditemukan adanya arus (mA) dengan nilai maksimal berkisar lebih dari 300mA saat motor DC mulai berputar (*startup*) hingga menuju nilai kecepatan yang stabil. Data arus (mA) pada rangkaian *driver* motor DC diukur, sehingga dapat dikumpulkan data *input output* motor DC, terlihat pada Tabel 11. Keempat roda yang digunakan dalam *Four Wheeled Mobile Robot* ini menggunakan jenis dan tipe penggerak yang sama, yaitu motor DC *JGA25-371*. Jadi dalam pengujian untuk mendapatkan data, keempat motor DC yang digunakan memiliki nilai *non linier* dalam data arus (mA), dengan kecepatan putar (rpm). Kurva grafik yang disajikan pada Gambar 4.7 merupakan data dari satu motor dengan tipe yang sama pada keempat motor yang digunakan dalam penelitian *Four Wheeled Mobile Robot*.

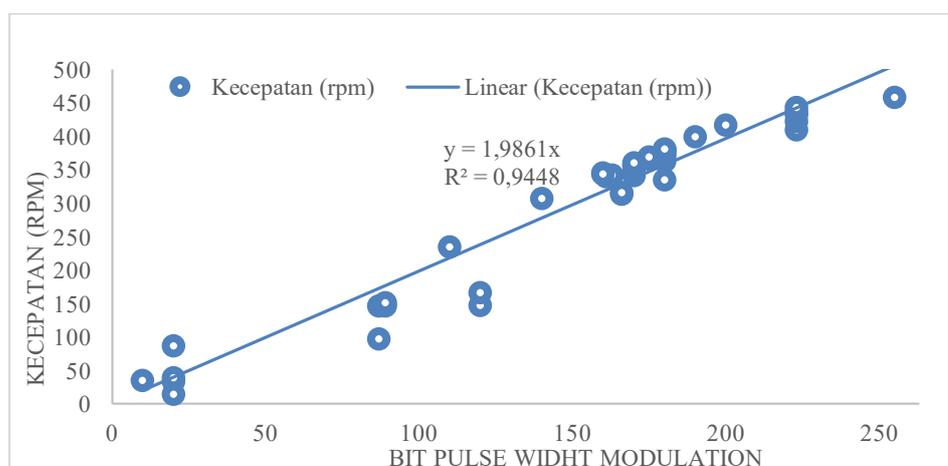
**Tabel 11.** Data *input output* motor DC

PWM	Motor DC 1		Motor DC 2		Motor DC 3		Motor DC 4	
	Arus (mA)	Kec (rpm)						
255	10	458	10	458	10	458	10.1	458
200	11	417	11	458	10	458	10	458
190	135	399	135	399	135	399	135	399
160	250	345	250	345	250	345	250	345
140	330	307	330	307	331	308	331	307
161	260	340	260	340	260	340	260	340
163	255	342	255	342	255	342	255	342
160	251	344	251	344	251	344	251	344
110	113	235	113	235	113	235	113	235
87	244	97	244	97	244	97	244	97
87	141	146	141	146	141	146	141	146
180	271	335	271	335	271	335	271	335
180	211	363	211	363	211	363	211	363
180	200	369	200	369	200	369	200	369
180	188	374	188	374	188	374	188	374
180	180	378	180	378	180	378	180	378
180	177	379	177	379	177	379	177	379
180	176	380	176	380	176	380	176	380
180	174	381	174	381	174	381	174	381
170	258	341	258	341	258	341	258	341
170	242	349	242	349	242	349	242	349
170	227	356	227	356	227	356	227	356
170	225	357	225	357	225	357	225	357
170	218	360	218	360	218	360	218	360
10	250	35	250	35	250	35	250	35
20	208	33,7	208	33,7	208	33,8	208	33,7
20	209	38,7	209	38,6	209	38,9	209	38,7
20	384	14,09	384	14,1	384	14,1	384	14,09
20	247	86,7	247	86,7	247	86,7	247	86,7
120	128	147	128	147	128	147	128	147
120	290	166	290	166	290	166	290	166
166	312	316	312	316	312	316	312	316
223	112	410	112	410	112	410	112	410
89	114	146	114	146	114	146	114	146
89	104	151	104	151	104	151	104	151
223	87,2	422	87,1	422	87,2	422	87,2	422
223	63,8	433	63,8	433	63,8	433	63,8	433
223	57,8	436	57,8	436	57,8	436	57,8	436
223	42,6	443	42,6	443	42,6	443	42,6	443
175	204	366	204	366	204	367	204	366
175	184	369	184	369	184	369	184	369

Tabel 11. Data *input output* motor DC (Lanjutan)

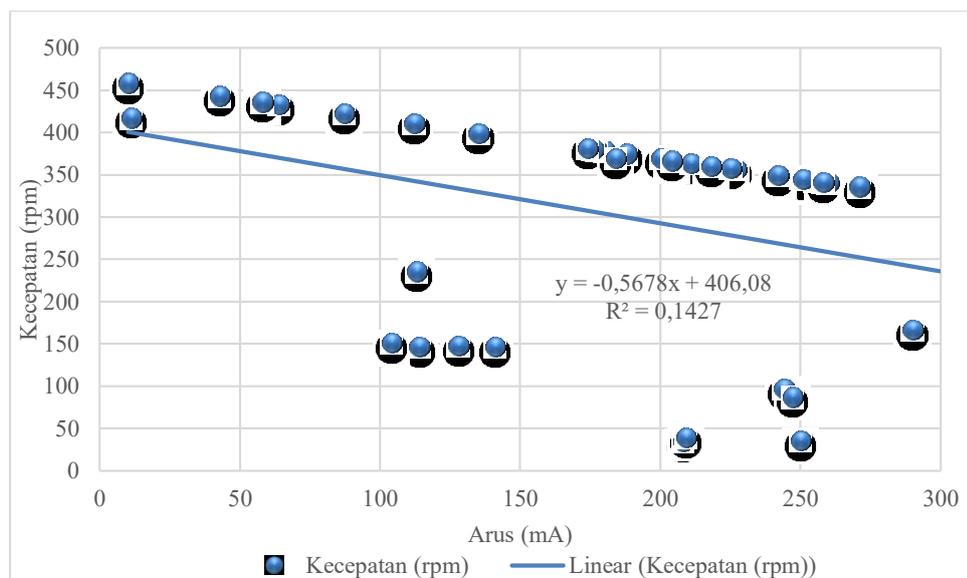
PWM	Motor DC 1		Motor DC 2		Motor DC 3		Motor DC 4	
	Arus (mA)	Kec (rpm)						
219	60,7	434	60	433	60,7	434	60,3	433
219	41,8	442	41,8	442	41,8	442	41	443
219	38,7	445	38,1	445	38,7	445	38,1	445
219	37,2	445	37,2	445	37,2	445	37,2	445
211	88,2	421	87,1	423	88,2	420	88,2	421
211	56,8	436	56,8	436	56,8	436	56,8	436
209	63,7	433	63,5	434	63,7	433	63,7	433
205	78	426	78	426	78	426	78	426
202	89	421	89	421	89	421	89	421
200	97,9	417	97,0	418	97,9	417	97,9	417
199	101	415	101	415	101	415	101	415
197	108	412	108	412	108	412	108	412
195	120	406	120	406	120	406	120	406
193	123	405	123	405	123	405	123	405
191	131	401	131	401	131	401	131	401
189	146	394	146	394	146	394	146	394
187	146	394	146	394	146	394	146	384
183	166	384	166	384	166	384	166	381
181	173	381	173	381	173	381	173	381
179	188	374	188	374	188	374	188	374
177	184	376	184	376	184	376	184	376

Grafik pada Gambar 4.7 merupakan grafik hubungan nilai *input* PWM dengan nilai *output* kecepatan (rpm). Grafik tersebut menunjukkan hasil *trendline* linier yang bagus yang terlihat dari nilai  $R^2 = 0,9448$  dan nilai persamaan linier  $y=1,9861x$ .



Gambar 4. 7 Hubungan *pulse widht modulation* dengan kecepatan (rpm)

Kriteria bagus terlihat dari nilai  $R^2$  yang didapat lebih dari nilai konstanta linier 0.75, sehingga hubungan antara PWM dengan Kecepatan adalah linier. Gambar 4.8 yaitu hubungan arus (mA) dengan kecepatan putar (rpm) yang dihasilkan menunjukkan ketidak linieritas dalam hubungan *input* dan *output* motor DC tersebut. Kecilnya nilai arus (mA) menghasilkan kecepatan (rpm) motor yang semakin besar, dan sebaliknya semakin besar nilai arus (mA) maka nilai kecepatan (rpm) semakin kecil. Besarnya nilai arus (mA) ini banyak didapat ketika periode *startup* atau nilai PWM yang kecil. Nilai *non linier* ditunjukkan pada Gambar 4.8 menunjukkan hasil persamaan  $y = -0,5678x + 406,08$  dan nilai  $R^2 = 0,1427$ . Nilai  $R^2$  sangat kecil dan menunjukkan jauh dari kriteria linier.



**Gambar 4. 8** Hubungan arus (mA) dengan kecepatan putar (rpm)

#### 4.4. Hasil Simulasi Perbandingan Kendali *Fuzzy-PID* dengan *Fuzzy-PI*

Pengujian ini merupakan tahap perbandingan, untuk membuktikan metode kendali mana yang terbaik, sistem kendali *fuzzy-PID* atau *fuzzy-PI (apple to apple)*. Simulasi pengendali diperlukan untuk mengetahui karakteristik *plant* yang digunakan. *Plant* yang digunakan adalah empat motor DC yang menjadi aktuator pada FWMR. Model yang digunakan adalah model fungsi transfer yang telah di temukan melalui proses identifikasi sistem, terlihat dalam Gambar 3.15. Metode

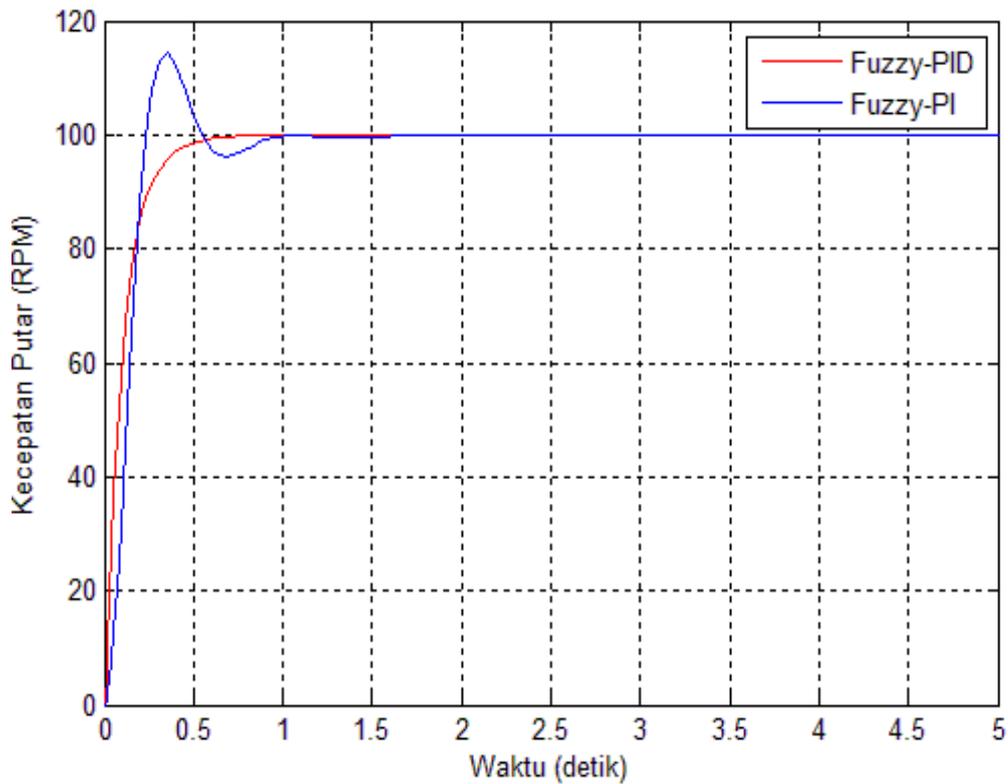
kendali *fuzzy-PID* dan *fuzzy-PI* akan dibandingkan dan dipilih berdasarkan *indeks* performansi sistem kendali. Perbandingan metode ini dibuat berdasarkan bahwa metode *fuzzy-PI* yang sudah dianggap cukup cepat dalam mengatasi kesalahan sistem, dan menghasilkan sistem kontrol yang stabil, namun kemampuan parameter *Kd* mempercepat respon sistem, sehingga *Kd* juga sangat dibutuhkan dalam sistem kontrol.

Pengendali PID merupakan gabungan antara tiga macam model pengendali yaitu *Proporsional (P)*, *Integral (I)*, dan *Derivative (D)*. Tujuan penggabungan ini adalah untuk menutupi kekurangan dan menonjolkan kelebihan dari masing-masing mode pengendali (Abadi, 2015). Mode P berfungsi mempercepat *rise time* agar respon sistem lebih cepat mencapai *setpoint*, namun masih memiliki kekurangan yaitu meninggalkan *offset*. Kelemahan tersebut dapat diatasi dengan mengkombinasikan mode I yang mampu menghilangkan *offset* dan juga mengurangi terjadinya maksimal *overshoot*. Tetapi mode I menyebabkan lambatnya respon sistem, dan antisipasinya adalah menggunakan mode I yang digabungkan dengan mode D (Abadi, 2015). Karakteristik ini diperlihatkan pada Tabel 12.

**Tabel 12.** Karakteristik parameter PID (Muhyiddin Bin Yusof, 2013)

<b>Respon Close loop</b>	<b>Rise time</b>	<b>Overs hoot</b>	<b>Setting time</b>	<b>SS error</b>
<b>Kp</b>	Turun	Naik	Perubahan kecil	Turun
<b>Ki</b>	Turun	Naik	Naik	Hilang
<b>Kd</b>	Perubahan Kecil	Turun	Turun	Perubahan Kecil

Perbandingan ini menggunakan pengujian simulasi *simulink* dengan konsep dasar diagram blok *loop* tertutup terlihat dalam gambar 3.2, dengan *rule-rule fuzzy-PID* yang sudah dirancang, dan *rule-rule fuzzy-PI* didapat dengan menghilangkan *output* parameter *Kd* dalam rancangan *membership function fuzzy-PID*. Gambar 4.9 memperlihatkan hasil simulasi metode kontrol *fuzzy-PID* dengan *fuzzy-PI*. Hasil simulasi perbandingan metode kontrol ini terlihat bahwa metode kontrol *fuzzy-PID* lebih baik dibandingkan dengan metode kontrol *fuzzy-PI*. Hasil respon *fuzzy-PID* menuju stabil lebih cepat dibandingkan dengan *fuzzy-PI*.



**Gambar 4. 9** Hasil Simulasi perbandingan metode kendali *fuzzy-PID* dengan *fuzzy-PI*.

Hasil nilai indeks performansi tanggapan sistem pengendalian terlihat dalam tabel 13. Terbukti bahwa parameter  $K_d$  juga dibutuhkan dalam mengurangi nilai *overshoot* dan mempercepat respon sistem. Penelitian oleh (Sharma & Palwalia, 2017) tentang perbandingan metode kontrol *fuzzy-PID* dengan PID pada kendali kecepatan putar motor DC, memberikan hasil 0,465% *overshoot* dan waktu tunak 97,80ms atau 0,0978s.

**Tabel 13.** Hasil Performansi Tanggapan Sistem *Fuzzy-PID* dengan *Fuzzy-PI*

Parameter	Perbandingan Metode Kendali	
	Fuzzy-PID	Fuzzy-PI
Waktu tunda (detik)	0.091	0,117
Waktu naik (detik)	1,133	0,235
Waktu puncak (detik)	-	0,353
Waktu tunak (persen)	0,353	0,494
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	-	14,26

Perbandingan metode kontrol terbaik pada sistem motor DC telah di buktikan dalam penelitian (Sharma & Palwalia, 2017) dan dalam penelitian ini, bahwa metode kontrol *fuzzy-PID* merupakan metode kontrol terbaik dibandingkan dengan metode kontrol *fuzzy-PI* atau PID pada sistem kendali kecepatan putar motor DC.

#### 4.5. Hasil Pengujian Kendali *Fuzzy-PID* pada *Four-Wheeled Mobile Robot* dengan Variasi Sudut Kemiringan Jalan

Tahap ini membahas dan menganalisa implementasi metode *fuzzy-PID* untuk pengendalian kecepatan putar empat motor DC pada FWMR, dilengkapi dengan hasil respon sistem kendali. Variasi bidang miring yang digunakan dengan sudut kemiringan  $5^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ . Pengujian ini telah mencapai tujuan, bahwa sistem kendali menggunakan metode *fuzzy-PID* untuk kendali kecepatan putar empat motor DC dalam sistem FWMR berhasil menyelesaikan permasalahan jalan menanjak dengan sudut kemiringan hingga  $\pm 30^{\circ}$ , dengan validasi waktu tunda, waktu naik, waktu puncak, waktu tunak dan waktu tempuh yang cepat. Terlihat Tabel 14 bahwa dalam lima kali pengujian di setiap variasi menghasilkan waktu rata-rata kurang dari 10S. Variasi  $20^{\circ}$  pada pengujian sistem tanpa kontrol FWMR tidak dapat berjalan, atau tidak dapat melawan gaya berat akibat jalan menanjak.

**Tabel 14.** Hasil waktu tempuh melewati variasi sudut kemiringan jalan

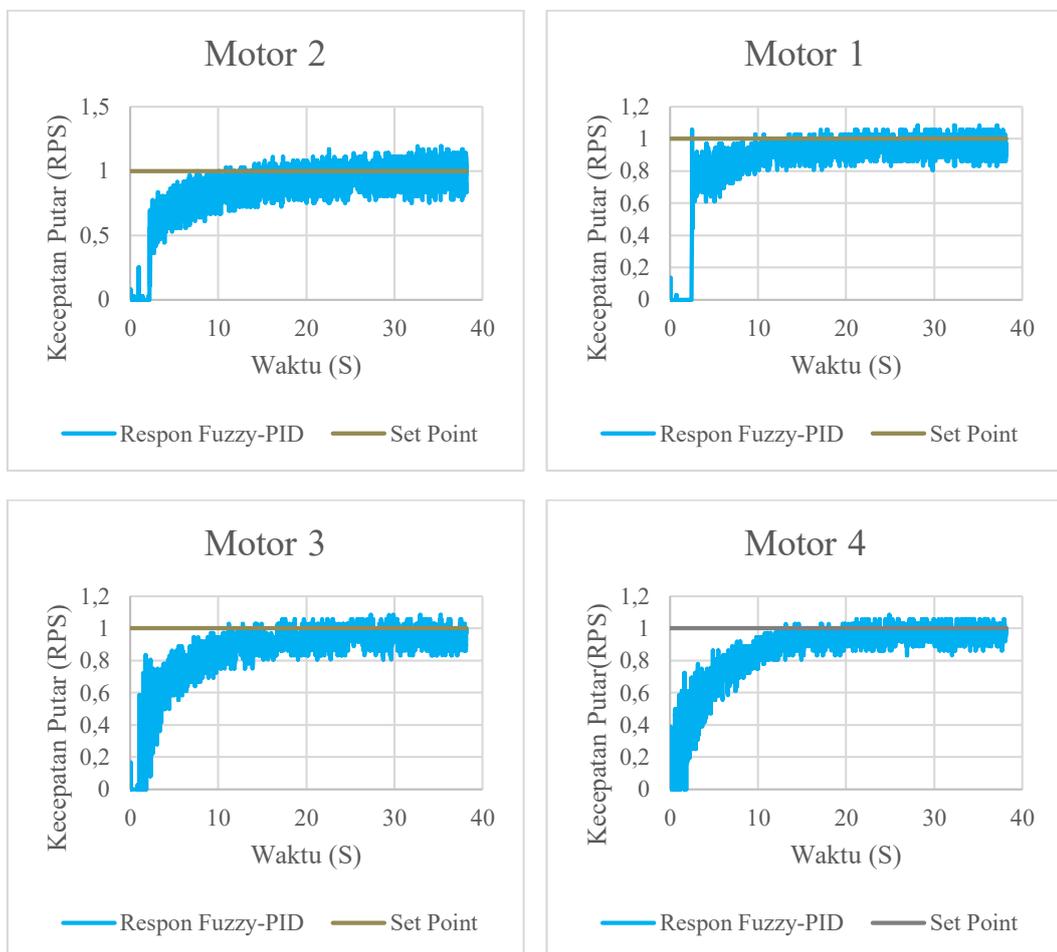
No.	Kemiringan Jalan	Waktu Tempuh (Dengan Kontrol)	Waktu Tempuh (Tanpa Kontrol)	Panjang Lintasan	Set Point
1.	$5^{\circ}$	3,04 Detik	4,04 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM
2.	$10^{\circ}$	4,04 Detik	6,14 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM
3.	$20^{\circ}$	6,12 Detik	Tidak Berjalan	2 meter	1RPS/60 RPM
4.	$30^{\circ}$	8,02 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM

##### 4.5.1. Hasil Pengujian *Fuzzy-PID* FWMR pada Variasi Sudut Kemiringan Jalan $5^{\circ}$ , $10^{\circ}$ , $20^{\circ}$

Sistem kendali kecepatan putar empat motor DC didapatkan dari nilai *feedback* hasil pengukuran sensor *optocoupler* yang terpasang di setiap motor pada FWMR. Hasil metode kendali *fuzzy-PID* yang diterapkan adalah melalui konversi pemrograman bahasa C, sehingga dapat diolah mikrokontroller.



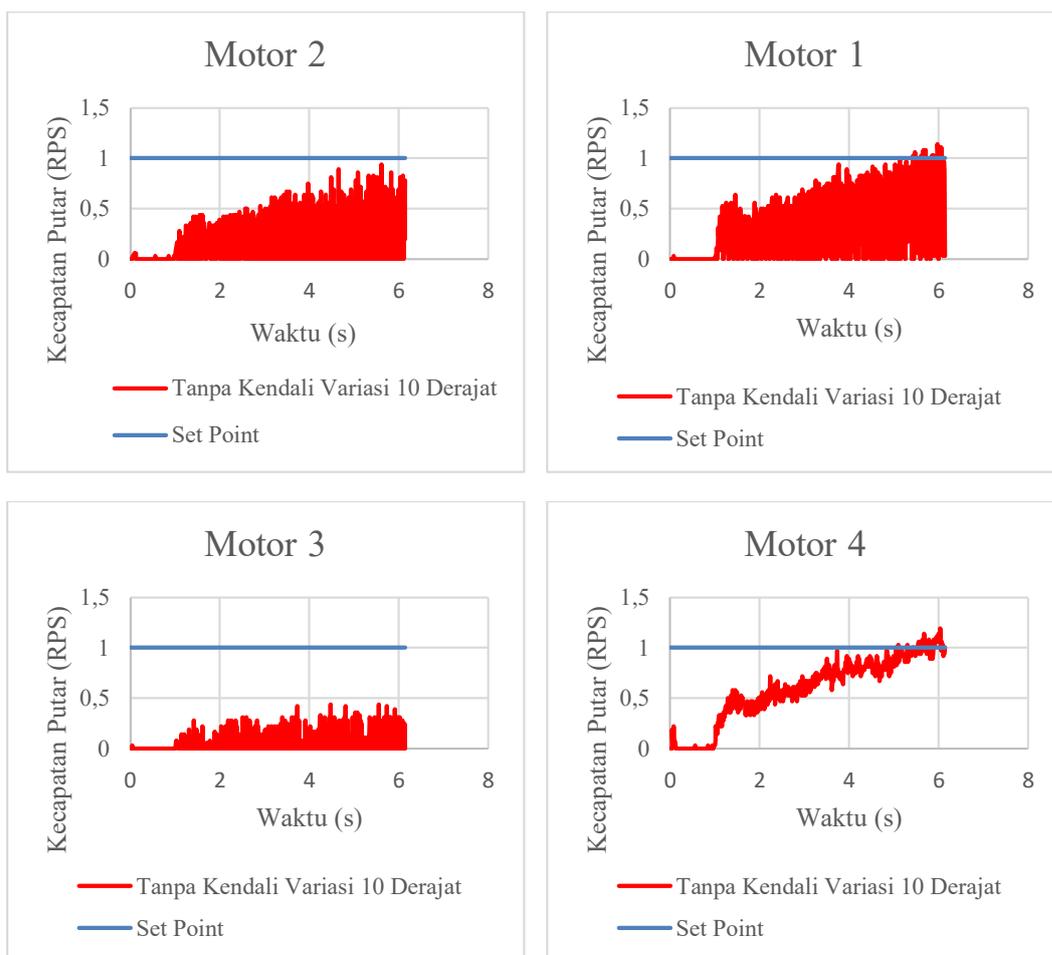
**Gambar 4. 10** (a) Validasi sudut kemiringan, (b) saat melewati tanjakan 5<sup>0</sup>.



**Gambar 4. 11** Respon sistem pengendalian fuzzy-PID pada tanjakan 5<sup>0</sup>

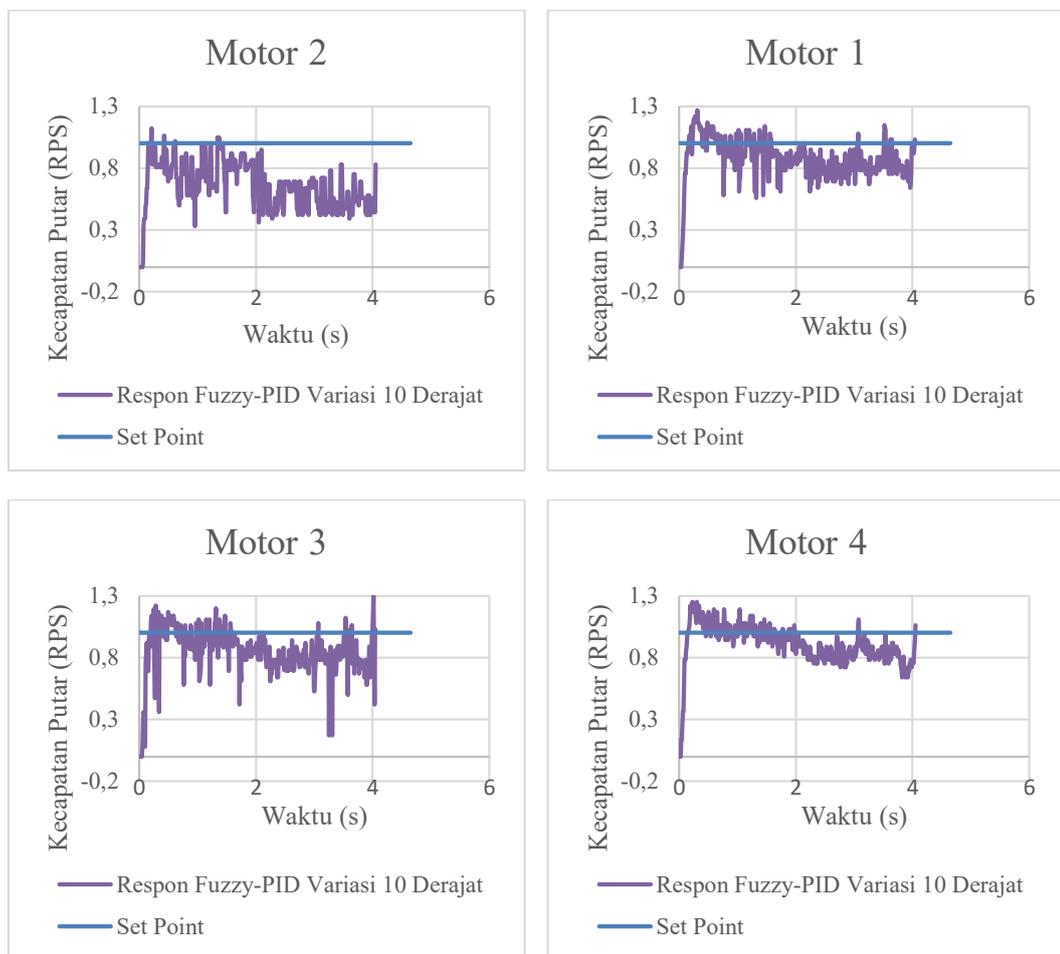
Data yang disajikan dalam grafik gambar 4.11 merupakan data sebenarnya yang didapat dari pengiriman data *serial* saat pengujian berlangsung. Berdasarkan tema judul pada penelitian ini, pembuatan sistem *Human Machine Interface*

disajikan pada Gambar 4.17 untuk melengkapi penyajian antarmuka data FWMR. Respon yang disajikan pada hasil HMI selaras dengan hasil *plot manual* melalui komunikasi *serial*. Penulis melengkapi hasil tanggapan tanpa menggunakan sistem kontrol pada variasi tanjakan  $10^0$ ,  $20^0$ ,  $30^0$ . Gambar 4.12, Gambar 4.14, Gambar 4.16 merupakan hasil dari tanggapan sistem pengendalian kecepatan putar FWMR, tanpa sistem kendali pada masing-masing variasi kemiringan. Tanpa sistem kendali terlihat bahwa sistem FWMR tidak mampu mengatasi gangguan pada jalan tanjakan, dan tidak dapat menyesuaikan nilai *setpoint*. Waktu akhir pada 5-6 S, hasil tanggapan tanpa sistem kontrol menunjukkan nilai kecepatan putar FWMR melalui *setpoint*, ini terjadi akibat FWMR tidak lagi berada pada lintasan atau diangkat menyelesaikan *track* yang dilalui, sehingga motor berputar tanpa ada gangguan.



**Gambar 4. 12** Respon tanpa sistem kontrol dengan sudut kemiringan jalan  $10^0$

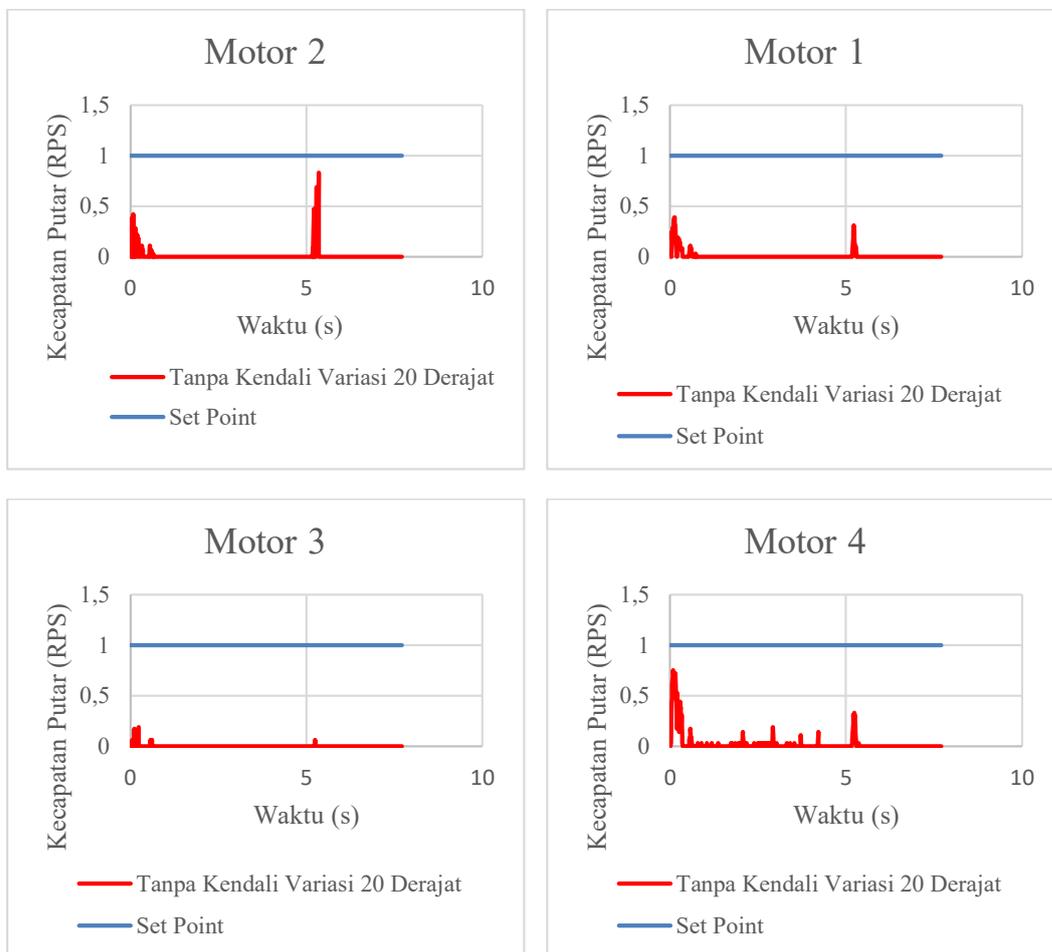
FWMR tanpa menggunakan sistem kendali mampu melewati variasi sudut kemiringan  $10^0$ , namun kecepatan putar yang di operasikan tidak stabil dan mempunyai efek waktu tempuh dalam melewati kemiringan cukup lama dibandingkan dengan FWMR yang mengimplementasikan sistem kendali. Nilai variasi kemiringan saat pengujian *real* sangat berpengaruh pada kinerja FWMR, semakin terbebani motor akibat dari variasi kemiringan mengakibatkan putaran motor menuju nilai yang paling kecil hingga 0 dan FWMR akan berhenti berputar. Berhentinya putaran motor dengan periode waktu yang lama dapat menimbulkan kerusakan pada motor, sampai dengan terbakarnya motor tersebut, hal tersebut terjadi mulai dari variasi sudut kemiringan  $20^0$  hingga  $30^0$ .



**Gambar 4. 13** Respon kendali fuzzy-PID dengan sudut kemiringan jalan  $10^0$

Hasil tanggapan sistem tanpa kontrol pada variasi kemiringan  $20^0$  terlihat dalam gambar 4.14, bahwa semua motor tidak dapat berjalan, kecepatan putar

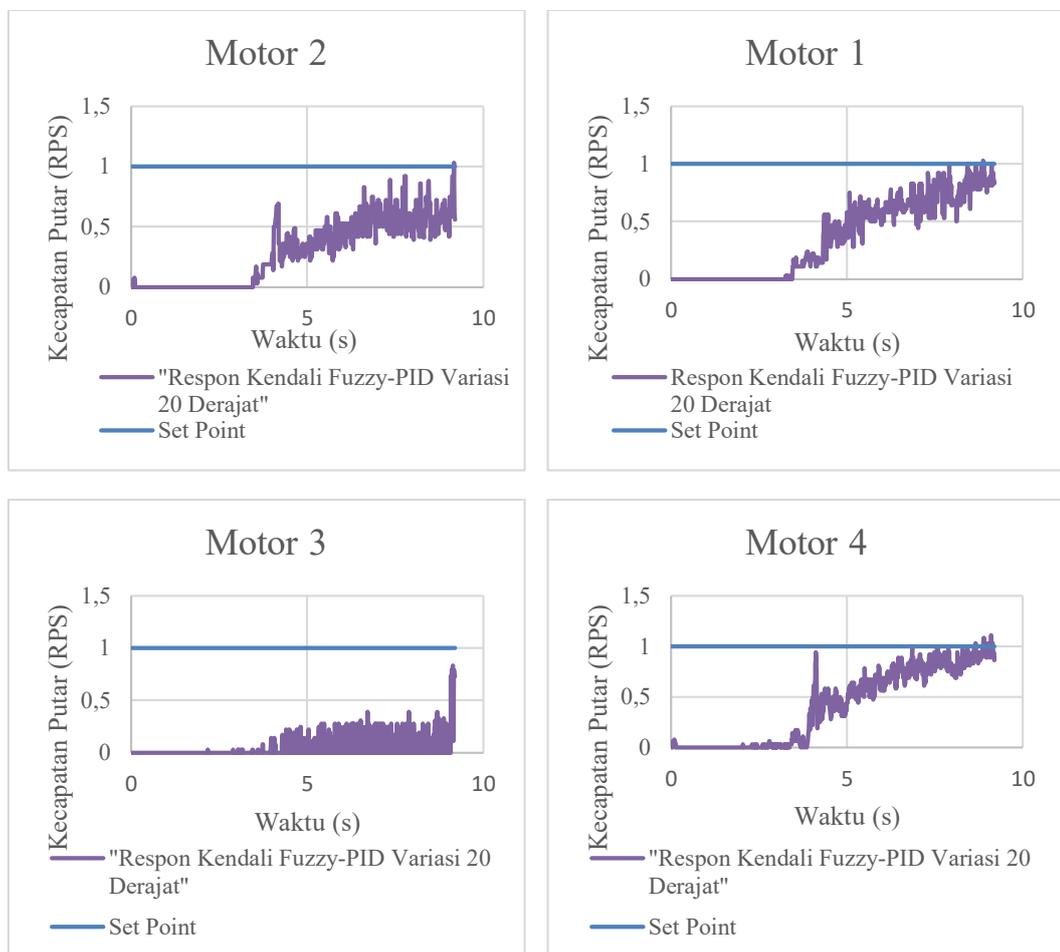
bernilai sampai dengan 0, sehingga pada sudut kemiringan  $20^0$ , tanpa sistem kendali robot tidak dapat berjalan ataupun melewati kemiringan jalan tersebut. Pada sudut kemiringan  $20^0$  mempunyai gaya berat yang besar, membuat torsi motor tidak mampu berputar sampai bernilai 0, dan tidak adanya sistem kendali yang memberikan perintah kepada motor untuk memaksimalkan torsi dari motor itu sendiri. Fungsi sistem kendali yang diterapkan haruslah memberikan respon dengan cepat saat mendeteksi adanya nilai *error* dan *delta error*, sehingga sistem kontrol memberikan respon untuk meningkatkan torsi di setiap motor, sehingga motor listrik dapat bergerak dan mengantisipasi jalan menanjak secara otomatis.



**Gambar 4. 14** Respon tanpa sistem kontrol dengan sudut kemiringan jalan  $20^0$

Motor 3 pada hasil penerapan sistem kendali *fuzzy-PID* mengalami nilai respon yang sangat jauh dari nilai *setpoint*, hal ini diakibatkan dari titik kesalahan hasil pengukuran pada sensor kecepatan putar motor 3 sangat berpengaruh dan titik

pusat beban berada pada motor 3. Motor 3 merupakan pusat beban hampir di setiap pengujian. Hasil sistem tanpa kendali terlihat dalam gambar 4.14 memberikan bukti bahwa tanpa adanya sistem kontrol untuk memberikan aksi terhadap aktuator maka nilai *setpoint* yang telah ditetapkan tidak akan tercapai. Pemberian nilai *Setpoint* rpm yang besar pada motor DC secara terus menerus akan membuat banyak sekali kerugian. Kerugian tersebut antara lain dari *life time* motor tersebut akan berkurang dan konsumsi baterai berlebihan (boros), karena baterai merupakan satu-satunya sumber daya yang digunakan.



**Gambar 4. 15** Respon kendali fuzzy-PID dengan sudut kemiringan jalan  $20^{\circ}$

**Tabel 15.** Hasil Performansi Sistem Kontrol *Fuzzy-PID*

Parameter	Sudut Kemiringan 5 <sup>0</sup>				Sudut Kemiringan 10 <sup>0</sup>			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Waktu Tunda (s)	2,47	2,21	1,03	1,02	0,08	0,11	0,76	0,08
Waktu Naik (s)	8,21	7,68	11,2	12,2	0,17	0,15	0,17	0,15
Waktu Tunak (s)	9,98	9,98	12,9	12,8	0,19	0,19	0,18	0,17
Waktu Puncak (s)	-	-	-	-	0,31	0,21	0,31	0,30
Max overshoot (%)	0	0	0	0	27	12	27	25

**Tabel 15.** Hasil Performansi Sistem Kontrol *Fuzzy-PID* (Lanjutan)

Parameter	Sudut Kemiringan 20 <sup>0</sup>			
	M1	M2	M3	M4
Waktu Tunda (s)	4,66	4,61	-	4,03
Waktu Naik (s)	7,90	9,16	-	8,62
Waktu Tunak (s)	8,45	9,19	-	8,66
Waktu Puncak (s)	-	-	-	-
Max overshoot (%)	0	0	0	0

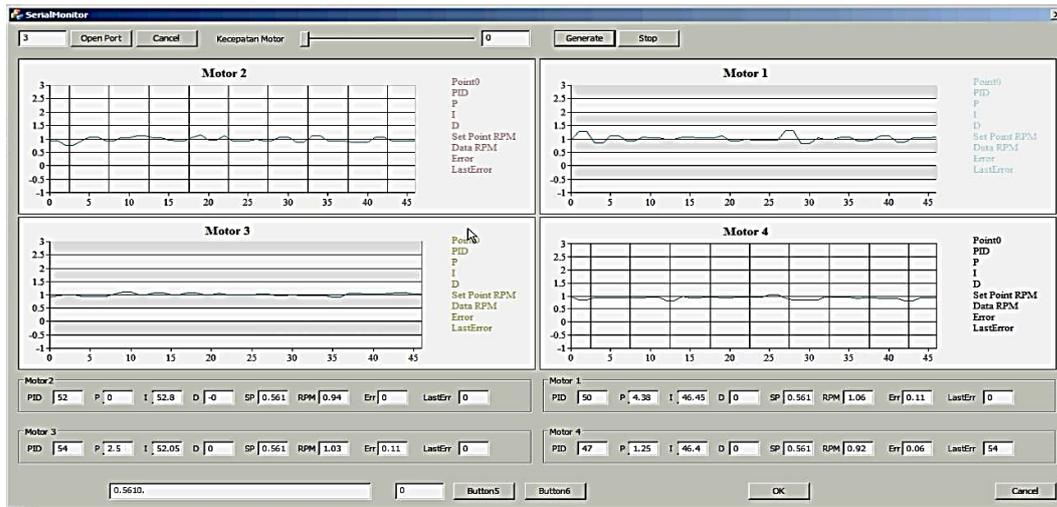
Tabel 15 menunjukkan hasil performansi sistem kontrol *fuzzy-PID* saat pengujian variasi sudut kemiringan. Makna tanda (-) adalah tidak ditemukannya waktu yang di analisa, seperti tidak ditemukan nilai *overshoot* pada sudut kemiringan 5<sup>0</sup> dan 20<sup>0</sup>. Variasi sudut kemiringan 5<sup>0</sup>, keempat motor tidak terlihat mempunyai nilai *overshoot*, namun masih terdapat riak dari hasil pengujian. Riak tersebut diakibatkan dari tidak idealnya pengujian pada *real plant*. Tidak ideal yang dimaksud adalah akibat dari kualitas sensor dan mikrokontroller, hal tersebut terjadi pada semua pengujian pada penelitian ini namun hasil dan mutu pengukuran sistem kontrol dapat ditoleransi. Variasi 10<sup>0</sup>, waktu tunak yang dicapai kurang dari 1S pada setiap motor, sehingga sistem tersebut mampu menstabilkan berdasarkan nilai *setpoint*. Gangguan gaya berat oleh jalan menanjak membuat sistem berosilasi turun dibawah nilai *setpoint*. Sistem kontrol memerlukan waktu untuk menstabilkan ulang kecepatan putar motor ke nilai *setpoint*. Variasi 20<sup>0</sup>, terlihat bahwa *overshoot* bernilai 0, itu disebabkan dari kecepatan putar dibawah nilai *setpoint* dan aktualnya FWMR dapat melewati tanjakan dengan sudut kemiringan 20<sup>0</sup> dengan waktu tempuh 6,12S. Analisa yang di dapat bahwa walaupun kecepatan putar aktual saat 20<sup>0</sup> dibawah *setpoint*, nilai kecepatan putar terus beradaptasi naik melawan gaya berat total. Gaya mekanik yang dihasilkan dari kecepatan putar tersebut sudah cukup untuk melawan dan melewati tanjakan dengan sudut kemiringan 20<sup>0</sup>.

#### 4.5.2. Hasil Pengujian Fuzzy-PID FWMR pada Variasi Sudut Kemiringan Jalan 30<sup>0</sup>

Kendali *fuzzy-PID* yang telah diterapkan menghasilkan kendali empat motor DC yang lebih stabil dalam mengatasi permasalahan jalan menanjak 30<sup>0</sup>. Penggunaan kendali *fuzzy-PID* berdasarkan rancangan (Sharma & Palwalia, 2017) dan mengembangkan dengan merubah metode *defuzzyfikasi* menjadi metode LOM menunjukkan nilai *overshoot* yang hampir 0% pada motor 1, motor 3 dan motor 4, berbeda dengan motor 2 yang menunjukkan grafik kecepatan putar yang besar diakibatkan dari terjadinya slip pada motor 2. Slip ini terjadi akibat tidak rata lintasan, sehingga motor berputar tanpa menyentuh permukaan lintasan. Gambar 4.16 pengujian FWMR dalam mengatasi variasi gangguan jalan tanjakan dengan kemiringan  $\pm 30^0$  menggunakan kendali fuzzy-PID. Gambar 4.19 merupakan grafik hasil tanggapan sistem pengendalian kecepatan putar FWMR mengatasi jalan tanjakan dengan sudut kemiringan 30<sup>0</sup>. Pembuatan berdasarkan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak untuk FWMR berfungsi dengan baik dan handal, penggunaan untuk pengujian berulang-berulang tidak mengalami kerusakan sampai saat ini.

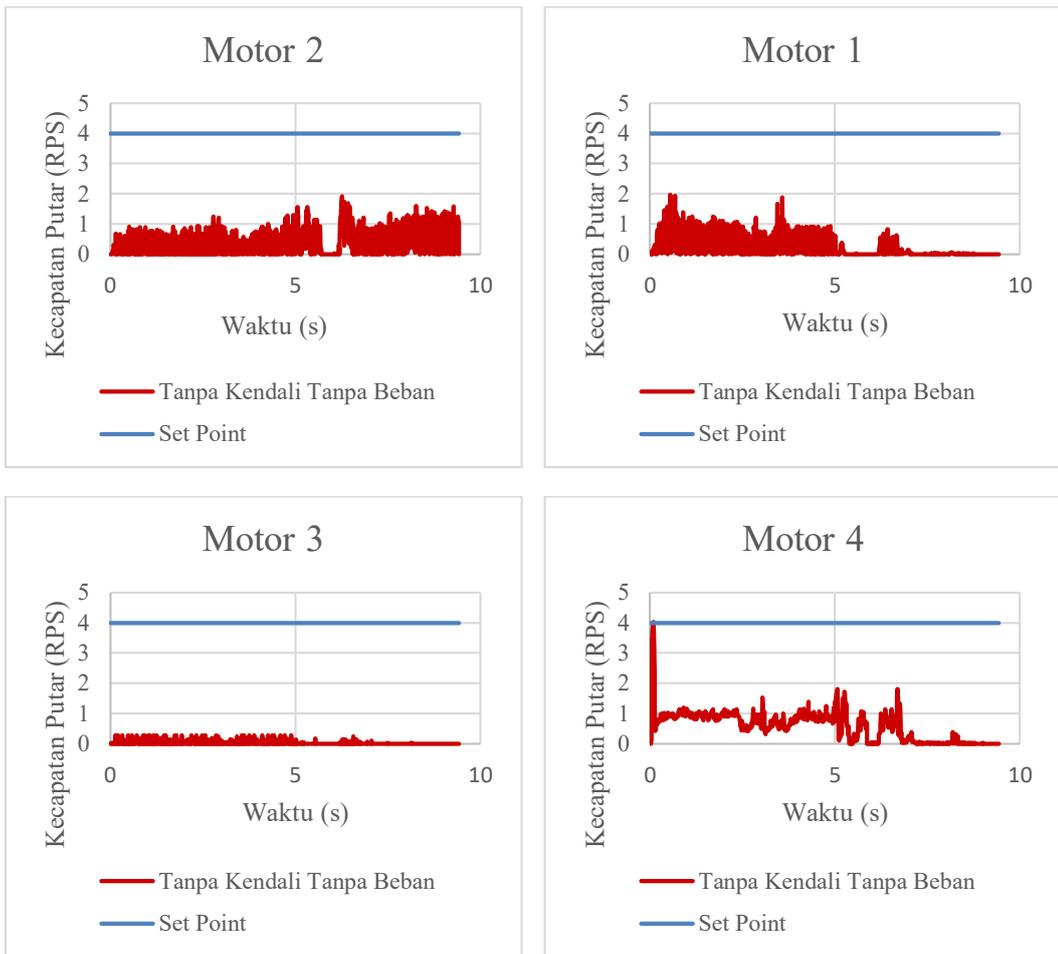


**Gambar 4. 16** Dokumentasi FWMR dalam mengatasi tanjakan 30<sup>0</sup>

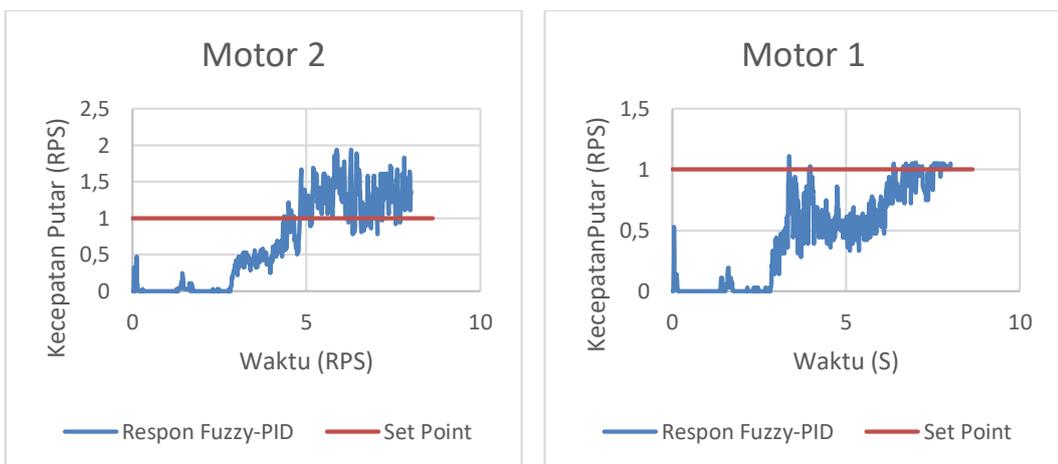


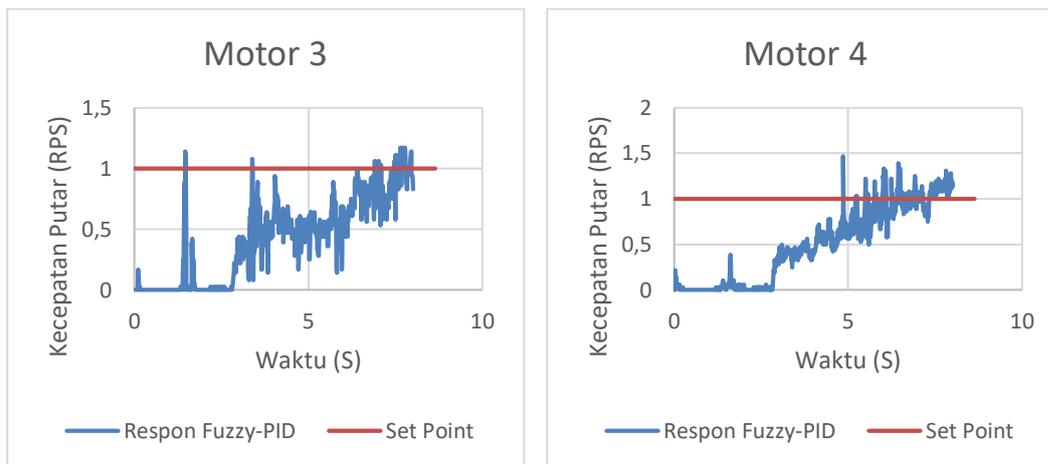
**Gambar 4. 17** Display untuk menyajikan antarmuka FWMR

Hasil antarmuka yang telah dibuat ditunjukkan dalam gambar 4.17, bahwa telah selaras dengan penyajian hasil *plot* data *manual*. Dapat ditarik kesimpulan bahwa pembuatan sistem antarmuka pada sistem FWMR yang menerapkan kendali *fuzzy-PID* pada empat motor DC yang bekerja secara *independent* dengan komunikasi *wireless* berjalan dengan baik. Terlihat dalam gambar 4.17 terdapat beberapa penyajian nilai-nilai parameter yang dapat diamati, seperti nilai PID, *error*, *last error*, *setpoint*, dan data kecepatan putar. Sistem antarmuka dengan konsep HMI melengkapi penelitian tentang implementasi sistem kendali *fuzzy-PID*. HMI pada berbagai penjelasan dan aplikasinya merupakan alat berbentuk perangkat keras atau perangkat lunak yang berfungsi untuk menampilkan berbagai informasi data dari mesin kepada manusia. Upaya dalam menghemat *cost*, sistem ini dibuat berbasis *software* yang dioperasikan oleh *personal computer*. Berbeda dengan SCADA sistem yang dibuat ini hanya mempunyai fasilitas antarmuka mesin dengan manusia, yaitu antarmuka informasi yang ada dalam FWMR, sedangkan SCADA mempunyai fungsi yang lebih kompleks. SCADA haruslah memiliki sistem yang dapat mengawasi, *monitoring*, mempunyai fasilitas aksi kendali secara jarak jauh, dan pengolahan penyimpanan data pada *plant* (akuisisi data), sehingga *display* yang dibuat merupakan sistem yang melengkapi antarmuka FWMR dengan manusia menggunakan perangkat keras berupa personal komputer.



**Gambar 4. 18** Respon tanpa metode kendali dengan sudut kemiringan  $30^{\circ}$





**Gambar 4. 19** Respon sistem pengendalian fuzzy-PID pada tanjakan  $30^0$

Gambar 4.18 menunjukkan bahwa kecepatan putar bernilai 0, dan tidak adanya sistem kontrol yang memberikan aksi untuk meningkatkan energi mekanik pada motor. Dalam penerapannya terdapat beberapa permasalahan pengukuran dari instrumentasi sensor yang terpasang pada masing-masing motor DC. Sensor yang ter-couple pada motor sangat terpengaruh dalam gangguan *non* teknis seperti getaran dan perubahan posisi sensor yang diakibatkan dari benturan benda lain dalam bodi FWMR seperti baterai yang membentur fisik sensor. Gangguan slip yang terjadi dalam operasi FWMR pada tanjakan  $30^0$  mengakibatkan beberapa roda berputar tanpa menyentuh permukaan lintasan, sehingga mengakibatkan FWMR mengalami perubahan posisi. Solusi yang diberikan dalam mengatasi stabilisasi FWMR ketika terjadi slip adalah penggunaan sensor gyro, accelerometer, untuk mendapatkan data pengukuran perubahan sudut *yaw*, *pitch*, dan *roll* pada FWMR.

Sistem pengendalian *Fuzzy-PID* memberikan nilai indeks performansi tanggapan saat pengujian *real plant* pada variasi bidang miring atau tanjakan  $30^0$  yang ditampilkan pada Tabel 14. Hasil respon sistem terlihat dalam gambar 4.19 menunjukkan bahwa respon dari motor 1 dan motor 3 terlihat mirip, Motor 2 dan motor 4 terlihat mirip dalam variasi sudut kemiringan  $30^0$ . Respon tersebut menunjukkan bahwa sistem kontrol memberikan aksi kendali untuk menstabilkan FWMR berjalan lurus, dengan mensinkronkan kecepatan putar roda kiri dan kanan agar dapat berjalan lurus.

**Tabel 16.** Hasil Performansi Tanggapan Sistem Pengendalian dengan *Fuzzy-PID*

Parameter	Fuzzy-PID Bidang Miring 30 <sup>0</sup>			
	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
Waktu tunda (detik)	3,21	3,18	3,44	3,10
Waktu naik (detik)	3,37	4,36	6,40	5,23
Waktu puncak (detik)	6,40	4,85	1,47	4,86
Waktu tunak (detik)	6,41	3,39	6,43	5,22
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	8	67	14	11

Tabel 16 menunjukkan bahwa nilai kendali *fuzzy-PID* memberikan karakteristik kinerja yang berbeda dibandingkan dengan hasil simulasi. Penerapan kendali *fuzzy-PID* pada *real plant system* memberikan waktu tunda, waktu naik, waktu puncak, dan waktu turun yang lebih lama serta *maximum overshoot* yang lebih besar dibandingkan dengan hasil simulasi. Penelitian (Muhyiddin Bin Yusof, 2013) menyebutkan bahwa jika parameter PID tidak terpilih dengan tepat, proses sistem kontrol tidak dapat stabil (*unstable*), ketidakstabilan akibat dari kelebihan nilai *gain*. Karakteristik antara motor 1, motor 2, motor 3, dan motor 4 memiliki nilai indeks performansi yang berbeda-beda, hal tersebut diakibatkan dari setiap motor memiliki nilai gangguan yang berbeda-beda saat jalan tanjakan 30<sup>0</sup>, dan masing masing motor harus menstabilkan kecepatan putar yang telah ditentukan berdasarkan nilai *setpoint*. Ketelitian pembacaan sensor dan mikrokontroller sebagai pengolahan data pengukuran kecepatan putar sangat dipengaruhi berdasarkan kualitas dari produk sensor dan IC pada mikrokontroller, karena pada prinsipnya komponen yang ada pada pasar peneliti mahasiswa merupakan pasar komponen dengan kualitas lapis ke-4, sehingga *error* data yang didapat besar, bahkan melebihi nilai *standart error steady state* 5%, namun mutu yang disajikan pada sistem FWMR masuk dalam kategori stabil mengatasi bidang miring atau jalan menanjak sampai dengan 30<sup>0</sup>.

#### **4.6. Hasil Pengujian Kendali *Fuzzy-PID* pada *Four-Wheeled Mobile Robot* dengan Variasi Beban pada Jalan Menanjak.**

Pengujian menggunakan variasi beban ini mempunyai tujuan untuk menguji pengoptimalan kinerja sistem dalam mengatasi jalan menanjak. Variasi beban pada jalan menanjak menambah permasalahan sistem kendali FWMR, dengan harapan

bahwa sistem kendali dapat mengatasi beban internal dan beban eksternal dalam melewati jalan menanjak. Nilai beban internal pada FWMR adalah 1,775 Kg, dan detail variasi beban terlihat dalam tabel 17. Konversi dari massa menjadi gaya berat (N) menggunakan persamaan  $W = m \times g$

W = Gaya Berat (N)

m = Massa benda (kg)

g = Percepatan gravitasi bumi yang besarnya  $9,8 \text{ m/s}^2$  atau dibulatkan  $10 \text{ m/s}^2$

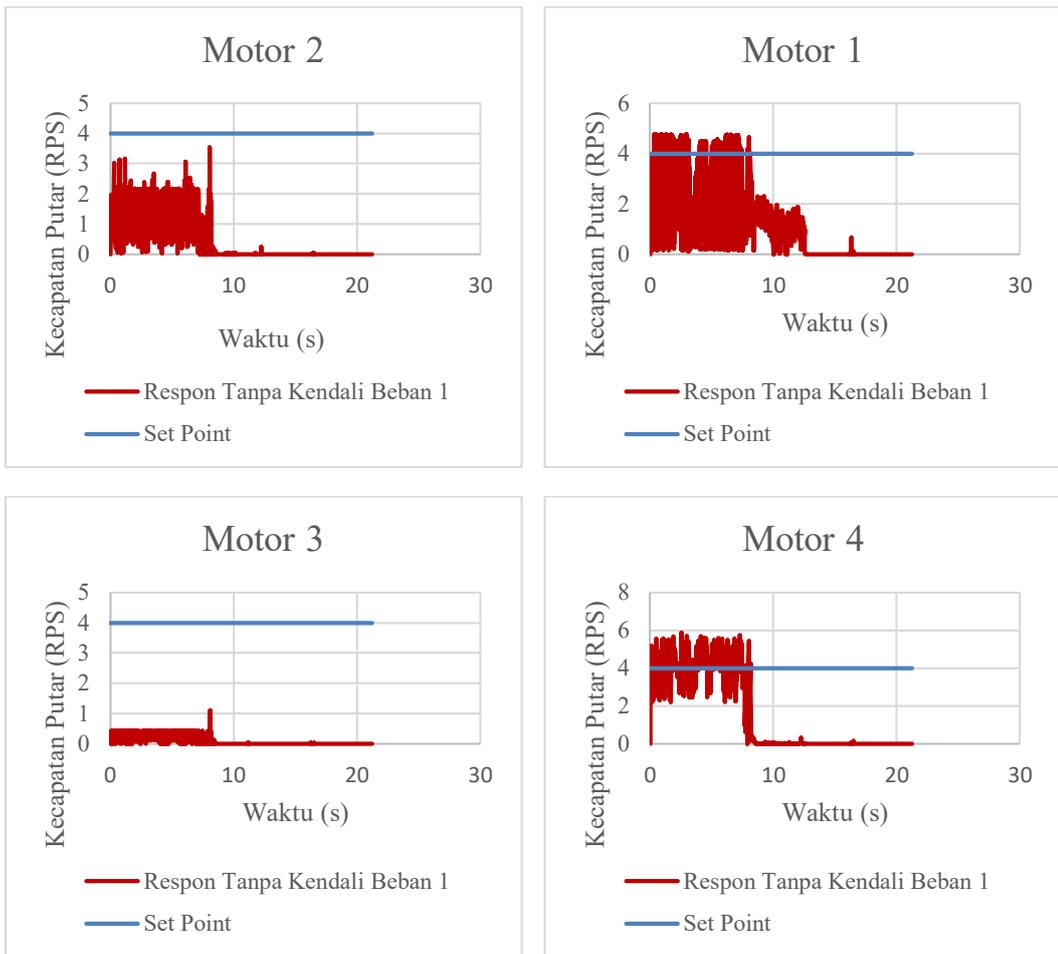
**Tabel 17.** Variasi beban yang digunakan

Variasi Beban	Massa (Gram)	Gaya Berat (N)	Gaya Berat Total (N)
Tanpa Beban	0	0	11,77
Beban 1	104,1	1,041	12,82
Beban 2	207,4	2,074	13,85
Beban 3	332,9	3,329	15,10

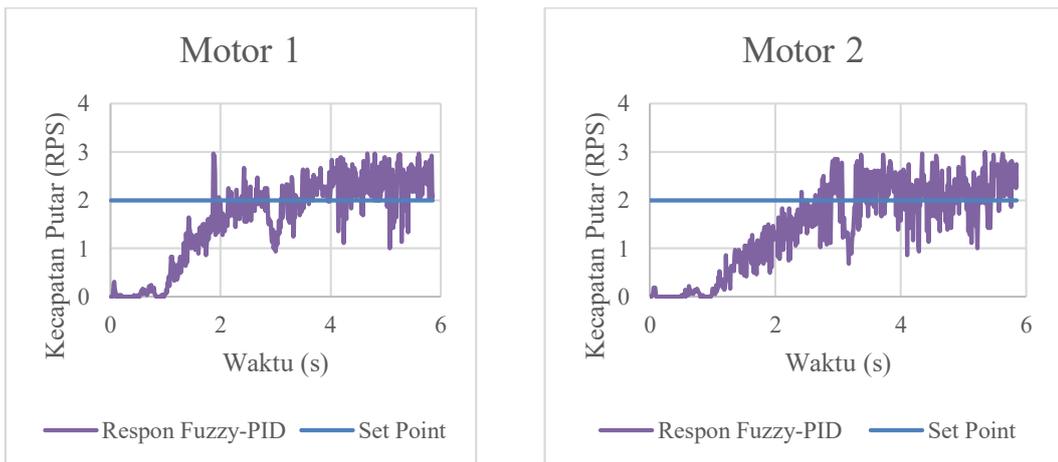
Hasil waktu tempuh disajikan dalam tabel 18, sistem tanpa kendali mulai dari variasi tanpa beban sampai dengan beban 3 tidak merespon untuk melewati lintasan dengan sudut kemiringan  $30^0$ . Hal ini disebabkan karena kecepatan aktuator bernilai 0 saat terbebani dari gangguan variasi kemiringan dan variasi beban. Sistem kendali *fuzzy-PID* memberikan solusi mengatasi gangguan tersebut, menghasilkan waktu tempuh dengan panjang lintasan 6 meter waktu tercepat dengan variasi tanpa beban yaitu 8s, waktu tempuh beban 1 adalah 10s, dan beban 2 adalah 12s. Hubungan gaya berat dengan waktu tempuh ini adalah linier, semakin besar variasi beban yang diterima maka semakin besar waktu tempuh dengan panjang lintasan yang sama.

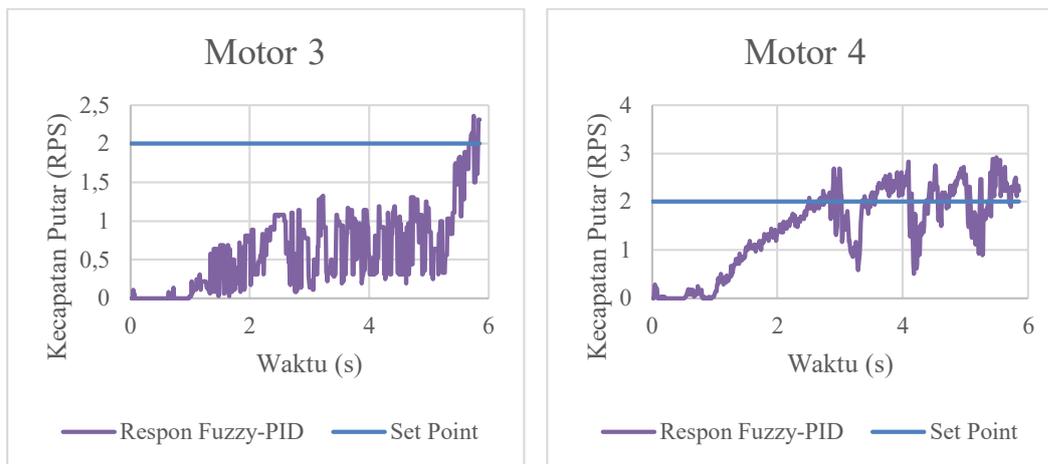
**Tabel 18.** Hasil waktu tempuh melewati tanjakan dengan variasi beban

No.	Gaya Berat Total (N)	Waktu Tempuh (Dengan Kontrol)	Waktu Tempuh (Tanpa Kontrol)	Panjang Lintasan	Set Point
B0.	11,77 N	8,02 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
B1.	12,82 N	10,13 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
B2.	13,85 N	12,04 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
B3.	15,10 N	Tidak Berjalan	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM



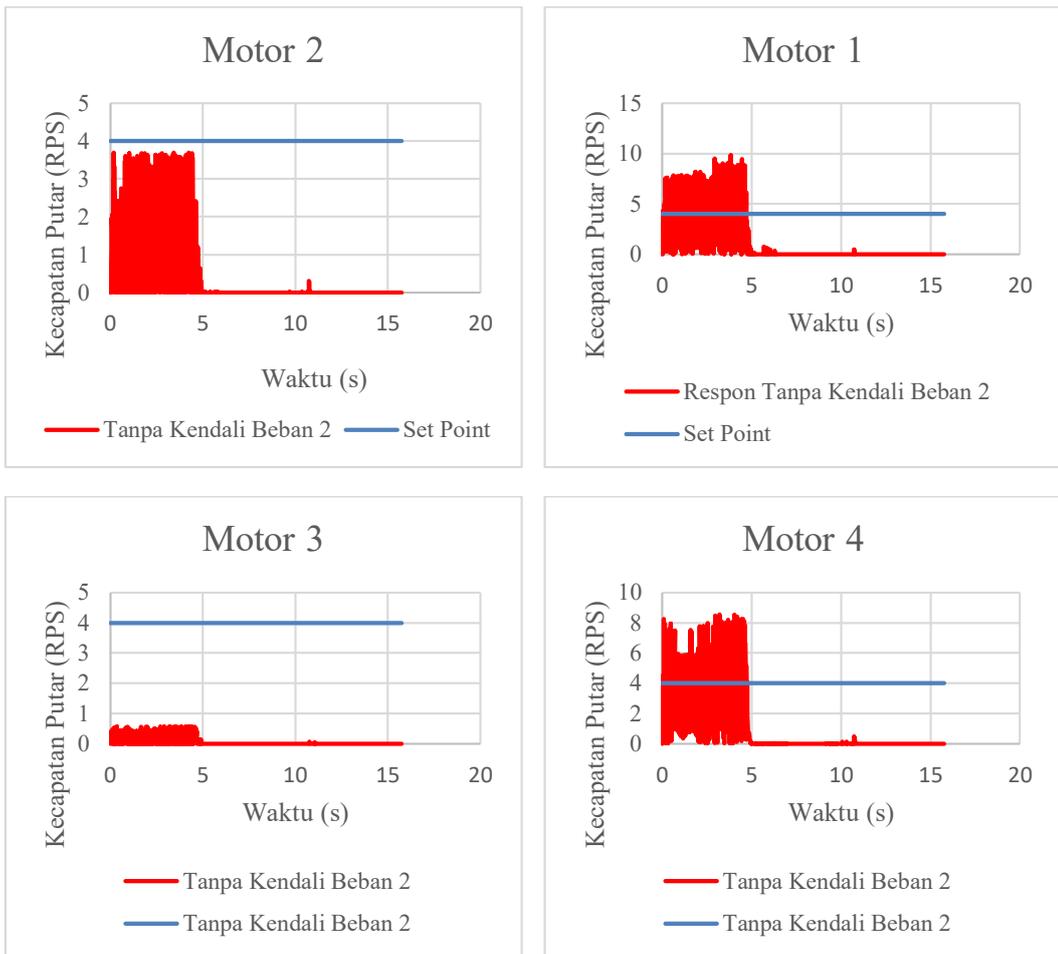
**Gambar 4. 20** Respon tanpa sistem kendali pada variasi beban 1



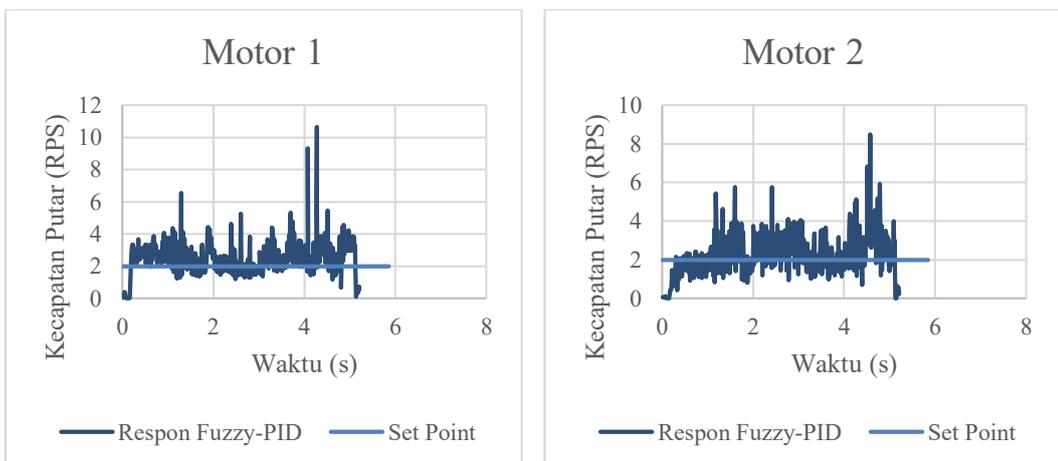


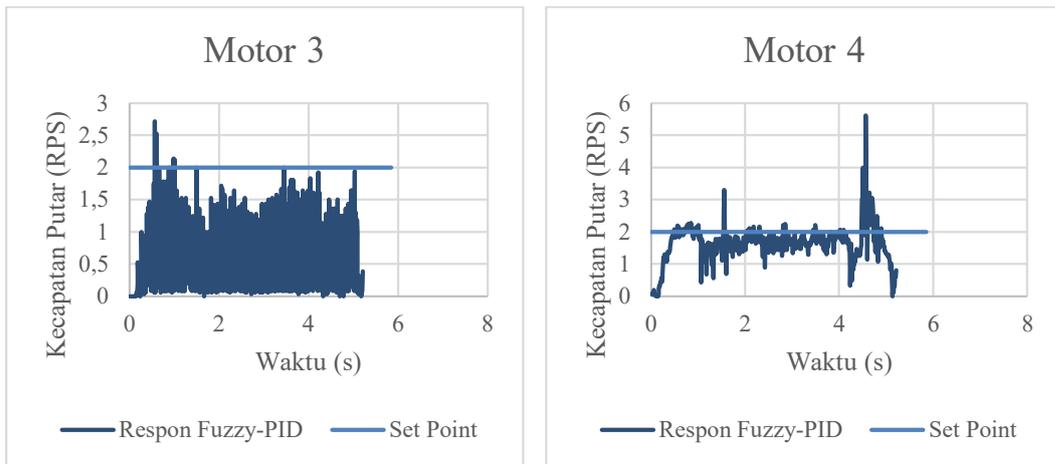
**Gambar 4. 21** Respon sistem pengendalian fuzzy-PID pada variasi beban 1

Gambar 4.20 menunjukkan penerapan perbedaan harga *setpoint* pada sistem tanpa kendali. Perbedaan tersebut adalah pengujian pemberian kecepatan putar yang lebih besar pada sistem tanpa kendali. Hipotesa yang diusulkan bahwa FWMR dapat mengatasi jalan dengan sudut kemiringan  $30^0$  dan variasi beban 1 dengan baik. Maksimum performa motor DC di tunjukan pada saat pengujian variasi beban 3, dengan *setpoint* 2rps/120rpm sampai dengan 6rps/360rpm motor DC tidak mampu mengatasi variasi tanjakan  $30^0$  dan variasi beban 3. Secara fakta dan data, walaupun menggunakan kecepatan putar yang lebih besar, respon sistem jauh lebih baik dan berhasil menggunakan sistem kontrol yang hanya menggunakan *setpoint* 2rps atau 120rpm. Sama halnya dengan pengujian variasi beban lainnya, sehingga metode kendali ini efektif untuk mengatasi gangguan motor listrik pada FWMR yang diakibatkan oleh sudut kemiringan pada lintasan. Gambar 4.20 dan gambar 4.21 juga menunjukkan bahwa respon pada motor 3 berbeda dengan motor 1,2,4. Hal tersebut diakibatkan titik berat FWMR saat jalan tanjakan berada pada motor 3. Kerja maksimal motor dengan variasi gaya berat total 13,849N tidak dapat melewati bidang miring  $30^0$ . Pembuatan FWMR berdasarkan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak dalam penelitian ini berfungsi dengan baik dan handal, terbukti dari penggunaan untuk pengujian berulang-berulang tidak mengalami kerusakan sampai saat ini, sehingga FWMR ini dapat terus dikembangkan dengan mengimplementasikan sistem kontrol modern lainnya.

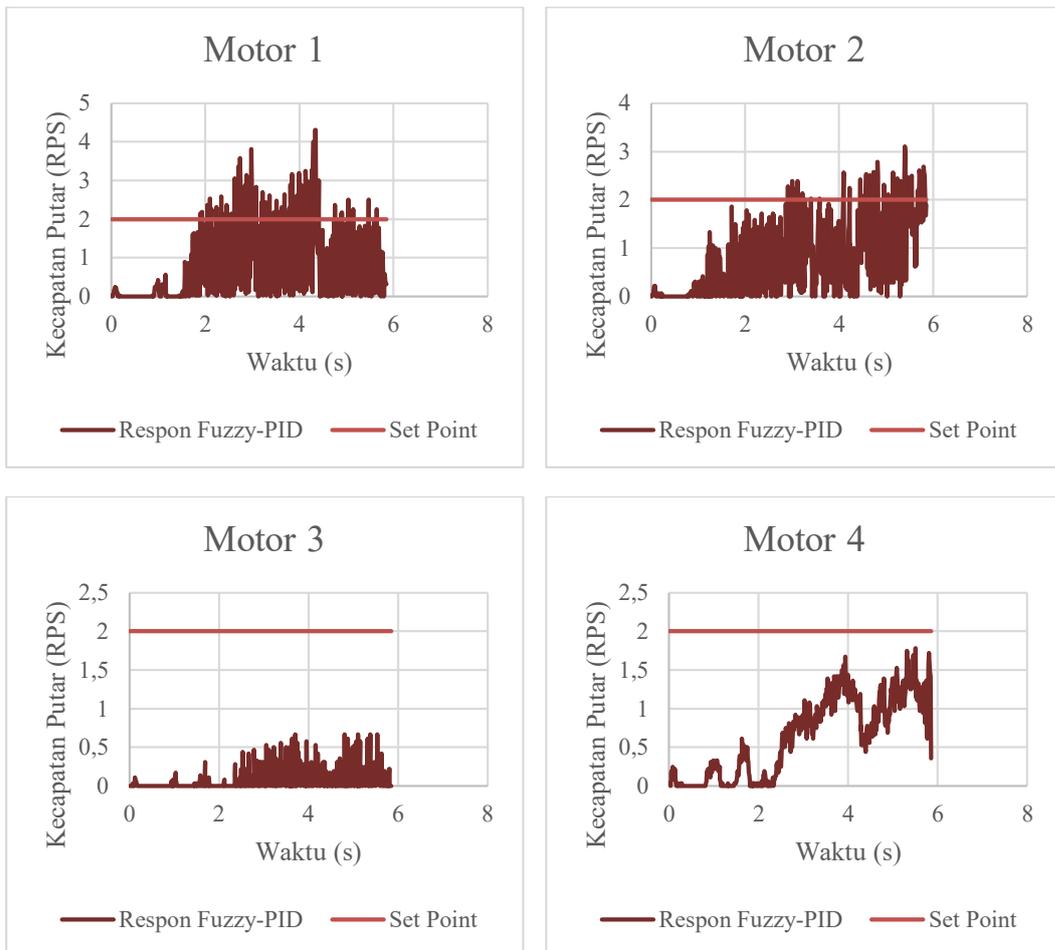


**Gambar 4. 22** Respon tanpa sistem kendali pada variasi beban 2





**Gambar 4. 23** Respon sistem pengendalian fuzzy-PID pada variasi beban 2



**Gambar 4. 24** Respon sistem pengendalian fuzzy-PID pada variasi beban 3

**Tabel 19** Hasil Gabungan Variasi Beban Terhadap Performansi Sistem.

Parameter	Beban 1				Beban 2			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Waktu Tunda (s)	1,41	1,68	2,58	1,49	0,18	0,21	0,27	0,26
Waktu Naik (s)	1,86	2,46	5,67	2,5	0,19	0,3	0,67	0,47
Waktu Puncak (s)	1,87	3,06	5,83	3,00	1,29	1,6	0,57	1,56
Waktu Tunak (s)	1,9	5,44	-	3,33	1,87	2,64	5,71	2,51
Max overshoot (%)	48,5	39	15,5	33,5	228	188,5	36	65,5

Tabel 19 menyajikan hasil performansi respon dari sistem kendali kecepatan putar FWMR dalam variasi permasalahan beban menggunakan metode *fuzzy-PID*. Metode kendali ini mempunyai performansi yang baik, didasarkan pada indeks performansi kontrol yaitu, nilai waktu tunda, waktu naik, waktu puncak, dan waktu tunak yang kecil atau lebih cepat. Seluruh pengujian menunjukkan bahwa kondisi tanggapan sistem pengendalian motor 3 terburuk. Motor 3 pada sebagian besar pengujian terlihat tidak menampilkan respon menuju nilai *setpoint*, tidak laku tersebut diakibatkan dari pusat titik beban saat FWMR menerima gangguan yang disebabkan oleh gaya berat, dan kemiringan berpusat pada Motor 3 Terbukti melalui data pengujian semua variasi kemiringan yang telah ditentukan dengan batasan lintasan rata dan roda menyentuh permukaan lintasan dapat terlewati, hanya beban 3 dengan nilai 15,104N FWMR tidak lagi dapat beroperasi pada sudut kemiringan  $30^0$ .

Tanggapan pengendalian kecepatan putar dengan metode kendali *fuzzy-PID* menunjukkan nilai *overshoot* yang relatif besar lebih dari 25%, dan nilai *error steady state* masih dalam toleransi 5%. Waktu tempuh tercepat dalam melewati lintasan variasi sudut kemiringan terbesar dengan panjang 6m tercatat 8S tanpa ada variasi beban. Waktu tempuh tercepat ketika variasi beban 2 dan variasi sudut kemiringan terbesar adalah 12S. Kualitas baterai juga sangat berpengaruh dalam pengujian *real* FWMR pada berbagai variasi sudut kemiringan atau variasi beban. Kapasitas terbaik baterai adalah 12V, jika kapasitas tegangan berubah turun maka akan menimbulkan efek perbedaan performansi pada setiap motor. Tanggapan performansi sistem kendali *fuzzy-PID* dalam mengatasi gangguan pada variasi beban total yaitu 11,775N dan 12,816N menunjukkan performansi waktu tunak, waktu tunda, waktu naik dan waktu puncak yang relatif cepat.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Pengembangan kendali empat motor DC secara independen untuk aplikasi sebuah *robot* beroda telah sampai pada hasil puncak, dan memperoleh kesimpulan sebagai berikut

- Hasil pengembangan metode kontrol *fuzzy-PID* dengan mengubah metode *defuzzyfikasi* menjadi metode LOM, menghasilkan performansi sistem kontrol yang baik dalam implementasi ke *real plant system*. Metode *fuzzy-PID* yang di implementasikan tepat dalam mengantisipasi permasalahan jalan menanjak dengan waktu tunak cepat dan waktu tempuh < 15S berdasarkan pengujian variasi sudut kemiringan jalan dan variasi beban.
- Pengaruh variasi sudut kemiringan dan variasi beban terhadap respon sistem kontrol kecepatan putar FWMR dengan metode kontrol *fuzzy-PID* memiliki pengaruh performansi terhadap masing-masing motor. Semakin besar sudut kemiringan akan berpengaruh terhadap waktu tunak semakin lama, waktu tempuh semakin lama dan *overshoot* yang semakin besar. Pengaruh variasi beban pada sudut kemiringan  $30^0$ , semakin besar gaya berat (N) yang ditambahkan berpengaruh terhadap nilai *overshoot* yang semakin besar, waktu tempuh yang lebih lama dan waktu tunak lebih cepat.

#### **5.2 Saran**

Penelitian ini dapat lebih ditingkatkan, untuk memberikan hasil yang lebih baik. Berikut merupakan saran yang disampaikan penulis untuk penelitian selanjutnya :

1. Desain mekanik pada FWMR dapat diteliti lebih dalam, terutama pada desain bodi dan pemilihan karet ban untuk mengantisipasi slip pada roda.
2. Sistem kontrol modern lain yang dapat dikembangkan dan di implementasikan, sehingga performansi menjadi lebih baik daripada sistem kontrol pada penelitian ini.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Abadi, I. (2015). Simulasi Pengendalian Level Steam Drum dengan Pengendali PID Berbasis Fuzzy Gain Scheduling, (September).
- Abhinav, R. (2012). An Adaptive , Robust control of DC motor Using Fuzzy-PID controller.
- Aisjah, A. S. (2017). *Pengantar Teknik Pengendalian Otomatis*.
- Aisjah, A. S., Arifin, S., Masroeri, A. A., & Saiko. (2011). Perancangan sistem pengendalian pada kapal berbasis data ais (automatic identification system) untuk menghindari tabrakan di perairan tanjung perak surabaya. *Seminar Nasional Senta 2011*, (January), 1–10.
- amazon-is-now-using-a-whole-lot-more-of-the-robots-from-the-company-it-bought-for-775-million. (n.d.).
- ApS, M. I. R. (2017). *Mobile Industrial Robots ApS - YouTube - YouTube*. youtube. Retrieved from [https://www.youtube.com/channel/UC3MRxsNU6AW\\_hKdExtnGr1Q](https://www.youtube.com/channel/UC3MRxsNU6AW_hKdExtnGr1Q)
- Ardiansyah, & Prasetyawan, A. (2014). *Rancang Bangun Human Machine Interface (HMI) Modul Training Kit Pneumatik Menggunakan PLC (Programmable Logic Controler) Dan Wonderware in Touch Sebagai Media Pembelajaran Pneumatik Yang Interaktif pada Dunia Training untuk Industri*.
- Azlan, M. F. I. Bin. (2009). System Identification and Estimation of a Hot Air Blower System Using Parametric Method. *Universiti Teknologi Malaysia*.
- Bayoume, M. O., El-geliel, M. A. B. D., & Rezeka, S. F. (2016). Supervisory Position Control for Wheeled Mobile Robot. *2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 228–233.
- Binugroho, E. H., Pratama, D., Syahputra, A. Z. R., & Pramadihanto, D. (2016). Control for balancing line follower robot using discrete cascaded PID algorithm on ADROIT V1 education robot. *Proceedings - 2015 International Electronics Symposium: Emerging Technology in Electronic and Information, IES 2015*, 245–250. <https://doi.org/10.1109/ELECSYM.2015.7380849>
- Castillo, O., & Melin, P. (2008). *Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications*. (J. Kacprzyk, Ed.), *Springer*. Berlin: Springer.
- Chen, Z., Hu, X., Li, Y., & Zhang, Z. (2017). Speed Control System Design of Automatic Parking Based on Fuzzy-PID Control, (July), 989–993.
- Chu, C., Wang, Y., & Liang, H. (2016). SISO PID-Fuzzy Controller for BLDC Motor Speed Control base on Low Cost MSP430 Solution 1 1, 2–3.
- Ding, L., Li, S., Liu, Y., Gao, H., Chen, C., & Deng, Z. (2017). Adaptive Neural Network-Based Tracking Control for Full-State Constrained Wheeled Mobile Robotic System, *47(8)*, 2410–2419.
- Dutta, A., & Dasgupta, P. (2017). Ensemble Learning With Weak Classifiers for Fast and Reliable Unknown Terrain Classification Using Mobile Robots. *IEEE Explore*, *47(11)*, 2933–2944.
- Erc, I. S. T. (2016). AdRoiT V1 (pp. 0–41).
- Fan, Z., Qiu, Q., & Meng, Z. (2017). Implementation of a Four-Wheel Drive Agricultural Mobile Robot for Crop / Soil Information Collection on the Open Field, 408–412.

- Filatov, D. M., Serykh, E. V, Kopichev, M. M., & Weinmeister, A. V. (2016). Autonomous Parking Control System of Four- Wheeled Vehicle, 102–107.
- Guodong, Y., Ruifeng, W., & Ning, Z. (2017). Coordination Control for Formation and Lateral Stability under Constant Speed of Four-wheel Independently Driving Electric Vehicles, *0(1)*, 9566–9571.
- Hashemi, E., Ghaffari, M., & Ghaffari, N. (2011). Model-based PI – fuzzy control of four-wheeled omni-directional mobile robots a b. *Robotics and Autonomous Systems*, *59(11)*, 930–942. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.07.002>
- Hibban, H., Pramudijanto, J., & Gamayanti, N. (2015). Desain Kontroler Fuzzy PID Gain Scheduling Untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC Tanpa Sikat, *4(2)*, 2–5.
- Huynh Xuan. (2016). (68) Pinterest. Retrieved from <https://www.pinterest.co.uk/pin/434386326541088797/>
- Iagnemma, K., & Dubowsky, S. (2011). Two-Wheel Self-Balancing of a Four-Wheeled Vehicle, (APRIL), 29–37.
- Jahaya, J., Nawawi, S. W., & Ibrahim, Z. (2011). Multi Input Single Output Closed Loop Identification of Two Wheel Inverted Pendulum Mobile Robot. *2011 IEEE Student Conference on Research and Development*, 138–143.
- Jayasree, K. R., Jayasree, P. R., & Vivek, A. (2017). Dynamic target tracking using a four wheeled mobile robot with optimal path planning technique.
- Kim, I. H., Yook, J. H., & Son, Y. I. (2017). Robust predictor-based DC motor speed control under uncertain time delay. *Electronics Letters*, *53(14)*, 914–916. <https://doi.org/10.1049/el.2017.1301>
- Kutaiba, S., & Wajdi, A. (2016). Mobility Performance Analysis of Mobile Robot Wheels, (August). <https://doi.org/10.19026/rjaset.12.2848>
- Kwak, Y., Ahn, J.-W., & Lee, D.-H. (2014). An high performance direct torque control method with PWM approach of PMSMs. *2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 61–66. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2014.6894973>
- Larminie, J., & Lowry, J. (2003). *Electric Vehicle Technology Explained*. West Sussex, England ; Hoboken, N.J. : J. Wiley,.
- Lee, M., Lee, K., Hwang, K., & Suh, I. S. (2014). Development of a foldable micro electric vehicle for future urban driving with intelligent control. *2014 17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2014*, 2486–2491. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6958088>
- Lin, S., & Wang, G. (2017). Fuzzy PID control algorithm based on PSO and application in BLDC motor. *IOPScience*, *012186*.
- Ma, Y., Zhang, K., Gu, J., Li, J., & Lu, D. (2009). Design of the control system for a four-wheel driven micro electric vehicle. *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09*, 1813–1816. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289671>
- Martinez, J. S., Hissel, D., & Péra, M.-C. (2012). Type-2 fuzzy logic control of a DC/DC buck converter. *Power Plants and Power Systems Control*, 103–108. <https://doi.org/10.3182/20120902-4-FR-2032.00020>
- Masood, M. U., Sami, M. A., Sohail, H., Siddique, M. A., Akram, H., Rashid, N., ... Iqbal, J. (2017). Design and Development of a Semi-Autonomous Stair Climbing Robotic Platform For Rough Terrains. *17th International*

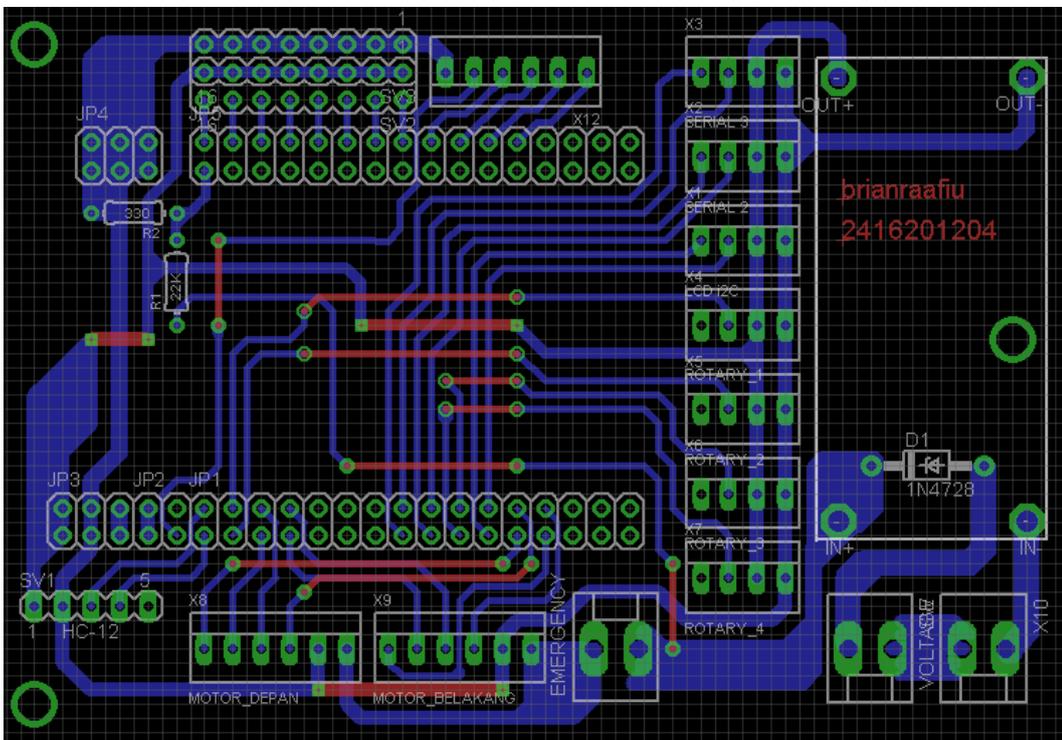
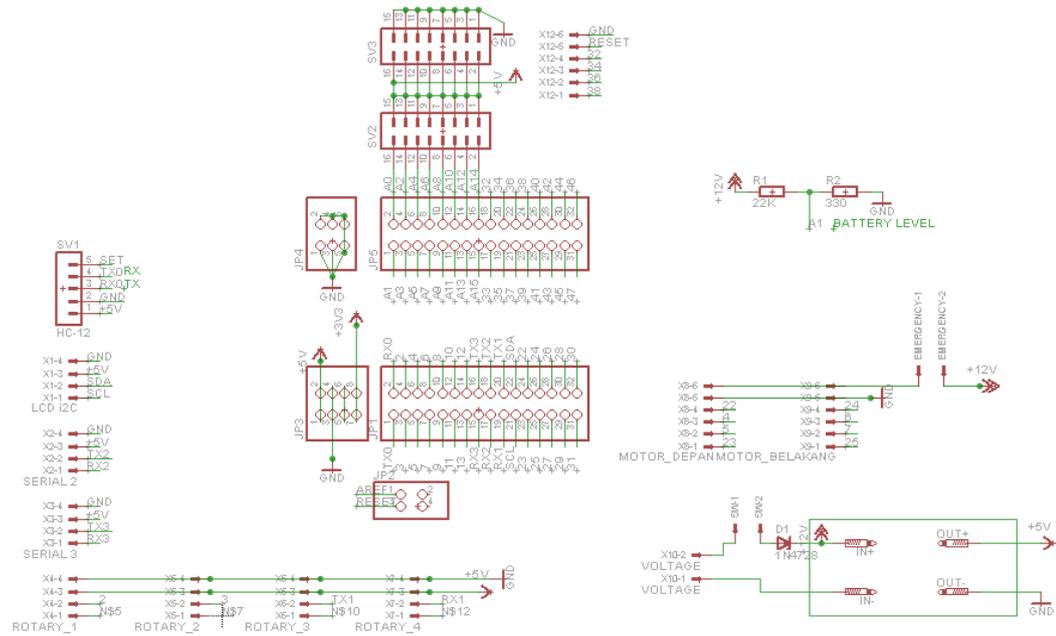
- Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2017)*, (Iccas), 212–217.
- Meshram, P. ., & Kanojiya, R. G. (2012). Tuning of PID Controller using Ziegler-Nichols Method for Speed Control of DC Motor, 117–122.
- Muhyiddin Bin Yusof, A. (2013). *A Comparative Study of Conventional PID And Fuzzy-PID For DC Motor Speed Control*.
- Musyafa', A., & Al., E. (2010). Pitch Angle Control of Variable Low Rated Speed Wind Turbine Using Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Engineering & Technology*, 1(05), 1–4.
- Musyafa, A., & Ibrohim, M. (2013). Development of Buck Converter Based Fuzzy Logic Control in Small Scale Wind Turbine System Implemented in East-Java. *Asian Journal of Natural & Applied Sciences*, 2(4), 46–55.
- Pan, S., & Zhou, H. (2017). An Adaptive Fuzzy PID Control Strategy for Vehicle Yaw Stability, 642–646.
- Phuong Nam, D., Manh Hung, N., Trung Ty, N., Van Hau, P., & Thanh Long, N. (2017). A Cascade Controller for Tracking and Stabilization of Wheeled Mobile Robotic Systems, 6–9.
- Raafiu, B. (2017a). *Optimasi Berbasis Metode Pemograman Newton dan Genetic Algorithm (GA) untuk Design Permanent Magnet DC Motor*.
- Raafiu, B. (2017b). *Sistem Pengendali Otomatik Lanjut*.
- Robandi, I., & Kharisma, B. (2009). Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Based Power System Stabilizer. *Proceedings of World Academy of Science, ...*, 3(10), 593–600.
- Rojas, M., Ponce, P., & Molina, A. (2014). Novel Fuzzy Logic Controller based on Time Delay Inputs for a Conventional Electric Wheelchair. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 35(2), 125–142.
- Roozegar, M., & Mahjoob, M. J. (2016). Modelling and control of a non-holonomic pendulum-driven spherical robot moving on an inclined plane : simulation and experimental results. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2016.0964>
- Saeed, B. I., & Mehrdadi, B. (2012). Design of an iterative auto-tuning algorithm for a fuzzy PID controller. *Journal of Physics: Conference Series*, 364, 012052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/364/1/012052>
- Saputra, roni P., Ardiansyah, R. A., Mirdanies, M., Santoso, A., Nugraha, A. S., Muqorobin, A., ... Rijanto, E. (2011). Perancangan Dan Pengujian Awal Kendali Motor DC Brushless untuk Independent 4-Wheel Drive Platform Robot Rev -11. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 02(2), 85–94.
- Sato, K., Horie, T., & Ishiwaka, K. (2017). Experimental Evaluations of Robust Adaptive Trajectory Control for Two Wheel Mobile Robot.
- Sharma, K., & Palwalia, D. K. (2017). A modified PID control with adaptive fuzzy controller applied to DC motor, (1).
- Silva, L. I., Magall, G. A., Angelo, C. H. De, & Garcia, G. O. (2006). Vehicle Dynamics Using Multi-Bond Graphs : Four Wheel Electric Vehicle Modeling.
- Sutikno. (2011). Perbandingan Metode Defuzzifikasi Aturan Mamdani Pada Sistem Kendali Logika Fuzzy ( Studi Kasus Pada Pengaturan Kecepatan Motor DC ). *Elektro, Jurusan Teknik Teknik, Fakultas Semarang, Universitas Diponegoro*, 1–10.

- Visual, S. (2017). Visual Studio IDE, Code Editor, VSTS, & Mobile Center. Retrieved October 27, 2017, from <https://www.visualstudio.com/>
- Wang, N., Lv, S., Er, M. J., & Chen, W.-H. (2017). Fast and Accurate Trajectory Tracking Control of an Autonomous Surface Vehicle with Unmodelled Dynamics and Disturbances. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1(3), 1–1. <https://doi.org/10.1109/TIV.2017.2657379>
- Weihua, H., Ping, S., & Haiyan, L. (2016). Design and Realization of a Four-wheeled Robot Based on Fuzzy Variable Universe Control, 3761–3765.
- Xu, J., Guo, Z., & Lee, T. H. (2013). Design and Implementation of a Takagi – Sugeno-Type Fuzzy Logic Controller on a Two-Wheeled Mobile Robot, 60(12), 5717–5728.
- Youcar. (2013). ► *Audi's automated driving for parking - YouTube*. youtube. Retrieved from [https://www.youtube.com/watch?v=b\\_m8DqTIOLE](https://www.youtube.com/watch?v=b_m8DqTIOLE)
- Zhao, Z. Y., Tomizuka, M., & Isaka, S. (1993). Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(5), 1392–1398. <https://doi.org/10.1109/21.260670>
- Zhu, X., Qiu, C., Guo, L., & Zhang, Y. (2011). New Method for Slip and Tire Force Estimation of Wheeled Mobile Robot on Inclined Terrain, 2264–2269.

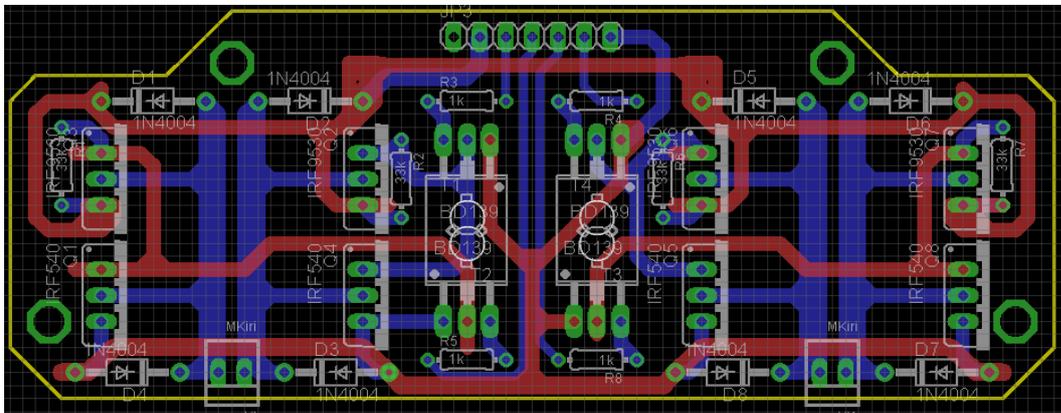
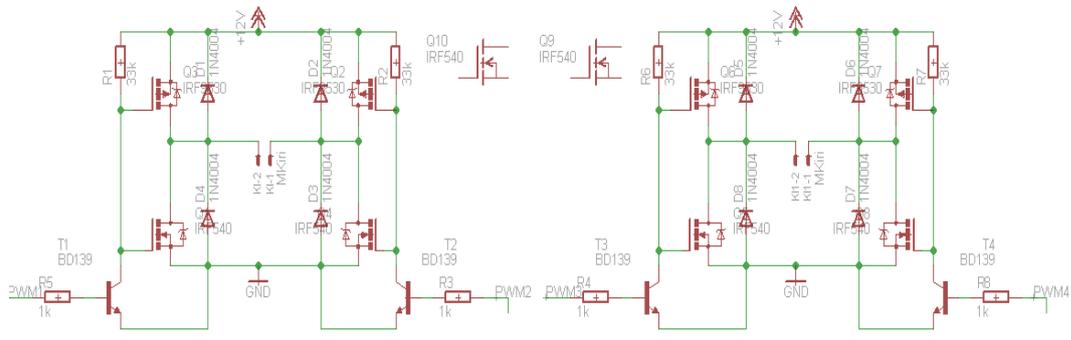
# LAMPIRAN

## Desain Perangkat Keras Elektronik

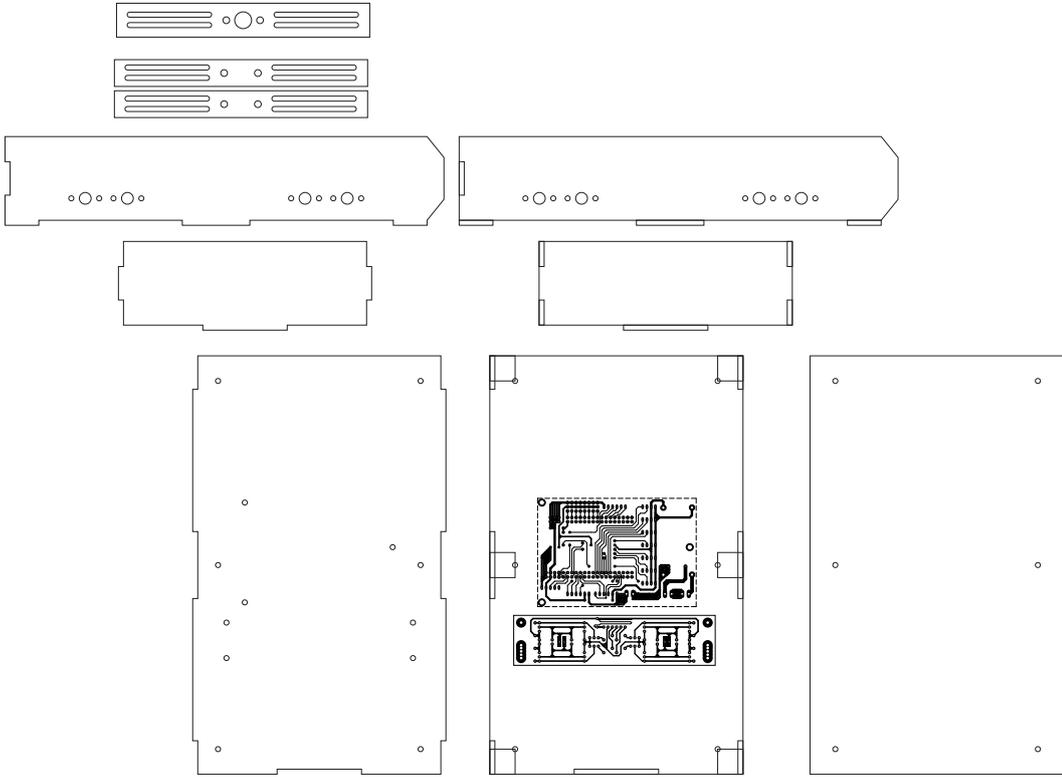
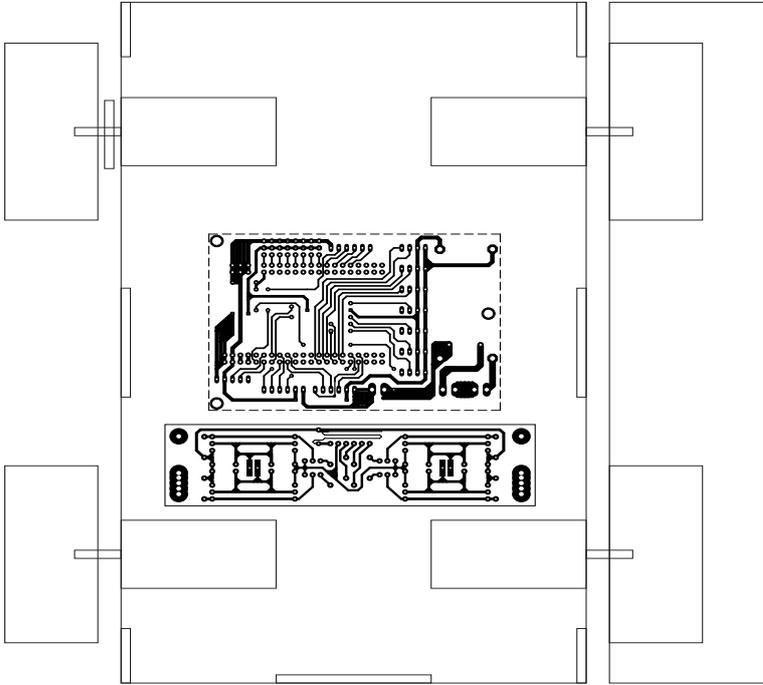
### Skematik dan *Board Main Controller Unit*



## Skematik dan Board Driver Motor Unit



**LAMPIRAN**  
**Desain Perangkat Keras Bodi**



***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## LAMPIRAN

### *Source Code* Proses Identifikasi Sistem ARX dan ARMAX

#### Program Proses Identifikasi Menggunakan Struktur ARX

```
clear all;
% Loading data input dan output;
in_vc_1;           % nama file input (data estimasi)
out_ir_1;         % nama file output (data estimasi)
interval = (1:116); % panjang data yang digunakan

% Penentuan Input-Output
u11 = input_vc_1(interval,1); % input 1 PWM
u12 = input_vc_1(interval,2); % input 2 arus
y11 = output_ir_1(interval,1); % output RPM

% Remove Mean / Preprocessing
det_u11 = detrend (u11);
det_u12 = detrend (u12);
det_y11 = detrend (y11);

% Normalisasi data
nor_u11 = det_u11;
nor_u12 = 0.005*(det_u12);
nor_y11 = 0.0005*(det_y11);

% Pembuatan iddata
% u11, u12, sebagai input dan y11 sebagai output
data = iddata([nor_y11],[nor_u11,nor_u12]); % Objek Iddata, dengan
nama variabel adalah data
data.InputName = {'PWM';'Arus'}; % Nama data input
data.OutputName = {'RPM'}; % Nama data output

%Pemilihan data validasi dan estimasi
n_total = numel (u11); % Jumlah data total
n_estimasi = 61; % Jumlah data estimasi
n_validasi = n_total - n_estimasi; % Jumlah data validasi

%Penentuan nilai prediksi ke depan
prediction_horizon = 1;
Hp = prediction_horizon;

%Pemilihan orde terbaik
%NN=struc(1:10,1:10,[1 10],0,0);
%parameterARX=selstruc(arxstruc(data(1:n_estimasi,,:),:),data(1+n_es
timasi:n_total,,:),:),NN));
%Penentuan orde polinomial ARX
na1 = [1]; nb1 = [1 1]; nk1 = [0 0];
na2 = [2]; nb2 = [2 2]; nk2 = [0 0];
na3 = [3]; nb3 = [3 3]; nk3 = [0 0];
na4 = [4]; nb4 = [4 4]; nk4 = [0 0];
na5 = [5]; nb5 = [5 5]; nk5 = [0 0];
na6 = [6]; nb6 = [6 6]; nk6 = [0 0];
```

```

na7 = [7]; nb7 = [7 7]; nk7 = [0 0];
na8 = [8]; nb8 = [8 8]; nk8 = [0 0];
na9 = [9]; nb9 = [9 9]; nk9 = [0 0];
na10 = [10]; nb10 = [10 10]; nk10 = [0 0];

%Simulasi ARX
marx_a=arx(data(1:n_estimasi, :, :), [na1 nb1 nk1]);
marx_b=arx(data(1:n_estimasi, :, :), [na2 nb2 nk2]);
marx_c=arx(data(1:n_estimasi, :, :), [na3 nb3 nk3]);
marx_d=arx(data(1:n_estimasi, :, :), [na4 nb4 nk4]);
marx_e=arx(data(1:n_estimasi, :, :), [na5 nb5 nk5]);
marx_f=arx(data(1:n_estimasi, :, :), [na6 nb6 nk6]);
marx_g=arx(data(1:n_estimasi, :, :), [na7 nb7 nk7]);
marx_h=arx(data(1:n_estimasi, :, :), [na8 nb8 nk8]);
marx_i=arx(data(1:n_estimasi, :, :), [na9 nb9 nk9]);
marx_j=arx(data(1:n_estimasi, :, :), [na10 nb10 nk10]);

%Perbandingan model dengan data asli, menggunakan data validasi
compare(data(1+n_estimasi:n_total, :, :),marx_a,marx_b,marx_c,marx_d,
,marx_e,marx_f,marx_g,marx_h,marx_i,marx_j);

marx_a
marx_b
marx_c
marx_d
marx_e
marx_f
marx_g
marx_h
marx_i
marx_j

```

## Program Proses Identifikasi Menggunakan Struktur ARMAX

```

clear all;
% Loading data input dan output;
in_vc_1; % nama file input (data estimasi)
out_ir_1; % nama file output (data estimasi)
interval = (1:116); % panjang data yang digunakan

% Penentuan Input-Output
u11 = input_vc_1(interval,1); % input 1 PWM
u12 = input_vc_1(interval,2); % input 2 arus
y11 = output_ir_1(interval,1); % output RPM

% Remove Mean / Preprocessing
det_u11 = detrend (u11);
det_u12 = detrend (u12);
det_y11 = detrend (y11);

% Normalisasi data
nor_u11 = det_u11;
nor_u12 = 0.005*(det_u12);
nor_y11 = 0.0005*(det_y11);
% Pembuatan iddata
% u11, u12, sebagai input dan y11 sebagai output

```

```

data = iddata([nor_y11],[nor_u11,nor_u12]); % Objek Iddata, dengan
nama variabel adalah data
data.InputName = {'PWM';'Arus'}; % Nama data input
data.OutputName = {'RPM'}; % Nama data output

%Pemilihan data validasi dan estimasi
n_total = numel (u11); % Jumlah data total
n_estimasi = 61; % Jumlah data estimasi
n_validasi = n_total - n_estimasi; % Jumlah data validasi

%Penentuan nilai prediksi ke depan
prediction_horizon = 1;
Hp = prediction_horizon;

%memilih orde terbaik
%NN=struc(1:10,1:10,[1 10],0,0);
%parameterARMAX=selstruc(armaxstruc(data(1:n_estimasi,::),data(1+
n_estimasi:n_total,::),NN));
%Penentuan orde polinomial ARMAX
na1 = [1]; nb1 = [1 1]; nc1 =[1]; nk1 = [0 0];
na2 = [2]; nb2 = [2 2]; nc2 =[2]; nk2 = [0 0];
na3 = [3]; nb3 = [3 3]; nc3 =[3]; nk3 = [0 0];
na4 = [4]; nb4 = [4 4]; nc4 =[4]; nk4 = [0 0];
na5 = [5]; nb5 = [5 5]; nc5 =[5]; nk5 = [0 0];
na6 = [6]; nb6 = [6 6]; nc6 =[6]; nk6 = [0 0];
na7 = [7]; nb7 = [7 7]; nc7 =[7]; nk7 = [0 0];
na8 = [8]; nb8 = [8 8]; nc8 =[8]; nk8 = [0 0];
na9 = [9]; nb9 = [9 9]; nc9 =[9]; nk9 = [0 0];
na10 = [10]; nb10 = [10 10]; nc10 =[10]; nk10 = [0 0];

%Simulasi ARMAX
marmax_a=armax(data(1:n_estimasi,::),[na1 nb1 nc1 nk1]);
marmax_b=armax(data(1:n_estimasi,::),[na2 nb2 nc2 nk2]);
marmax_c=armax(data(1:n_estimasi,::),[na3 nb3 nc3 nk3]);
marmax_d=armax(data(1:n_estimasi,::),[na4 nb4 nc4 nk4]);
marmax_e=armax(data(1:n_estimasi,::),[na5 nb5 nc5 nk5]);
marmax_f=armax(data(1:n_estimasi,::),[na6 nb6 nc6 nk6]);
marmax_g=armax(data(1:n_estimasi,::),[na7 nb7 nc7 nk7]);
marmax_h=armax(data(1:n_estimasi,::),[na8 nb8 nc8 nk8]);
marmax_i=armax(data(1:n_estimasi,::),[na9 nb9 nc9 nk9]);
marmax_j=armax(data(1:n_estimasi,::),[na10 nb10 nc10 nk10]);

%Perbandingan model dengan data asli, menggunakan data validasi
compare(data(1+n_estimasi:n_total,::),marmax_a,marmax_b,marmax_c,
marmax_d,marmax_e,marmax_f,marmax_g,marmax_h,marmax_i,marmax_j);

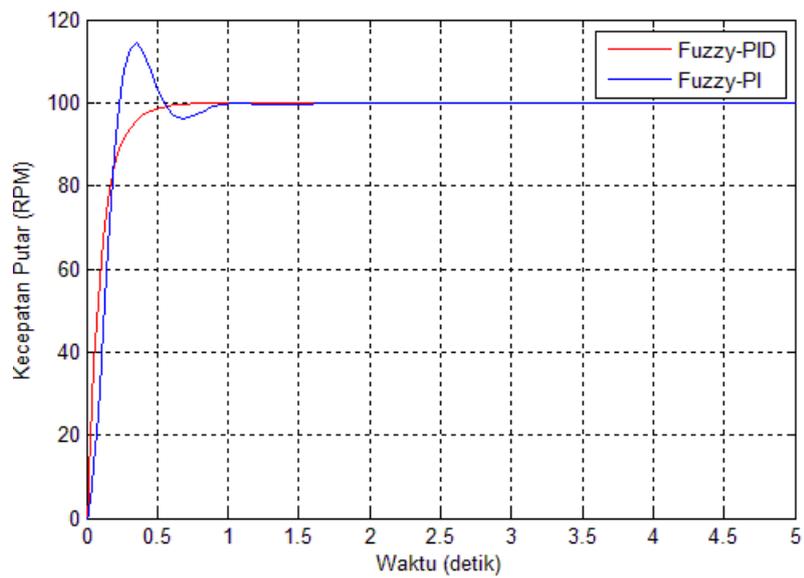
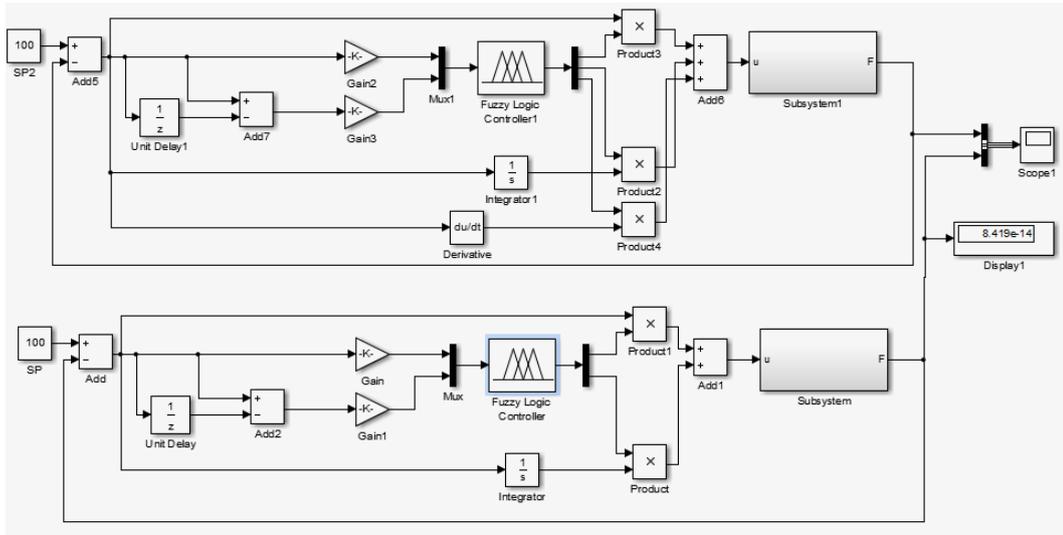
marmax_a
marmax_b
marmax_c
marmax_d
marmax_e
marmax_f
marmax_g
marmax_h
marmax_i
marmax_j

```

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# LAMPIRAN

## *Simulink Matlab Simulasi Perbandingan Metode Kontrol Fuzzy-PID dengan Fuzzy-PI*



***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## LAMPIRAN

### Variasi Sudut Kemiringan

#### Sudut Kemiringan Jalan 5<sup>0</sup>

Pengujian Ke-	Waktu Tempuh (Dengan Kontrol)	Waktu Tempuh (Tanpa Kontrol)	Panjang Lintasan	Set Point
1.	3,00 Detik	4,00 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM
2.	3,00 Detik	4,00 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM
3.	3,12 Detik	4,00 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM
4.	3,00 Detik	4,20 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM
5.	3,10 Detik	4,00 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM

#### Sudut Kemiringan Jalan 10<sup>0</sup>

Pengujian Ke-	Waktu Tempuh (Dengan Kontrol)	Waktu Tempuh (Tanpa Kontrol)	Panjang Lintasan	Set Point
1.	4,00 Detik	6,13 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM
2.	4,00 Detik	6,15 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM
3.	4,12 Detik	6,15 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM
4.	4,00 Detik	6,14 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM
5.	4,10 Detik	6,14 Detik	2 meter	1RPS/60 RPM

#### Sudut Kemiringan Jalan 20<sup>0</sup>

Pengujian Ke-	Waktu Tempuh (Dengan Kontrol)	Waktu Tempuh (Tanpa Kontrol)	Panjang Lintasan	Set Point
1.	6,14 Detik	Tidak Berjalan	2 meter	1RPS/60 RPM
2.	6,13 Detik	Tidak Berjalan	2 meter	1RPS/60 RPM
3.	6,14 Detik	Tidak Berjalan	2 meter	1RPS/60 RPM
4.	6,10 Detik	Tidak Berjalan	2 meter	1RPS/60 RPM
5.	6,10 Detik	Tidak Berjalan	2 meter	1RPS/60 RPM

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN

### Variasi Beban Pada Kemiringan 30<sup>0</sup>

#### Variasi Beban 11,77 N Sudut Kemiringan Jalan 30<sup>0</sup>

Pengujian B0 Ke-	Waktu Tempuh (Dengan Kontrol)	Waktu Tempuh (Tanpa Kontrol)	Panjang Lintasan	Set Point
1.	8,00 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
2.	8,00 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
3.	8,10 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
4.	8,00 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
5.	8,00 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM

#### Variasi Beban 12,82 N Sudut Kemiringan Jalan 30<sup>0</sup>

Pengujian B1 Ke-	Waktu Tempuh (Dengan Kontrol)	Waktu Tempuh (Tanpa Kontrol)	Panjang Lintasan	Set Point
1.	10,11 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
2.	10,12 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
3.	10,10 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
4.	10,20 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
5.	10,15 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM

#### Variasi Beban 13,85 N Sudut Kemiringan Jalan 30<sup>0</sup>

Pengujian B2 Ke-	Waktu Tempuh (Dengan Kontrol)	Waktu Tempuh (Tanpa Kontrol)	Panjang Lintasan	Set Point
1.	12,00 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
2.	12,00 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
3.	12,10 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
4.	12,10 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
5.	12,00 Detik	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM

### **Variasi Beban 15,10 N Sudut Kemiringan Jalan 30<sup>0</sup>**

Pengujian B3 Ke-	Waktu Tempuh (Dengan Kontrol)	Waktu Tempuh (Tanpa Kontrol)	Panjang Lintasan	Set Point
1.	Tidak Berjalan	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
2.	Tidak Berjalan	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
3.	Tidak Berjalan	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
4.	Tidak Berjalan	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM
5.	Tidak Berjalan	Tidak Berjalan	6 meter	2RPS/120RPM

## LAMPIRAN

### Biodata Peneliti

- a. Nama Lengkap : **Brian Raafiu**  
b. Jenis Kelamin : Laki-laki  
c. Tempat Tanggal Lahir : Banyuwangi, 26 Maret 1994  
d. NRP : 02311650012004  
e. Program Studi : S2 Teknik Fisika  
f. Bidang Keahlian : Rekayasa Instrumentasi Industri  
g. Fakultas/Departemen : Fakultas Teknologi Industri/Teknik Fisika  
h. Alamat Rumah dan No. Telp : Perumahan Kebalenan Baru 1 B 28. BWI (087759520066)  
i. E-mail : [brianvani1@gmail.com](mailto:brianvani1@gmail.com)  
j. Riwayat Pendidikan :
  - SD Muhammadiyah 1 Banyuwangi
  - SMP 2 Banyuwangi
  - SMAN 1 GIRI (IPA)
  - Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (D4 Teknik Otomasi)
  - Institut Teknologi Sepuluh Nopember (S2 Teknik Fisika-Instrumentasi)  
k. Publikasi:
  - “Smart Monitoring of Solar Panel System in Saving of the Electrical Power with Internet of Things,” in *The 8th Annual Basic Science Internatioanal Conference*, 2018.
  - “Speed Control of Single Phase AC Motor on Cocoa Beans Fermentation Process Using PID Controller,” in *The 8th Annual Basic Science Internatioanal Conference*, 2018.
  - “Identification of Four Wheel Mobile Robot based on Parametric Modelling” in ISITIA 2018, *IEEE Explore*, 2018.  
l. Riwayat Pelatihan dan Pengabdian:
  - *Intermediate PLC Engineering*
  - Pelatihan Aplikasi Smart Home
  - *Smart Trash ( Robot Tempat Sampah )*  
m. Tugas Akhir
  1. Tugas Akhir
    - “Pengembangan Sistem SCADA *Android* pada PLC *Type Compact* untuk Aplikasi Pintu Air Otomatis
  2. Tesis
    - Implementasi *Fuzzy PID* untuk Kendali *Four-Wheeled Mobile Robot* : Studi Kasus Pada Jalan Tanjakan.

Surabaya, 2 Juli 2018

**Brian Raafiu, S.ST., M.T.**