

**PEMODELAN *MOBILE ROBOT* BERPENGGERAK
DIFFERENSIAL MENGGUNAKAN METODE KENDALI
LOGIKA *FUZZY-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer**



OLEH :

FEBRINA SETIANINGSIH

09011181419021

**JURUSAN SISTEM KOMPUTER
FAKULTAS ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

2018

**PEMODELAN *MOBILE ROBOT* BERPENGGERAK
DIFFERENSIAL MENGGUNAKAN METODE KENDALI
LOGIKA *FUZZY-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer**



OLEH :

FEBRINA SETIANINGSIH

09011181419021

**JURUSAN SISTEM KOMPUTER
FAKULTAS ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

2018

HALAMAN PENGESAHAN

**PEMODELAN *MOBILE ROBOT* BERPENGERAK
DIFFERENSIAL MENGGUNAKAN METODE KENDALI
LOGIKA *FUZZY-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer**

Oleh :

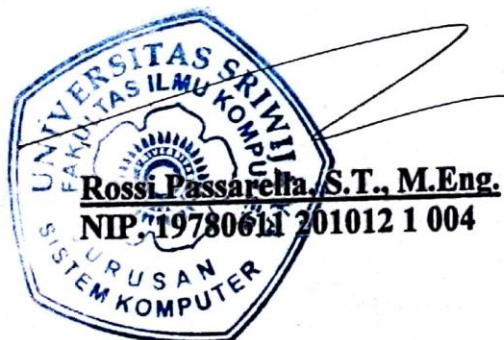
FEBRINA SETIANINGSIH

09011181419021

Indralaya, 26 Mei 2018

Mengetahui,

Ketua Jurusan Sistem Komputer



Pembimbing Tugas Akhir

Prof. Dr. Ir. Siti Nurmaini, M.T.
NIP. 19690802 199401 2 001

HALAMAN PERSETUJUAN

Telah diuji dan lulus pada :

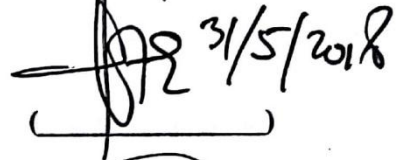
Hari : Sabtu
Tanggal : 26 Mei 2018

Tim Penguji :

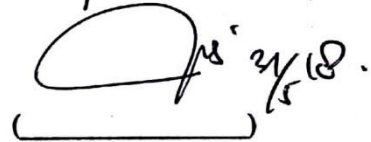
1. Ketua : Prof. Dr. Ir. Siti Nurmaini, M.T.



2. Anggota I : Ir. Bambang Tutuko, M.T.



3. Anggota II : Kemahyanto Exaudi, M.T.



Mengetahui,
Ketua Jurusan Sistem Komputer



Roski Passarella, S.T., M.Eng.

NIP. 19780611 201012 1 004

HALAMAN PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Febrina Setianingsih

NIM : 09011181419021

Judul : *Pemodelan Mobile Robot Berpenggerak Differensial Menggunakan Metode Logika Fuzzy-Particle Swarm Optimization*

Hasil Pengecekan Software iThenticate/Turnitin : 2 %

Menyatakan bahwa laporan tugas akhir saya merupakan hasil karya sendiri dan bukan hasil penjiplakan / plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan / plagiat dalam laporan tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tidak dipaksakan.



Indralaya, 27 April 2018



Febrina Setianingsih
NIM. 09011181419021

HALAMAN PERSEMBAHAN

MOTTO :

Mother is the only reason why I can stand stronger up to now –

Febrina Setianingsih

Karya besar ini kupersembahkan kepada :

- **Bapak dan Ibuku tercinta.**
- **Saudara-saudaraku dan seluruh keluarga besarku.**
- **Kawan-kawan seperjuangan Sistem Komputer 2014.**
- **Almamaterku.**

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan Tugas Akhir yang berjudul “**PEMODELAN *MOBILE ROBOT* BERPENGGERAK DIFFERENSIAL MENGGUNAKAN METODE LOGIKA *FUZZY-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*”**”.

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya atas bantuan dan kesempatan yang telah diberikan dari berbagai pihak dan hanya Allah SWT yang mampu membalas, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dan terima kasih kepada yang terhormat :

1. Ibu dan bapak saya tercinta yang telah membesarkan saya dan selalu mengajarkan saya akan pentingnya tanggung jawab, disiplin, kesabaran, dan kejujuran dalam hidup. Serta seluruh keluarga besar saya yang tercinta. Terima kasih atas segala do'a, motivasi dan dukungannya baik moril, materil maupun spiritual selama ini.
2. Bapak Jaidan Jauhari, S.Pd., M.T., selaku Dekan Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Rossi Passarella, S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Sistem Komputer Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya.
4. Ibu Prof. Dr. Ir. Siti Nurmaini, M.T., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah berkenan meluangkan waktunya guna membimbing, memberikan saran dan motivasi serta bimbingan terbaik untuk penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Dr. Reza Firsandaya Malik, M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik di Jurusan Sistem Komputer.
6. Bapak Ir. Bambang Tutuko, M.T., dan Bapak Kemahyanto Exaudi, M.T., selaku Dosen Penguji Sidang Tugas Akhir.
7. Mba Iis Oktaria dan kak Eza yang telah sabar mengurus jadwal dan berkas sidang, yudisium, serta wisuda.

8. Kak Abdurahman, S.Kom., Kak Aditya, S.Kom., Kak Abda Barias, S.Kom., Kak Velia, S.Kom., Kak Chusniah, S.Kom., Kak Maya, S.Kom., Kak Rendyansyah, S.Kom, serta kakak tingkat dan kakak laboran lainnya.
9. Arum, Indah, Sarah, Rahmi, Nabilah, Fritz, Faris, Anshori, Ginting, Novia, Erda, Ratih, Tya, Tamara, Fitriyani, Resti. Teman-teman seperjuangan Sistem Komputer Angkatan 2014 di Jurusan Sistem Komputer.
10. Seluruh Civitas Akademika Jurusan Sistem Komputer Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya.
11. Teman seperjuangan di HIMASISKO, Fasilkom Unsri, Unsri dan lainnya.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan yang harus disempurnakan dalam penyusunan laporan ini, baik dari materi maupun teknik penyajiannya. Untuk itu kritik dan saran yang membangun sangatlah diharapkan penulis agar dapat segera diperbaiki sehingga laporan ini dapat dijadikan sebagai masukan ide dan pemikiran yang bermanfaat bagi semua pihak dan menjadi tambahan bahan bacaan bagi yang tertarik dalam penelitian Pemodelan Sistem dan Sistem Kendali.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Palembang, Maret 2018

Penulis

**PEMODELAN *MOBILE ROBOT* BERPENGERAK
DIFFERENSIAL MENGGUNAKAN METODE KENDALI
LOGIKA *FUZZY-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

Febrina Setianingsih (09011181419021)

Jurusan Sistem Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Sriwijaya

Email : febrinampeb@gmail.com

ABSTRAK

Differential Drive Mobile Robot (DDMR) merupakan salah satu *mobile robot* berpengerak differensial dengan menggunakan dua buah roda penggerak. Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) diterapkan untuk memecahkan masalah optimasi dalam pencarian suatu target (nilai terbaik) secara otomatis dengan men-*tuning membership function* pada sistem logika *fuzzy* sehingga waktu yang dibutuhkan lebih sedikit dan efisien. Ketika *mobile robot* melakukan perpindahan dari posisi awal ke posisi tujuan maka *mobile robot* diberikan sistem kendali logika *fuzzy* dan persamaan model *kinematic* yang bertujuan untuk meminimalisir perubahan (*error*) dan mengendalikan kecepatan pada pergerakan roda (kanan dan kiri). Hasil pengujian *tuning* MFs dengan sistem logika *fuzzy*-PSO pada *swarm* ke-45 secara otomatis pada rentang [-2.2 – 2.9] sebagai *input* dan menghasilkan nilai rata-rata *error* posisi x sebesar 0.288889 m/s, rata-rata *error* posisi y sebesar 0.288889 m/s, rata-rata *error* theta sebesar 0.480605 rad/s, rata-rata kecepatan linier sebesar 4,666667 m/s dan rata-rata kecepatan anguler sebesar 4.666667 rad/s dengan waktu tempuh menuju stabil sebesar 1.4 s.

Kata Kunci : Sistem Kendali, *Mobile Robot*, Model Kinematik, Logika *Fuzzy*, Fungsi Keanggotaan, *Particle Swarm Optimization*

**MODELLING OF DIFFERENTIAL DRIVE MOBILE ROBOT
USING FUZZY LOGIC CONTROLLER-PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION METHODS**

Febrina Setianingsih (09011181419021)

*Dept. of Computer Engineering, Faculty of Computer Science, Sriwijaya
University*

Email : febrinampeb@gmail.com

ABSTRACT

Differential Drive Mobile robot (DDMR) is one of the mobile robot driven differential by using two drive wheels. Particle Swarm Optimization (PSO) method is applied to solve the optimization problem in search of a target (best value) automatically by tuning the membership function on the system of fuzzy logic so that the time required is less and efficient. When the mobile robot moves from the actual robot to the destination position, then the mobile robot given the fuzzy logic control system and model equations the kinematic aiming to minimize the change (error) and control the speed in the movement of the wheels (right and left). The results of testing by tuning MFs with fuzzy logic system-PSO in swarm-45 automatically in range [-2.2 - 2.9] as input and produces the average position error x is 0.288889 m/s, the average position error y is 0.288889 m/s, the average error position of theta is 0.480605 rad/s, the average error of linear velocity is 4.666667 m/s and the average error of angular velocity is 4.666667 rad/s with time duration stable by 1.4 s.

Keywords : *Control System, Mobile Robot, Kinematic Model, Fuzzy Logic, Membership Function, Particle Swarm Optimization*

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan dan Manfaat	2
1.2.1 Tujuan	2
1.2.2 Manfaat	2
1.3 Perumusan dan Batasan Masalah.....	2
1.3.1 Perumusan Masalah	2
1.3.2 Batasan Masalah.....	3
1.4 Metodologi Penelitian	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Pendahuluan.....	6
2.2 <i>Mobile Robot</i>	7
2.2.1 <i>Wheeled Mobile Robot (WMR)</i>	8
2.2.1.1 Tipe Kemudi	8

2.2.1.2 Tipe Roda	11
2.2.2 <i>Legged Mobile Robot</i>	12
2.3 <i>Kinematic and Dinamic Analysis</i>	12
2.4 Model Pergerakan Robot	12
2.4.1 Gerak <i>Holonomic Robot</i>	12
2.4.2 Gerak <i>Nonholonomic Robot</i>	13
2.5 <i>Differential Drive Mobile Robot (DDMR)</i>	14
2.6 Prinsip Dasar Pemodelan Matematis dalam <i>Robotic System</i>	14
2.6.1 Konsep Kinematik	16
2.6.1.1 Kinematik <i>Differential Drive Mobile Robot (DDMR)</i>	16
2.6.2 Konsep Dinamik	17
2.7 Sistem Kendali	18
2.7.1 Tipe Sistem Kendali	19
2.7.1.1 Sistem Kendali Loop Terbuka (<i>Open Loop</i>)	19
2.7.1.2 Sistem Kendali Loop Tertutup (<i>Close Loop</i>)	19
2.7.1.3 Perbandingan antara Sistem Kendali <i>Close Loop</i> dan <i>Open Loop</i>	20
2.8 Metode Logika <i>Fuzzy</i>	20
2.8.1 Himpunan <i>Fuzzy</i>	21
2.8.2 Operasi Himpunan <i>Fuzzy</i>	23
2.8.3 Fungsi Keanggotaan	24
2.8.4 <i>Linguistic Variable</i>	25
2.8.5 Sistem Logika <i>Fuzzy</i>	26
2.8.5.1 <i>Fuzzification</i>	27
2.8.5.2 <i>Rules Base</i>	27
2.8.5.3 FIS (<i>Fuzzy Inference System</i>)	27
a. Metode Mamdani	27
b. Metode Sugeno	28
c. Metode Tsukamoto	28
2.8.5.4 <i>Defuzzification</i>	28
2.9 <i>Particle Swarm Optimization</i>	29

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	32
3.1 Pendahuluan.....	32
3.2 Pemodelan Kinematik <i>Differential Drive Mobile Robot</i> (DDMR).....	33
3.3 <i>Nonholonomic Constraints</i> DDMR	35
3.4 Transformasi <i>Nonholonomic</i> dari Posisi Awal DDMR	38
3.5 Model Kinematik <i>Differential Drive Mobile Robot</i> (DDMR).....	39
3.6 Persamaan <i>Tracking Error</i> dari Pergerakan <i>Differential Drive Mobile Robot</i> (DDMR)	41
3.7 Metode Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	43
3.7.1 <i>Linguistic Table</i>	44
3.7.2 <i>Fuzzification</i>	45
3.7.3 <i>Rules Base</i>	50
3.7.4 <i>Inference</i>	51
3.7.5 <i>Defuzzification</i>	52
3.8 <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO).....	52
3.8.1 Algoritma PSO.....	52
3.9 Blok Diagram Perancangan Kontrol DDMR	53
BAB IV. PENGUJIAN DAN ANALISA	55
4.1 Pendahuluan.....	55
4.2 <i>Pseudo Code Fuzzification</i>	55
4.3 <i>Pseudo Code Rules Base</i>	56
4.4 <i>Pseudo Code Inference</i>	58
4.5 <i>Pseudo Code Defuzzification</i>	60
4.6 Contoh Studi Kasus Logika <i>Fuzzy</i>	60
4.7 Menghitung Kecepatan Linier Robot dengan <i>Input</i> (e_x) dan (e_θ).....	61
4.7.1 <i>Fuzzification Input Error</i> untuk Kecepatan Linier	61
4.7.2 <i>Inference Sistem Fuzzy</i> untuk Kecepatan Linier.....	61
4.7.3 <i>Defuzzification Sistem Fuzzy</i> untuk Kecepatan Linier	62
4.8 Menghitung Kecepatan Anguler Robot dengan <i>Input</i> (e_y) dan (e_θ).....	62
4.8.1 <i>Fuzzification Input Error</i> untuk Kecepatan Anguler	62

4.8.2	<i>Inference</i> Sistem <i>Fuzzy</i> untuk Kecepatan Anguler	63
4.8.3	<i>Defuzzification</i> Sistem <i>Fuzzy</i> untuk Kecepatan Anguler	63
4.9	Perancangan Algoritma Sistem Kendali DDMR pada Simulasi.....	65
4.10	Visualisasi Simulasi	66
4.11	Hasil Uji Coba	66
4.12	<i>Tuning Membership Function</i> Dengan Menggunakan PSO.....	67
4.12.1	Inisialisasi <i>Swarm Input Error</i> pada <i>Membership Function</i>	67
4.12.2	Perbandingan Optimasi <i>Swarm Input Error</i> – <i>Gbest Fitness</i>	72
4.13	Grafik <i>Tuning Membership Function</i>	74
4.13.1	Grafik <i>Tuning Membership Function</i> Dengan PSO - 10 <i>Swarm</i>	74
4.13.2	Grafik <i>Tuning Membership Function</i> Dengan PSO - 20 <i>Swarm</i>	75
4.13.3	Grafik <i>Tuning Membership Function</i> Dengan PSO - 30 <i>Swarm</i>	76
4.13.4	Grafik <i>Tuning Membership Function</i> Dengan PSO - 40 <i>Swarm</i>	77
4.13.5	Grafik <i>Tuning Membership Function</i> Dengan PSO - 50 <i>Swarm</i>	78
4.14	Pengujian Sistem.....	79
4.14.1	Pengujian Sistem Tanpa Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	79
4.14.2	Pengujian Sistem Dengan Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	81
4.14.2.1	Pengujian Terhadap Nilai <i>Input</i>	81
4.15	Analisa Perbandingan Pengendali.....	94
4.15.1	Gambar Perbandingan Tanpa <i>Tuning</i> dan <i>Tuning Membership Function</i> (MFs) Dengan PSO.....	94
4.15.2	Gambar Perbandingan Grafik Pengendali.....	95
4.15.3	<i>Table</i> Perbandingan Pengendali.....	96
4.16	Analisa Pengujian.....	97
BAB V. KESIMPULAN		102
5.1	Kesimpulan	102
5.2	Saran	103
DAFTAR PUSTAKA		104
LAMPIRAN.....		107

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Model <i>Mobile Robot</i>	7
Gambar 2.2 Pergerakan <i>Differential Drive</i> pada WMR	9
Gambar 2.3. Pergerakan <i>Tricycle</i> pada WMR.....	9
Gambar 2.4. <i>Omnidirectional</i> pada WMR	10
Gambar 2.5. Pergerakan Roda <i>Synchro Drive</i> pada WMR	10
Gambar 2.6.a. Gerakan <i>Holonomic</i> pada Sebuah Pensil.....	13
Gambar 2.6.b. Robot <i>Manipulator Holonomic</i>	13
Gambar 2.7.a. Gerakan <i>Nonholonomic</i> pada Sebuah Pisau	14
Gambar 2.7.b. Gerakan <i>Nonholonomic Robot</i>	14
Gambar 2.8. Pergerakan <i>Differential Drive Mobile Robot</i> (DDMR).....	14
Gambar 2.9. Blok Diagram Sistem Robotik.....	15
Gambar 2.10. Diagram Sistem Kontrol Robotik	15
Gambar 2.11. Transformasi Kinematik Maju dan Kinematik Invers	16
Gambar 2.12. DDMR pada Medan 2D Cartesian.....	16
Gambar 2.13. Manuver DDMR.....	17
Gambar 2.14. Diagram Model Dinamik Robot	17
Gambar 2.15. Transformasi Dinamik Invers dan Dinamik Maju.....	18
Gambar 2.16. Diagram Blok <i>Open-Loop Control System</i>	19
Gambar 2.17. Diagram Blok <i>Close-Loop Control System</i>	19
Gambar 2.18. Pemetaan suatu <i>Input-Output</i> pada <i>Black Box</i>	21
Gambar 2.19. Himpunan Fungsi Keanggotaan <i>Fuzzy</i> untuk Variabel Jarak.....	22
Gambar 2.20. Operasi Himpunan <i>Fuzzy</i>	23
Gambar 2.21. Operasi Gabungan Himpunan <i>Fuzzy</i>	23
Gambar 2.22. Operasi Irisan Himpunan <i>Fuzzy</i>	24
Gambar 2.23. Operasi Komplemen Himpunan <i>Fuzzy</i>	24
Gambar 2.24. Grafik Representasi Fungsi Keanggotaan Linier Naik	24
Gambar 2.25. Grafik Representasi Fungsi Keanggotaan Linier Turun.....	25
Gambar 2.26. Grafik Representasi Fungsi Keanggotaan Segitiga	25
Gambar 2.27. Grafik Representasi Fungsi Keanggotaan Trapesium	25

Gambar 2.28.	Diagram Blok Sistem Berbasis Aturan <i>Fuzzy</i>	26
Gambar 2.29.	Sistem Logika <i>Fuzzy</i> Tipe-1	26
Gambar 2.30.	Diagram Blok Metode FLC-PSO	29
Gambar 2.31.	<i>Flowchart</i> Algoritma Optimasi <i>Fuzzy</i> -PSO	31
Gambar 3.1.	Kerangka Kerja Penelitian	32
Gambar 3.2.	DDMR pada Bidang 2D Cartesian	33
Gambar 3.3.	Kecepatan Roda Robot Berdasarkan Porosnya	35
Gambar 3.4.	Transformasi <i>Error</i> Posisi pada DDMR.....	41
Gambar 3.5.	Koordinat Analisis <i>Error</i>	42
Gambar 3.6.	Grafik Fungsi <i>Input Error</i> x (e_x).....	46
Gambar 3.7.	Grafik Fungsi <i>Input Error</i> y (e_y)	47
Gambar 3.8.	Grafik Fungsi <i>Input Error</i> θ (e_θ)	48
Gambar 3.9.	Grafik Fungsi <i>Output Error</i> Kecepatan Linier (v_f).....	49
Gambar 3.10.	Grafik Fungsi <i>Output Error</i> Kecepatan Anguler (ω_f).....	50
Gambar 3.11.	Blok Diagram Perancangan Kontrol DDMR	53
Gambar 4.1.	<i>Pseudo Code Fuzzification</i>	55
Gambar 4.2.	<i>Pseudo Code Rules Base</i>	57
Gambar 4.3.	<i>Pseudo Code Inference</i>	59
Gambar 4.4.	<i>Pseudo Code Defuzzification</i>	60
Gambar 4.5.	Kurva <i>Defuzzification</i> untuk Kecepatan Linier (v_f).....	62
Gambar 4.6.	Kurva <i>Defuzzification</i> untuk Kecepatan Anguler (ω_f)	64
Gambar 4.7.	<i>Flowchart</i> Simulasi Proses Kerja <i>Mobile Robot</i>	65
Gambar 4.8.	Visualisasi Simulasi dengan Menggunakan C#.....	66
Gambar 4.9.a.	Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> x (e_x) - 10S	74
Gambar 4.9.b.	Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> y (e_y) - 10S	74
Gambar 4.9.c.	Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> θ (e_θ) - 10S.....	74
Gambar 4.10.a.	Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> x (e_x) - 20S	75
Gambar 4.10.b.	Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> y (e_y) - 20S	75
Gambar 4.10.c.	Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> θ (e_θ) - 20S	75

Gambar 4.11.a. Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> x (e_x) - 30S	76
Gambar 4.11.b. Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> y (e_y) - 30S	76
Gambar 4.11.c. Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> θ (e_θ) - 30S	76
Gambar 4.12.a. Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> x (e_x) - 40S	77
Gambar 4.12.b. Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> y (e_y) - 40S	77
Gambar 4.12.c. Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> θ (e_θ) - 40S	77
Gambar 4.13.a. Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> x (e_x) - 50S	78
Gambar 4.13.b. Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> y (e_y) - 50S	78
Gambar 4.13.c. Grafik <i>Tuning</i> MFs Untuk <i>Input Error</i> θ (e_θ) - 50S	78
Gambar 4.14.a. Grafik Nilai <i>Error</i> x pada Sistem Tanpa Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	79
Gambar 4.14.b. Grafik Nilai <i>Error</i> y pada Sistem Tanpa Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	79
Gambar 4.14.c. Grafik Nilai <i>Error</i> θ pada Sistem Tanpa Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	80
Gambar 4.14.d. Grafik Nilai <i>Error</i> Kecepatan Linier (v_f) pada Sistem Tanpa Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	80
Gambar 4.14.e. Grafik Nilai <i>Error</i> Kecepatan Anguler (ω_f) pada Sistem Tanpa Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	80
Gambar 4.15.a. Grafik Nilai <i>Error</i> x Dengan <i>Tuning</i> MFs pada <i>Fuzzy Logic</i> <i>System</i>	81
Gambar 4.15.b. Grafik Nilai <i>Error</i> y Dengan <i>Tuning</i> MFs pada <i>Fuzzy Logic</i> <i>System</i>	82
Gambar 4.15.c. Grafik Nilai <i>Error</i> θ Dengan <i>Tuning</i> MFs pada <i>Fuzzy Logic</i> <i>System</i>	82
Gambar 4.15.d. Grafik Nilai <i>Error</i> Kecepatan Linier (v_f) Dengan <i>Tuning</i> MFs pada <i>Fuzzy Logic System</i>	82
Gambar 4.15.e. Grafik Nilai <i>Error</i> Kecepatan Anguler (ω_f) Dengan <i>Tuning</i> MFs pada <i>Fuzzy Logic System</i>	83
Gambar 4.16.a. Grafik Nilai <i>Error</i> x pada Sistem F-PSO 10S	83
Gambar 4.16.b. Grafik Nilai <i>Error</i> y pada Sistem F-PSO 10S	84
Gambar 4.16.c. Grafik Nilai <i>Error</i> θ pada Sistem F-PSO 10S	84
Gambar 4.16.d. Grafik Nilai <i>Error</i> Kecepatan Linier (v_f) pada Sistem F-PSO 10S	84
Gambar 4.16.e. Grafik Nilai <i>Error</i> Kecepatan Anguler (ω_f) pada Sistem F-PSO 10S	85

Gambar 4.17.a. Grafik Nilai <i>Error x</i> pada Sistem F-PSO 20S	85
Gambar 4.17.b. Grafik Nilai <i>Error y</i> pada Sistem F-PSO 20S	86
Gambar 4.17.c. Grafik Nilai <i>Error θ</i> pada Sistem F-PSO 20S	86
Gambar 4.17.d. Grafik Nilai <i>Error Kecepatan Linier (v_f)</i> pada Sistem F-PSO 20S	86
Gambar 4.17.e. Grafik Nilai <i>Error Kecepatan Anguler (ω_f)</i> pada Sistem F-PSO 20S	87
Gambar 4.18.a. Grafik Nilai <i>Error x</i> pada Sistem F-PSO 30S	87
Gambar 4.18.b. Grafik Nilai <i>Error y</i> pada Sistem F-PSO 30S	88
Gambar 4.18.c. Grafik Nilai <i>Error θ</i> pada Sistem F-PSO 30S	88
Gambar 4.18.d. Grafik Nilai <i>Error Kecepatan Linier (v_f)</i> pada Sistem F-PSO 30S	88
Gambar 4.18.e. Grafik Nilai <i>Error Kecepatan Anguler (ω_f)</i> pada Sistem F-PSO 30S	89
Gambar 4.19.a. Grafik Nilai <i>Error x</i> pada Sistem F-PSO 40S	89
Gambar 4.19.b. Grafik Nilai <i>Error y</i> pada Sistem F-PSO 40S	90
Gambar 4.19.c. Grafik Nilai <i>Error θ</i> pada Sistem F-PSO 40S	90
Gambar 4.19.d. Grafik Nilai <i>Error Kecepatan Linier (v_f)</i> pada Sistem F-PSO 40S	90
Gambar 4.19.e. Grafik Nilai <i>Error Kecepatan Anguler (ω_f)</i> pada Sistem F-PSO 40S	91
Gambar 4.20.a. Grafik Nilai <i>Error x</i> pada Sistem F-PSO 50S	92
Gambar 4.20.b. Grafik Nilai <i>Error y</i> pada Sistem F-PSO 50S	92
Gambar 4.20.c. Grafik Nilai <i>Error θ</i> pada Sistem F-PSO 50S	92
Gambar 4.20.d. Grafik Nilai <i>Error Kecepatan Linier (v_f)</i> pada Sistem F-PSO 50S	93
Gambar 4.20.e. Grafik Nilai <i>Error Kecepatan Anguler (ω_f)</i> pada Sistem F-PSO 50S	93

DAFTAR TABEL

	Halaman
Table 3.1. <i>Linguistic Table Input 1 “Error x (e_x)”</i>	44
Table 3.2. <i>Linguistic Table Input 2 “Error y (e_y)”</i>	44
Table 3.3. <i>Linguistic Table Input 3 “Error θ (e_θ)”</i>	44
Table 3.4. <i>Linguistic Table Output 1 “Kecepatan Linier (v_f)”</i>	45
Table 3.5. <i>Linguistic Table Output 2 “Kecepatan Anguler (ω_f)”</i>	45
Table 3.6. <i>Table Rules Base Logika Fuzzy untuk Error Kecepatan Linier (v_f)</i>	50
Table 3.7. <i>Table Rules Base Logika Fuzzy untuk Error Kecepatan Anguler (ω_f)</i>	51
Table 4.1. <i>Inisialisasi Input Error MFs Dengan 10 Swarm</i>	67
Table 4.2. <i>Inisialisasi Input Error MFs Dengan 20 Swarm</i>	67
Table 4.3. <i>Inisialisasi Input Error MFs Dengan 30 Swarm</i>	68
Table 4.4. <i>Inisialisasi Input Error MFs Dengan 40 Swarm</i>	69
Table 4.5. <i>Inisialisasi Input Error MFs Dengan 50 Swarm</i>	71
Table 4.6. <i>Gbest Fitness - Input Error MFs Dengan 10 Swarm</i>	73
Table 4.7. <i>Gbest Fitness - Input Error MFs Dengan 20 Swarm</i>	73
Table 4.8. <i>Gbest Fitness - Input Error MFs Dengan 30 Swarm</i>	73
Table 4.9. <i>Gbest Fitness - Input Error MFs Dengan 40 Swarm</i>	73
Table 4.10. <i>Gbest Fitness - Input Error MFs Dengan 50 Swarm</i>	73
Table 4.11. <i>Gambar Perbandingan Sebelum dan Sesudah Tuning MFs</i>	94
Table 4.12. <i>Gambar Perbandingan Grafik Pengendali</i>	95
Table 4.13. <i>Table Perbandingan Pengendali (Rise time, Maximum Overshoot, Steady State Error</i>	96

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Hasil Perbandingan 10 <i>Swarm Input Error</i> MFs	108
Lampiran 2. Hasil Perbandingan <i>Gbest Fitness</i> MFs Dengan 10 <i>Swarm</i>	108
Lampiran 3. Hasil Perbandingan 20 <i>Swarm Input Error</i> MFs	109
Lampiran 4. Hasil Perbandingan <i>Gbest Fitness</i> MFs Dengan 20 <i>Swarm</i>	110
Lampiran 5. Hasil Perbandingan 30 <i>Swarm Input Error</i> MFs	111
Lampiran 6. Hasil Perbandingan <i>Gbest Fitness</i> MFs Dengan 30 <i>Swarm</i>	112
Lampiran 7. Hasil Perbandingan 40 <i>Swarm Input Error</i> MFs	113
Lampiran 8. Hasil Perbandingan <i>Gbest Fitness</i> MFs Dengan 40 <i>Swarm</i>	114
Lampiran 9. Hasil Perbandingan 50 <i>Swarm Input Error</i> MFs	116
Lampiran 10. Hasil Perbandingan <i>Gbest Fitness</i> MFs Dengan 50 <i>Swarm</i>	118
Lampiran 11. Data Perubahan Nilai <i>Error</i> Tanpa Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i>	120
Lampiran 12. Data Perubahan Nilai <i>Error</i> Dengan <i>Tuning</i> MFs [-2-2] Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i> -PSO	121
Lampiran 13. Data Perubahan Nilai <i>Error</i> Dengan <i>Tuning</i> MFs [-1.5-2] Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i> -PSO	122
Lampiran 14. Data Perubahan Nilai <i>Error</i> Dengan <i>Tuning</i> MFs [-1.7-2.1] Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i> -PSO	123
Lampiran 15. Data Perubahan Nilai <i>Error</i> Dengan <i>Tuning</i> MFs [-1.9-2.2] Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i> -PSO	124
Lampiran 16. Data Perubahan Nilai <i>Error</i> Dengan <i>Tuning</i> MFs [-2.1-2.5] Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i> -PSO	125
Lampiran 17. Data Perubahan Nilai <i>Error</i> Dengan <i>Tuning</i> MFs [-2.2-2.9] Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i> -PSO	126
Lampiran 18. Data Perubahan Grafik MFs (<i>Rise Time, Maximum Overshoot, Steady State Error</i>)	127

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Mobile robot merupakan robot yang dapat berpindah dari satu tempat ke tempat lain secara otonom dengan menggunakan aktuator (roda) yang dilengkapi sebuah sensor untuk menentukan titik lokasi pada lingkungannya [1][2]. *Differential Drive Mobile Robot (DDMR)* merupakan salah satu tipe *mobile robot* yang mempunyai dua buah roda penggerak dengan kemudi differensial pada masing-masing roda dan dikendalikan oleh satu buah roda bebas (*castor*) yang berfungsi sebagai penyeimbang robot [3][4]. *Mobile robot* berpenggerak differensial dapat memecahkan masalah kendali gerak robot pada pelacakan *track* yang telah ditentukan [5].

Mobile robot dikatakan sebagai sebuah sistem *nonholonomic* jika derajat kebebasan yang terkendali kurang dari total derajat kebebasan berarti robot tidak dapat melakukan pergerakan secara bebas menuju ke arah tegak lurus terhadap roda [6]. Analisis sistem kontrol dari *nonholonomic* robot dibagi menjadi dua yaitu model kinematik dan model dinamik. Pada model kinematik, *controller* didesain lebih sederhana dan mengabaikan unsur dinamik dalam analisis pergerakan robotnya karena pengaturan kecepatan dilakukan secara langsung sedangkan untuk model dinamik dimana *controller* hanya didesain untuk beberapa model tertentu [6]. Sistem kendali dengan kinematika robot dapat mendefinisikan arah dan kecepatan robot di masing-masing roda serta tidak mengubah arah hadap robot dan sudut kemiringan roda agar dapat menghasilkan total vektor gaya dengan arah pergerakan robot yang diinginkan [7].

Metode logika *fuzzy* merupakan metode untuk mengatasi masalah ketidakpastian yang sering terjadi dalam interpretasi sebuah himpunan *fuzzy* dan memiliki kinerja lebih baik dalam meminimalisir nilai *error* pada pergerakan robot jenis DDMR [8]. *Mobile robot* telah diberikan sistem kendali logika *fuzzy* dalam pergerakannya di masing-masing roda serta persamaan kinematik untuk menganalisis pergerakan *mobile robot* yang tidak perlu dilinearisasi atau *nonlinear* [9]. *Particle Swarm Optimization (PSO)* merupakan teknik optimasi

berdasarkan analogi dengan model perilaku sosial individu atau kelompok yang digunakan untuk memecahkan masalah optimasi diskrit, sekelompok atau *swarm*, elemen komputasi atau partikel yang banyak, mengeksplorasi ruang solusi dari masalah optimasi, serta *tuning* nilai terbaik secara otomatis pada *membership function* [10]. Maka pada tugas akhir ini akan dibuat pemodelan *mobile robot* berpenggerak differensial menggunakan metode kendali logika fuzzy dan *Particle Swarm Optimization* (PSO).

1.2. Tujuan dan Manfaat

1.2.1. Tujuan

Adapun tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah :

1. Membuat model pengendalian dengan menggunakan analisa pemodelan kinematik DDMR berdasarkan persamaan kecepatan menggunakan teknik logika fuzzy dan *Particle Swarm Optimization* (PSO).
2. Men-*tuning* nilai *membership function* dengan *fuzzy logic system* - PSO.
3. Mencari nilai *error* pada *mobile robot* dan mengimplementasikan hasil desain sistem kendali *Differential Drive Mobile Robot* (DDMR) dalam bentuk simulasi dengan menggunakan bahasa pemrograman C#.

1.2.2. Manfaat

Adapun manfaat yang didapatkan dari dilakukannya penelitian ini adalah dapat memberikan informasi dan referensi bagi pihak yang ingin mengembangkan *mobile robot*.

1.3. Perumusan dan Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka rumusan masalah dan batasan masalah yang ada pada tugas akhir ini adalah :

1.3.1. Perumusan Masalah

Bagaimana merancang *mobile robot* berpenggerak differensial dengan pemodelan kinematik DDMR dengan metode kendali logika fuzzy dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) agar *mobile robot* dapat bergerak mencapai referensi *trajectory* yang telah ditentukan.

1.3.2. Batasan Masalah

Selain perumusan masalah di atas, terdapat pula batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini yaitu sebagai berikut :

1. Robot yang dianalisa yaitu *Differential Drive Mobile Robot* (DDMR) berpenggerak dua buah roda dimasing-masing roda (kanan dan kiri) yang dikemudikan secara terpisah.
2. Robot dianalisa dengan menggunakan persamaan kinematik dan mengabaikan persamaan dinamik dalam proses analisisnya.
3. Robot diasumsikan bergerak pada bidang horizontal dan berada dalam ruang lingkup 2D pada koordinat *XY*.
4. Dianggap tidak ada hambatan pada *track* dan *mobile robot* tidak pernah tergelincir / tidak mengalami *slip* dan bersifat nonholonomik.
5. Mengabaikan analisis dari *castor* bebas.
6. Kontrol inputannya adalah kecepatan linier pada masing-masing roda.
7. *Tuning membership function* (MFs) dengan *fuzzy logic system* - PSO.
8. Penelitian ini hanya sebatas simulasi program (*soft computing*) dengan menggunakan bahasa pemrograman C# dan metode yang dipakai yaitu logika *fuzzy-Particle Swarm Optimization* (PSO).

1.4. Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini akan melewati beberapa tahapan sebagai berikut :

1. Metode Studi Pustaka dan *Literature*
Pada tahap ini dilakukan dengan cara mencari dan mengumpulkan sumber-sumber referensi berupa *literature* yang terdapat pada buku, *internet* atau sumber lainnya tentang “Pemodelan *Mobile Robot* Berpenggerak Differensial Menggunakan Metode Kendali Logika *Fuzzy-Particle Swarm Optimization*” sehingga dapat menunjang penulisan Laporan Tugas Akhir.
2. Metode Konsultasi
Pada tahap ini dilakukan dengan cara konsultasi kepada orang-orang yang dianggap memiliki pengetahuan dan wawasan terhadap permasalahan yang ditemui saat pembuatan Tugas Akhir.

3. Metode Pembuatan Model

Pada tahap ini dilakukan dengan cara membuat perancangan model dalam bentuk simulasi.

4. Metode Pengujian

Pada tahap ini dilakukan pengujian simulasi bagaimana sistem kendali yang telah dirancang ini dapat bekerja sehingga diperoleh data hasil pengujian untuk mendapatkan nilai terbaik dari sistem yang telah dibuat.

5. Metode Analisa dan Kesimpulan

Hasil dari pengujian pada metode pengujian kemudian dianalisis dengan tujuan untuk mengetahui kekurangan pada hasil perancangan dan faktor penyebabnya, sehingga dapat digunakan untuk pengembangan pada penelitian selanjutnya dan dibuat kesimpulan dari hasil penelitian.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika yang akan digunakan dalam penulisan tugas akhir ini akan melewati beberapa tahap sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab pertama ini berisi tentang penjabaran secara sistematis topik yang diambil meliputi latar belakang, tujuan dan manfaat, perumusan dan batasan masalah, metodologi dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab kedua ini menjelaskan dasar teori yang menunjang pembahasan dari penelitian ini. Dasar teori ini berisi literatur tentang *mobile robot*, kinematika DDMR, dan desain kendali logika *fuzzy-particle swarm optimization* pada *mobile robot*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ketiga ini menjelaskan bagaimana penelitian ini berjalan mulai dari proses pemodelan kinematik DDMR sampai perancangan kendali logika *fuzzy* dan *Particle Swarm Optimization* (PSO).

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Pada bab keempat ini akan disajikan algoritma pemrograman simulasi sistem kendali yang telah dirancang dengan menggunakan logika *fuzzy-particle swarm optimization* (dengan menggunakan bahasa pemrograman C# serta diperoleh data dari hasil respon sistem yang menggambarkan *performance* dari sistem kendali yang telah dirancang.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab kelima ini berisi kesimpulan dan saran yang didapat dari hasil penelitian tugas akhir secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. G. Tzafestas, *Introduction to mobile robot control*. Elsevier, 2013.
- [2] L. Jaulin, *Mobile Robotics*. Elsevier, 2015.
- [3] F. W. Aribowo and I. Setiawan, “Penjejak Arah Cahaya Dengan Kendali Logika,” pp. 144–150.
- [4] A. Z. Arifin, “Simulasi Pengendalian Gerak Robot Mobil Berpenggerak Differensial Dengan Metode v,w Tracking Control Berbasis Proportional Derivative,” vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2012.
- [5] B. Winarno and M. W. P. Pratama, “Pengendalian Gerak Robot Penghindar Halangan Menggunakan Citra dengan Kontrol PID,” *Jeecae*, vol. 1, no. 1, pp. 25–30, 2016.
- [6] P. Petrov, “Modeling and adaptive path control of a differential drive mobile robot,” *Proc. 12th WSEAS Int. Conf. Autom. Control. Model. Simul.*, pp. 403–408, 2010.
- [7] X. Lang, “A Trajectory Tracking Controller Design for a Nonholonomic Mobile Robot,” 2013.
- [8] E. M. Veri Hendrayawan, Nanang Sulistiyanto, “Implementasi Invers Kinematics pada Sistem Pergerakan Mobile Robot Roda Mekanum,” *Skripsi*, 2014.
- [9] B. Riyanto and W. Dwiono, “Sistem Kendali Fuzzy Bertipe-2 Interval dengan Struktur Adaptif Beracuan Model,” *Proc ITB Sains dan Tek*, vol. 38, no. 2, pp. 181–200, 2006.

- [10] A. M. Abdelbar, S. Abdelshahid, and D. C. Wunsch, “Fuzzy PSO: A generalization of particle swarm optimization,” *Proc. Int. Jt. Conf. Neural Networks*, vol. 2, pp. 1086–1091, 2005.
- [11] Sutojo, T., Edy, and Vincent, *Kecerdasan Buatan*. Semarang: ANDI, 2011.
- [12] Fadlisyah, F., and Sayuti, M., *Robot Visi*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2009.
- [13] R. Supriyanto, *Robotika*. Tangerang, 2010.
- [14] W. Budiharto, *Robotika-Teori dan Implementasinya*. Yogyakarta: ANDI, 2010.
- [15] Niku, Saeed B., *Introduction to Robotics : analysis, systems, applications*, Second. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [16] E. A. Mishra, “Trajectory Tracking of Differential Drive Wheeled Mobile Robot,” vol. 2, no. 2, pp. 28–31, 2014.
- [17] G. Bayar, E. İ. L. Konukseven, and A. B. U. Ğ. R. A. Koku, “Control of a Differentially Driven Mobile Robot Using Radial Basis Function Based Neural Networks,” vol. 3, no. 12, pp. 1002–1013, 2008.
- [18] S. Miah, “Design and Implementation of Control Techniques for Differential Drive Mobile Robots: An RFID Approach,” *ProQuest Diss. Theses*, vol. NR98132, p. 213, 2012.
- [19] Campion, Georges, and Brigitte, “Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of wheeled Mobile Robots,” vol. 12, 1996.
- [20] M.W.S, Sanjaya, *Membuat Robot Cerdas berbasis Vision*. Yogyakarta: ANDI, 2015.
- [21] J.-M. Yang and J.-H. Kim, “Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 15, no. 3, pp. 578–587, 1999.
- [22] G. Klanč and D. Matko, “Mobile Robot Control on a Reference Path,” pp. 1343–1348, 2005.
- [23] S. Nurmaini, K. Dewi, and B. Tutuko, “Differential-Drive Mobile Robot Control Design based-on Linear Feedback Control Law,” 2017.
- [24] F. A. Salem, “Kinematics and Dynamic Models and Control for Differential Drive Mobile Robots,” *Int. J. Curr. Eng. Technol*, vol. 3, pp.

253–263, 2013.

- [25] A. N. Aziz and E. Pitowarno, “Implementasi Metode Kontrol v, ω Berbasis Proporsional Integral Untuk Kontrol Gerak Mobile Robot Berpenggerak Differensial : Studi Simulasi,” no. 1, pp. 1–6.
- [26] K. Ogatha, *Teknik Kontrol Automatik*. 1996.
- [27] D. A. Ratna Wati, *Sistem Kendali Cerdas : Fuzzy Logic Controller (FLC), Jaringan Syaraf Tiruan (JST), Algoritma Genetik (AG), dan Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO)*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2011.
- [28] E. Mahargia, D. Anggraeni P, R. Wandiro S, and Y. Mahzar, “Penerapan Logika Fuzzy Metode Sugeno untuk Sistem Pendukung Keputusan Prakiraan Cuaca,” 2013.
- [29] Kusumadewi, Sri and Purnomo, Hari, *Aplikasi Logika Fuzzy untuk pendukung keputusan edisi kedua*. 2010.
- [30] Suyanto, *Soft Computing membangun mesin ber-IQ tinggi*. Bandung: Informatika, 2008.
- [31] X. Chen and Y. Li, “Smooth Path Planning of a Mobile Robot Using Stochastic Particle Swarm Optimization,” *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom.*, pp. 1722–1727, 2006.
- [32] S. Vaneshani and H. Jazayeri-rad, “Optimized Fuzzy Control by Particle Swarm Optimization Technique for Control of CSTR,” vol. 5, no. 11, pp. 686–691, 2011.
- [33] S. Dutta, “Obstacle Avoidance of mobile robot using PSO based Neuro Fuzzy Technique,” vol. 2, no. 2, pp. 301–304, 2010.
- [34] A. Amir and K. Puspipetek, “Pemodelan Kendali Pada Perangkat Logika Fuzzy (Fuzzy Logic Controller) Pemindai Gamma,” no. November, pp. 179–188, 2010.
- [35] R. Rashid, I. Elamvazuthi, M. Begam, and M. Arrofiq, “Fuzzy-based Navigation and Control of a Non-Holonomic Mobile Robot,” vol. 2, no. 3, 2010.
- [36] I. Cholissodin, *Buku Ajar Swarm Intelligence*, no. June 2016. 2017.