

**MODEL FUZZY SOCIAL FORCE UNTUK KENDALI
NAVIGASI ROBOT BERODA PADA BIDANG MIRING**

(Tesis)

Oleh
RICI RIANSYAH
NPM 2225031010



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**MODEL FUZZY SOCIAL FORCE UNTUK KENDALI
NAVIGASI ROBOT BERODA PADA BIDANG MIRING**

Oleh
RICI RIANSYAH

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK ELEKTRO**

Pada
**Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRACT**FUZZY SOCIAL FORCE MODEL FOR WHEELED ROBOT
NAVIGATION CONTROL ON AN INCLINED TERRAIN**

By
Rici Riansyah

Robot navigation on inclined surfaces presents additional challenges compared to flat terrain due to the influence of gravity and friction, which can reduce movement stability and efficiency. The objective of this study is to develop a navigation system based on the Model Fuzzy Social Force (MFSF) capable of dynamically adjusting social forces, frictional forces, and gravitational forces to maintain stable robot motion on inclined surfaces. The system is equipped with a LiDAR (Light Detection and Ranging) sensor for distance and direction detection, as well as an IMU (Inertial Measurement Unit) sensor to measure the slope angle in real time. The proposed method employs simulation using the CoppeliaSim platform, with 10 experimental trials conducted at each inclination level (10° , 15° , and 20°) to ensure result consistency. The findings show that the robot with MFSF completes navigation in an average time ranging from 11 to 20 seconds, while the conventional Social Force model requires 16 to 21 seconds under the same conditions. The improved performance of the MFSF system is attributed to its fuzzy-based ability to adapt social forces according to slope variations, thereby reducing traction loss (slip) and maintaining directional stability. Consequently, the integration of fuzzy mechanisms and IMU sensors has been proven to enhance navigation efficiency and stability in environments with varying inclinations, making it potentially applicable to autonomous robotic systems operating on hilly or uneven terrains.

Keywords : Inclined Terrain, LiDAR and IMU Sensor, Wheeled Robot Navigation, CoppeliaSim simulation, Model Fuzzy Social Force.

ABSTRAK

MODEL FUZZY SOCIAL FORCE UNTUK KENDALI NAVIGASI ROBOT BERODA PADA BIDANG MIRING

Oleh
Rici Riansyah

Navigasi robot pada medan miring menghadirkan tantangan tambahan dibandingkan dengan medan datar karena pengaruh gaya gravitasi dan gesekan yang dapat mengurangi stabilitas dan efisiensi pergerakan. Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan sistem navigasi berbasis Model *Fuzzy Social Force* (MFSF) yang mampu menyesuaikan gaya sosial, gaya gesek, dan gaya gravitasi secara dinamis agar robot dapat bergerak stabil pada bidang miring. Sistem ini dilengkapi dengan sensor LiDAR (*(Light Detection and Ranging)*) untuk deteksi jarak dan arah serta sensor IMU (*(Inertial Measurement Unit)*) untuk mengukur sudut kemiringan secara *real-time*. Metode yang digunakan melibatkan simulasi pada platform CoppeliaSim, dengan pengujian sebanyak 10 kali pada setiap tingkat kemiringan (10° , 15° , dan 20°) untuk memastikan konsistensi hasil. Hasil menunjukkan bahwa robot dengan MFSF mampu menyelesaikan navigasi dalam waktu rata-rata antara 11 hingga 20 detik, sedangkan model *Social Force* konvensional memerlukan waktu antara 16 hingga 21 detik pada kondisi medan yang sama. Performa yang lebih baik pada MFSF disebabkan oleh kemampuan sistem *fuzzy* dalam menyesuaikan gaya sosial terhadap perubahan sudut kemiringan secara adaptif, sehingga mengurangi kehilangan traksi (*slip*) dan menjaga stabilitas arah gerak. Dengan demikian, integrasi mekanisme *fuzzy* dan sensor IMU terbukti meningkatkan efisiensi serta stabilitas navigasi robot pada lingkungan dengan variasi kemiringan, dan berpotensi diterapkan pada sistem robot otonom di area berbukit atau tidak rata.

Kata kunci : Medan Miring, Sensor LiDAR dan IMU, Navigasi Robot Beroda, Simulasi CoppeliaSim dan Model *Fuzzy Social Force*.

Judul Tesis : Model Fuzzy Social Force Untuk
Kendali Navigasi Robot Beroda Pada
Bidang Miring

Nama Mahasiswa : **Rici Riansyah**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2225031010

Program Studi : Magister Teknik Elektro

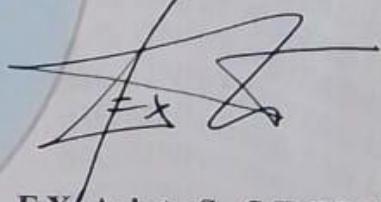
Fakultas : Teknik

Pembimbing I

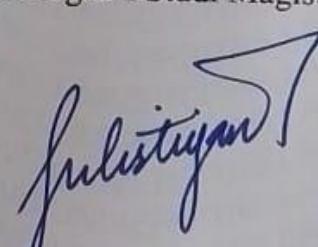

Dr. Sri Purwiyanti, S.T., M.T., Ph.D
NIP 197310 04199803 2 001

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing II


Dr. Eng. F.X. Arinto S., S.T., M.T.
NIP 19691219 19990 3 1002

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro

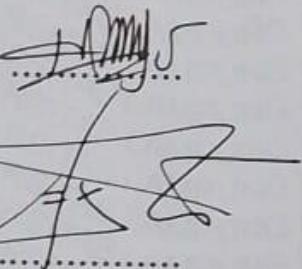

Prof. Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.
NIP 19651021 199512 2 001

MENGESAHKAN

1. Komisi Pengaji 1

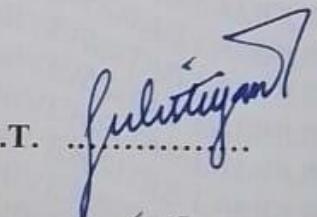
Ketua Komisi Pengaji

(Pembimbing I) : **Dr. Sri Purwiyanti, S.T., M.T., Ph.D**



Sekretaris Komisi Pengaji

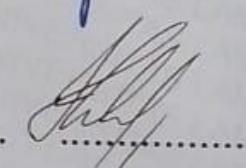
(Pembimbing II) : **Dr. Eng. F.X. Arinto S., S.T.,M.T.**



Anggota Komisi Pengaji

(Pengaji I)

: **Prof. Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.**

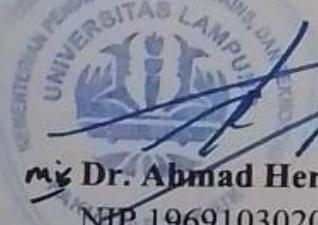


Anggota Komisi Pengaji

(Pengaji II)

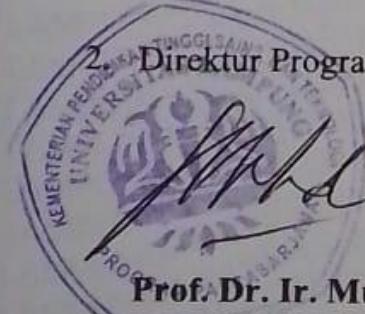
: **Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.**

1. Dekan Fakultas Teknik

 **Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.**

NIP 196910302000031001

Direktur Program Pascasarjana

 **Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.**

NIP 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : **19 Januari 2026**

LEMBAR PERNYATAAN

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis yang saya susun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik dari Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro seluruhnya merupakan hasil karya sendiri.

Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan tesis yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah.

Tesis dengan judul “Model Fuzzy Social Force Untuk Kendali Navigasi Robot Beroda Pada Bidang Miring” dapat diselesaikan berkat bimbingan dan motivasi dari pembimbing-pembimbing saya, yaitu :

1. **Dr. Sri Purwiyanti, S.T., M.T., Ph.D**
2. **Dr. Eng. F.X. Arinto S., S.T.,M.T.**

Saya Ucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada semua pihak, khususnya kedua dosen pembimbing dan Bapak/Ibu Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung yang banyak memberikan ilmu pengetahuan, bimbingan dan motivasi.

Apabila dikemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian tesis ini bukan hasil karya sendiri atau adanya plagiat dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya sandang dan sanksi-sanksi lainnya sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Bandar Lampung, Januari 2026



Rici Riansyah

NPM. 2225031010

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Sekayu pada tanggal 28 September 1997. Penulis merupakan anak ke-1 dari 3 bersaudara dari pasangan Bapak Pauzi dan Ibu Riana. Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri Talang Pake dan lulus pada tahun 2010. Pendidikan menengah pertama diselesaikan di SMP Negeri 9 Sekayu, Kecamatan Sekayu, dan lulus pada tahun 2013. Pendidikan menengah kejuruan diselesaikan di SMK Negeri 2 Sekayu Jurusan Teknik Instalasi Tenaga Listrik dan lulus pada tahun 2016. Pada tahun 2016, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Politeknik Negeri Sriwijaya pada Program Studi DIV Teknik Elektro melalui jalur Penelusuran Minat dan Kemampuan Politeknik Negeri (PMDK). Selama menempuh pendidikan, penulis aktif dalam organisasi kemahasiswaan internal kampus, yaitu Tim ARCOS (*Automation & Robotic Club of Sriwijaya*), serta meraih prestasi Juara 1 KRPAI (Kontes Robot Pemadam Api Indonesia) tingkat regional Sumatera pada tahun 2017 dan beserta Strategi Terbaik pada tahun 2019. Pada tahun 2020, penulis menyelesaikan Program Studi DIV Teknik Elektro POLSRI dengan menulis skripsi berjudul “*Navigasi Garbage Robot Menggunakan Environment Mapping*”. Pada tahun 2022, penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro Universitas Lampung. Pada tahun 2024, penulis melakukan penelitian pada bidang navigasi robotika dengan judul tesis “*Model Fuzzy Social Force Untuk Kendali Navigasi Robot Beroda Pada Bidang Miring*” di bawah bimbingan Ibu Dr. Sri Purwiyanti, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Eng. F.X. Arinto S., S.T., M.T.

Bandar Lampung, Januari 2026

Penulis

Rici Riansyah



PERSEMBAHAN

Dengan Ridho Allah SWT, teriring shalawat kepada Nabi Muhammad SAW

Karya Tulis ini kupersembahkan untuk:

Ayah dan Ibu Tercinta

Bapak Pauzi dan Ibu Riana.

Keluarga Kecil Tersayang

Istriku Sonia Wahyuni, S.Pd. dan Anakku tersayang Rayyan Ghani Alfatih.

Dosen Teknik Elektro

Yang selalu membimbing, mengajarkan, memberikan saran, baik secara akademis maupun non akademis.

Teman- teman kebanggaanku

Rekan – rekan Jurusan Teknik Elektro.

Sahabat-sahabatku

Yang selalu membantu, memberikan semangat, mendukung menuju keberhasilan, serta berbagi cerita suka duka dalam berkeluh kesah.

Keluarga Besar Magister Teknik Elektro 2022

Yang selalu memberi semangat, dukungan dalam proses yang sangat panjang, dan selalu berdiri bersama dalam perjuangan menuju kesuksesan.

Almamaterku

Universitas Lampung

Bangsa dan Negaraku

Republik Indonesia

Terima kasih untuk semua yang telah diberikan kepadaku. *Jazakallah Khairan.*



MOTTO

“Setiap proses memiliki waktu terbaiknya, tugas manusia adalah berusaha dan berserah”

“Kesalahan bukan kegagalan, tetapi data untuk perbaikan”

”Sebaik Apapun Perkataan, Jika Tidak Ada Aksi, Maka Tidak Akan ada Artinya. Maka Bangun dan Bergegaslah Merangkai Mimpi yang Didapat dari Tidur Semalam”

-Rici Riansyah-

SAN WACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Syukur Alhamdulillahirabbil'alamin, penulis haturkan puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat, hidayah, serta inayah-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tesis ini dengan judul "**Model Fuzzy Social Force Untuk Kendali Navigasi Robot Beroda Pada Bidang Miring**" dengan sebaik-baiknya.

Shalawat beriring salam senantiasa tercurah kepada junjungan alam, Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan para pengikutnya yang istiqamah menegakkan agama Islam hingga akhir zaman. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister, sekaligus sebagai wadah pembelajaran dan pengembangan ilmu di bidang teknik kendali dan kecerdasan buatan. Dalam proses penyusunan tesis ini, penulis menghadapi berbagai tantangan dan hambatan, namun berkat bimbingan, doa, serta dukungan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikannya dengan baik.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis banyak mendapatkan bimbingan, motivasi, serta bantuan baik moral maupun material dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan sepenuh ketulusan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., selaku Direktur Program Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
4. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Ibu Prof. Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung sekaligus selaku dosen penguji

utama yang telah banyak memberikan kritik, saran dan motivasi yang bermanfaat bagi penulis.

6. Ibu Dr. Sri Purwiyanti, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama tesis yang banyak memberikan waktu, ide pemikiran dan semangat serta motivasi bagi penulis.
7. Bapak Dr. Eng. F.X. Arinto Setyawan, S.T., M.T., selaku pembimbing kedua tesis, yang telah banyak memberikan waktu, pengalaman, motivasi dan pemikiran bagi penulis.
8. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku dosen penguji kedua yang telah banyak memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis.
9. Seluruh Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung, berkat ilmu yang telah diajarkan kepada penulis selama penulis menjalani masa studi di perkuliahan.
10. Seluruh Tenaga Pendidik Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah banyak membantu kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
11. Seluruh teman-teman Program Studi Magister Teknik Elektro UNILA angkatan 2022 untuk kebersamaan yang telah dijalani. Tiada kata yang dapat penulis utarakan untuk mengungkapkan perasaan senang dan bangga menjadi bagian dari angkatan 2022.
12. Kedua orang tua, ayah dan ibu yang selalu menyayangi, mendidik, membimbing, berkorban serta mendoakan penulis.
13. Istriku Sonia Wahyuni yang selalu berdoa, memberi dukungan moral, berjuang bersama-sama dalam menyelesaikan studi S2 dan materiil mengenai kebutuhan terkait perkuliahan hingga kehidupan agar semua berjalan lancar.
14. Serta semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, baik dari segi isi maupun cara penyajiannya. Oleh karena itu, Penulis sangat mengharapkan saran serta kritik yang bersifat membangun dari

pembaca. Akhir kata semoga karya sederhana ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Aamiin Allahumma Aamiin.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, Januari 2026

Penulis,

Rici Riansyah

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
ABSTRACT	iii
ABSTRAK	iv
LEMBAR PENGESAHAN	vi
RIWAYAT HIDUP.....	viii
SAN WACANA.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Manfaat Penelitian	5
1.5. Batasan Masalah.....	5
1.6. Hipotesis.....	6
1.7. Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1. Penelitian Terdahulu	8
2.2. Landasan Teori.....	10
2.2.1. <i>Social Force Model</i>	10
2.2.1.1 Keterbatasan <i>Social Force Model</i>	13
2.2.1.2 Model <i>Fuzzy Social Force</i> (MFSF)	14
2.2.2. <i>Fuzzy</i>	15
2.2.3. Kontrol PID.....	16
BAB III METODE PENELITIAN.....	18
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	18
3.2. Alat dan Komponen Penelitian	18

3.3.	Tahap Pelaksanaan Penelitian	19
3.3.1.	Studi Literatur	19
3.3.2.	Observasi (Simulasi Awal)	20
3.4.	Desain Sistem Secara Umum	20
3.5.	Perancangan Model <i>Fuzzy Social Force</i> Pada Robot	22
3.5.1.	<i>Social Force Model – Inclined Terrain</i>	23
3.5.2.	Perancangan <i>Fuzzy</i>	24
3.5.2.1	Fungsi Keanggotaan (<i>Membership Function</i>).....	24
3.5.2.2	<i>Rule Base Fuzzy</i>	25
3.5.2.3	Inferensi <i>Fuzzy</i> dengan Metode Sugeno Zero-Order.....	28
3.5.3.	Navigasi Robot.....	29
3.5.3.1	Area <i>Proxemic</i> dan Gaya Pada Robot.....	29
3.5.3.2	Kalibrasi dan Validasi Sensor IMU dan LiDAR.....	29
3.5.3.3	Kontrol <i>Heading</i> dan Kecepatan Robot	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34	
4.1	Pengujian Persamaan dengan MATLAB	34
4.2	Simulasi CoppeliaSim.....	36
4.3	Parameter Sudut dan Vektor Robot SFM Tanpa <i>Fuzzy</i>	39
4.4	Parameter Sudut dan Vektor Robot Dengan MFSF.....	41
4.5	Pengujian MFSF pada Sudut Kemiringan 10 Derajat.....	43
4.6	Pengujian MFSF Sudut 15 Derajat	47
4.7	Pengujian MFSF pada Sudut Kemiringan 20 Derajat.....	50
4.8	Hasil Perbandingan Waktu MFSF dan SFM Konvensional	54
4.9	Analisis Perbandingan MFSF, SFM Konvensional, dan PID	57
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	60	
5.1	Kesimpulan	60
5.2	Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA	63	
LAMPIRAN	66	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2. 1 Gaya Pada Algoritma SFM.....	8
Gambar 3. 1 Tampilan Aplikasi CoppeliaSim.....	19
Gambar 3. 2 Blok Diagram <i>High Level Control</i>	21
Gambar 3. 3 Blok Diagram <i>Low Level Control</i>	22
Gambar 3. 4 Gaya Robot di Bidang Miring	23
Gambar 3. 5 Pembagian Arah Relatif Rintangan Variabel <i>Direction</i> (γ).....	25
Gambar 3. 6 Pembagian Arah Relatif Rintangan Variabel <i>Distance</i> (d)	25
Gambar 3.7 (a) Fungsi Keanggotan Input Variabel <i>Direction</i> (b) Fungsi Keanggotan Input Variabel <i>Distance</i>	27
Gambar 3. 8 Area <i>Proxemic</i>	29
Gambar 3. 9 Ilustrasi Arah Sudut Tujuan.....	31
Gambar 3. 10 Kontrol PID <i>Heading</i> Robot.....	32
Gambar 3. 11 Kontrol PID Kecepatan robot	32
Gambar 4. 1 Simulasi MFSF Menggunakan Matlab.....	35
Gambar 4. 2 Pengujian Gaya Gravitasi	36
Gambar 4. 3 Diameter dan Jarak Roda Robot	38
Gambar 4. 4 Simulasi Pengujian Sudut dan Vektor Pada Robot	39
Gambar 4. 5 Grafik Vektor <i>Social Force Model</i>	40
Gambar 4. 6 Grafik Vektor Model <i>Fuzzy Social Force</i>	42
Gambar 4. 7 Menampilkan Gambar Pengujian Robot Pada Medan Miring	44
Gambar 4. 8 (a) Perubahan <i>Pitch</i> Pada Bidang Miring 10° (b) Perubahan Kecepatan pada Bidang Miring 10°	45
Gambar 4. 9 (a) Perubahan <i>Pitch</i> Pada Bidang Miring 15° (b) Perubahan Kecepatan pada Bidang Miring 15°	48
Gambar 4. 10 (a) Perubahan <i>Pitch</i> Pada Bidang Miring 20° (b) Perubahan Kecepatan pada Bidang Miring 20°	52
Gambar 4. 11 (a) Hasil Simulasi Robot SFM Konvensional (b) Hasil Simulasi Robot MFSF.....	55

DAFTAR TABEL

Table	Halaman
Tabel 3. 1 Rule Base Fuzzy Menentukan Nilai Gain k	26
Tabel 4. 1 Konfigurasi Simulasi.....	37
Tabel 4. 2 Perbandingan Kinerja Sistem dengan dan tanpa MFSF pada Berbagai Sudut Kemiringan	55

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
Lampiran 1. <i>Source Code</i>	67
Lampiran 2. Pengujian di Aplikasi Coppeliasim	72
Lampiran 3. Publikasi Jurnal.....	74

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sistem navigasi robot beroda yang adaptif pada medan miring menjadi semakin urgensi seiring perkembangan teknologi robotika modern. Faktanya, medan operasional robot di dunia nyata tidak selalu berupa permukaan datar, melainkan sering kali menghadirkan kondisi lingkungan yang dinamis, tidak rata, serta memiliki tingkat kemiringan yang bervariasi. Kondisi medan miring ini menghadirkan tantangan tersendiri karena perubahan sudut kemiringan dapat memengaruhi distribusi gaya, stabilitas pusat massa, dan efisiensi gerak robot secara signifikan. Dalam konteks tersebut, sistem navigasi konvensional yang dirancang untuk permukaan datar sering kali gagal mempertahankan kestabilan dan ketepatan arah ketika diaplikasikan pada bidang miring, karena tidak memiliki mekanisme kompensasi terhadap pengaruh gravitasi dan gaya normal yang berubah-ubah.[1],[2],[3].

Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan model kendali navigasi adaptif pada bidang miring, dengan tujuan menjamin pergerakan robot yang tetap stabil, aman, dan efisien meskipun beroperasi pada kondisi ekstrem. Untuk mencapai tujuan tersebut, robot harus mampu mendekripsi dan mengidentifikasi kemiringan permukaan secara akurat, kemudian menyesuaikan kecepatan linear, sudut arah, serta gaya dorongnya terhadap perubahan medan. Pemilihan bidang miring sebagai fokus penelitian bukan hanya untuk menguji ketahanan dan kemampuan adaptif sistem kendali, tetapi juga untuk menjawab keterbatasan model navigasi eksisting yang umumnya hanya dievaluasi pada medan datar. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengisi kesenjangan (*research gap*) dalam pengembangan sistem navigasi cerdas yang mampu beroperasi secara andal pada kondisi topografi kompleks dan tidak ideal.

Dalam konteks penelitian navigasi robot, *Social Force Model* (SFM) telah menjadi salah satu pendekatan yang banyak digunakan. Model ini awalnya diperkenalkan untuk memodelkan interaksi antar agen dalam kerumunan manusia,

namun dalam perkembangannya diaplikasikan secara luas pada navigasi robot. Selama lebih dari dua dekade terakhir, SFM terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas navigasi robot di berbagai lingkungan kompleks. Sejumlah studi menunjukkan kontribusi signifikan, misalnya pengembangan perilaku kepekaan sosial pada robot pemandu berbasis *reinforcement learning*, yang memungkinkan robot tidak hanya bergerak efisien tetapi juga memperhatikan kenyamanan manusia [4]. Penelitian lain memperkenalkan mekanisme kendali adaptif berbasis SFM untuk mengoptimalkan interaksi antara robot dan manusia, sehingga menghasilkan pergerakan yang lebih alami, lancar, dan minim potensi tabrakan [5]. Selain itu, integrasi *behavioural templates* dengan SFM terbukti efektif dalam menghasilkan lintasan yang menyerupai pola pergerakan manusia, sehingga navigasi robot menjadi lebih kontekstual pada lingkungan padat [6].

Perkembangan penerapan *Social Force Model* (SFM) terus menunjukkan diversifikasi aplikasi. Sejumlah penelitian mengombinasikan SFM dengan algoritma *Q-learning* untuk menghasilkan perilaku navigasi yang lebih sesuai dengan norma sosial, dengan menekankan pentingnya interaksi jangka panjang yang harmonis antara robot dan manusia [7]. Dalam konteks *companion robot*, SFM dimanfaatkan untuk mendukung kemampuan mengenali keberadaan manusia sekaligus menjaga jarak aman dalam lingkungan ramai [8]. Selain itu, akurasi pelacakan manusia ditingkatkan melalui pendekatan prediksi berbasis gaya sosial, yang terbukti efektif dalam mengurangi kesalahan identifikasi pada kondisi *occlusion* [9]. Selanjutnya, kerangka navigasi *real-time* berbasis SFM dikembangkan agar robot mampu menyesuaikan pergerakannya secara dinamis dengan aturan sosial yang berlaku di lingkungannya [10]. Hal ini menunjukkan bahwa SFM tidak hanya efektif secara teoretis, tetapi juga memiliki relevansi praktis dalam mendukung interaksi antara manusia dan robot pada berbagai skenario nyata.

Integrasi SFM dengan metode kecerdasan buatan semakin memperluas ruang lingkup aplikasinya. Misalnya, penggabungan SFM dengan teknik *machine learning* dapat meningkatkan fleksibilitas dalam pengambilan keputusan navigasi robot sosial [11]. Selain itu, pengembangan *Aerial Social Force Model* memungkinkan drone mendampingi manusia secara aman dengan tetap

mempertimbangkan aspek kenyamanan sosial [12]. Pada skenario darurat, SFM dimanfaatkan untuk merancang strategi evakuasi kerumunan [13], bahkan dimodifikasi menjadi *Improved Social Force Model* guna meningkatkan realisme interaksi antar agen [14]. Selain itu, dukungan *deep learning* turut memperkuat simulasi evakuasi kerumunan sehingga dinamika pergerakan pada kondisi padat dapat diprediksi dengan lebih akurat [15].

Selain dalam interaksi sosial, penerapan *Social Force Model* (SFM) juga meluas pada konteks multi-agennya yang menuntut kecepatan serta koordinasi tinggi. Salah satu contohnya terdapat pada bidang robot sepak bola, di mana SFM dipadukan dengan pengendalian perilaku adaptif berbasis *fuzzy logic* untuk menghasilkan manuver cepat dan koordinatif antar agen [16]. Penelitian lain memanfaatkan *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk mengoptimalkan parameter SFM sehingga pergerakan robot menjadi lebih efisien dan efektif [17]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada navigasi di medan datar. Padahal, medan miring menghadirkan tantangan tambahan berupa perubahan distribusi gaya gravitasi, variasi gaya normal, karakteristik gaya gesek yang lebih kompleks, serta meningkatnya risiko instabilitas robot [18], [19]. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengaruh fisik akibat kemiringan medan belum terintegrasi secara eksplisit dalam formulasi gaya sosial yang digunakan pada sistem navigasi robot.

Berdasarkan kondisi tersebut, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) yang signifikan, yaitu belum adanya model navigasi berbasis *Social Force* yang secara sistematis mengintegrasikan komponen gaya fisik akibat kemiringan medan ke dalam mekanisme pengambilan keputusan adaptif. Ketiadaan integrasi ini membatasi kemampuan robot untuk menyesuaikan gaya dorong, kecepatan, dan arah gerak secara *real-time* pada medan miring, sehingga berpotensi menurunkan stabilitas dan efisiensi navigasi.

Berangkat dari celah tersebut, penelitian ini menggunakan Model *Fuzzy Social Force* (MFSF) sebagai kerangka kendali navigasi adaptif untuk robot beroda pada medan miring. Model ini mengadopsi prinsip dasar *Social Force Model* (SFM) dan mengintegrasikannya dengan mekanisme inferensi fuzzy guna mendukung pengambilan keputusan yang lebih fleksibel. Sistem yang dikembangkan memiliki

kemampuan mendekripsi kemiringan permukaan secara *real-time*, menyesuaikan gaya dorong secara adaptif, serta mempertimbangkan gaya-gaya fisik lain seperti gaya gesekan permukaan. Melalui mekanisme ini, percepatan, kecepatan, dan arah gerak robot dapat disesuaikan secara dinamis terhadap perubahan kondisi medan, sehingga stabilitas dan keamanan pergerakan tetap terjaga.

Dengan integrasi Model *Fuzzy Social Force* (MFSF) dan gaya-gaya fisik yang bekerja pada tubuh robot, sistem navigasi yang dikembangkan diharapkan mampu menghasilkan lintasan pergerakan yang lebih konsisten, stabil, dan efisien pada medan miring. Dalam penelitian ini, istilah adaptif merujuk pada kemampuan sistem untuk menyesuaikan parameter kendali dan respons gerak secara dinamis terhadap perubahan sudut kemiringan (*pitch*) serta gaya-gaya yang memengaruhi kestabilan robot. Mekanisme inferensi fuzzy memungkinkan penyesuaian kecepatan, arah, dan gaya dorong secara *real-time* tanpa memerlukan model kendali yang kaku. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi teoretis melalui pengembangan model kendali navigasi adaptif berbasis MFSF, sekaligus kontribusi praktis dalam memperluas kemampuan robot beroda untuk beroperasi secara andal pada topografi yang menantang [18], [19], [20].

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana membangun Model *Fuzzy Social Force* yang sesuai dengan navigasi *mobile robot* pada bidang miring.
2. Bagaimana mengimplementasikan Model *Fuzzy Social Force* dalam simulasi navigasi *mobile robot* beroda.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengimplementasikan Model *Fuzzy Social Force* ke dalam simulasi *mobile robot* beroda.

2. Menerapkan aturan *fuzzy* pada *Social Force Model* untuk mengoptimalkan navigasi robot agar mampu beradaptasi terhadap berbagai tingkat kemiringan medan.
3. Menganalisis efisiensi waktu pergerakan *mobile robot* beroda dengan membandingkan hasil simulasi menggunakan Model *Fuzzy Social Force* dengan hasil pergerakan robot yang dikendalikan secara manual (tanpa penerapan *fuzzy*).

1.4. Manfaat Penelitian

Penggunaan metode Model *Fuzzy Social Force* pada robot beroda dalam menghadapi beragam kondisi medan. Mempertimbangkan faktor-faktor seperti jenis permukaan, kemiringan, atau keberadaan halangan, sistem dapat menyesuaikan *force* yang digunakan untuk mencapai respon yang optimal dan diharapkan robot dapat mengoptimalkan pergerakan dan menghindari potensi hambatan atau risiko yang terkait dengan kondisi medan yang berbeda.

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah terhadap pada penelitian ini adalah

1. Sistem yang digunakan dalam penelitian ini difokuskan pada pengukuran dan penyesuaian terhadap kemiringan pada orientasi *pitch* suatu robot, dengan penekanan khusus pada konteks pengembangan Model *Fuzzy Social Force* pada bidang miring yang kasar.
2. Penelitian ini membatasi fokusnya pada aspek-aspek tertentu, di mana robot yang digunakan yaitu robot beroda dan tidak secara otomatis memperhitungkan *slip* dan tidak melibatkan proses koreksi terhadap *slip* yang terjadi selama operasionalnya. Dalam konteks pengembangan ini, penelitian akan lebih difokuskan pada penerapan Model *Fuzzy Social Force* pada bidang miring, di mana gaya pada robot akan dipertimbangkan dengan memperhitungkan kemiringan medan.
3. Ruang lingkup pengujian sistem dalam penelitian ini dibatasi pada tiga variasi sudut kemiringan bidang, yaitu 10° , 15° , dan 20° , yang dipilih sebagai representasi tingkat kemiringan rendah, sedang, dan tinggi. Batasan ini

digunakan untuk tujuan pengujian dan validasi performa sistem, tanpa membatasi potensi penerapan model pada sudut kemiringan lain di luar rentang tersebut.

1.6. Hipotesis

Implementasi metode Model *Fuzzy Social Force* pada robot beroda mampu meningkatkan adaptabilitas robot dalam menghadapi berbagai kemiringan medan, sehingga pergerakan robot menjadi lebih stabil dan aman. Optimasi aturan *fuzzy* pada *Social Force* akan menghasilkan penyesuaian yang lebih cepat dan efisien terhadap perubahan kemiringan medan, memungkinkan robot untuk menjaga kecepatan dan arah dengan lebih konsisten dibandingkan metode manual.

1.7. Sistematika Penulisan

Agar struktur dan alur pembahasan dalam karya tulis ini tersaji secara sistematis, maka sistematika penulisan disusun sebagai berikut.

BAB 1 PENDAHULIAN

Bab ini memuat latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, kontribusi, serta manfaat penelitian. Pada bab ini diuraikan dasar-dasar yang melandasi pelaksanaan penelitian, yang selanjutnya dirumuskan ke dalam permasalahan penelitian serta dijabarkan tujuan, kontribusi, dan manfaat yang ingin dicapai.

BAB 2 KAJIAN PUSTAKA

Bab ini menyediakan deskripsi detail mengenai penelitian serupa yang sebelumnya telah dilakukan terkait dengan penelitian tesis yang sedang dilakukan. Selain penelitian terkait, bab ini juga berisi teori-teori yang sesuai dengan ruang lingkup penelitian tesis sebagai dasar dan referensi dalam pekerjaan.

BAB 3 DESAIN SISTEM

Bab ini memberikan penjelasan mengenai desain sistem Model *Fuzzy Social Force* yang diusulkan. Selain itu, juga menjelaskan pekerjaan teknis dari penelitian tesis, mulai dari sistem kinematika hingga *rule base fuzzy* robot beroda.

BAB 4 ESKPERIMEN DAN ANALISIS

Bab ini memberikan penjelasan mengenai tahapan pengujian yang dilakukan pada sistem navigasi yang telah dibangun. Hasil pengujian akan dianalisis baik dari tingkat keberhasilan maupun tingkat kegagalan sistem yang telah dibuat, sehingga dari proses ini dapat terlihat sejauh mana keberhasilan sistem navigasi yang telah dibangun.

BAB 5 PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari seluruh proses penelitian tesis yang telah dilakukan. Selain itu, saran perbaikan dan pengembangan untuk penelitian di masa depan juga dituliskan.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

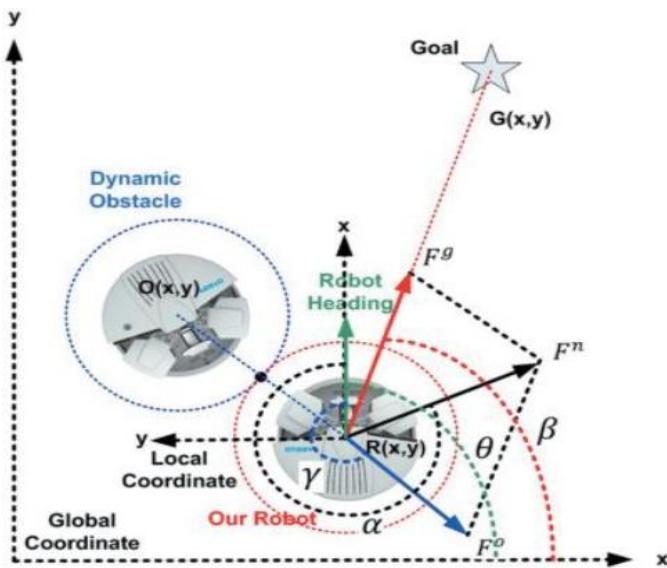
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Sebelum melakukan penelitian, dibutuhkan peninjauan terhadap penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Penelitian sebelumnya digunakan sebagai sarana pencarian referensi seputar topik permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini yaitu navigasi robot menggunakan *social force model*. Adapun beberapa penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi utama dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

Pertama, Penelitian yang dilakukan oleh Bima Sena Bayu Dewantara dan Deby Ariyadi pada tahun 2021 dengan judul *Adaptive Behavior Control for Robot Soccer Navigation Using Fuzzy Based SFM* [16]. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan navigasi *Fuzzy-Social Force Model*. Tujuan dari penelitian ini adalah mengimplementasikan *gain k* yang adaptif berdasarkan jarak halangan terdekat berbasis area *proxemic* robot dan arah datangnya. Implementasi tersebut, digunakan sistem *Fuzzy* untuk memperbesar atau memperkecil gaya tolak yang digunakan oleh robot dalam menghindari halangan. Hal ini bertujuan untuk mencapai tingkat reaktivitas dan daya tanggap robot yang sesuai dengan data yang diterima. **Gambar 2.1** merupakan ilustrasi gaya algoritma SFM.



Gambar 2. 1 Gaya Pada Algoritma SFM

Penelitian ini dilakukan melalui penggunaan perangkat lunak simulasi 3D, yaitu V-REP, dengan menggunakan model robot sepak bola beroda *omnidirectional wheel* dapat dilihat pada **Gambar 2.1**. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan reaktivitas robot dalam menghadapi halangan dinamis. Ketika *gain k* memiliki nilai yang tetap, tingkat keberhasilannya terbatas pada 60%. Namun, dengan menggunakan sistem *Fuzzy* yang memiliki *gain k* yang adaptif, tingkat keberhasilannya meningkat menjadi 70%. Hal ini menjadi dasar bagi penelitian ini untuk mencoba membuat sistem yang lebih adaptif.

Kedua, penelitian yang dilakukan oleh Oscar Gil, Anais Garrell dan Alberto Sanfeliu dengan judul *Social Robot Navigation Tasks: Combining ML Techniques and SFM*. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menunjukkan bahwa kombinasi *Reinforcement Learning* (RL) dan *Social Force Model* dapat mencapai sistem navigasi yang baik dan mampu bernavigasi dengan adanya halangan dinamis (manusia) dalam skenario yang kompleks [11]. Skenario ini melibatkan batasan lingkungan seperti bangunan, objek statis, pejalan kaki, dan kendaraan bergerak lainnya. Penelitian ini terdiri dari dua bagian, di mana percobaan pertama menggunakan hanya RL, sementara percobaan kedua menggunakan sistem hibrida antara RL dan SFM.

Navigasi yang hanya menggunakan *Reinforcement Learning*, seringkali sulit untuk meraih kinerja sistem yang optimal dalam situasi kompleks karena memerlukan penyetelan parameter yang rumit, pembentukan *reward*, dan metode lain yang tidak menjamin peningkatan hasil. Namun, penggunaan SFM dalam percobaan hibrida diharapkan akan berguna dalam mensimulasikan sistem navigasi robot terhadap perilaku manusia dalam berbagai situasi.

Hasil dari simulasi dan eksperimen dengan robot IVO menunjukkan bahwa penggunaan SFM mampu meningkatkan *success rate* dan bermanfaat untuk meningkatkan navigasi robot. Sehingga dalam penelitian ini, kemampuan robot untuk menghindari hambatan meningkat dalam semua kasus ketika SFM ditambahkan di simulasi. Hal ini menghasilkan navigasi yang lebih aman dalam lingkungan *real* yang banyak melibatkan manusia.

Secara garis besar, penelitian mengenai navigasi robot menggunakan *social force model* sudah dilakukan. Namun, kebaharuan dalam penelitian ini terletak pada

integrasi Model *Fuzzy Social Force* dengan kemampuan adaptasi terhadap perubahan kemiringan medan secara *real-time*. Pendekatan ini memberikan kemampuan bagi robot beroda untuk bergerak secara lebih stabil dan efisien pada berbagai kondisi topografi, suatu aspek yang masih jarang dieksplorasi dalam studi sebelumnya. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan sistem navigasi robot yang lebih adaptif dan andal. Dengan demikian, penelitian ini tidak sekadar melanjutkan temuan-temuan terdahulu, melainkan juga menghadirkan inovasi baru dalam upaya meningkatkan kemampuan navigasi robot pada medan yang bervariasi.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. *Social Force Model*

Tingkah laku manusia seringkali dianggap sebagai sesuatu yang acak, tidak teratur, dan sulit diprediksi. Pada tahun 1995, fisikawan bernama Helbing dan Molnar mengembangkan model perilaku individu yang dikenal sebagai *Social Force Model*. *Social Force Model* (SFM) adalah sebuah sistem yang digunakan untuk memprediksi kemungkinan pergerakan agen atau individu berdasarkan gaya tarik dan gaya tolak yang bekerja pada mereka [21]. Sistem ini mempertimbangkan faktor fisik dan sosial yang memengaruhi pergerakan pejalan kaki. *Social Force Model*, terdapat tiga jenis gaya yang mempengaruhi gerakan pejalan kaki, di mana masing-masing gaya ini terinspirasi dari faktor yang berbeda.

1. Gerakan pejalan kaki dipengaruhi oleh interaksi dengan pejalan kaki lainnya. Biasanya, manusia merasa tidak nyaman ketika ada orang asing mendekatinya, yang dapat mengakibatkan reaksi agresif. Oleh karena itu, pejalan kaki akan berusaha menghindari interaksi dengan pejalan kaki asing dalam jarak yang tepat, dan hal ini menjadi dasar dari gaya pada halangan dinamis.
2. Pejalan kaki akan menghindari rintangan statis seperti tembok, gedung, jalan, atau objek lainnya. Mereka akan lebih berhati-hati terhadap objek-objek yang berpotensi menyebabkan cedera fisik atau memberikan rasa tidak nyaman jika mendekatinya.

3. Pejalan kaki terkadang tertarik atau terpengaruh oleh kehadiran orang lain, seperti teman atau seniman jalanan, atau oleh objek tertentu. Ini dapat mengubah arah atau kecepatan gerakan mereka.

Social Force Model, konsep ini dapat diterapkan pada robot untuk menghindari halangan baik yang bersifat dinamis maupun statis. Model ini memberikan *input* gaya dorong dari halangan ke navigasi robot, dan gaya total yang memengaruhi pergerakan robot (F_{nav}) diperoleh melalui penjumlahan tiga variabel: F_g yang merupakan gaya yang dihasilkan oleh robot untuk menuju ke titik tujuan, F_s yang merupakan gaya dari halangan statis, dan F_d yang merupakan gaya dari halangan yang bersifat dinamis. *Social Force Model* memberikan pendekatan yang berguna dalam menggambarkan dan mengimplementasikan interaksi antara robot dengan lingkungannya, yang memungkinkan robot untuk secara adaptif menghindari halangan dinamis dan statis dalam pergerakannya.

$$F_{nav} = F_g + F_s + F_d \quad (2.1)$$

$$F_g = m \cdot a = m \frac{v(t) - v(t-\Delta t)}{t} \quad (2.2)$$

Keterangan :

- F_{nav} : Gaya navigasi robot
- F_g : Gaya tarik robot
- F_s : Gaya dorong halangan statis
- F_d : Gaya dorong halangan dinamis
- m : Berat robot
- a : Percepatan
- t : Waktu
- v : Kecepatan robot

Gaya F_g dalam *Social Force Model* dihitung berdasarkan rumus yang melibatkan berat robot dan percepatan seperti pada Persamaan 1 dan Persamaan 2. Percepatan tersebut diperoleh melalui perhitungan selisih antara kecepatan yang diinginkan dan kecepatan sesungguhnya, kemudian dibagi dengan waktu tempuh yang diperlukan untuk mencapai perubahan tersebut. Perhitungan ini, berat robot

mewakili faktor *massa* yang memengaruhi seberapa kuat gaya tarik atau dorong yang dihasilkan, sementara percepatan menggambarkan seberapa cepat perubahan kecepatan dapat terjadi. Dengan menggunakan rumus tersebut, *Social Force Model* dapat menghitung gaya F_g yang bertindak pada robot dan memperhitungkannya dalam pergerakan dan interaksi dengan lingkungan sekitarnya.

A. Gaya Statis

Gaya statis dalam konteks *Social Force Model* robot terbentuk melalui penjumlahan antara gaya tolak sosial dan gaya tolak fisik. Gaya tolak sosial merujuk pada interaksi sosial antara robot dan objek-objek di sekitarnya, seperti orang-orang atau objek yang tidak bergerak. Sementara itu, gaya tolak fisik melibatkan interaksi fisik antara robot dan objek-objek statis, seperti dinding atau hambatan yang diam.

Ketika robot bergerak, gaya tolak sosial dan gaya tolak fisik saling berinteraksi dan saling mempengaruhi. Gaya tolak sosial berfungsi untuk menjaga jarak yang aman antara robot dan objek-objek di sekitarnya, sehingga mencegah terjadinya tumpukan atau tabrakan. Pada sisi lain, gaya tolak fisik berperan sebagai penghalang fisik yang memberikan gaya tolak saat robot menabrak objek-objek yang tidak bergerak.

$$F_s = f_{soc}^s + f_{phy}^s \quad (2.3)$$

$$f_{soc}^s = K^s \exp\left(\frac{r_R - d_R^s}{\psi^s}\right) + e_R^s \quad (2.4)$$

$$f_{phy}^s = K^s (r_R - d_R^s) e_R^s \quad (2.5)$$

Keterangan :

f_{soc}^s : Gaya tolak sosial robot ke halangan statis

f_{phy}^s : Gaya tolak fisik robot ke halangan statis

K^s : Gain respon robot ke halangan statis

r_R : Radius total robot

e_R^s : Vektor arah ke halangan statis terdekat

Ψ^s : Jarak efektif gaya tolak untuk menghindari halangan statis

d_R^s : Jarak ke halangan statis

B. Gaya Dinamis

Gaya dinamis dalam *Social Force Model* (SFM) muncul ketika terdapat halangan yang bergerak di sekitar robot. Perbedaan utama antara gaya dinamis dan gaya statis terletak pada perubahan posisi serta arah pergerakan halangan dinamis. Untuk mengantisipasi pergerakan halangan dinamis, dalam SFM diberikan *radius area proxemic* yang mengindikasikan kemungkinan pergerakan yang dapat terjadi selanjutnya. Gaya dinamis, yang dinyatakan sebagai F_d , terdiri dari kombinasi gaya tolak sosial dan gaya tolak fisik yang mempengaruhi robot.

Besarnya gaya ini akan berubah secara waktu sesuai dengan kecepatan relatif dan arah pergerakan antara robot dan halangan. Dengan demikian, F_d merepresentasikan interaksi dinamis yang memengaruhi lintasan aktual robot dalam menyesuaikan arah dan kecepatan geraknya terhadap perubahan lingkungan sekitarnya, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$F_d = f_{soc}^d + f_{phy}^d \quad (2.6)$$

$$f_{soc}^d = K^d \exp\left(\frac{r_R - d_R^d}{\Psi^d}\right) + e_R^d \quad (2.7)$$

$$f_{phy}^d = K^d (r_r^d - d_R^d) e_R^d \quad (2.8)$$

$$r_r^d = r_R - d_R^d \quad (2.9)$$

Keterangan :

- f_{soc}^d : Gaya tolak sosial robot ke halangan dinamis
- f_{phy}^d : Gaya tolak fisik robot ke halangan dinamis
- K^d : Gain respon robot ke halangan dinamis
- r_R : Radius total robot
- e_R^d : Vektor arah ke halangan dinamis terdekat
- Ψ^d : Jarak efektif gaya tolak untuk menghindari halangan dinamis
- d_R^d : Jarak ke halangan dinamis

2.2.1.1 Keterbatasan *Social Force Model*

Meskipun *Social Force Model* (SFM) memiliki kemampuan yang baik dalam memodelkan interaksi sosial dan fisik antar individu, penerapannya pada navigasi robot di lingkungan nyata masih menghadapi beberapa keterbatasan.

Pertama, SFM bersifat deterministik, sehingga parameter-parameter seperti gaya tolakan dan jarak efektif ditetapkan secara konstan. Hal ini membuat sistem kurang fleksibel dalam menghadapi ketidakpastian sensor maupun variasi kondisi lingkungan, misalnya pada medan yang tidak rata atau dinamis.

Kedua, model ini sensitif terhadap *noise* sensor dan perubahan mendadak di sekitar robot. Dalam praktiknya, ketidakakuratan data sensor dapat menyebabkan perhitungan gaya menjadi tidak stabil, sehingga menghasilkan perilaku navigasi yang tidak konsisten. Ketiga, SFM klasik cenderung menghasilkan reaksi berlebihan (*overshoot*) terhadap rintangan yang muncul secara tiba-tiba. Kondisi ini dapat menyebabkan robot melakukan manuver yang tidak efisien, bahkan berisiko menimbulkan tabrakan jika lingkungan sangat padat atau sempit.

Selain itu, SFM awalnya dirancang untuk simulasi pejalan kaki di area datar dan terbuka, sehingga kurang optimal ketika diterapkan pada medan kompleks seperti area berbukit, miring, atau permukaan yang tidak rata. Dalam kasus seperti ini, diperlukan mekanisme adaptif yang mampu menyesuaikan respons gaya terhadap variasi kondisi lingkungan. Oleh karena itu, SFM dalam bentuk klasik masih belum cukup untuk memastikan navigasi robot yang stabil, efisien, dan adaptif pada berbagai skenario nyata [21],[22].

2.2.1.2 Model *Fuzzy Social Force* (MFSF)

Untuk mengatasi keterbatasan SFM klasik, sejumlah penelitian mengusulkan integrasi logika fuzzy ke dalam *Social Force Model*, yang dikenal sebagai Model *Fuzzy Social Force* (MFSF). Logika fuzzy memungkinkan representasi pengetahuan yang lebih fleksibel melalui variabel linguistik, seperti “jarak dekat tapi aman” atau “medan cukup curam tapi masih dapat dilalui”. Dengan pendekatan ini, keputusan navigasi tidak lagi hanya didasarkan pada nilai deterministik, tetapi juga mempertimbangkan ketidakpastian dan ambiguitas lingkungan.

Dalam MFSF, parameter-parameter penting pada SFM, seperti respons robot terhadap rintangan atau jarak efektif gaya tolakan, ditentukan secara adaptif melalui *Fuzzy Inference System* (FIS). Input fuzzy dapat berupa jarak ke rintangan, kecepatan relatif, maupun kemiringan medan, sedangkan output fuzzy berupa arah

gerak dan percepatan yang lebih halus. Dengan demikian, robot dapat menyesuaikan gaya navigasi secara dinamis sesuai kondisi aktual.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa MFSF mampu menghasilkan performa navigasi yang lebih baik dibandingkan SFM klasik. Robot yang menggunakan MFSF dapat mengurangi *overshoot*, mempertahankan lintasan yang lebih stabil, dan bergerak lebih efisien dalam mencapai tujuan meskipun berada pada lingkungan padat dan penuh ketidakpastian [16], [23]. Selain itu, integrasi metode optimisasi, seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO), terbukti meningkatkan akurasi parameter fuzzy, sehingga robot dapat bergerak lebih cepat dengan kesalahan arah yang lebih kecil [23].

Dengan keunggulan tersebut, MFSF dianggap sebagai pengembangan penting dari SFM, yang memperluas penerapannya tidak hanya pada simulasi pejalan kaki, tetapi juga pada navigasi robot cerdas di lingkungan nyata. Dengan pendekatan ini, sistem mampu menyesuaikan besar gaya secara halus terhadap perubahan posisi rintangan di sekitar robot. Hal ini menghasilkan gerakan navigasi yang lebih stabil dan realistik dibandingkan SFM konvensional yang memiliki parameter tetap. Secara matematis, gaya total yang bekerja pada robot dalam model MFSF dinyatakan sebagai.

$$F_{MFSF} = F_g + F_s + (F_d + F_a) \quad (2.10)$$

dengan keterangan:

F_{MFSF} : Total gaya pada Model *Fuzzy Social Force* (MFSF), yaitu gaya keseluruhan yang menentukan arah dan kecepatan gerak robot.

F_d : Gaya dorong halangan dinamis.

F_s : Gaya dorong halangan statis.

F_g : Gaya tarik robot

F_a : gaya koreksi adaptif yang bergantung pada nilai penguat k hasil keluaran sistem *fuzzy*.

2.2.2. *Fuzzy*

Fuzzy adalah sistem kecerdasan yang memiliki kemampuan penalaran yang mirip dengan manusia di mana sistem ini mampu merespon informasi yang ambigu

di mana sesuatu tidak hanya ditentukan berdasarkan ya-tidak atau 1-0 [16], [17]. *Fuzzy* memiliki aturan pengambilan keputusan dengan sistem *if-then* berdasarkan *rule base* yang ditentukan, setelah menentukan sendiri *rule base* sesuai pengguna maka tahapan selanjutnya secara umum *Fuzzy* memiliki 3 tahapan yaitu :

1. *Fuzzification*, merupakan langkah awal di mana *Fuzzification* adalah membuat *input* dan *output* data yang berupa *non-Fuzzy* dibuat menjadi sebuah bentuk *Fuzzy* dengan sistem fungsi keanggotaan *rule base Fuzzy* yang memiliki *membership function* (fungsi keanggotaan) pada nilai antara 0-1.
2. *Fuzzy Inference System* (FIS), fungsi nya adalah untuk mengelola nilai keanggotaan hasil dari *fuzzification* berdasarkan *rule base* yang telah dibuat dengan sistem menggunakan logika AND atau OR, proses ini untuk memetakan logika untuk mengambil keputusan. Hal ini dapat digambarkan menggunakan *Fuzzy associative memory*. FIS mendefinisikan sebuah sistem pengambilan keputusan dengan ketentuan *if-then rules*.
3. *Defuzzification*, merupakan tahap akhir yaitu merupakan mengolah kembali nilai linguistik sehingga nilai akhirnya dapat menjadi nilai *non-Fuzzy (crisp)* atau nilai pasti.

2.2.3. Kontrol PID

Kontrol PID merupakan suatu fungsi kontrol yang bertujuan untuk memperbaiki kesalahan (*error*) dengan mengambil selisih antara nilai yang diinginkan dan nilai aktual. PID bekerja secara kontinu untuk terus memperbaiki kesalahan yang terjadi dengan menggunakan tiga komponen utama, yaitu *proporsional*, *integral*, dan *diferensial* [24].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

Keterangan :

- u : Nilai umpan balik PID
- K_p : Konstanta proporsi
- K_i : Kontanta integral
- K_d : Konstanta derivatif
- e : Nilai kesalahan

de : Perubahan nilai kesalahan
 dt : Perubahan waktu

Tiga kontrol pada PID memiliki fungsi yang berbeda-beda. Kontrol proporsional bertujuan untuk mengurangi waktu naik, yaitu waktu yang dibutuhkan agar sistem mencapai nilai yang diinginkan. Kontrol integral memiliki peran penting dalam menghilangkan dengan mengakumulasikan kesalahan sebelumnya dari waktu ke waktu. Namun, efek negatif dari kontrol integral adalah kemungkinan terjadinya *overshoot* pada sistem, yaitu saat sistem melewati nilai setpoint sebelum mencapai kestabilan. Pada sisi lain, kontrol diferensial berfungsi untuk mengurangi *overshoot* awal pada suatu sistem dengan merespons laju perubahan kesalahan. Mengukur perubahan kesalahan dari waktu ke waktu, sehingga kontrol diferensial dapat membantu sistem mencapai kestabilan dengan lebih halus.

Setiap kontrol pada PID diatur dan disesuaikan dengan menggunakan teknik penyetelan (*tunning*). Penyetelan ini melibatkan pengaturan nilai-nilai *gain* pada setiap kontrol untuk memperoleh respons kontroler yang optimal. Respons kontroler dapat dijelaskan melalui respon terhadap kesalahan, tingkat *overshoot* dari nilai setpoint, serta derajat osilasi sistem. Kombinasi dari ketiga kontrol pada PID dan penyetelan *gain* yang tepat akan menghasilkan respons kontroler yang baik sesuai dengan karakteristik sistem yang diinginkan.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Perencanaan, implementasi dan pengujian penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Elektronika dan Kendali Teknik Elektro, Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Komponen Penelitian

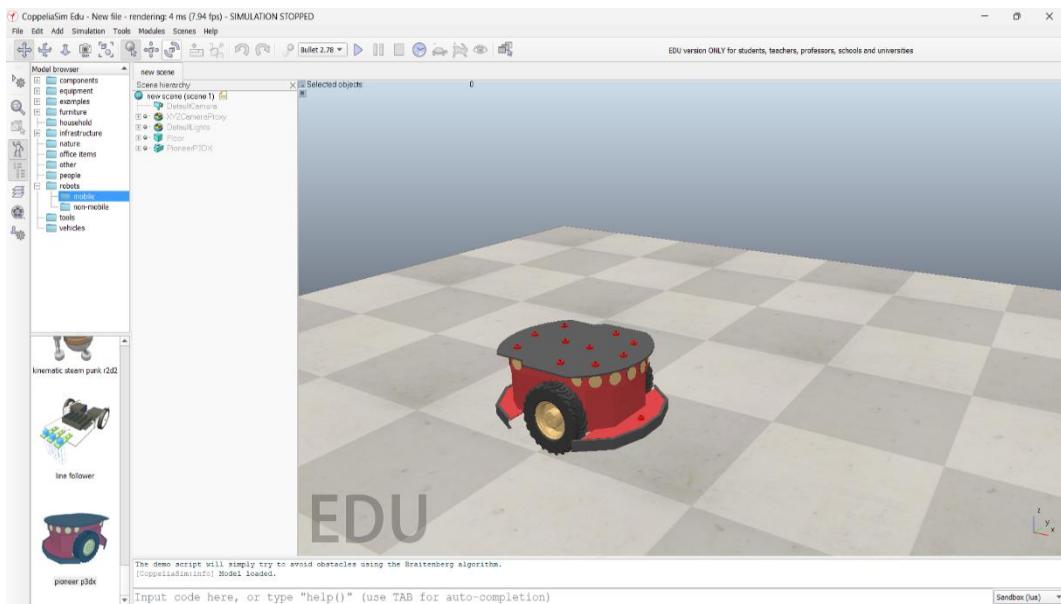
Guna menyelesaikan penelitian dengan baik, perlu melengkapi alat dan aplikasi menjadi satu kesatuan dengan baik. Alat beserta aplikasi yang digunakan sebagai berikut.

1. Sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*)
2. Sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*)
3. Raspberry pi (Mikrokontroller)
4. Driver Motor L298N
5. Motor DC
6. Baterai
7. 1 unit PC/Laptop minimal *core i5* sesuai dengan spesifikasi pemrograman.
8. Aplikasi CoppeliaSim

CoppeliaSim adalah platform simulasi robotika 3D yang memungkinkan pengguna untuk merancang, mensimulasikan, dan menganalisis perilaku sistem robot. Perangkat lunak ini sering digunakan dalam penelitian robotika. Penelitian dan pendidikan menggunakan perangkat lunak ini untuk mempelajari robotika, sistem kontrol, dan kecerdasan buatan. Tampilan perangkat lunak ini dapat dilihat pada **Gambar 3.1**. Salah satu fitur utama CoppeliaSim adalah dukungannya untuk pemrograman robot. Pengguna dapat memprogram perilaku robot mereka menggunakan berbagai bahasa pemrograman, termasuk C/C++, Python, dan Lua.

Dengan memanfaatkan fitur-fitur tersebut, tahap simulasi dijalankan menggunakan CoppeliaSim untuk melakukan proses optimasi sistem. Beberapa skenario simulasi didefinisikan guna mengevaluasi dua pendekatan optimasi, yaitu optimasi parameter statis dan optimasi yang melibatkan parameter dinamis melalui pemodelan benda bergerak. Pendekatan ini memungkinkan analisis kinerja sistem

robot secara lebih komprehensif terhadap variasi kondisi dan karakteristik pergerakan.



Gambar 3. 1 Tampilan Aplikasi CoppeliaSim

3.3. Tahap Pelaksanaan Penelitian

Mekanisme yang dilakukan dalam penelitian ini adalah *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan berbasis simulasi. Penelitian ini merupakan pengembangan metode baru dari penelitian sebelumnya yang melakukan navigasi robot menggunakan *Reinforcement Learning*. Metode tersebut sering kali sulit mencapai kinerja optimal pada medan miring karena memerlukan penyetelan parameter yang kompleks dan pembentukan fungsi *reward* yang sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Pengembangan pada penelitian ini difokuskan pada penerapan Model *Fuzzy Social Force* untuk mempertimbangkan faktor navigasi pada medan miring dalam lingkungan simulasi. Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan utama yang saling berurutan untuk memastikan hasil yang sistematis dan terukur, antara lain sebagai berikut:

3.3.1. Studi Literatur

Tahapan awal penelitian adalah studi literatur yang bertujuan mengidentifikasi posisi dan kebaruan penelitian terkait sistem navigasi robot adaptif. Studi literatur ini juga menjadi dasar dalam perancangan Model *Fuzzy*

Social Force yang digunakan dalam simulasi. Melalui kajian literatur, diperoleh referensi dan hasil penelitian terdahulu yang relevan, yang kemudian dikembangkan untuk mengurangi perubahan gaya dan meningkatkan kestabilan gerak robot ketika melintasi permukaan miring.

3.3.2. Observasi (Simulasi Awal)

Setelah melakukan studi literatur, tahap selanjutnya adalah observasi melalui simulasi awal. Observasi dilakukan dengan mencocokkan hasil referensi yang diperoleh dari penelitian sebelumnya terhadap model yang akan dikembangkan. Tahap ini dilakukan menggunakan aplikasi CoppeliaSim sebagai lingkungan simulasi utama untuk memodelkan dan menguji perilaku navigasi robot beroda pada medan miring.

Pada tahap ini, dilakukan pengujian awal terhadap model kinematika robot virtual guna memperoleh kecepatan dan arah gerak yang sesuai agar robot dapat mencapai titik tujuan dengan efisiensi dan akurasi yang diharapkan. Simulasi di CoppeliaSim memungkinkan peneliti untuk memvisualisasikan dinamika robot secara real-time, termasuk perubahan orientasi, gaya, serta interaksi antara robot dan permukaan medan.

Dalam konteks ini, Model *Fuzzy Social Force* diintegrasikan untuk mengatur kecepatan linear dan sudut arah secara adaptif terhadap kemiringan bidang. Oleh karena itu, integrasi antara model kinematika dan Model *Fuzzy Social Force* pada robot beroda virtual dua roda di CoppeliaSim memiliki peranan penting dalam mengatur pergerakan agar mencapai titik tujuan secara optimal di medan miring yang bervariasi.

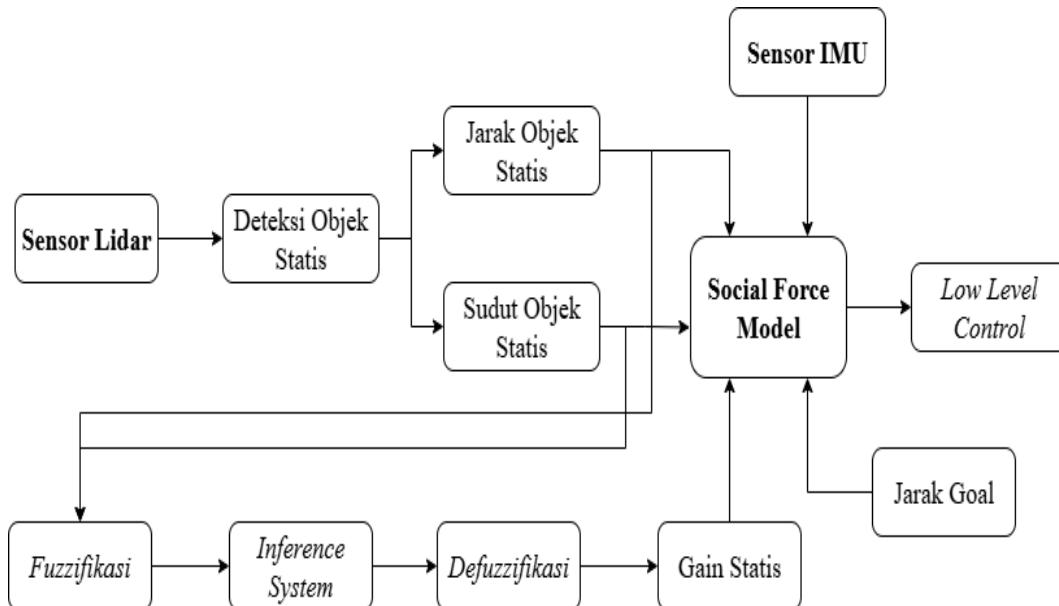
3.4. Desain Sistem Secara Umum

Pada subbab ini dijelaskan rancangan sistem secara umum yang digunakan dalam penelitian dengan memanfaatkan CoppeliaSim sebagai platform simulasi. Rancangan sistem disajikan dalam bentuk blok diagram untuk menggambarkan hubungan antar komponen, alur kerja input–proses–output, serta integrasi antara Model *Fuzzy Social Force* dengan mekanisme navigasi robot.

Secara garis besar, alur kerja sistem diawali oleh sensor LiDAR yang berfungsi mendeteksi jarak serta arah datangnya rintangan di sekitar robot. Data

yang diperoleh dari sensor kemudian dikirimkan ke Model *Fuzzy Social Force* untuk diproses lebih lanjut. Agar sistem mampu beradaptasi dengan kondisi medan miring, sudut kemiringan permukaan dideteksi menggunakan *Inertial Measurement Unit* (IMU). Nilai kemiringan tersebut selanjutnya dikonversi menjadi gaya F, sehingga robot dapat melakukan navigasi secara lebih stabil dan aman.

Seluruh sensor yang digunakan, termasuk LiDAR dan IMU, beserta komponen lain yang mendukung mekanisme navigasi, telah tersedia dan dapat diintegrasikan melalui aplikasi CoppeliaSim. Hal ini memungkinkan proses simulasi *mobile robot* beroda dilakukan secara realistik, mendekati kondisi nyata. Gambaran umum mengenai mekanisme ini dapat dilihat pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3. 2 Blok Diagram *High Level Control*

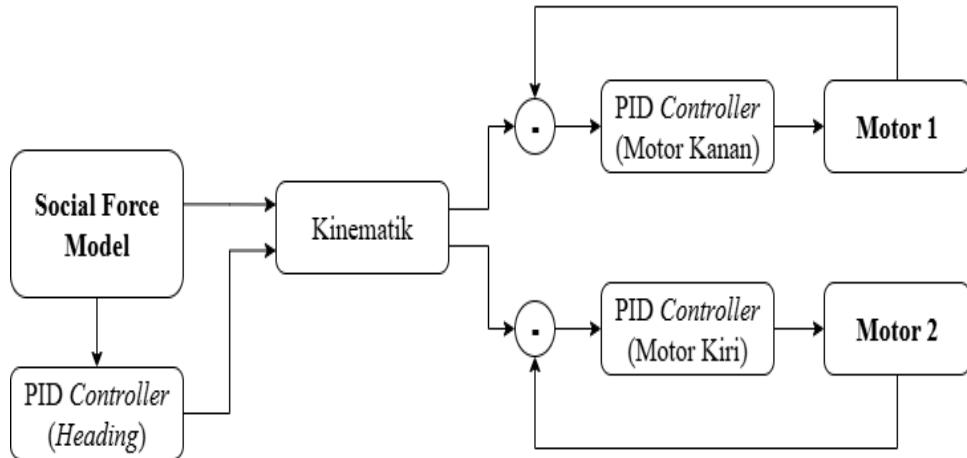
Pada tahap *low level control*, informasi gaya yang dihasilkan oleh *Social Force Model* tidak dapat langsung digunakan sebagai sinyal kendali aktuator. Gaya tersebut harus dikonversi terlebih dahulu menjadi besaran gerak yang dapat dieksekusi oleh robot, seperti percepatan dan kecepatan. **Gambar 3.3** menunjukkan blok diagram *low level*, di mana pada blok diagram ini output dari Social Force Model akan diubah nilainya menjadi nilai kecepatan dengan rumus berikut :

$$F_{Nav_t} = m \cdot a_t \quad (3.1)$$

$$a_t = \frac{F_{Nav_t}}{m} \quad (3.2)$$

$$\frac{V_t - V_{t-1}}{dt} = \frac{FN_{navt}}{m} \quad (3.3)$$

$$V_t = V_{t-1} + \frac{FN_{navt}}{m} dt \quad (3.4)$$



Gambar 3. 3 Blok Diagram *Low Level Control*

Setelah *Social Force Model* menghasilkan informasi gaya navigasi, *heading* robot dikendalikan menggunakan *PID Controller (Heading)*. Output dari *PID Controller* ini berupa koreksi *heading* yang kemudian digabungkan dengan kecepatan linear pada blok kinematik. Pada tahap kinematik, kedua masukan tersebut dikalkulasikan untuk menghasilkan kecepatan roda kanan dan roda kiri sesuai dengan arah pergerakan yang diinginkan.

Selanjutnya, kecepatan hasil perhitungan kinematik dibandingkan dengan kecepatan aktual masing-masing roda melalui dua *PID Controller* terpisah, yaitu untuk motor kanan dan motor kiri. Setiap *PID Controller* akan menghitung selisih antara kecepatan target dan kecepatan aktual roda, kemudian menghasilkan sinyal kontrol korektif agar motor dapat berputar sesuai nilai kecepatan yang diinginkan. Dengan demikian, sistem kendali ini mampu menjaga heading sekaligus kestabilan pergerakan robot dalam mengikuti lintasan menuju target.

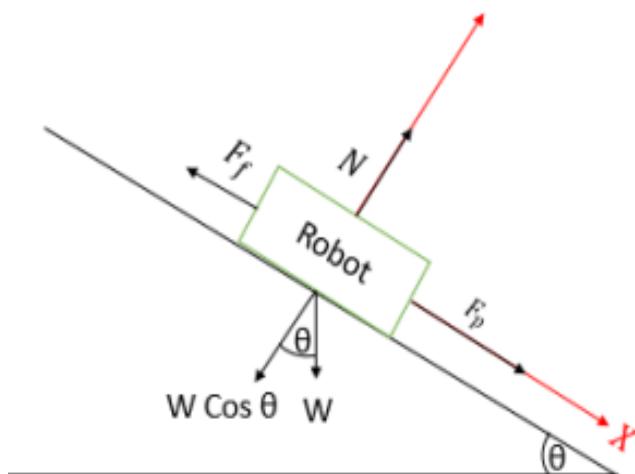
3.5. Perancangan Model *Fuzzy Social Force* Pada Robot

Perancangan ini mencakup beberapa aspek, dimulai dari perancangan *Social Force Model*, perumusan *Rule Base Fuzzy*, pengujian navigasi robot, hingga

pengendalian *heading* dan kecepatan robot dengan memanfaatkan aplikasi CoppeliaSim sebagai platform simulasi.

3.5.1. Social Force Model – Inclined Terrain

Penelitian ini mengusulkan untuk mempertimbangkan faktor medan miring seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.4**. Robot terkadang perlu bennavigasi pada posisi melintasi medan yang miring, maka kondisi licin dapat terjadi dan membuat robot bergeser akibat gaya gravitasi. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan perhitungan terkait gaya-gaya yang mempengaruhi robot saat melintasi jalan miring, dengan tujuan agar *Social Force Model* dapat beradaptasi dengan lebih baik dalam melakukan navigasi.



Gambar 3.4 Gaya Robot di Bidang Miring

Gambar 3.4 memperlihatkan diagram gaya yang bekerja pada robot ketika berada di atas bidang miring dengan sudut kemiringan θ . Pada gambar tersebut, robot dipengaruhi oleh gaya berat (W) yang bekerja vertikal ke bawah, gaya normal (N) yang bekerja tegak lurus terhadap permukaan bidang miring, gaya gesek (F_f) yang bekerja sejajar bidang miring dan berlawanan dengan kecenderungan gerak robot, serta gaya penggerak (F_p) yang dihasilkan oleh aktuator roda dan bekerja searah sumbu x. Sumbu x didefinisikan sejajar dengan bidang miring dan digunakan sebagai acuan analisis pergerakan robot.

Langkah pertama dalam perhitungan ini adalah mencari nilai gaya normal (N) yang bekerja pada robot, yang dapat dinyatakan dalam Persamaan (3.5) hingga

Persamaan (3.7). Persamaan-persamaan ini berkaitan dengan gaya-gaya yang mempengaruhi robot saat melaju di jalan miring.

$$\sum F_y = 0 \quad (3.5)$$

$$N - W \cdot \cos \theta = 0 \quad (3.6)$$

$$N = W \cdot \cos \theta \quad (3.7)$$

Tujuan dari perhitungan ini adalah agar *Social Force Model* dapat beradaptasi dengan lebih baik dalam navigasi robot. Tujuan utamanya adalah menemukan nilai resultan gaya pada sumbu x (ΣF_x) sehingga dapat mengurangi perubahan gaya yang terjadi ketika robot bergerak melintasi permukaan miring.

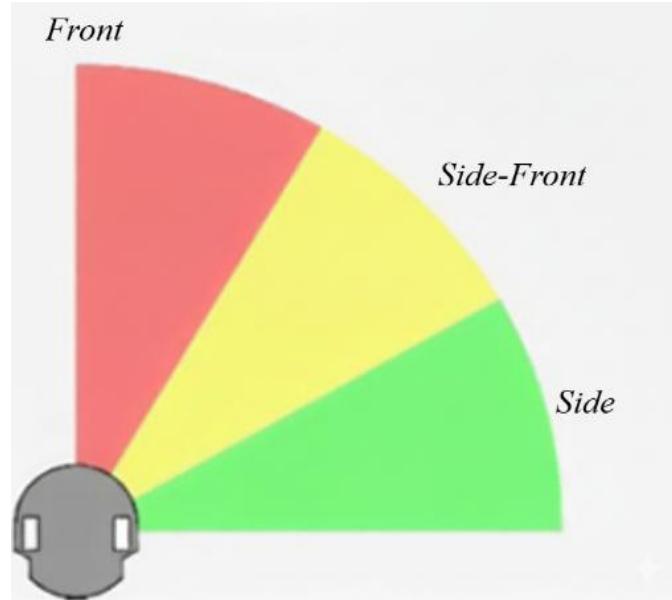
3.5.2. Perancangan Fuzzy

3.5.2.1 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*)

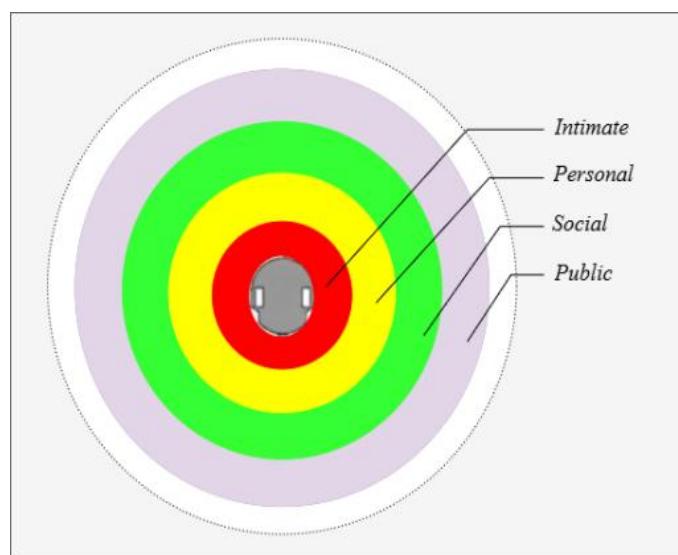
Pada penelitian ini, sistem fuzzy dirancang untuk menghasilkan nilai *gain* (k) yang digunakan dalam Model *Fuzzy Social Force*. Nilai *gain* ini berfungsi sebagai penguat gaya tolak (*repulsive force*) sehingga robot mampu menyesuaikan diri terhadap posisi dan jarak rintangan. Sistem fuzzy memiliki dua variabel input, yaitu *Direction* (γ) dan *Distance* (d), masing-masing dengan domain tertentu dan himpunan linguistik yang merepresentasikan kondisi spasial di sekitar robot.

Variabel *Direction* (γ) didefinisikan pada domain 0^0 - 180^0 , dengan tiga himpunan linguistik yakni *Front* (Depan), *Side-Front* (Serong Depan), dan *Side* (Samping). Sedangkan variabel *Distance* (d) memiliki domain 0-400cm dengan empat himpunan linguistik yakni *Intimate* (sangat dekat), *Personal* (dekat), *Social* (sedang), dan *Public* (jauh). Dengan kedua variabel ini, sistem *fuzzy* mampu merepresentasikan hubungan spasial antara robot dan rintangan secara lebih alami, menyerupai cara manusia menilai risiko tabrakan berdasarkan arah dan jarak objek di sekitarnya.

Visualisasi bentuk fungsi keanggotaan untuk kedua variabel masukan tersebut ditunjukkan pada **Gambar 3.5** dan **Gambar 3.6**, yang menggambarkan hubungan antara derajat keanggotaan dengan perubahan *Direction* dan *Distance* yang menjadi dasar perhitungan dalam Model *Fuzzy Social Force* (MFSF).



Gambar 3. 5 Pembagian Arah Relatif Rintangan Variabel *Direction* (γ)



Gambar 3. 6 Pembagian Arah Relatif Rintangan Variabel *Distance* (d)

3.5.2.2 Rule Base Fuzzy

Rule base fuzzy digunakan untuk memetakan kombinasi antara *Direction* (γ) dan *Distance* (d) menjadi nilai *gain* (k). **Tabel 3.1** berikut menyajikan aturan fuzzy yang digunakan dalam penelitian ini. Aturan-aturan tersebut dirancang untuk menghasilkan respons kendali yang adaptif sesuai dengan kondisi arah dan jarak yang dihadapi sistem.

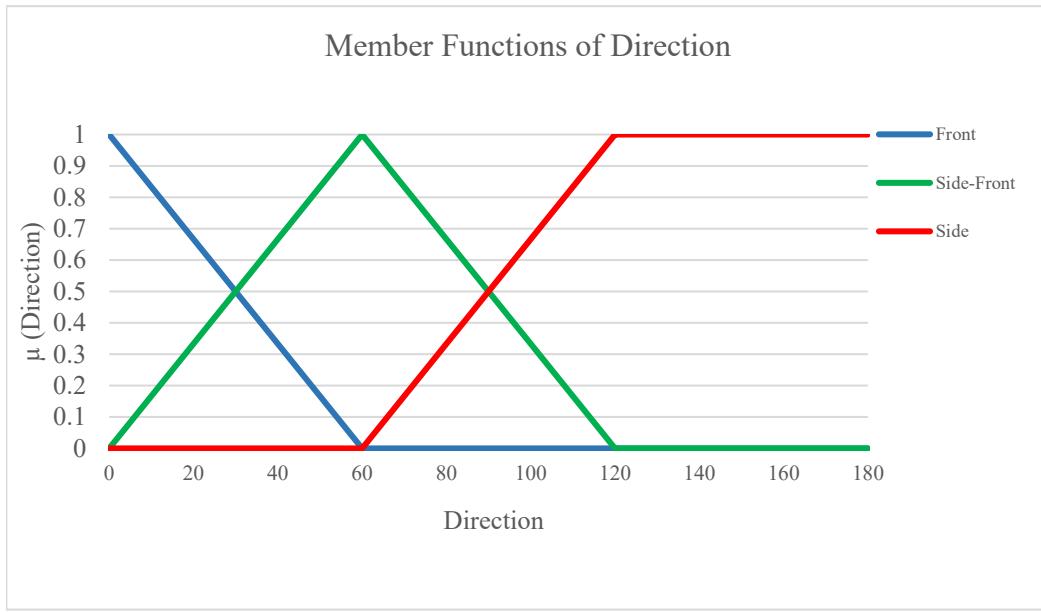
Tabel 3.1 Rule Base Fuzzy Menentukan Nilai Gain (k)

<i>Distance(d)</i> <i>Direction (γ)</i>	<i>Intimate</i>	<i>Personal</i>	<i>Social</i>	<i>Public</i>
Front	50	25	25	25
Side-Front	25	25	12	12
Side	12	6	6	6

Dari **Tabel 3.1 rule base** terlihat bahwa nilai *gain* terbesar ($k = 50$) muncul pada kondisi *Front–Intimate*, karena rintangan sangat dekat di depan robot sehingga berisiko tabrakan dan membutuhkan gaya tolak maksimum. Pada kondisi *Front–Personal*, *Social*, dan *Public*, *gain* diturunkan menjadi $k=25$ karena jarak lebih jauh menandakan risiko lebih kecil. Pada arah *Side-Front*, *gain* lebih rendah dibandingkan *Front*, yaitu $k = 25$ untuk jarak dekat dan $k=12$ untuk jarak lebih jauh. Sementara pada arah *Side*, *gain* paling rendah ($k = 6–12$) karena rintangan tidak langsung menghalangi jalur robot. Secara umum, semakin dekat dan semakin ke depan posisi rintangan, semakin besar *gain* yang diberikan, sebaliknya semakin jauh atau menyamping, *gain* diperkecil.

Pada **Gambar 3.7** ditampilkan fungsi keanggotaan input yang terdiri dari variabel *Direction* (γ) pada **Gambar 3.7 (a)** dan *Distance* (d) pada **Gambar 3.7 (b)**. Variabel *Direction* didefinisikan pada rentang $0^\circ–180^\circ$ dengan tiga himpunan fuzzy, yaitu *Front* pada rentang $0^\circ–60^\circ$, *Side-Front* pada rentang $0^\circ–120^\circ$ dengan puncak di 60° , serta *Side* pada rentang $60^\circ–180^\circ$. Sementara itu, variabel *Distance* berada pada rentang 0–400 cm dengan empat himpunan fuzzy, yaitu *Intimate* pada rentang <40 cm, *Personal* pada rentang 0–60 cm dengan puncak di 30 cm, *Social* pada rentang 50–360 cm dengan puncak di 120 cm, serta *Public* pada rentang 120–400 cm. Pembagian fungsi keanggotaan ini bertujuan untuk merepresentasikan kondisi posisi dan jarak rintangan terhadap robot, sehingga sistem dapat menilai tingkat kedekatan dan arah rintangan secara adaptif. Selain itu, penentuan rentang dan bentuk fungsi keanggotaan disesuaikan dengan karakteristik lingkungan pengujian dan kemampuan sensor yang digunakan. Pendekatan ini memungkinkan sistem fuzzy merespons variasi kondisi secara lebih halus dan berkelanjutan.

Dengan demikian, keputusan kendali yang dihasilkan dapat mendukung pergerakan robot yang lebih aman dan efisien.



Gambar 3. 7 (a) Fungsi Keanggotaan Input Variabel *Direction*

(b) Fungsi Keanggotaan Input Variabel *Distance*

Dengan rancangan fungsi keanggotaan input dan output ini, sistem fuzzy mampu menghasilkan nilai *Gain* (*k*) yang adaptif. Hal ini memungkinkan robot

untuk menyesuaikan intensitas gaya tolak secara proporsional terhadap jarak dan arah rintangan, sehingga navigasi menjadi lebih aman, responsif, dan efisien.

3.5.2.3 Inferensi Fuzzy dengan Metode Sugeno Zero-Order

Proses inferensi dilakukan dengan metode Sugeno Zero-Order, di mana konsekuensi dari setiap aturan fuzzy berupa konstanta nilai *gain* (k). Derajat keanggotaan (μ) dihitung menggunakan Persamaan (3.8) berikut.

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (3.8)$$

Dengan :

- $\mu(x)$: derajat keanggotaan,
- x : nilai *crisp* input,
- a, b, c : batas kiri, pusat, dan batas kanan fungsi keanggotaan.

Keluaran fuzzy dihitung dengan metode rata-rata berbobot (*weighted average*):

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot k_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (3.9)$$

Dengan :

- k_i : konstanta keluaran pada aturan ke- i ,
- μ_i : derajat keanggotaan (*firing strength*) aturan ke- i .

Metode ini memastikan bahwa nilai *gain* (k) yang dihasilkan selalu adaptif terhadap perubahan arah (γ) dan jarak (d) rintangan, sekaligus efisien untuk kebutuhan navigasi robot secara real-time. Inferensi fuzzy pada penelitian ini menggunakan metode Sugeno Zero-Order. Metode ini dipilih karena memiliki bentuk aturan yang lebih sederhana, dimana konsekuensi aturan direpresentasikan sebagai konstanta. Hal ini memudahkan dalam proses komputasi dan implementasi secara real-time, terutama untuk sistem navigasi mobile robot yang membutuhkan

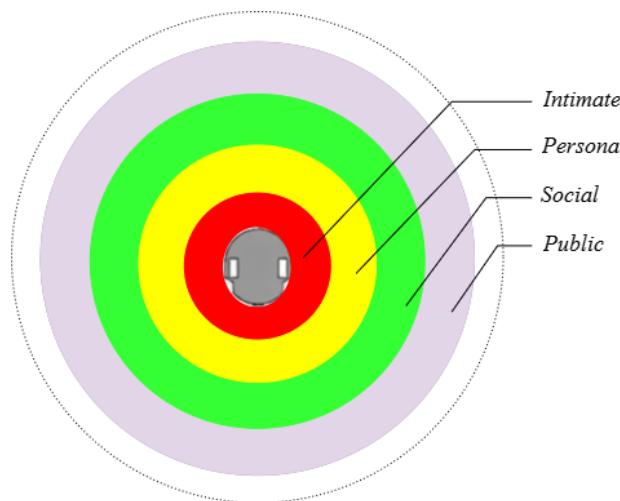
respon cepat dan stabil. Selain itu, Sugeno Zero-Order lebih efisien dibandingkan metode fuzzy lain karena tidak memerlukan proses *defuzzifikasi* yang kompleks.

3.5.3. Navigasi Robot

Tahap awal melakukan hal tersebut adalah melakukan validasi dan kalibrasi sensor IMU dan sensor LiDAR. Kemudian membuat ukuran dari radius *area proxemic* robot. Selanjutnya memperhitungkan gaya yang akan terjadi pada robot dan memberi *input* berdasarkan *output Social Force Model* yang akan diolah lagi menggunakan kontrol *heading* dan kontrol kecepatan agar robot dapat selalu mengarah ke tujuan dan tetap dapat menjaga kecepatan yang diinginkan.

3.5.3.1 Area Proxemic dan Gaya Pada Robot

Gambar 3.8 menjelaskan pembagian area *proxemic* di mana *intimate space* sejauh < 40 cm ditandai pada lingkaran merah, *personal space* sejauh 0-60 cm ditandai dengan lingkaran kuning dan *social space* menjangkau 50-360 cm dengan tanda lingkaran hijau, di luar area tersebut dari 120 cm akan dianggap sebagai *public space* ditandai lingkaran warna abu-abu.



Gambar 3.8 Area Proxemic

3.5.3.2 Kalibrasi dan Validasi Sensor IMU dan LiDAR

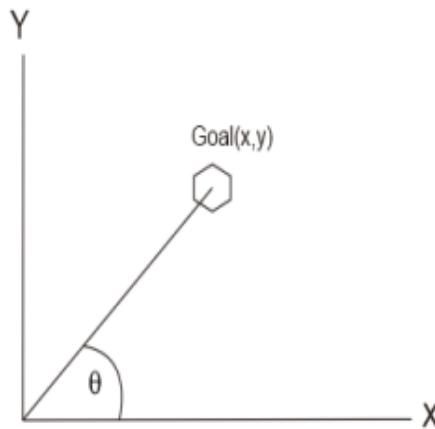
Sensor IMU virtual berfungsi untuk mendeteksi sudut kemiringan bidang serta orientasi robot dengan rentang pembacaan 0° hingga $\pm 180^\circ$. Dalam penelitian ini, robot diuji pada sudut kemiringan 10° , 15° , dan 20° . Karena lingkungan berbasis simulasi, proses *filtering* maupun pemodelan *noise* tidak diterapkan

sehingga data dianggap ideal. Kondisi ini menjadi keterbatasan penelitian, mengingat IMU pada implementasi nyata rentan mengalami noise acak dan drift orientasi. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan penggunaan Kalman Filter atau *Complementary Filter* agar estimasi orientasi lebih stabil dan adaptif terhadap gangguan fisik.

Selain IMU, proses kalibrasi dan validasi juga dilakukan pada sensor LiDAR yang berfungsi mendeteksi objek statis di sekitar robot. Pada sistem ini, LiDAR membaca sudut 0° – 180° serta jarak 0–400 cm sebagai input utama. Kalibrasi dilakukan dengan memastikan bahwa arah pancaran sinar LiDAR sesuai dengan orientasi spasial robot serta bahwa pengukuran jarak berada dalam rentang yang benar untuk setiap zona linguistik. Selanjutnya, validasi dilakukan dengan menguji respons fuzzy pada berbagai skenario posisi objek untuk memastikan konsistensi pembacaan dan ketepatan klasifikasi. Dengan pemetaan linguistik ini, sistem mampu merepresentasikan hubungan spasial antara robot dan rintangan secara lebih alami, menyerupai cara manusia menilai risiko tabrakan berdasarkan arah dan kedekatan objek.

3.5.3.3 Kontrol *Heading* dan Kecepatan Robot

Kontrol PID pada robot ini akan difungsikan sebagai pengontrol *heading* robot atau mengarahkan robot ke arah tujuan dengan mencari nilai *error* yang merupakan selisih antara arah sudut tujuan dengan arah *heading* robot. Penentuan *gain* K_p , K_i dan K_d akan dilakukan dengan cara percobaan dan terus diubah dengan cara melihat secara langsung hasil pergerakan robot sampai mendapatkan nilai yang cukup optimal untuk terus digunakan. **Gambar 3.9** merupakan ilustrasi arah sudut tujuan navigasi robot. Proses penalaan *gain* ini bertujuan untuk meminimalkan kesalahan arah serta mengurangi osilasi selama pergerakan robot. Selain itu, respons sistem diamati berdasarkan kestabilan, kecepatan konvergensi, dan kemampuan robot dalam mempertahankan arah menuju target. Dengan pengaturan *gain* yang tepat, kontrol PID diharapkan mampu menghasilkan pergerakan robot yang halus dan akurat.



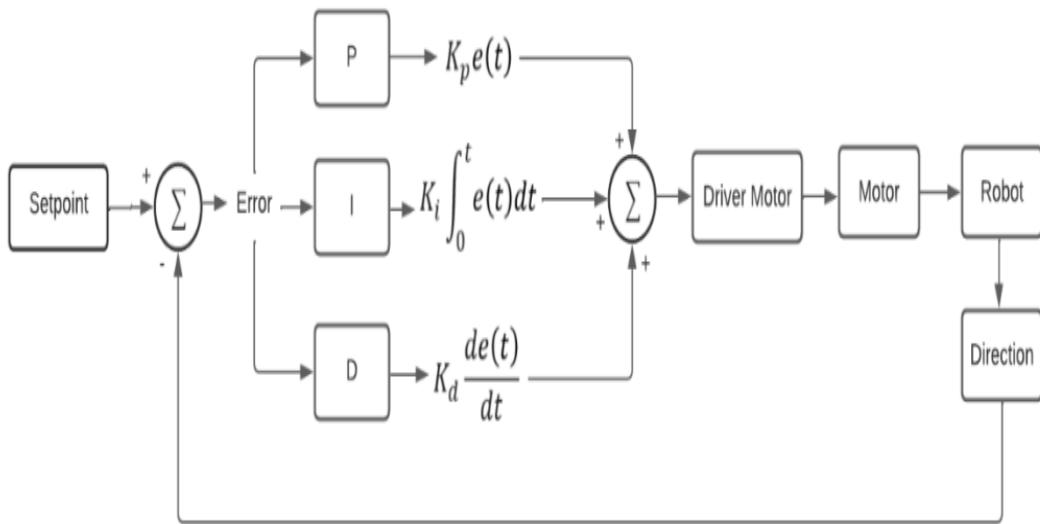
Gambar 3.9 Ilustrasi Arah Sudut Tujuan

Gambar 3.9 menunjukkan nilai yang akan diatur oleh PID adalah arah *heading* robot (θ) agar selalu menghadap ke arah nilai sudut tujuan dari navigasi robot dengan menentukan nilai selisihnya agar dapat diberikan *feedback* ke pergerakan *heading* robot. Rumusnya sebagai berikut.

$$\text{error}(t) = \alpha(t) - \theta(t) \quad (3.10)$$

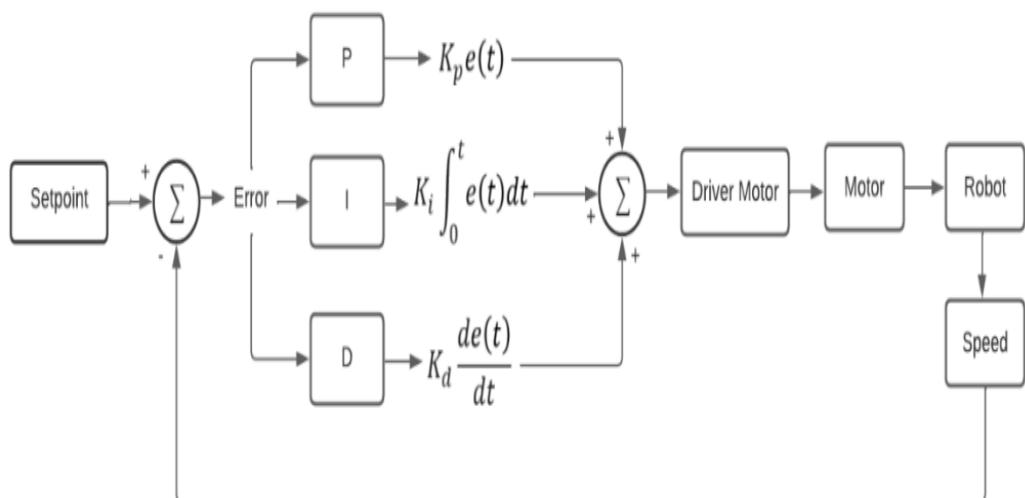
$$V_\theta(t) = K_p \text{error}(t) + K_i \sum \text{error}(t) + K_d (\text{error}(t) - \text{error}(t-1)) \quad (3.11)$$

PID juga akan mengontrol kecepatan motor agar tidak terjadi selisih yang cukup jauh dari yang diinginkan, sehingga di sini PID memiliki 2 peran yaitu kontrol heading dan juga kontrol kecepatan. Kedua mekanisme kontrol ini bekerja secara simultan untuk memastikan bahwa robot tidak hanya bergerak menuju arah yang benar, tetapi juga mempertahankan laju gerak yang stabil selama proses navigasi. Dengan demikian, keluaran PID menjadi elemen penting dalam menjaga respons gerak robot tetap halus dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Blok diagram kontrol PID dapat dilihat pada **Gambar 3.10** dan **Gambar 3.11**. Pengaturan ini membantu robot bergerak lebih terkendali saat terjadi perubahan arah atau kecepatan secara tiba-tiba. Selain itu, koordinasi antara kontrol arah dan kecepatan dapat mengurangi getaran serta gerakan yang tidak diinginkan. Hal ini membuat pergerakan robot menjadi lebih aman dan efisien selama pengujian.



Gambar 3. 10 Kontrol PID *Heading* Robot

Gambar 3.10 menunjukkan blok diagram kontrol PID untuk pengendalian *heading* robot. Nilai *setpoint* dibandingkan dengan arah aktual robot sehingga dihasilkan sinyal *error*. Sinyal *error* tersebut diproses oleh tiga komponen PID, yaitu P untuk mempercepat respons terhadap kesalahan, I untuk mengurangi kesalahan *steady-state*, dan D untuk meredam perubahan error yang cepat. Keluaran dari ketiga komponen ini dijumlahkan dan diteruskan ke driver motor untuk mengatur kerja motor, sehingga robot dapat menyesuaikan arah geraknya agar tetap mengarah ke tujuan yang diinginkan.



Gambar 3. 11 Kontrol PID Kecepatan robot

Gambar 3.11 menunjukkan blok diagram kontrol PID untuk pengendalian kecepatan robot. Nilai *setpoint* kecepatan dibandingkan dengan kecepatan aktual robot sehingga dihasilkan sinyal *error*. Sinyal *error* tersebut kemudian diproses oleh komponen P, I, dan D, di mana bagian proporsional berfungsi menyesuaikan respons kecepatan, bagian integral mengurangi kesalahan kecepatan secara bertahap, dan bagian derivatif membantu meredam perubahan kecepatan yang terlalu cepat. Keluaran PID selanjutnya dikirimkan ke driver motor untuk mengatur putaran motor, sehingga kecepatan robot dapat dipertahankan tetap stabil sesuai dengan nilai yang diinginkan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Model *Fuzzy Social Force* (MFSF) berhasil diimplementasikan pada simulasi mobile robot beroda menggunakan CoppeliaSim. Implementasi ini memungkinkan robot memodelkan interaksi gaya sosial secara adaptif, sehingga robot mampu menyesuaikan arah dan kecepatan navigasi terhadap perubahan kondisi lingkungan, khususnya pada medan miring dan lingkungan dengan keberadaan *obstacle*.
2. Penerapan mekanisme *fuzzy* pada *Social Force Model* menunjukkan kestabilan navigasi yang lebih baik dibandingkan SFM konvensional pada seluruh sudut kemiringan yang diuji. Pada medan miring 10° , sistem MFSF mampu menyesuaikan kecepatan secara bertahap dari $12\text{--}13$ m/s hingga 4 m/s, sedangkan sistem SFM cenderung mempertahankan kecepatan lebih tinggi dengan penyesuaian yang lebih terbatas. Pada medan 15° , MFSF menurunkan kecepatan dari puncak $17\text{--}18$ m/s hingga $1\text{--}3$ m/s secara terkendali, sementara SFM masih bergerak pada kisaran $7\text{--}9$ m/s saat terjadi perubahan *pitch* yang signifikan. Pada medan 20° , MFSF mampu menurunkan kecepatan hingga $0\text{--}2$ m/s ketika sudut *pitch* mencapai sekitar -30° , sedangkan SFM tetap mempertahankan kecepatan yang lebih tinggi, sehingga menunjukkan keterbatasan adaptasi pada kondisi medan yang ekstrem.
3. Dari sisi efisiensi waktu tempuh, sistem MFSF menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan SFM konvensional dan pengendali PID. Berdasarkan hasil pengujian pada lintasan sepanjang 10 meter, MFSF mampu meningkatkan efisiensi waktu tempuh sebesar 31,25% pada sudut kemiringan 10° dan 40% pada sudut kemiringan 15° dibandingkan SFM konvensional. Pada sudut kemiringan 20° , peningkatan efisiensi waktu tempuh relatif lebih kecil, yaitu 4,76%, akibat dominasi pengaruh gaya gravitasi dan keterbatasan

traksi roda. Selain itu, dibandingkan dengan pengendali PID konvensional, MFSF menunjukkan peningkatan efisiensi waktu tempuh sebesar 37,89% pada medan miring 20° , yang menegaskan keunggulan MFSF dalam menghasilkan navigasi yang lebih adaptif dan stabil pada kondisi medan yang menantang.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengimplementasikan Model *Fuzzy Social Force* (MFSF) pada robot nyata, sehingga kinerja sistem dapat diuji secara langsung pada kondisi lingkungan fisik yang sesungguhnya.
2. Untuk penerapan pada mobile robot beroda, disarankan menggunakan konfigurasi dua roda penggerak (*differential drive*) agar respons gaya dan kestabilan navigasi dapat bekerja lebih optimal.
3. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan dengan memperluas aturan dan parameter *fuzzy* serta menguji sistem pada kondisi lingkungan yang lebih kompleks dan dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. F. B. Silva, A. V. Santos, M. A. Meggiolaro, and M. S. Neto, “A rough terrain traction control technique for all-wheel-drive mobile robots,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 32, no. 4, pp. 489–501, 2010, doi: 10.1590/S1678-58782010000400011.
- [2] C. Gehring *et al.*, “Dynamic trotting on slopes for quadrupedal robots,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 2015-Decem, pp. 5129–5135, 2015, doi: 10.1109/IROS.2015.7354099.
- [3] M. Focchi, A. del Prete, I. Havoutis, R. Featherstone, D. G. Caldwell, and C. Semini, “High-slope terrain locomotion for torque-controlled quadruped robots,” *Auton. Robots*, vol. 41, no. 1, pp. 259–272, 2017, doi: 10.1007/s10514-016-9573-1.
- [4] B. S. B. Dewantara and J. Miura, “Generation of a socially aware behavior of a guide robot using reinforcement learning,” *Proc. - 2016 Int. Electron. Symp. IES 2016*, no. February, pp. 105–110, 2017, doi: 10.1109/ELECSYM.2016.7860984.
- [5] C. Wang, Y. Li, S. S. Ge, and T. H. Lee, “Adaptive control for robot navigation in human environments based on social force model,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 2016-June, pp. 5690–5695, 2016, doi: 10.1109/ICRA.2016.7487791.
- [6] A. Colombo *et al.*, “Behavioural templates improve robot motion planning with social force model in human environments,” *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA*, no. September, 2013, doi: 10.1109/ETFA.2013.6648081.
- [7] B. S. B. Dewantara, “Building a socially acceptable navigation and behavior of a mobile robot using Q-learning,” *2016 Int. Conf. Knowl. Creat. Intell. Comput. KCIC 2016*, pp. 88–93, 2016, doi: 10.1109/KCIC.2016.7883630.
- [8] G. Ferrer, A. Garrell, and A. Sanfeliu, “Robot companion: A social-force based approach with human awareness-navigation in crowded environments,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 1688–1694, 2013, doi: 10.1109/IROS.2013.6696576.

- [9] M. Luber, J. A. Stork, G. D. Tipaldi, and K. O. Arras, “People tracking with human motion predictions from social forces,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 464–469, 2010, doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509779.
- [10] S. Silva, D. Paillacho, N. Verdezoto, and J. D. Hernandez, “Towards Online Socially Acceptable Robot Navigation,” *IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng.*, vol. 2022-Augus, no. August, pp. 707–714, 2022, doi: 10.1109/CASE49997.2022.9926686.
- [11] Ó. Gil, A. Garrell, and A. Sanfeliu, “Social robot navigation tasks: Combining machine learning techniques and social force model,” *Sensors*, vol. 21, no. 21, 2021, doi: 10.3390/s21217087.
- [12] A. Garrell, L. Garza-Elizondo, M. Villamizar, F. Herrero, and A. Sanfeliu, “Aerial social force model: A new framework to accompany people using autonomous flying robots,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 2017-Septe, pp. 7011–7017, 2017, doi: 10.1109/IROS.2017.8206627.
- [13] I. Sakour and H. Hu, “Robot-assisted crowd evacuation under emergency situations: A survey,” *Robotics*, vol. 6, no. 2, 2017, doi: 10.3390/robotics6020008.
- [14] P. Regier, I. Shareef, and M. Bennewitz, “Improving navigation with the social force model by learning a neural network controller in pedestrian crowds,” *2019 Eur. Conf. Mob. Robot. ECMR 2019 - Proc.*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ECMR.2019.8870923.
- [15] X. Li, Y. Liang, M. Zhao, C. Wang, H. Bai, and Y. Jiang, “Simulation of evacuating crowd based on deep learning and social force model,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 155361–155371, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2949106.
- [16] B. S. B. Dewantara and B. N. D. Ariyadi, “Adaptive Behavior Control for Robot Soccer Navigation Using Fuzzy-based Social Force Model,” *Smart Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 14–29, 2021, doi: 10.1080/23080477.2021.1871799.
- [17] Anugerah Wibisana, Bima Sena Bayu Dewantara, and Dadet Pramadihanto, “Implementasi Particle Swarm Optimization untuk Optimasi Fuzzy-Social Force Model pada Sistem Navigasi Robot Omnidirectional,” *Indones. J. Comput. Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 501–518, 2022, doi:

- 10.33022/ijcs.v11i2.3076.
- [18] X. Zhu, C. Qiu, and M. A. Minor, “Terrain inclination aided three-dimensional localization and mapping for an outdoor mobile robot,” *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 10, 2013, doi: 10.5772/54957.
 - [19] Z. Kausar, K. Stol, and N. Patel, “The effect of terrain inclination on performance and the stability region of two-wheeled mobile robots,” *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 9, 2012, doi: 10.5772/52894.
 - [20] A. V. Pesterev and L. B. Rapoport, “Stabilization problem for a wheeled robot following a curvilinear path on uneven terrain,” *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, vol. 49, no. 4, pp. 672–680, 2010, doi: 10.1134/S1064230710040155.
 - [21] D. Helbing and P. Molnár, “Social force model for pedestrian dynamics,” *Phys. Rev. E*, vol. 51, no. 5, pp. 4282–4286, 1995.
 - [22] D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek, “Simulating dynamical features of escape panic,” *Nature*, vol. 407, no. 6803, pp. 487–490, 2000, doi: 10.1038/35035023.
 - [23] A. WIBISANA, B. S. B. DEWANTARA, and D. PRAMADIHANTO, “Development of an Omni Directional based Mobile Robot Navigation System using Optimized-Fuzzy Social Force Model,” *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 10, no. 4, p. 961, 2022, doi: 10.26760/elkomika.v10i4.961.
 - [24] J. Lin and T. Ni, “Research on Optimized Motion Control of Soccer Robot Based on Fuzzy-PID Control,” *Proc. - 2018 5th Int. Conf. Inf. Sci. Control Eng. ICISCE 2018*, no. 2016, pp. 952–956, 2018, doi: 10.1109/ICISCE.2018.00197.
 - [25] A. S. Priambodo, A. Nasuha, and O. A. Dhewa, “Integrated Implementation of Computer vision and PID Control for Dynamic Speed Control of Line follower Robot,” *Telekontran J. Ilm. Telekomun. Kendali dan Elektron. Terap.*, vol. 12, no. 1, pp. 81–93, 2024, doi: 10.34010/telekontran.v12i1.13323.