**TELEKONTRAN: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan**
Vol. 13, No. 2, Oktober 2025
DOI : 10.34010/telekontran.v13i2.17895
p-ISSN : 2303 – 2901; e-ISSN : 2654 – 7384


# Model Fuzzy Social Force Untuk Kendali Navigasi Robot Beroda Pada Bidang Miring

# *Fuzzy Social Force Model for Wheeled Robot Navigation Control on an Inclined Terrain*

**Rici Riansyah*, Sri Purwiyanti, Arinto Setyawan**
Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No.1, Gedong Meneng, Rajabasa, Kota Bandar Lampung
Email* : riciriansyah28@gmail.com

**Abstrak -** 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 51,71 hingga 59,24 detik, sedangkan model *Social Force* konvensional memerlukan waktu antara 79,61 hingga 88,59 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.

***Abstract -*** *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 ten 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 51.71 to 59.24 seconds, while the conventional Social Force model requires 79.61 to 88.59 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.*

# I. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi robotika otonom telah membawa dampak signifikan dalam berbagai bidang seperti industri, logistik, hingga sistem penyelamatan bencana. Salah satu tantangan utama dalam pengembangan robot *mobile* adalah kemampuan navigasi adaptif pada medan miring, di mana pengaruh gaya gravitasi dan gaya gesekan dapat menyebabkan penurunan stabilitas, peningkatan konsumsi energi, serta risiko slip yang tinggi. Berdasarkan hasil penelitian eksperimental, perubahan sudut kemiringan antara 10° hingga 20° dapat menyebabkan penurunan kecepatan hingga 30% dan peningkatan konsumsi daya hingga 35% pada sistem robot beroda [1]. Kondisi tersebut menegaskan kebutuhan akan sistem navigasi cerdas yang mampu beradaptasi terhadap perubahan kemiringan medan guna menjaga stabilitas dan efisiensi pergerakan.

Dalam konteks navigasi robot, *Social Force Model* (SFM) telah menjadi pendekatan populer dalam memodelkan interaksi antaragen serta penghindaran rintangan [2]. Model ini banyak diterapkan untuk pengaturan lintasan dan penghindaran tabrakan melalui pemodelan gaya sosial antara robot dan lingkungannya [3]. Selain interaksi sosial, penerapan SFM juga berkembang pada konteks multi-agen yang menuntut kecepatan dan koordinasi tinggi [4]. Contohnya, dalam bidang robot sepak bola, SFM dipadukan dengan pengendalian perilaku adaptif berbasis *fuzzy logic* untuk menghasilkan manuver cepat dan terkoordinasi antar-agen [5]. Studi lain memanfaatkan *Particle Swarm Optimization* (PSO) guna mengoptimalkan parameter SFM sehingga pergerakan robot menjadi lebih efisien [6].

Penelitian yang dilakukan oleh Dewantara dan Ariyadi mengembangkan *Fuzzy-Social Force Model* (FSFM) untuk navigasi robot sepak bola. Dengan memanfaatkan sistem *fuzzy*, nilai gain *k* diatur secara adaptif berdasarkan jarak halangan terdekat dan arah datangnya, sehingga reaktivitas robot terhadap hambatan dinamis meningkat [5]. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak V-REP menunjukkan peningkatan tingkat keberhasilan navigasi dari 60% menjadi 70% ketika nilai *gain k* bersifat adaptif. Sementara itu, Gil, Garrell, dan Sanfeliu mengombinasikan reinforcement learning dan SFM untuk meningkatkan efektivitas navigasi pada skenario kompleks yang melibatkan manusia dan hambatan dinamis [7]. Eksperimen menggunakan robot IVO menunjukkan bahwa penambahan SFM mampu meningkatkan keberhasilan navigasi sekaligus mengurangi risiko tabrakan.

Selain itu, penelitian oleh Kartika dkk. memperkenalkan robot penghisap debu cerdas berbasis logika *fuzzy* Takagi–Sugeno yang mampu beradaptasi terhadap kondisi ruangan kompleks dengan menggabungkan data sensor jarak dan debu dalam sistem *fuzzy* [8]. Hasilnya, navigasi menjadi lebih presisi, efisien, dan responsif terhadap perubahan lingkungan. Sedangkan penelitian Budi Herdiana dkk. mengusulkan integrasi computer vision dan kendali PID pada robot line follower untuk meningkatkan akurasi lintasan pada kondisi pencahayaan bervariasi [9]. Kedua penelitian tersebut memperlihatkan kemajuan dalam integrasi kecerdasan buatan pada sistem navigasi robot, namun masih berfokus pada lingkungan datar, belum mencakup pengaruh fisik akibat kemiringan permukaan.

Berdasarkan kajian tersebut, dapat diidentifikasi adanya *research gap* bahwa sebagian besar penelitian navigasi robot berbasis SFM dan *fuzzy logic* masih terbatas pada medan datar. Padahal, medan miring menghadirkan tantangan tambahan berupa distribusi gaya dorong yang tidak merata, perubahan komponen gaya gravitasi, serta peningkatan risiko instabilitas. Kondisi ini menuntut adanya model navigasi baru yang tidak hanya memperhatikan aspek sosial dan perilaku adaptif, tetapi juga dapat menyesuaikan gaya fisik akibat variasi kemiringan medan secara *real-time*.

Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian ini mengusulkan Model Fuzzy Social Force (MFSF) sebagai pengembangan dari SFM yang dilengkapi dengan pemodelan gaya bidang miring (*Inclined Force Modelling*) dan integrasi sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) guna mendeteksi sudut kemiringan secara *real-time*. Nilai kemiringan yang diperoleh digunakan sebagai input sistem *fuzzy* untuk menyesuaikan gaya gravitasi dan gesekan terhadap arah dan percepatan robot. Melalui perancangan *rule-base fuzzy* adaptif, sistem mampu mengoreksi arah dan kecepatan robot agar tetap stabil pada berbagai tingkat kemiringan medan.

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan dan menguji Model Fuzzy Social Force (MFSF) sebagai sistem navigasi adaptif bagi robot beroda yang mampu menyesuaikan gaya dorong, gaya gesekan, dan percepatan berdasarkan perubahan kemiringan permukaan. Model ini diharapkan dapat meningkatkan stabilitas dan efisiensi waktu navigasi dibandingkan *Social Force Model* konvensional. Validasi dilakukan menggunakan simulasi CoppeliaSim pada variasi kemiringan 10°,

15°, dan 20° untuk mengukur peningkatan efisiensi waktu tempuh dan kestabilan gerak robot.

Kebaruan penelitian ini terletak pada kombinasi antara *Social Force Model*, inferensi logika *fuzzy*, dan deteksi kemiringan berbasis IMU dalam satu sistem adaptif. Integrasi ini memungkinkan perhitungan gaya gravitasi dan gesekan sebagai variabel kendali dinamis, yang belum pernah diterapkan dalam model SFM sebelumnya. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi dalam memperluas penerapan *Social Force Model* dari lingkungan datar menuju medan fisik yang lebih realistis, menghasilkan sistem navigasi robot yang lebih stabil, efisien, dan adaptif terhadap variasi kemiringan medan.

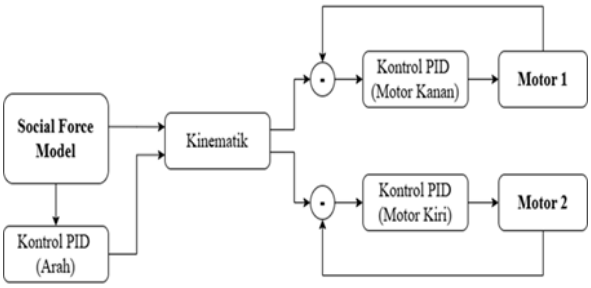
# II. METODOLOGI

## A. Desain Secara Umum

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

Secara keseluruhan, alur kerja sistem diawali oleh sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*) yang berfungsi mendeteksi jarak serta arah kedatangan rintangan di sekitar robot [10]. Data hasil pengukuran kemudian dikirimkan ke Model Fuzzy Social Force (MFSF) untuk diproses lebih lanjut. Agar sistem mampu beradaptasi terhadap kondisi medan miring, sudut kemiringan permukaan diperoleh melalui Sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) [11]. Nilai kemiringan tersebut selanjutnya dikonversi menjadi gaya koreksi (*F*), sehingga robot dapat melakukan navigasi secara lebih stabil, aman, dan adaptif. Gambaran umum mengenai mekanisme sistem ini ditunjukkan pada **Gambar 1**.

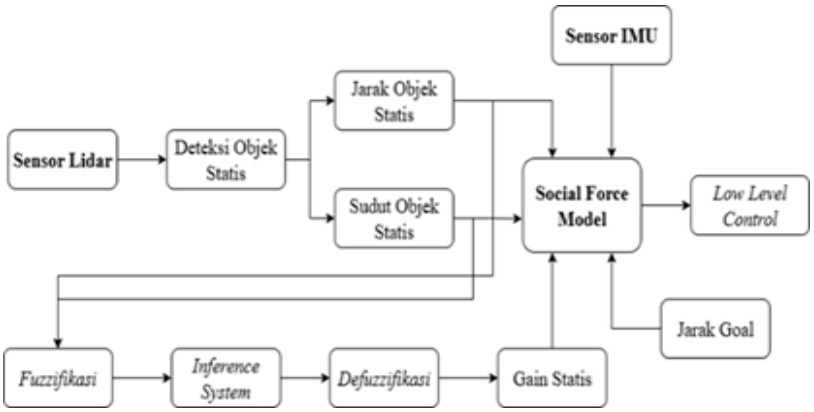
Seluruh sensor yang digunakan, termasuk sensor LiDAR dan IMU, beserta komponen pendukung navigasi lainnya, dapat diintegrasikan melalui aplikasi CoppeliaSim. Dengan demikian, proses simulasi *mobile robot* beroda dapat dilakukan secara realistis dan mendekati kondisi nyata. **Gambar 2** menunjukkan blok diagram *low level control*, di mana pada blok diagram ini output dari *Social Force Model.*




**Gambar 2.** Blok Diagram *Low Level Control*

Setelah *Social Force Model* menghasilkan informasi gaya navigasi, arah robot dikendalikan menggunakan Kontrol PID (Arah). Output dari Kontrol PID ini berupa koreksi arah (*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 Kontrol PID terpisah, yaitu untuk motor kanan dan motor kiri. Setiap Kontrol PID 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 arah (*heading)* sekaligus kestabilan pergerakan robot dalam mengikuti lintasan menuju target.




**Gambar 1.** Blok diagram *High Level Control*

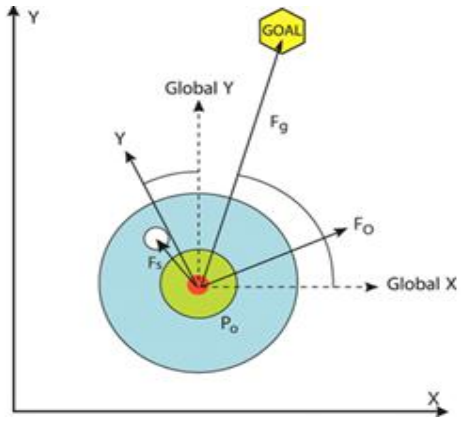
## B. *Social Force Model*

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 [12]. *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.

$$F_{nav} = F_g + F_s + F_d \quad (1)$$

$$F_g = m.a = m\frac{v(t) - v(t-\Delta t)}{t} \quad (2)$$

*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. **Gambar 3** merupaka ilustrasi pergerakan robot di bidang miring.




**Gambar 3.** Gaya Robot di Bidang Miring

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.

$$F_s = f_{soc}^s + f_{phy}^s \quad (3)$$

$$f_{soc}^s = K^s exp\left(\frac{r_R - d_R^s}{\Psi^s}\right) + e_R^s \quad (4)$$

$$f_{phy}^s = K^s\,(r_R - d_R^s)e_R^s \quad (5)$$

Gaya dinamis dalam *Social Force Model* muncul ketika terdapat halangan yang bergerak di sekitar robot. Perbedaan utama antara gaya dinamis dan gaya statis terletak pada perubahan posisi dan arah pergerakan halangan dinamis. Untuk mengantisipasi pergerakan halangan dinamis, dalam *Social Force Model* 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.

$$F_d = f_{soc}^d + f_{phy}^d \quad (6)$$

$$f_{soc}^d = K^d exp\left(\frac{r_R - d_R^d}{\Psi^d}\right) + e_R^d \quad (7)$$

$$f_{phy}^d = K^d\,(r_r^d - d_R^d)e_R^d \quad (8)$$

$$r_r^d = r_R - d_R^d \quad (9)$$

Berdasarkan formulasi gaya dorong, sosial, dan dinamis pada persamaan (1) hingga (9), setiap simbol fisik memiliki arti dan satuan tersendiri. Untuk menjaga konsistensi dan memudahkan pemahaman, **Tabel I** berikut menyajikan daftar notasi dan definisi variabel yang digunakan dalam *Social Force Model (SFM)*.

**Tabel I.** Notasi dan definisi variabel pada model SFM

| Simbol | Definisi | Satuan |
|---|---|---|
| $F_{nav}$ | Gaya total navigasi robot | N |
| $F_g$ | Gaya tarik robot | N |
| $F_s$ | Gaya dorong halangan statis | N |
| $F_d$ | Gaya dorong halangan dinamis | N |
| $m$ | Massa robot | kg |
| $a$ | Percepatan robot | $m/s^2$ |
| $t$ | Waktu | s |
| $v$ | Kecepatan robot | m/s |
| $f_{soc}^s$ | Gaya tolak sosial robot ke halangan statis | N |
| $f_{phy}^s$ | Gaya tolak fisik robot ke halangan statis | N |
| $K^s$ | Gain respon robot ke halangan statis | – |
| $r_R$ | Radius total robot | m |
| $e_R^s$ | Vektor arah ke halangan statis terdekat | - |
| $\Psi^s$ | Jarak efektif gaya tolak untuk menghindari halangan statis | m |
| $d_R^s$ | Jarak antara robot dan halangan statis | m |
| $f_{soc}^d$ | Gaya tolak sosial robot ke halangan dinamis | N |
| $f_{phy}^d$ | Gaya tolak fisik robot ke halangan dinamis | N |
| $K^d$ | Gain respon robot ke halangan dinamis | – |
| $e_R^d$ | Vektor arah ke halangan dinamis terdekat | - |
| $\Psi^d$ | Jarak efektif gaya tolak untuk menghindari halangan dinamis | m |
| $d_R^d$ | Jarak antara robot dan halangan dinamis | m |

## C. Model Fuzzy Social Force (MFSF)

Model Fuzzy Social Force (MFSF) dikembangkan sebagai perluasan dari *Social Force Model* (SFM) untuk mengatasi keterbatasan model konvensional dalam menyesuaikan diri terhadap kondisi lingkungan yang berubah secara waktu nyata [5]. Pada SFM konvensional, parameter gaya seperti penguat gaya sosial beserta dinamis ($K^s, K^d$) dan jarak efektif gaya tolakan ($\Psi^s, \Psi^d$) bernilai tetap (konstan), sehingga sistem menjadi kurang adaptif ketika robot menghadapi variasi arah dan jarak terhadap rintangan di sekitarnya. Dalam MFSF, nilai penguat gaya sosial ( $k$ ) ditentukan secara adaptif menggunakan Sistem Inferensi *Fuzzy* (*Fuzzy Inference System*). Sistem *fuzzy* berfungsi sebagai pengatur dinamis yang menyesuaikan besar gaya tolak (*repulsive force*) sesuai posisi relatif antara robot dan rintangan. Sistem ini memiliki dua variabel masukan, yaitu arah dan jarak, sedangkan keluarannya berupa nilai penguat gaya (*gain*) $k$ yang digunakan dalam perhitungan gaya sosial pada MFSF.

1. Variabel arah menunjukkan sudut relatif antara robot dan rintangan, dengan domain 0–180°.
2. Variabel jarak menunjukkan jarak linear antara robot dan rintangan, dengan domain 0–400 cm.
3. Keluaran *fuzzy* yaitu nilai penguat gaya $k$, digunakan untuk mengatur intensitas gaya tolak sosial secara adaptif berdasarkan kondisi arah dan jarak tersebut.

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 realistis dibandingkan SFM konvensional yang memiliki parameter tetap. Secara matematis, gaya total yang bekerja pada robot dalam model MFSF dinyatakan sebagai.

$$F_{MFSF} = F_g + F_s + (F_d + F_a) \quad (10)$$

dengan keterangan:

| | | |
|---|---|---|
| $F_{MFSF}$ | : | Total gaya pada Model Fuzzy Social Force (MFSF), yaitu gaya keseluruhan yang menentukan arah dan kecepatan gerak robot (N). |
| $F_d$ | : | Gaya dorong halangan dinamis (N). |
| $F_s$ | : | Gaya dorong halangan statis (N). |
| $F_g$ | : | Gaya tarik robot |
| $F_a$ | : | gaya koreksi adaptif yang bergantung pada nilai penguat $k$ hasil keluaran sistem *fuzzy* (N). |

Pendekatan ini membuat model gaya menjadi lebih adaptif dan responsif terhadap kondisi posisi dan arah rintangan, sehingga pergerakan robot menjadi lebih halus dan stabil, terutama saat melakukan navigasi di medan miring dengan distribusi gaya yang kompleks.

## D. Perancangan Sistem Fuzzy

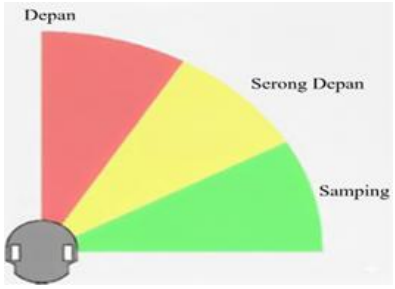
Untuk merealisasikan integrasi antara metode *fuzzy logic* dan *Social Force Model (SFM)*, diperlukan suatu perancangan sistem yang mampu memetakan kondisi lingkungan ke dalam bentuk representasi linguistik. Perancangan ini berfokus pada penentuan variabel input, fungsi keanggotaan, serta aturan *rule base fuzzy* yang berfungsi menghasilkan nilai penguat (*gain*) $k$ adaptif [12].

### 1. Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*)

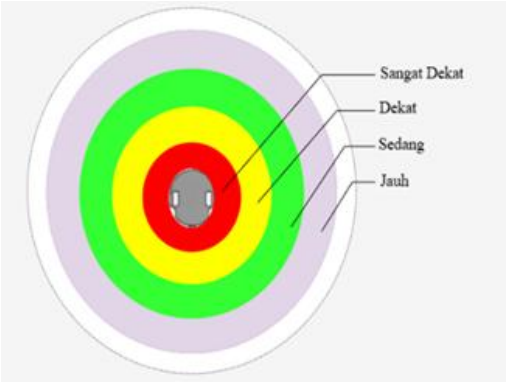
Pada penelitian ini, sistem *fuzzy* dirancang untuk menghasilkan nilai penguat (*gain*) $k$ pada Model Fuzzy Social Force (MFSF), yang berfungsi sebagai pengatur besar gaya tolak agar robot mampu menyesuaikan diri terhadap posisi serta jarak terhadap rintangan di sekitarnya. Sistem ini memiliki dua variabel masukan, yaitu arah (γ) dan jarak ($d$).

a. Variabel arah (γ) memiliki domain 0–180°, dengan tiga himpunan linguistik, yaitu Depan pada rentang 0–40°, Serong Depan pada rentang 40–140°, dan Samping pada rentang 120–180°.
b. Variabel jarak ($d$) memiliki domain 0–400 cm dengan empat himpunan linguistik, yaitu Sangat Dekat pada rentang 0–100 cm, Dekat pada rentang 50–150 cm, Sedang pada rentang 150–300 cm, dan Jauh pada rentang 300–400 cm.

Visualisasi bentuk fungsi keanggotaan untuk kedua variabel masukan tersebut ditunjukkan pada **Gambar 4** dan **Gambar 5**, yang menggambarkan hubungan antara derajat keanggotaan dengan perubahan arah dan jarak yang menjadi dasar perhitungan dalam Model Fuzzy Social Force (MFSF).

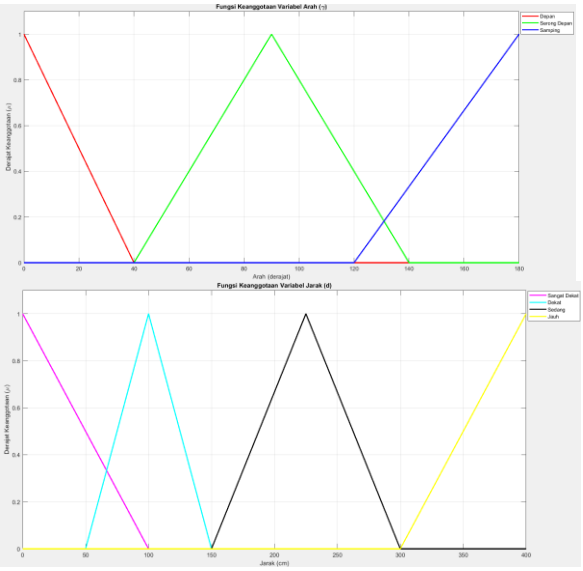



**Gambar 4.** Pembagian Arah Relatif Rintangan Variabel Arah (γ)




**Gambar 5.** Pembagian Arah Relatif Rintangan Variabel Jarak (***d***)

Representasi ini memperlihatkan bagaimana posisi dan jarak rintangan dipetakan ke dalam himpunan linguistik sebelum diproses lebih lanjut. Dengan pengaturan tersebut, sistem *fuzzy* mampu merepresentasikan hubungan spasial antara robot dan rintangan secara lebih alami, menyerupai cara manusia menilai risiko tabrakan berdasarkan arah serta jarak objek di sekitarnya. Berikut ini **Gambar 6** yang merupakan fungsi keangotaan input.



**Gambar 6.** Fungsi Keangotaan Input

Dari **Gambar 6** diatas sistem *fuzzy* dirancang dengan dua variabel input utama, yaitu Arah ($\gamma$) dan Jarak ($d$). Melalui kedua variabel ini, sistem *fuzzy* dapat menilai tingkat risiko tabrakan secara bertahap dan fleksibel, sehingga memberikan representasi yang lebih realistis terhadap persepsi spasial robot dalam lingkungannya.

### 2. *Rule Base Fuzzy*

*Rule base fuzzy* digunakan untuk memetakan kombinasi antara Arah ($\gamma$) dan Jarak ($d$) menjadi nilai gain ($k$). **Tabel II** berikut menyajikan aturan *fuzzy* yang digunakan dalam penelitian ini dalam menentukan nilai *gain* ($k$).

**Tabel II.** *Rule Base Fuzzy* Menentukan Nilai *Gain* (***k***)

| Arah | Jarak | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Sangat Dekat | Dekat | Sedang | Jauh |
| Depan | 50 | 25 | 25 | 25 |
| Serong Depan | 25 | 25 | 12 | 12 |
| Samping | 12 | 6 | 6 | 6 |

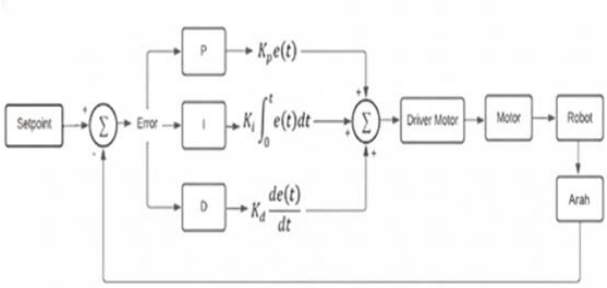
## E. Perancangan Kontrol PID

Kontrol PID pada robot ini akan difungsikan sebagai pengontrol arah robot atau mengarahkan robot ke arah tujuan dengan mencari nilai *error* yang merupakan selisih antara arah sudut tujuan ($\alpha(t)$) dengan sudut arah robot ($\theta(t)$). Nilai parameter penguat $K_p$, $K_i$, dan $K_d$ ditentukan melalui proses penyetelan manual (*manual tuning*) yang dilakukan secara eksperimental dengan mengamati secara langsung respons pergerakan robot hingga diperoleh nilai parameter yang optimal [13]. Persamaan kendali PID yang digunakan ditunjukkan pada Persamaan (11) dan Persamaan (12).

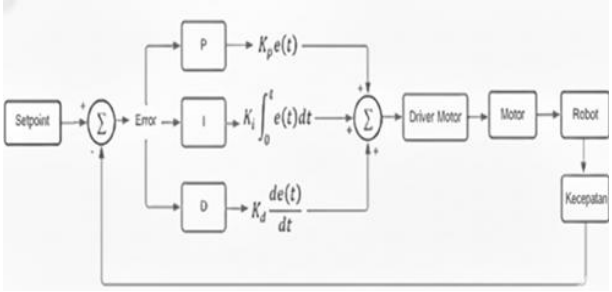
$$error\ (t) = \alpha(t) - \theta(t) \tag{11}$$

$$V_\theta(t) = K_p error(t) + K_i \sum error\ (t) + K_d(error\ (t) - error\ (t-1) \tag{12}$$

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 arah dan kontrol kecepatan. Blok diagram sistem kontrol PID dapat dilihat pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**.




**Gambar 7.** Kontrol PID Arah Robot




**Gambar 8.** Kontrol PID Kecepatan Robot

Setelah dilakukan beberapa kali proses penyetelan manual (*manual tuning*), diperoleh nilai parameter kendali PID yang digunakan pada sistem, yaitu $K_p = 1{,}20, K_i = 0{,}35$ dan $K_d = 0{,}15$. Nilai-nilai tersebut ditetapkan berdasarkan hasil pengamatan terhadap respons sistem selama proses simulasi, sehingga diperoleh kombinasi parameter yang mampu menghasilkan pergerakan robot yang halus dan stabil. Dengan penerapan parameter tersebut, kendali PID berfungsi secara efektif dalam menjaga keseimbangan antara respons sistem dan kestabilan arah gerak robot pada saat proses navigasi.

Dengan penerapan kendali PID yang telah disesuaikan melalui proses penyetelan manual, sistem navigasi robot mampu mempertahankan arah gerak yang stabil dan responsif terhadap perubahan posisi maupun kondisi medan. Setelah tahap perancangan kendali ini, langkah berikutnya adalah melakukan kalibrasi dan validasi sensor IMU untuk memastikan bahwa data sudut kemiringan dan orientasi yang digunakan dalam sistem kendali memiliki akurasi yang memadai.

### F. Kalibrasi dan Validasi Sensor IMU

Sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*) virtual berfungsi untuk mendeteksi sudut kemiringan bidang serta orientasi robot [14]. Data orientasi yang dihasilkan memiliki rentang pembacaan 0° hingga ±180° dengan resolusi sekitar 0,1° per satuan waktu. Frekuensi pengambilan data (*sampling rate*) diatur sebesar 100 Hz, sehingga setiap 0,01 detik sistem memperoleh pembaruan nilai sudut secara kontinu.

Dalam penelitian ini, robot diuji pada sudut kemiringan tertentu, yaitu 10°, 15°, dan 20°. Karena sistem yang digunakan berbasis simulasi, proses penyaringan sinyal (*filtering*) dan pemodelan noise tidak diterapkan. Oleh sebab itu, hasil pengukuran dianggap ideal dan bebas gangguan. Kondisi ini menjadi salah satu keterbatasan penelitian, karena pada implementasi nyata sensor IMU rentan terhadap noise acak dan drift kumulatif akibat faktor lingkungan dan getaran. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan penerapan Kalman Filter atau *Complementary Filter* guna memperoleh estimasi sudut yang lebih akurat dan stabil pada kondisi nyata.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

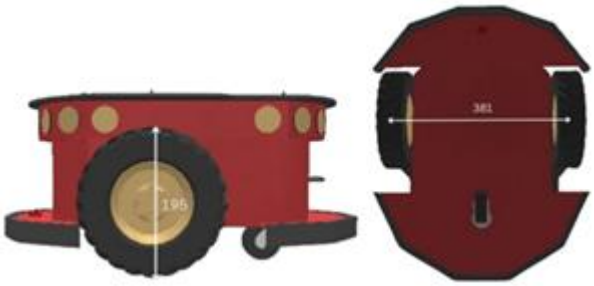
### A. Simulasi CoppeliaSim

Simulasi MFSF dilakukan menggunakan aplikasi CoppeliaSim dengan implementasi algoritma melalui Bahasa C++. Dalam simulasi ini, robot dimodelkan untuk bergerak dari posisi awal hingga posisi akhir, di mana sejumlah halangan akan ditempatkan untuk mengevaluasi efektivitas navigasi robot berdasarkan MFSF yang telah dikembangkan. Pendekatan ini memungkinkan pengujian iteratif dan analisis perilaku robot dalam kondisi yang beragam tanpa risiko kerusakan perangkat keras atau bahaya bagi manusia. Skrip Lua dikembangkan dalam lingkungan CoppeliaSim untuk mengatur aktuasi motor dalam simulasi, sehingga memungkinkan penyesuaian kecepatan linear dan orientasi sudut secara presisi, serta pemodelan interaksi robot dengan lingkungan secara komprehensif, termasuk deteksi halangan, strategi penghindaran tabrakan, dan respons adaptif terhadap dinamika medan. Dengan menggunakan simulasi, peneliti dapat melakukan optimisasi parameter MFSF secara efisien dan memastikan validitas algoritma. Spesifikasi lengkap dari semua perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini tercantum dalam **Tabel III**.

**Tabel III.** Spesifikasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

| Hardware dan Software | Deskripsi |
|---|---|
| **Laptop** | Dell Latitude |
| **Processor** | Intel Core i7 |
| **RAM** | 32 GB DDR4 |
| **SDD** | 512 GB |
| **Sistem Operasi dan Software** | Visual Studio Code, CoppeliaSim, Python |

Dalam konteks pengujian robot, berat robot ditetapkan sekitar 9 kg, dan bidang miring disusun dengan kemiringan sebesar 10°, 15°, dan 20°. Semua pengaturan ini dirancang untuk mencapai hasil simulasi yang akurat dan representatif, memastikan bahwa simulasi mencerminkan dengan baik kondisi nyata yang dihadapi oleh robot dalam skenario tertentu. Ukuran roda dan jarak antar roda dapat dilihat pada **Gambar 9**.

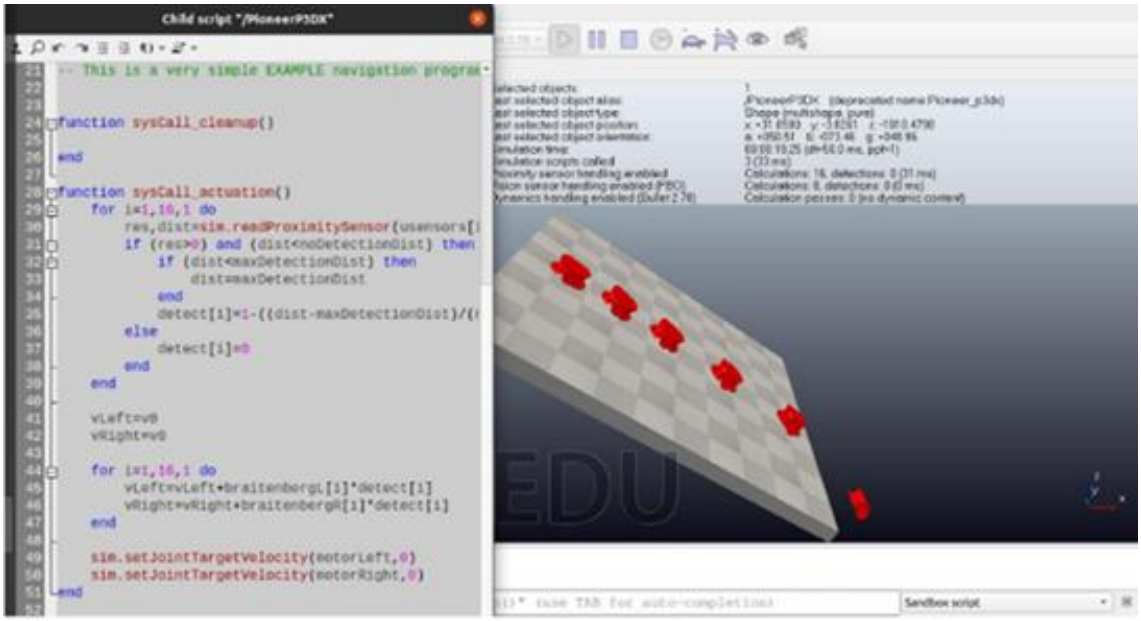



**Gambar 9.** Diameter dan Jarak Roda Robot Pioneer

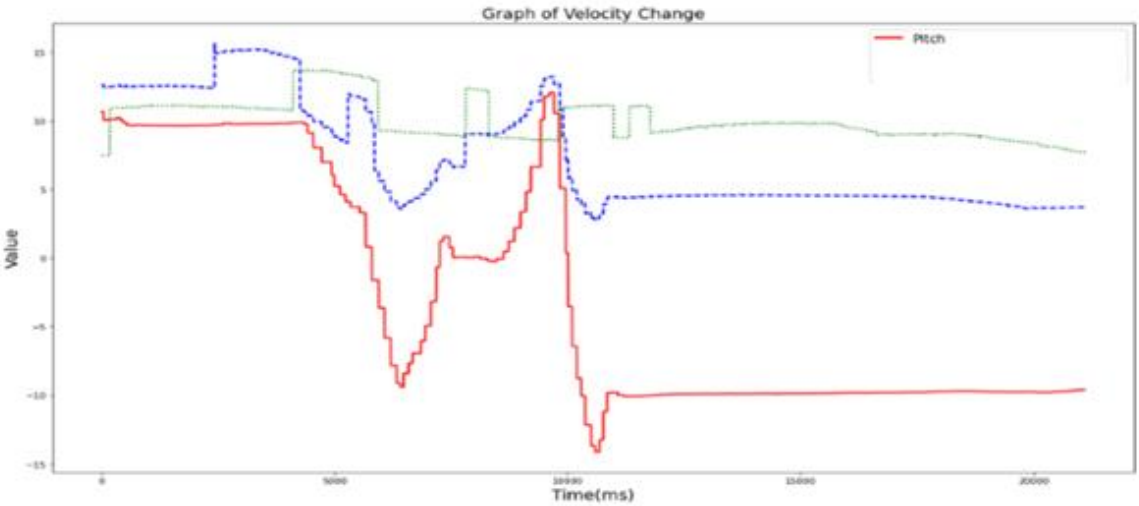
Pada **Gambar 10** dilakukan pengujian gaya gravitasi menggunakan simulasi di CoppeliaSim. Pada gambar tersebut, meskipun robot tidak diberikan kecepatan awal, robot tetap melaju di sepanjang bidang miring yang telah dirancang dalam simulasi. Pengamatan ini menunjukkan bahwa robot mengalami akselerasi meskipun tidak ada kecepatan awal yang diterapkan, yang diakibatkan oleh pengaruh gaya gravitasi pada bidang miring. Hal ini membuktikan bahwa CoppeliaSim mampu merepresentasikan dengan cukup baik efek-efek fisika yang terjadi, seperti gaya gravitasi dan akselerasi pada robot ketika berada di permukaan miring. Dengan demikian, hasil pengujian ini mengkonfirmasi bahwa simulasi di CoppeliaSim dapat diandalkan untuk mensimulasikan perilaku dinamis robot dalam kondisi miring, memungkinkan untuk memahami lebih dalam tentang interaksi antara gaya gravitasi dan gerakan robot dalam lingkungan virtual yang diatur oleh CoppeliaSim.

## B. Pengujian MFSF Sudut 10 Derajat

Pengujian ini membandingkan hasil dalam dua kondisi yakni menggunakan MFSF dengan SFM konvensial dengan mempertimbangkan gaya-gaya pada bidang miring yaitu menanjak 10° dan menurun 10° dan tanpa mempertimbangkan gaya tersebut. Selanjutnya, diperlukan data hasil pengujian untuk menunjukkan perbedaan yang jelas antara kedua sistem yang telah dijalankan. **Gambar 11** merupakan pengujian pada miring 10°.




**Gambar 10.** Pengujian Gaya Gravitasi




**Gambar 11.** Perubahan Kecepatan pada Bidang Miring 10°

Pada **Gambar 11** terlihat bahwa kecepatan robot yang menerapkan MFSF ditunjukkan oleh garis biru putus-putus menunjukkan respons yang lebih adaptif terhadap perubahan kemiringan medan, yang direpresentasikan oleh garis merah (*pitch*). Sistem dengan MFSF mampu menyesuaikan kecepatan secara dinamis seiring dengan variasi sudut kemiringan, sehingga pergerakannya menjadi lebih stabil dan terkontrol. Sebaliknya, robot tanpa penerapan MFSF ditunjukkan oleh garis hijau titik-titik menunjukkan fluktuasi kecepatan yang relatif lebih acak dan kurang responsif terhadap perubahan medan. Hal ini mengindikasikan bahwa model MFSF memiliki kemampuan lebih baik dalam menyesuaikan gaya dorong terhadap kondisi medan miring, menghasilkan navigasi yang lebih stabil, serta mempercepat proses adaptasi terhadap halangan di sekitarnya.

## C. Pengujian MFSF Sudut 15 Derajat

Pada pengujian kedua, terlihat perbedaan yang cukup signifikan antara pergerakan robot yang menggunakan MFSF dan yang tidak. Sistem dengan MFSF menunjukkan kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap perubahan kemiringan bidang, sehingga pergerakannya menjadi lebih efisien dan stabil. Sementara itu, sistem tanpa MFSF cenderung mempertahankan kecepatan secara konstan tanpa mampu menyesuaikan gaya dorong terhadap kondisi medan miring.

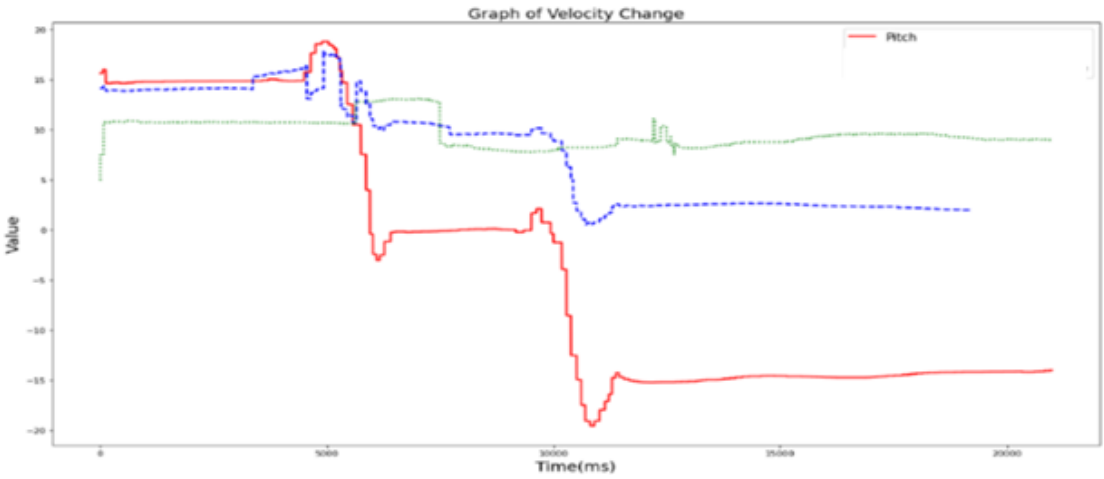
Untuk menganalisis lebih lanjut perubahan kecepatan, sudut kemiringan, dan gaya yang dihasilkan, dilakukan pengamatan terhadap grafik hasil pengujian. **Gambar 12** menunjukkan hasil pengujian pada bidang miring 15°.

Berdasarkan **Gambar 12**, terlihat bahwa robot yang tidak menggunakan MFSF (garis hijau, titik-titik) memperlihatkan pola kecepatan yang relatif statis dengan perubahan yang tidak signifikan. Sebaliknya, robot yang menerapkan MFSF (garis biru, putus-putus) menunjukkan dinamika kecepatan yang lebih responsif terhadap perubahan medan. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan MFSF meningkatkan kemampuan sistem dalam menyesuaikan gaya gerak sesuai kondisi kemiringan, menghasilkan stabilitas yang lebih baik serta efisiensi dalam navigasi di medan miring.

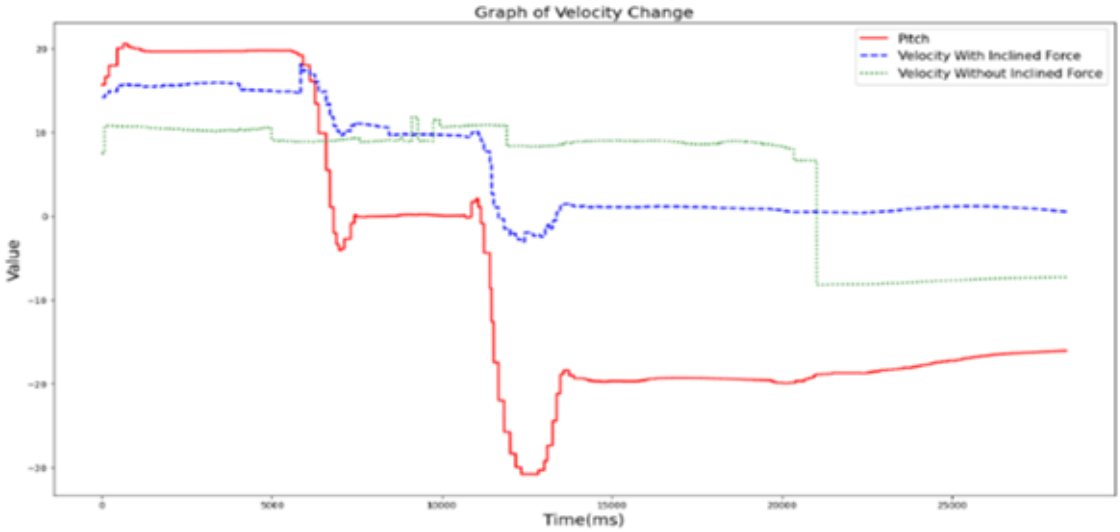
## D. Pengujian MFSF Sudut 20 Derajat

Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja sistem navigasi robot yang menggunakan MFSF dan yang tidak, pada kondisi bidang miring dengan sudut 20°, baik saat menanjak maupun menurun. Penambahan komponen gaya bidang miring melalui penerapan MFSF memungkinkan sistem untuk beradaptasi terhadap perubahan gaya gravitasi dan kondisi medan yang ekstrem, sehingga menghasilkan pergerakan yang lebih stabil dan terkendali.

Seperti pada pengujian sebelumnya, data hasil simulasi dikumpulkan untuk menganalisis perbedaan performa antara kedua sistem. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi sejauh mana penerapan MFSF memengaruhi kestabilan kecepatan dan kemampuan adaptasi terhadap perubahan sudut medan. **Gambar 13** menggambarkan pengujian yang dilakukan pada kemiringan 20°.




**Gambar 12.** Perubahan Kecepatan pada Bidang Miring 15°



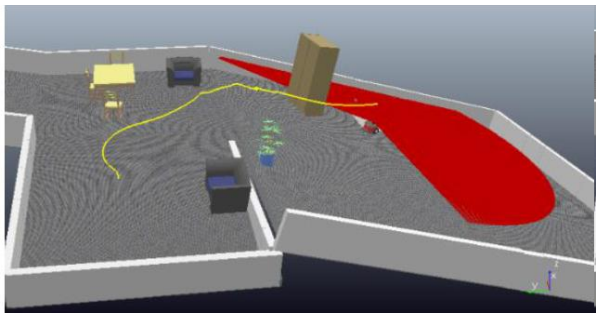

**Gambar 13.** Perubahan Kecepatan pada Bidang Miring 20°

Berdasarkan **Gambar 13,** terlihat bahwa robot yang menggunakan MFSF (garis biru putus-putus) menunjukkan respons kecepatan yang lebih adaptif terhadap perubahan kemiringan medan (garis merah). Perubahan kecepatan yang dinamis mengindikasikan kemampuan sistem dalam menyesuaikan gaya gerak secara *real time* terhadap kondisi medan yang berubah. Sebaliknya, robot tanpa MFSF (garis hijau titik-titik) cenderung mempertahankan kecepatan yang relatif konstan dan kurang responsif terhadap perubahan kemiringan. Hasil ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa penerapan MFSF mampu meningkatkan stabilitas serta efektivitas navigasi robot di medan miring dengan sudut yang lebih ekstrem.

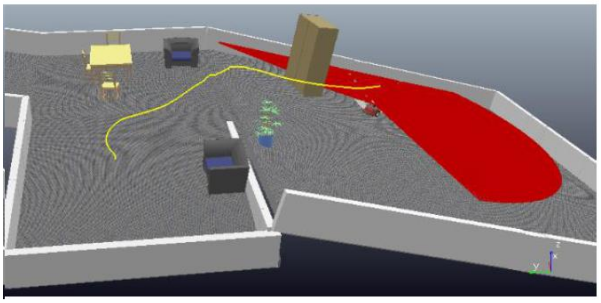
## E. Hasil Perbandingan MFSF dan SFM Konvensional

Hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan waktu yang cukup signifikan dalam pencapaian garis akhir antara sistem yang menggunakan MFSF dan sistem SFM konvensional. Pada kemiringan medan 20°, robot yang menggunakan SFM konvensional memerlukan waktu rata-rata 88,59 detik untuk mencapai tujuan. Sebaliknya, penerapan MFSF yang memperhitungkan gaya-gaya pada bidang miring mampu meningkatkan efisiensi navigasi dengan waktu tempuh rata-rata 59,24 detik.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa integrasi faktor kemiringan melalui MFSF secara efektif meningkatkan kemampuan adaptasi robot terhadap perubahan topografi, sehingga pergerakannya menjadi lebih stabil dan cepat dalam menyelesaikan lintasan. **Gambar 14** menampilkan hasil uji perbandingan antara MFSF dan SFM konvensional pada medan miring.



(a)



(b)

**Gambar 14.** Hasil Simulasi Robot (a) SFM Konvensional (b) MFSF

Pada **Gambar 14** terlihat bahwa perbedaan arah lintasan antara robot dengan SFM konvensional dan robot yang menggunakan MFSF tidak terlalu mencolok secara visual. Namun, analisis dinamika gerak menunjukkan bahwa robot tanpa MFSF mengalami kesulitan ketika menghadapi transisi dari bidang datar ke bidang menurun. Kondisi ini menyebabkan penurunan kendali kecepatan dan peningkatan risiko tergelincir, sehingga robot membutuhkan waktu tambahan untuk menstabilkan gerak dan kembali ke jalur navigasi semula.

Sebaliknya, penerapan MFSF memungkinkan sistem untuk menyesuaikan gaya dorong dan kecepatan secara adaptif ketika terjadi perubahan kemiringan. Robot dengan MFSF mampu menurunkan kecepatan secara terukur pada area transisi, sehingga pergerakannya tetap stabil dan efisien. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi faktor kemiringan pada model MFSF berkontribusi signifikan dalam meningkatkan kemampuan adaptasi dan keamanan navigasi robot di medan tidak datar.

Secara keseluruhan, penerapan MFSF terbukti meningkatkan efisiensi navigasi melalui pengurangan waktu pemulihan setelah tergelincir serta peningkatan stabilitas saat melewati medan dengan perubahan topografi yang kompleks. Perbandingan waktu rata-rata hasil pengujian pada bidang miring dengan sudut 10°, 15°, dan 20° antara sistem dengan dan tanpa MFSF ditunjukkan pada **Tabel IV**. Data tersebut merupakan hasil rata-rata dari 10 kali pengujian untuk setiap tingkat kemiringan, yang menunjukkan bahwa robot dengan MFSF mampu menyelesaikan navigasi pada medan miring dengan waktu yang secara signifikan lebih singkat dibandingkan sistem tanpa MFSF.

**Tabel IV.** Perbandingan Kinerja Sistem dengan dan tanpa MFSF pada Berbagai Sudut Kemiringan

| Sudut Kemiringan (°) | Metode | Jarak (m) | Waktu Tempuh Rata-Rata (detik) |
|---|---|---|---|
| 10 | SFM Konvensional | 16.12 ± 0.05 | 79.61 ± 0.48 |
| 10 | MFSF | 16.09 ± 0.04 | 51.71 ± 0.52 |
| 15 | SFM Konvensional | 16.14 ± 0.06 | 85.44 ± 0.55 |
| 15 | MFSF | 16.09 ± 0.05 | 54.18 ± 0.49 |
| 20 | SFM Konvensional | 16.02 ± 0.04 | 88.59 ± 0.57 |
| 20 | MFSF | 16.00 ± 0.03 | 59.24 ± 0.51 |

Robot yang menggunakan MFSF menunjukkan performa navigasi yang lebih efisien, dengan waktu tempuh berkisar antara 51 hingga 60 detik pada berbagai tingkat kemiringan medan. Hasil ini mencerminkan kemampuan sistem dalam beradaptasi terhadap perubahan sudut permukaan yang curam, sehingga robot mampu mempertahankan kecepatan optimal sambil menjaga kestabilan dan meminimalkan risiko tergelincir.

Sebaliknya, robot yang menggunakan SFM konvensional (tanpa MFSF) membutuhkan waktu lebih lama, yaitu antara 79 hingga 89 detik, untuk menyelesaikan lintasan pada kondisi medan yang sama. Keterlambatan ini terutama disebabkan oleh keterbatasan sistem konvensional dalam menyesuaikan gaya dorong dan kecepatan saat menghadapi perubahan kemiringan, yang mengakibatkan penurunan stabilitas dan peningkatan risiko kehilangan kendali. Kondisi tersebut memperpanjang waktu tempuh dan berpotensi meningkatkan risiko kerusakan akibat benturan atau ketidakseimbangan pada saat navigasi di medan miring.

Berdasarkan hasil keseluruhan, penerapan MFSF terbukti meningkatkan efektivitas navigasi robot di medan miring melalui pengurangan waktu tempuh rata-rata sebesar 35% dibandingkan metode SFM konvensional. Hasil pengujian tambahan juga menunjukkan bahwa sistem navigasi berbasis PID konvensional, yang digunakan dalam penelitian terdahulu [9], mencatat waktu tempuh rata-rata 66,2 ± 0,8 detik pada kemiringan 20°, sedangkan sistem berbasis MFSF mampu menyelesaikan lintasan yang sama dalam waktu 59,2 ± 0,5 detik. Dengan demikian, penerapan MFSF memberikan peningkatan efisiensi sebesar 10,6% dibandingkan pengendali PID, disertai kestabilan gerak dan waktu konvergensi yang lebih baik ketika menghadapi variasi kemiringan medan yang dinamis.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini konsisten dengan temuan Dewantara dan Ariyadi [15], yang melaporkan bahwa pendekatan berbasis *Fuzzy Social Force Model* dapat meningkatkan efisiensi navigasi hingga 25–30% dibandingkan metode konvensional. Namun, hasil penelitian ini menunjukkan peningkatan yang lebih tinggi, yaitu hingga 35% pada medan miring dengan sudut 20°, menandakan bahwa integrasi faktor kemiringan pada perhitungan gaya sosial memberikan kontribusi signifikan terhadap kemampuan adaptasi robot terhadap variasi topografi. Selain itu, hasil ini juga sejalan dengan studi O. Gil dkk. [7], yang menegaskan bahwa integrasi informasi lingkungan dalam model gaya sosial meningkatkan stabilitas lintasan robot pada medan tidak rata. Penelitian ini memperluas pendekatan tersebut dengan mempertimbangkan komponen gaya gravitasi dan friksi secara langsung dalam proses inferensi *fuzzy*, sehingga sistem dapat menyesuaikan kecepatan secara lebih realistis dan responsif terhadap perubahan kondisi medan.

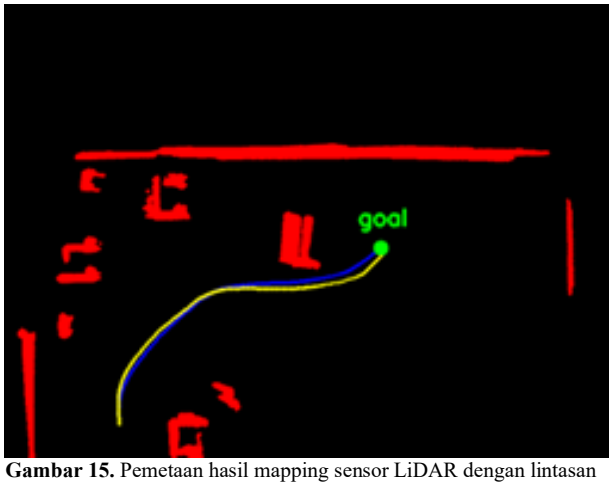
## F. Evaluasi Robustness Sistem terhadap Gangguan

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan (*robustness*) sistem MFSF (Model

Fuzzy Social Force) terhadap berbagai gangguan lingkungan yang terekam melalui sensor LiDAR. Uji sensitivitas dilakukan pada beberapa kondisi, yaitu variasi pembacaan LiDAR akibat perubahan karakteristik permukaan, kemunculan halangan dinamis tak terduga di jalur robot, perubahan koefisien gesekan permukaan, serta transisi medan secara tiba-tiba dari datar ke kemiringan 15°.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem MFSF mampu mempertahankan kestabilan arah dan kecepatan navigasi meskipun terjadi gangguan signifikan pada lingkungan. Berdasarkan hasil rata-rata dari sepuluh kali simulasi, penyimpangan kecepatan robot terhadap nilai nominal tercatat sebesar 6,8% ± 0,7, sedangkan sistem SFM konvensional menunjukkan deviasi yang lebih besar yaitu 17,9% ± 1,3. Selain itu, waktu konvergensi untuk menyesuaikan lintasan kembali ke arah semula pada kondisi gangguan dinamis tercatat 1,9 ± 0,2 detik untuk sistem MFSF, lebih cepat dibandingkan 3,4 ± 0,3 detik pada SFM konvensional.

Integrasi logika fuzzy dalam perhitungan gaya sosial terbukti meningkatkan kemampuan adaptif sistem terhadap ketidakpastian data LiDAR, sehingga robot tetap stabil dan efektif dalam mencapai titik tujuan (*goal*). **Gambar 15** menampilkan hasil pemetaan lingkungan menggunakan sensor LiDAR yang memperlihatkan lintasan robot pada kondisi tanpa gangguan dan dengan gangguan.




**Gambar 15.** Pemetaan hasil mapping sensor LiDAR dengan lintasan robot tanpa gangguan (biru) dan dengan gangguan (kuning).

**Gambar 15** menunjukkan hasil pemetaan lingkungan menggunakan sensor LiDAR yang memperlihatkan dua lintasan berbeda. Garis biru menggambarkan lintasan robot pada kondisi tanpa gangguan, sedangkan garis kuning menunjukkan lintasan ketika gangguan diterapkan. Terlihat bahwa pada kondisi gangguan, robot tetap mampu menyesuaikan arah gerak dan mencapai target dengan baik. Secara keseluruhan, sistem MFSF menunjukkan tingkat *robustness* yang tinggi dengan deviasi kecepatan dan arah yang relatif kecil, menunjukkan bahwa pendekatan ini efektif dalam menjaga kestabilan navigasi pada medan dengan variasi kondisi permukaan dan halangan dinamis.

## IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan MFSF (Model Fuzzy Social Force) mampu meningkatkan efektivitas navigasi robot di medan miring melalui penyesuaian gaya dorong secara adaptif terhadap perubahan kemiringan dan gesekan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem MFSF lebih efisien dibandingkan SFM konvensional, dengan waktu tempuh rata-rata 35% ± 0,5 lebih cepat dan deviasi kecepatan maksimum 6,8% ± 0,7, dibandingkan 17,9% ± 1,3 pada sistem konvensional. Selain itu, waktu konvergensi MFSF sebesar 1,9 ± 0,2 detik, lebih cepat dibandingkan 3,4 ± 0,3 detik. Dibandingkan dengan pengendali PID konvensional, MFSF juga menunjukkan peningkatan efisiensi waktu tempuh sekitar 10,6%, yang menegaskan keunggulan pendekatan ini dalam menjaga kestabilan lintasan dan adaptivitas terhadap gangguan.

Meskipun hasilnya signifikan, penelitian ini masih terbatas pada uji berbasis simulasi di CoppeliaSim dengan rentang kemiringan 10°, 15° dan 20°. Pengujian pada platform robot nyata serta variasi kondisi lingkungan yang lebih kompleks diperlukan untuk mengonfirmasi performa sistem secara menyeluruh.

## DAFTAR PUSTAKA

[1] 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.

[2] J. Li, H. Zhang, and Z. Ni, “Improved Social Force Model based on Navigation Points for Crowd Emergent Evacuation,” *J. Inf. Process. Syst.*, vol. 16, no. 6, pp. 1309–1323, 2020, doi: 10.3745/JIPS.04.0199.

[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] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] M. Jannah and B. Lubis, "Perancangan dan Implementasi Sistem Robot Penghisap Debu Cerdas Berbasis Logika Fuzzy Untuk Navigasi Otomatis di Rumah Design and Implementation of Fuzzy Logic Based Intelligent Vacuum Robot System for Auto Navigation at Home," vol. 13, no. 1, 2025.

[9] 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.

[10] P. Patompak, S. Jeong, I. Nilkhamhang, and N. Y. Chong, "Learning Proxemics for Personalized Human–Robot Social Interaction," *Int. J. Soc. Robot.*, vol. 12, no. 1, pp. 267–280, 2020, doi: 10.1007/s12369-019-00560-9.

[11] M. Mudarris and S. G. Zain, "Implementasi Sensor Inertial Meansurenment Unit (IMU) untuk Monitoring Perilaku Roket," *Avitec*, vol. 2, no. 1, pp. 55–64, 2020, doi: 10.28989/avitec.v2i1.610.

[12] A. W. Ramadhan, B. S. Bayu Dewantara, and S. Setiawardhana, "Optimization of Fuzzy Social Force Model Adaptive Parameter using Genetic Algorithm for Mobile Robot Navigation Control," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 19, no. 1, pp. 31–37, 2023, doi: 10.17529/jre.v19i1.28330.

[13] A. Y. Hidayat, Y. Y. Kerlooza, and T. N. Nizar, "Perancangan Sistem Kendali Kecepatan Putaran Mesin Bensin Menggunakan PID," *Telekontran J. Ilm. Telekomun. Kendali dan Elektron. Terap.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–11, 2023, doi: 10.34010/telekontran.v11i1.8161.

[14] M. Munadi *et al.*, "Simulasi Sistem Lokalisasi Berbasis Extended Kalman Filter Pada Robot Clearpath Husky," vol. 13, no. 1, pp. 57–62, 2025.

[15] 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.