

TUGAS AKHIR - EE184801

SISTEM KONTROL KECEPATAN MOBIL OTONOM MENGUNAKAN METODE *FUZZY-PID* PADA JALAN MENANJAK DAN MENURUN

MUHAMMAD PUTRA RABIULCHAIR

NRP 07111940000122

Dosen Pembimbing I

Mohamad Abdul Hady, S.T., M.T.

NIP 260150804

Dosen Pembimbing II

Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.

NIP 132092582

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknik Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2023



TUGAS AKHIR - EE184801

SISTEM KONTROL KECEPATAN MOBIL OTONOM MENGUNAKAN METODE *FUZZY-PID* PADA JALAN MENANJAK DAN MENURUN

MUHAMMAD PUTRA RABIULCHAIR

NRP 07111940000122

Dosen Pembimbing I

Mohamad Abdul Hady, S.T., M.T.

NIP 260150804

Dosen Pembimbing II

Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.

NIP 132092582

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2023



FINAL PROJECT - EE184801

AUTONOMOUS CAR SPEED CONTROL SYSTEM USING FUZZY-PID METHOD ON UPHILL AND DOWNHILL ROADS

MUHAMMAD PUTRA RABIULCHAIR

NRP 07111940000122

Advisor

Mohamad Abdul Hady, S.T., M.T.

NIP 260150804

Co-Advisor

Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.

NIP 132092582

Electrical Engineering Undergraduate Program

Department of Electrical Engineering

Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2023

LEMBAR PENGESAHAN

SISTEM KONTROL KECEPATAN MOBIL OTONOM MENGGUNAKAN METODE FUZZY-PID PADA JALAN MENANJAK DAN MENURUN



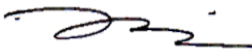



TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Elektro
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : MUHAMMAD PUTRA RABIULCHAIR

NRP. 07111940000122

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- | | | |
|---|---------------|---|
| 1. Mohamad Abdul Hady, S.T., M.T. | Pembimbing |  |
| 2. Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T. | Ko-pembimbing |  |
| 3. Dr. Ir. Ari Santoso, DEA | Penguji |  |
| 4. Ir. Ali Fatoni, M.T. | Penguji |  |
| 5. Yurid Eka Nugraha, S.T., M.Eng, PhD. | Penguji |  |
| 6. Eka Iskandar, S.T., M.T. | Penguji |  |

SURABAYA

Juli, 2023

Halaman ini sengaja dikosongkan.

APPROVAL SHEET

AUTONOMOUS CAR SPEED CONTROL SYSTEM USING FUZZY-PID METHOD ON UPHILL AND DOWNHILL ROADS

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements

For obtaining an undergraduate degree at

Undergraduate Study Program of Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : MUHAMMAD PUTRA RABIULCHAIR

NRP. 07111940000122

Approved by Tim Final Project Examiner Team:

1. Mohamad Abdul Hady, S.T., M.T.

Advisor



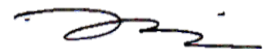
2. Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.

Co-Advisor



3. Dr. Ir. Ari Santoso, DEA

Examiner



4. Ir. Ali Fatoni, M.T.

Examiner



5. Yurid Eka Nugraha, S.T., M.Eng, PhD..

Examiner



6. Eka Iskandar, S.T., M.T.

Examiner



SURABAYA

July, 2023

Halaman ini sengaja dikosongkan.

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Muhammad Putra Rabiulchair / 07111940000122
Program studi : Teknik Elektro FTEIC – ITS
Dosen Pembimbing I / NIP : Mohamad Abdul Hady, S.T., M.T. / 260150804
Dosen Pembimbing II / NIP : Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T. / 132092582

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Sistem Kontrol Kecepatan Mobil Otonom Menggunakan Metode *Fuzzy-PID* pada Jalan Menanjak dan Menurun” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Apabila di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, Juli 2023

Mengetahui
Dosen Pembimbing I



Mohamad Abdul Hady, S.T., M.T.
NIP. 260150804

Mengetahui
Dosen Pembimbing II



Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.
NIP. 132092582

Mahasiswa



Muhammad Putra Rabiulchair
NRP. 07111940000122

Halaman ini sengaja dikosongkan.

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Muhammad Putra Rabiulchair / 07111940000122
Department : Electrical Engineering FTEIC – ITS
Advisor / NIP : Mohamad Abdul Hady, ST., MT. / 260150804
Co-Advisor / NIP : Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT. / 132092582

Hereby declare that the Final Project with the title of “Autonomous Car Speed Control System Using Fuzzy-PID Method on Uphill and Downhill Roads” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, July 2023

Acknowledge
Advisor



Mohamad Abdul Hady, S.T., M.T.
NIP. 260150804

Acknowledge
Co-Advisor



Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.
NIP. 132092582

Student



Muhammad Putra Rabiulchair
NRP. 07111940000122

Halaman ini sengaja dikosongkan.

ABSTRAK

SISTEM KONTROL KECEPATAN MOBIL OTONOM MENGGUNAKAN METODE FUZZY-PID PADA JALAN MENANJAK DAN MENURUN

Nama Mahasiswa / NRP : Muhammad Putra Rabiulchair / 07111940000122
Departemen : Teknik Elektro FTEIC - ITS
Dosen Pembimbing I / NIP : Mohamad Abdul Hady, S.T., M.T. / 260150804
Dosen Pembimbing II / NIP : Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T. / 132092582

Abstrak

Mobil otonom adalah kendaraan yang dapat melakukan perjalanan antar tujuan tanpa bantuan operator manusia. Untuk melewati perjalanan antar tujuan tersebut, mobil memerlukan sistem kontrol yang baik agar dapat berjalan dengan optimal melewati berbagai kondisi jalan. Kondisi jalan menanjak dan menurun merupakan salah satu permasalahan di mobil otonom, karena untuk melewati jalan tersebut diperlukan kontrol yang berbeda dengan melewati jalan datar. Hal ini disebabkan adanya perubahan beban saat mobil melewati jalan menanjak atau menurun. Dari permasalahan tersebut, perlu dirancang kontroler yang dapat mengikuti perubahan yang terjadi saat mobil melewati jalan yang menanjak atau menurun. Kontrol kecepatan yang dirancang pada penelitian ini terdiri dari kontrol *speed* dan *brake* dengan metode *Fuzzy-PID*. Kontroler *Fuzzy* digunakan untuk menentukan parameter k_p , k_i , dan k_d yang masuk ke kontroler *PID*. Sistem diuji pada jalan menanjak, dan jalan menurun. Berdasarkan hasil dari penelitian, kontroler menunjukkan hasil terbaik pada penggunaan 7 fungsi keanggotaan *Fuzzy-PID* dengan kontrol kecepatan pada jalan menanjak, dan menurun dengan nilai RMSE berturut-turut sebesar 3.6829 km/h, dan 3.6232 km/h serta besar *error steady state* sebesar 0.05955 km/h pada jalan menanjak, dan, 0.06258 km/h saat jalan menurun.

Kata kunci: Mobil Otonom, *Fuzzy-PID*, Jalan Menanjak, Jalan Menurun.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

ABSTRACT

AUTONOMOUS CAR SPEED CONTROL SYSTEM USING FUZZY-PID METHOD ON UPHILL AND DOWNHILL ROADS

Student Name / NRP : Muhammad Putra Rabiulchair / 07111940000122
Department : Teknik Elektro FTEIC - ITS
Advisor : Mohamad Abdul Hady, S.T., M.T.
Co-Advisor : Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.

Abstract

An autonomous car is a vehicle that can travel between destinations without the assistance of a human operator. To pass the trip between destinations, the car requires a good control system so that it can run optimally through various road conditions. Uphill and downhill road conditions are one of the problems in autonomous cars, because passing through these roads requires different controls than passing through flat roads. This is due to the change in load when the car passes uphill or downhill. From these problems, it is necessary to design a controller that can follow the changes that occur when the car passes uphill or downhill road. The speed control designed in this research consists of speed and brake control with the Fuzzy-PID method. The Fuzzy controller is used to determine the k_p , k_i , and k_d parameters that enter the PID controller. The system is tested on uphill roads, and downhill roads. Based on the results of the research, the controller shows the best results in the use of 7 membership functions Fuzzy-PID with speed control on uphill, and downhill roads with RMSE values of 3.6829 km/h, and 3.6232 km/h respectively and a steady state error of 0.05955 km/h on uphill roads, and, 0.06258 km/h on downhill roads.

Keywords: Autonomous Car, *FUZZY-PID*, Uphill Road, Downhill Road.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur senantiasa tercurahkan kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Sistem Kontrol Kecepatan Mobil Otonom Menggunakan Metode *Fuzzy-PID* pada Jalan Menanjak dan Menurun’. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat guna menyelesaikan Strata-1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro dan Informatika Cerdas.

Selama penelitian dan penulisan Tugas Akhir ini, terdapat banyak rintangan dan hambatan yang penulis hadapi, namun berkat bantuan, dorongan serta bimbingan dari berbagai pihak, penulis dapat terus maju dan menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini. Sehingga, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang selalu memberikan kekuatan, kesehatan, kelancaran, dan kemudahan bagi hamba-Nya.
2. Keluarga Penulis yang selalu memberikan dukungan, doa, dan semangat kepada penulis.
3. Bapak Mohamad Abdul Hady, S.T., M.T. dan Ibu Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing I dan II yang telah meluangkan waktu untuk melakukan bimbingan serta memberikan banyak ilmu, saran, dan motivasi dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Ari Santoso, DEA, Ir. Ali Fatoni, M.T., Yurid Eka Nugraha, S.T., M.Eng., PhD., dan Eka Iskandar, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan terhadap penelitian Tugas Akhir ini.
5. Inez Adela Maheswari, Yosia Christian A.S, Hanif Rachmad Refadi Putra, serta Nabilla Ananda Rifian sebagai teman terdekat penulis yang senantiasa menemani dan mendukung penulis dari awal sampai akhir pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Teman-teman Hidup sehat yang tidak bisa disebutkan satu persatu.
7. Teman-teman asisten Lab Kontrol dan Otomasi serta teman-teman Angkatan E59 yang selalu memberikan dukungan dan menjadi teman diskusi pengerjaan Tugas Akhir.
8. Dan kepada semua pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Sangat disadari dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan dikarenakan adanya keterbatasan pengetahuan dan pengalaman sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan karya tulis ini. Akhir kata semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2023


Penulis

Halaman ini Sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR SIMBOL	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	3
2.2 Dasar Teori	3
2.2.1 Mobil Otonom	3
2.2.2 Model Dinamik Mobil	3
2.3 Kontroler PID	7
2.4 Kontroler Fuzzy	8
2.4.1 Himpunan Fuzzy	9
2.4.2 Fungsi Keanggotaan Fuzzy (<i>Membership Function</i>)	9
2.4.3 Operasi Logika Fuzzy	10
2.4.4 Fuzzifikasi	10
2.4.5 Defuzzifikasi	10
2.4.6 Sistem Inferensi Fuzzy	11
2.5 Fuzzy-PID	12
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM	13
	xv

3.1	Bahan dan peralatan yang digunakan	13
3.1.1	Hardware	13
3.1.2	Software	13
3.2	Perancangan Model	13
3.2.1	Model Mobil	13
3.2.2	Dinamika Mobil	14
3.3	Diagram Blok	15
3.4	Perancangan Kontroler	16
3.4.1	Kontroler Fuzzy	16
3.4.2	Kontroler Fuzzy-PID	20
3.5	Skenario Pengujian Sistem	26
BAB 4	Hasil dan Pembahasan	29
4.1	Hasil penelitian	29
4.1.1	Kontroler <i>Fuzzy</i>	29
4.1.2	Kontroler <i>Fuzzy-PID</i>	31
4.1.3	Kontroler Fuzzy dan Fuzzy-PID 3 MF pada jalan tanjakan	34
4.1.4	Kontroler Fuzzy dan Fuzzy-PID 3 MF pada jalan dengan turunan	34
4.1.5	Kontroler Fuzzy dan Fuzzy-PID 7 MF pada skenario jalan menanjak	35
4.1.6	Kontroler Fuzzy dan Fuzzy-PID 7 MF pada skenario jalan menurun	36
4.2	Pembahasan	37
BAB 5	Kesimpulan dan Saran	39
5.1	Kesimpulan	39
5.2	Saran	39
	DAFTAR PUSTAKA	41
	LAMPIRAN	43
	BIODATA PENULIS	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gambar resultan gaya pada mobil	4
Gambar 2.2 Sudut Slip roda mobil	6
Gambar 2.3 Perhitungan Efektif Radius Roda	7
Gambar 2.4 Blok diagram kontroler PID	8
Gambar 2.5 Skema kontroler fuzzy	8
Gambar 2.6 Tipe Fungsi Keanggotaan fuzzy	10
Gambar 2.7 Struktur kontroler Fuzzy-PID	12
Gambar 3.1 Gaya saat mobil melewati tanjakan.	14
Gambar 3.2 Diagram blok sistem kontrol fuzzy pada mobil.	15
Gambar 3.3 Diagram blok sistem kontrol Fuzzy-PID pada mobil	16
Gambar 3.4 Struktur kontroler fuzzy	16
Gambar 3.5 3 Fungsi keanggotaan error kecepatan pada kontroler fuzzy.	17
Gambar 3.6 Delta error pada 3 fungsi keanggotaan kontroler fuzzy.	17
Gambar 3.7 3 fungsi keanggotaan keluaran speed fuzzy.	17
Gambar 3.8 Keluaran fungsi keanggotaan brake.	18
Gambar 3.9 Masukan error kecepatan fuzzy 7 fungsi keanggotaan.	18
Gambar 3.10 Masukan delta error kecepatan 7 fungsi keanggotaan fuzzy.	19
Gambar 3.11 Keluaran brake kontrol fuzzy 7 fungsi keanggotaan.	19
Gambar 3.12 Keluaran speed kontroler fuzzy 7 fungsi keanggotaan.	19
Gambar 3.13 Struktur Kontroler Fuzzy-PID	21
Gambar 3.14 3 fungsi keanggotaan pada masukan error kecepatan.	21
Gambar 3.15 Masukan delta error dengan 3 fungsi keanggotaan.	22
Gambar 3.16 3 fungsi keanggotaan keluaran kp .	22
Gambar 3.17 3 fungsi keanggotaan keluaran ki .	22
Gambar 3.18 3 fungsi keanggotaan keluaran kd .	23
Gambar 3.19 Masukan error kecepatan Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan.	24
Gambar 3.20 Masukan delta error kecepatan Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan.	24
Gambar 3.21 Keluaran variabel kp Fuzzy-PID.	24
Gambar 3.22 7 fungsi keanggotaan keluaran variabel ki pada Fuzzy-PID.	25
Gambar 3.23 Keluaran 7 fungsi keanggotaan variabel kd pada Fuzzy-PID.	25
Gambar 3.24 Perhitungan besar % slope	27
Gambar 4.1 Respon kontroler fuzzy pada kecepatan 15 km/h	30
Gambar 4.2 Kecepatan mobil dengan kontroler fuzzy pada kecepatan 30 km/h	30
Gambar 4.3 Respon kontroler fuzzy 3 fungsi keanggotaan pada kecepatan 45 km/h	31
Gambar 4.4 Respon sistem pada Fuzzy-PID dengan V_{ref} 15 km/h.	32
Gambar 4.5 Respon error kecepatan saat kecepatan 30 km/h.	33
Gambar 4.6 Respon kontroler Fuzzy-PID pada kecepatan 45 km/h jalan datar.	33
Gambar 4.7 Kontroler fuzzy 3 MF pada jalan Menanjak.	34
Gambar 4.8 Kontroler fuzzy-PID 3 MF pada jalan menanjak.	34
Gambar 4.9 Kontroler Fuzzy dengan 3 fungsi keanggotaan pada jalan menurun.	35
Gambar 4.10 Fuzzy-PID 3 fungsi keanggotaan pada jalan menurun.	35
Gambar 4.11 Fuzzy dengan 7 fungsi keanggotaan pada jalan menanjak.	35
Gambar 4.12 Kontroler Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan pada jalan menanjak.	36

Gambar 4.13 Kontroler Fuzzy pada jalan menanjak dengan 7 fungsi keanggotaan.	36
Gambar 4.14 Kontroler Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan pada jalan menurun	37

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Peralatan Pendukung Penelitian	13
Tabel 3.2 Parameter Model Mobil	13
Tabel 3.3 Rule keluaran dari fuzzy 3 fungsi keanggotaan.	18
Tabel 3.4 Rule keluaran speed fuzzy 7 fungsi keanggotaan.	20
Tabel 3.5 Rule keluaran fuzzy brake 7 fungsi keanggotaan.	20
Tabel 3.6 aturan keluaran kp , ki , dan kd pada Fuzzy-PID	23
Tabel 3.7 Rule keluaran kp 7 Fungsi Keanggotaan Fuzzy-PID	25
Tabel 3.8 Rule keluaran ki Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan.	26
Tabel 3.9 Rule keluaran kd Fuzzy-PID dengan 7 fungsi keanggotaan.	26
Tabel 4.1 RMSE hasil simulasi tanpa tanjakan dengan variasi kecepatan.	38
Tabel 4.2 RMSE hasil simulasi dengan skenario berbeda.	38

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
m	Massa mobil	kg
g	Percepatan gravitasi	m/s ²
A_{front}	Luas depan mobil	m ²
ρ_{air}	Massa jenis udara	kg/m ³
C_{drag}	Konstanta drag udara	
f_r	Konstanta hambatan gulir	
$C_{\sigma f}$	Konstanta stiffness	
r_{eff}	Radius efektif roda	m
v_x	Kecepatan mobil	km/h
a_x	Percepatan mobil	m/s ²
σ_x	Slip roda	
β_x	Sudut slope	°
ω_w	Kecepatan putar roda	rad/s

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi kendaraan otonom telah menjadi topik penelitian dan pengembangan utama di bidang otomotif industri selama dekade terakhir. Mobil otonom sendiri merupakan kendaraan yang dapat melakukan perjalanan antar tujuan tanpa bantuan operator manusia dengan kemampuan untuk memahami lingkungan sekitar dan menavigasi dirinya sendiri menggunakan kombinasi dari sensor, kamera, radar, serta kecerdasan buatan (Jo et al., 2014; Khodayari et al., 2010).

Menurut taksonomi oleh SAE (*Society of Automotive Engineers*) J3016, level mobil otonom dibagi menjadi 6 berdasarkan tingkat campur tangan manusia dalam pengoperasiannya. Semakin tinggi levelnya maka campur tangan manusia pada pengoperasiannya semakin rendah. Sebuah kendaraan dapat dikatakan sebagai kendaraan otonom penuh apabila kendaraan itu termasuk pada level 5 yang merupakan level tertinggi dari taksonomi oleh SAE. Pada level ini kendaraan sudah tidak memerlukan supir untuk pengoperasiannya dan semua tugas dari supir digantikan oleh ADS (*Automated Driving System*) untuk mengatasi seluruh DDT (*Dynamic Driving Task*) saat berkendara. DDT dibagi menjadi 2, yaitu deteksi serta pengaturan respon terhadap objek dan kejadian lain, dan pengaturan kontrol gerakan lateral dan longitudinal mobil. (Amiruddin Putra et al., 2021)

Pada kontrol longitudinal, diperlukan empat jenis informasi, yaitu kecepatan dan percepatan mobil, jarak ke kendaraan sebelumnya, serta kecepatan dan percepatan kendaraan sebelumnya. Kontrol longitudinal membutuhkan kontrol pada dua hal di mobil otonom, yaitu *throttle* dan *brake* untuk memastikan kecepatan yang ditentukan telah diikuti oleh mobil otonom tersebut. Pada kontrol longitudinal, mobil otonom harus mampu beroperasi mengikuti skema jalur yang telah dipilih dengan jalur yang bermacam-macam jenisnya, yaitu jalur yang menaik serta menurun. Jalur menaik menyebabkan beban pada mobil otonom bertambah yang mengakibatkan adanya perlambatan pada mobil (Jin et al., 2020). Apabila mobil tidak dapat memulihkan kecepatan akibat dari perlambatan tersebut maka mobil otonom tidak dapat melewati lintasan tersebut. Kemudian pada lintasan jalan yang menurun, sama seperti pada jalan menaik akan ada gaya tambahan yang mengakibatkan mobil akan mengalami percepatan sesuai dengan kemiringan turunan yang dilalui dan apabila mobil tidak dapat mengontrol kecepatan akibat percepatan tersebut, mobil otonom bisa saja menabrak mobil atau rintangan yang ada di depannya sehingga perlu kontrol yang baik agar mobil dapat mencapai tujuan dan beroperasi dengan baik.

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian yang dikembangkan pada kontrol longitudinal mobil otonom yaitu ada pada kontrol kecepatan dengan mengontrol bagian dari *throttle* atau *brake*. Hingga saat ini, penelitian pada kontrol longitudinal masih mengenai kontrol kecepatan mobil otonom pada lintasan lurus saja dengan variasi kecepatan yang berbeda-beda untuk pengujiannya. Pada penelitian yang dilakukan oleh Milanés pada kontrol dengan kecepatan rendah, digunakan perbandingan metode antara metode kontrol PI, kontrol fuzzy, serta kontroler neuro-fuzzy. Hasil pada penelitiannya yaitu untuk kontrol PI hasilnya kurang baik karena besarnya error pelacakan, lalu untuk kontrol fuzzy menunjukkan perilaku yang baik serta intuitif untuk menyetel ulang melalui *rule base* serta waktu yang dibutuhkan untuk mendesain kontrol ini signifikan lebih pendek daripada yang lain. Kemudian untuk metode kontrol menggunakan neuro-fuzzy memberikan hasil yang lebih baik namun memiliki

kelemahan yaitu sulit untuk merubah *rule base* yang telah dihasilkan (Milanés et al., 2012). Pada penelitian ini digunakan metode kontrol fuzzy-PID yang diharapkan dapat mengontrol kecepatan mobil dengan baik melewati lintasan yang berubah-ubah.

1.2 Rumusan Masalah

Pada saat mobil otonom melakukan perjalanan, jalan tanjakan serta turunan merupakan suatu hal yang tidak dapat dihindari. Ketika mobil otonom melewati jalan menanjak dan menurun, beban pada mobil akan bertambah akibat adanya gaya slope yang bekerja sehingga menyebabkan perubahan terjadi pada kondisi mobil, oleh sebab itu diperlukan kontrol yang baik untuk mengatasi hal ini. Permasalahan yang dirumuskan pada penelitian ini adalah bagaimana mendesain kontroler kecepatan yang dapat merespon dengan baik terhadap jalan menanjak dan menurun.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada poin sebagai berikut :

- Kontrol pada penelitian ini hanya pada *speed* dan *brake* yang selanjutnya dipengaruhi oleh sudut jalan.
- Kontrol kecepatan mobil otonom hanya pada gerakan longitudinalnya.
- Tidak dibatasi kemampuan motor.
- Kecepatan putar roda diasumsikan sama tiap rodanya.
- Hanya sampai simulasi menggunakan MATLAB dan Simulink

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian dari Tugas Akhir ini adalah desain kontroler kecepatan pada mobil otonom dengan adanya perubahan sudut saat jalan menanjak dan menurun, sehingga hasil dari penelitian ini diharapkan kontroler dapat mempertahankan kecepatan mobil sesuai dengan kecepatan yang diinginkan meskipun terdapat perubahan yang terjadi.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diberikan dari penelitian ini adalah mendukung perkembangan penelitian terhadap mobil otonom khususnya pada bagian kontrol kecepatan longitudinal saat menghadapi jalan menanjak dan menurun.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Mobil otonom merupakan kendaraan yang dapat melakukan perjalanan antar tujuan tanpa bantuan operator manusia. Kendaraan otonom cenderung akan memainkan peran utama dalam sistem transportasi masa depan, karena dapat menyediakan banyak manfaat potensial, seperti peningkatan keselamatan dan pemanfaatan jalan yang lebih tinggi. Penelitian untuk mobil otonom telah banyak dilakukan, diantaranya pada bagaimana mobil otonom ini bergerak. Gerak mobil otonom dibagi menjadi 2 yaitu gerak lateral dan gerak longitudinal. Gerak longitudinal merupakan gerak mobil mengikuti sumbu x atau dapat dibilang bergerak lurus. Untuk gerak longitudinal hal yang biasanya dikontrol merupakan *cruise control* yaitu bagaimana mengontrol sistem kecepatan mobil atau sistem pengereman mobil otonom (Babak et al., 2017).

Pada penelitian selanjutnya, kontrol longitudinal pada jalan lurus meliputi kontrol kecepatan serta pengereman menggunakan inverse model serta kontroler PI yang di cascade dengan model dinamik kendaraan. Pada penelitian ini terdapat batasan kecepatan kendaraan yaitu 0-40 km/jam. Hasil penelitian ini, controller dapat mempertahankan akselerasi kendaraan mendekati 2.5m/s^2 , yang merupakan level maksimum untuk penumpang manusia merasa nyaman (Dias et al., 2015). Pada penelitian-penelitian terdahulu yang telah disebutkan, kontrol longitudinal dilakukan pada jalan lurus dan tidak menanjak.

Kemudian terdapat penelitian yang dilakukan oleh Raffin yaitu kontrol longitudinal untuk mobil otonom dengan parameter yang diketahui. Pada penelitian yang dilakukan oleh Raffin digunakan metode MRAC sebagai kontroler. Penelitian ini juga menggunakan variasi slope pada jalannya namun hanya sebesar 10 derajat. Hasil akhir dari penelitian ini, MRAC dapat mengikuti kecepatan referensi dengan baik yaitu dengan kesalahan rata-rata sebesar 0.47 m/s, serta saat kondisi lingkungannya berubah, kesalahan rata-ratanya sebesar 0.53 m/s (Raffin et al., 2017)

2.2 Dasar Teori

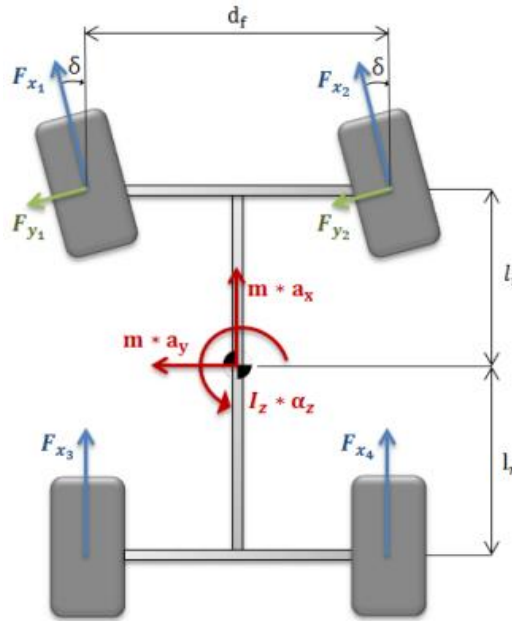
2.2.1 Mobil Otonom

Mobil Otonom atau yang biasa disebut *self-driving car* merupakan kendaraan yang dapat melakukan perjalanan antar tujuan tanpa bantuan operator manusia dengan menggunakan kombinasi dari sensor, kamera, radar, serta kecerdasan buatan (AI). Campbell et al. mengatakan mobil otonom modern dapat mendeteksi lingkungan sekitar dan mengklasifikasikan serta mengidentifikasi jalur navigasi yang tepat sesuai dengan aturan lalu lintas berdasarkan informasi dari sensor. Mobil dapat dikatakan sepenuhnya otonom apabila kendaraan tersebut dapat bernavigasi tanpa campur tangan manusia ke tujuan yang telah ditentukan.

2.2.2 Model Dinamik Mobil

Model dinamik merupakan deskripsi gerak mobil terhadap posisi, kecepatan, serta percepatan dengan memperhitungkan gaya internal, energi, dan momentum pada sistem. Dalam pemodelan ini, gaya dari massa serta roda mobil juga diperhitungkan.

2.2.2.1 Gerakan Mobil



Gambar 2.1 Gambar resultan gaya pada mobil

Persamaan dari gerak mobil didapat dari kesetimbangan gaya serta torsi pada setiap sumbu. Sumbu pada gerak mobil dibagi menjadi 3, yaitu sumbu longitudinal, sumbu lateral, dan sumbu tegak lurus terhadap jalan. Sumbu longitudinal dilambangkan dengan X, sumbu lateral dengan Y, dan sumbu yang tegak lurus dengan Z. Persamaan yang mendeskripsikan Gambar 2.1 adalah sebagai berikut:

$$F_{x1} \cdot \cos(\delta) - F_{y1} \cdot \sin(\delta) + F_{x2} \cdot \cos(\delta) - F_{y2} \cdot \sin(\delta) + F_{x3} + F_{x4} - F_{brake} - F_{drag} - F_{rolling} - F_{slope} = m \cdot a_x \quad (2.1)$$

pada persamaan diatas, F_{xi} merepresentasikan gaya longitudinal roda pada Gambar 2.1 sebagai vektor biru dan F_{yi} merupakan gaya lateral roda pada vektor hijau, dan δ merepresentasikan sudut kemudi dari roda depan. Kemudian a_x adalah percepatan inersia terhadap pusat gravitasi pada sumbu X. Persamaan a_x dapat dihitung melalui

$$a_x = \dot{v}_x + v_y \omega_z \quad (2.2)$$

di mana \dot{v}_x adalah percepatan di sumbu X dan $v_y \omega_z$ merupakan percepatan sentripetal ketika mobil berbelok. Lalu untuk gaya pengereman mobil ini disederhanakan menjadi:

$$F_{brake} = k \cdot \text{max. force braking} \quad (2.3)$$

konstanta k pada rumusan diatas merupakan konstanta input [0-1] pada pedal rem. Kemudian untuk gaya aerodinamisnya model mobilnya dapat dimodelkan seperti berikut:

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot C_{drag} \cdot A_{front} \cdot v_x^2 \cdot (\text{sign}(v_x)) \quad (2.4)$$

dimana ρ_{air} merupakan densitas udaranya ($1,2 \text{ kg/m}^3$ saat temperatur dan tekanan normal) C_{drag} merepresentasikan koefisien drag, A_{front} area frontal kendaraan dan V_x mewakili kecepatan aliran angin sesuai kecepatan kendaraan yang tidak mungkin diukur. Kemudian gaya hambatan gulir dapat dirumuskan melalui

$$F_{rolling} = f_r \cdot m \cdot g \cdot \min(1, v_x) \cdot (\text{sign}(v_x)) \quad (2.5)$$

dari persamaan (2.5) diketahui bahwa f_r merupakan koefisien hambatan gulir, m merupakan massa mobil, serta g merupakan kecepatan gravitasi. Ketika mobil berada pada jalur menanjak atau turunan, terdapat gaya baru yang muncul karena kemiringan jalan:

$$F_{slope} = m \cdot g \cdot \sin(\beta_x) \cdot (\text{sign}(V_x)) \quad (2.6)$$

dimana β_x merupakan sudut kemiringan jalan dan V_x merupakan kecepatan aliran angin.

Pada sumbu lateral, persamaan yang dimiliki sumbu ini memiliki bentuk yang serupa dengan gaya pada sumbu longitudinal. Keseimbangan gayanya dapat dirumuskan seperti berikut:

$$F_{x1} \sin(\beta) - F_{y1} \cos(\delta) + F_{x2} \sin(\delta) - F_{y2} \cos(\delta) - F_{tilt} = ma_y \quad (2.7)$$

kemudian didapat percepatan lateralnya melalui

$$a_y = \dot{v}_y + v_x \omega_z \quad (2.8)$$

sedangkan gaya (F_{tilt}) diperhitungkan saat kondisi jalan miring di sepanjang sumbu lateral atau ketika sudut roll tidak bernilai 0 melalui persamaan

$$F_{tilt} = mg \sin(\beta_y) \quad (2.9)$$

di mana β_y adalah sudut kemiringan jalan. Untuk persamaan kecepatan sudut terhadap sumbu Z atau biasa disebut gerakan yaw, memiliki persamaan yang apabila dirumuskan dalam keseimbangan torsi sebagai berikut:

$$l_f (F_{x1} \sin(\delta) + F_{y1} \cos(\delta)) + l_f (F_{x2} \sin(\delta) + F_{y2} \cos(\delta)) + l_r (F_{y3} + F_{y4}) = I_z \alpha_z \quad (2.10)$$

pada persamaan (2.10) l_f merupakan jarak roda antara roda depan dengan pusat gravitasi mobil pada sumbu X, sedangkan l_r adalah jarak roda belakang dengan pusat gravitasi mobil pada sumbu X. I_z merupakan inersia yang merupakan hambatan mobil terhadap yaw dan α_z adalah percepatan sudut mobil terhadap sumbu Z.

Gaya dari roda belakang diabaikan pada persamaan (2.10) karena roda belakang dianggap menghasilkan gaya yang kurang lebih sama sehingga torsi terhadap pusat gravitasinya saling meniadakan. Kemudian notasi untuk hubungan antara orientasi, kecepatan, dan percepatan di sumbu Z sebagai berikut:

$$\theta_{vf} = \frac{\dot{y} l_f + \omega_z}{v_x} \quad (2.11)$$

$$\theta_{vr} = \frac{\dot{y} - l_r \omega_z}{v_x} \quad (2.12)$$

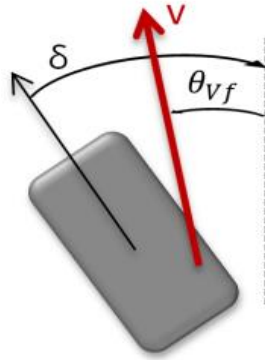
diketahui bahwa θ_{vf} merupakan sudut pada roda depan sedangkan θ_{vr} merupakan sudut pada roda belakang. ω_z adalah kecepatan sudut yaw dan percepatan lateralnya dilambangkan dengan \dot{y} . Selanjutnya adalah kecepatan longitudinal dan lateral pada masing-masing ban. Pada skenario ini, saat kendaraan membelok untuk mengikuti jalan, roda kiri berputar lebih cepat dari roda bagian kanan. Dengan begitu, kecepatan berbasis geometri baru perlu dihitung untuk masing-masing roda melalui

$$v_{x1} = v_x - \omega_z \cdot \frac{d_f}{2}$$

$$\begin{aligned}
v_{x2} &= v_x + \omega_z \cdot \frac{d_f}{2} \\
v_{x3} &= v_x - \omega_z \cdot \frac{d_r}{2} \\
v_{x4} &= v_x + \omega_z \cdot \frac{d_r}{2}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

di mana v_x adalah kecepatan longitudinal pada mobil, ω_z merupakan kecepatan sudut kendaraan, d_f merupakan jarak antara roda depan dan d_r adalah jarak antar roda belakang.

2.2.2.2 Model Roda



Gambar 2.2 Sudut Slip roda mobil

Model pada roda menghitung resultan gaya antara jalan dan roda yang digunakan oleh hukum Newton untuk menampilkan gerakan kendaraan yang benar. Resultan gaya lateral akan dideskripsikan terlebih dahulu dan kemudian gaya longitudinalnya akan di tampilkan. Sudut slip ban depan dan belakang dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\alpha_f &= \delta - \theta_{vf} \\
\alpha_r &= -\theta_{vr}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

dimana δ merepresentasikan sudut roda saat bergerak secara longitudinal, atau yang diketahui sebagai sudut kemudi dan θ_{vf} serta θ_{vr} merupakan orientasi dari vektor kecepatan. Kemudian, gaya lateral roda dapat diturunkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
F_{yf} &= C_{\alpha f} \alpha_f \\
F_{yr} &= C_{\alpha r} \alpha_r
\end{aligned} \tag{2.15}$$

simbol $C_{\alpha f}$ dan $C_{\alpha r}$ merupakan konstanta *cornering stiffness* untuk roda bagian depan dan bagian belakang dan apabila dilakukan pendekatan dengan sudut kecil, sudut slip α ban depan dan belakang dapat dihitung melalui

$$\begin{aligned}
\alpha_f &= \delta - \left(\frac{v_y + l_f \dot{\theta}}{v_x} \right) \\
\alpha_r &= \delta - \left(\frac{v_y + l_r \dot{\theta}}{v_x} \right)
\end{aligned} \tag{2.16}$$

gaya longitudinal roda sangat bergantung dengan rasio slip dan koefisien gesek pada roda. Sebelum menyajikan persamaan gaya ban longitudinal, akan lebih mudah untuk mendefinisikan radius efektif roda sebagai berikut:

$$r_{eff} = \frac{\sin(\beta)}{\beta} r_{nom}$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{r_{st}}{r_{nom}}\right)$$
(2.17)

dimana r_{st} merupakan radius roda saat mobil statis dan r_{nom} merupakan radius nominal roda. Kemudian slip pada roda direpresentasikan sebagai rasio melalui

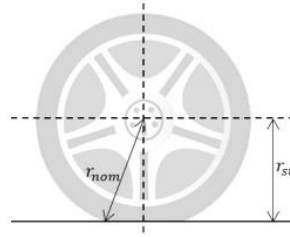
$$\sigma_x = \frac{r_{eff}\omega_w - v_x}{r_{eff}\omega_w}$$
(2.18)

pada persamaan (2.18) ω_w merupakan kecepatan putar roda, v_x yaitu kecepatan aktual dari mobil, dan r_{eff} merupakan radius efektif roda. Kemudian gaya longitudinal pada roda dapat didefinisikan seperti berikut:

$$F_{xf} = C_{\sigma f} \cdot \sigma x_f \quad f = 1,2$$

$$F_{xr} = C_{\sigma r} \cdot \sigma x_r \quad r = 3,4$$
(2.19)

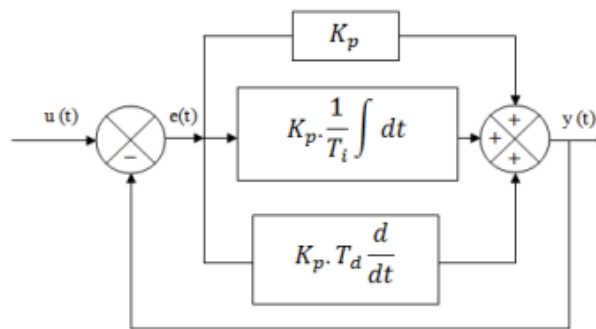
di mana $C_{\sigma f}$ dan $C_{\sigma r}$ merepresentasikan kekakuan roda depan dan belakang. Parameter normalnya berkisar antara 30 sampai 80 N/m (Alcalá Baselga, 2016).



Gambar 2.3 Perhitungan Efektif Radius Roda

2.3 Kontroler PID

Kontroler PID adalah kontroler yang banyak digunakan terutama pada *plant* industri. Kontroler PID melakukan mekanisme kontrol melalui selisih antara *set-point* dengan nilai keluaran yang di umpan balik. Selain itu, sistem kontrol PID mudah digabungkan dengan metode kontrol lain seperti *fuzzy* dan *robust*, sehingga gabungan dari dua kontroler tadi akan menjadi suatu sistem kontrol yang semakin baik. Kontroler ini terdiri dari tiga perhitungan yaitu, P (*Proportional*), I (*Integral*), D (*Derivative*). Parameter proporsional melakukan perkalian *error* saat ini. Pada parameter integral melakukan perkalian *error* tiap waktunya dan untuk parameter derivatif melakukan aksi kontrol berdasarkan kecepatan perubahan sinyal *error*. Selanjutnya, ketiga kontroler ini ditambahkan untuk menghasilkan sinyal kontrol seperti pada Gambar 2.4.

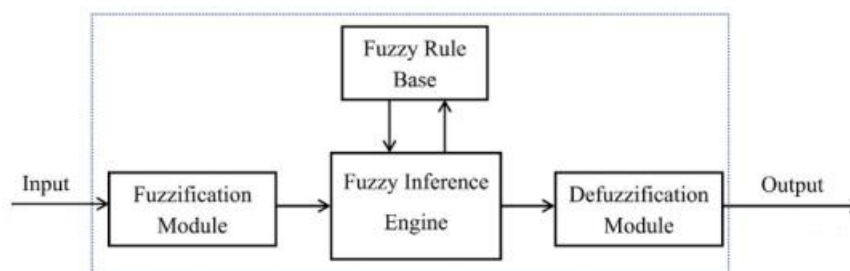


Gambar 2.4 Blok diagram kontroler PID

Pada penerapannya, parameter P digunakan untuk menambah kecepatan respon sistem namun tidak bisa menghilangkan nilai *error steady state* sistem. Parameter I digunakan untuk menghilangkan *error steady state* dan parameter D digunakan untuk menghilangkan osilasi pada respon sistem. Saat digunakan, kontroler PID terkadang tidak memakai ketiga parameter tersebut, kontroler ini dapat disebut kontrol P, PI, atau PD tergantung pada parameter apa saja yang digunakan. Kontroler PID memiliki parameter kontrol yang harus disesuaikan dengan respon yang diinginkan pada suatu model *plant*. Namun, pada sistem non-linear kontrol PID kurang handal untuk digunakan.

2.4 Kontroler Fuzzy

Komponen utama dari fuzzy adalah fuzzifikasi dan *inference engine* dan terintegrasi dengan rule base dan defuzzifikasi seperti pada Gambar 2.5. Nilai pada masukan akan dikonversi menjadi himpunan fuzzy yang memiliki derajat keanggotaan tertentu setiap elemennya. Proses dari konversi ini disebut fuzzifikasi. Kemudian, *inference engine* merupakan komponen utama kontrol fuzzy yang melakukan semua manipulasi logis serta bertanggung jawab atas pengambilan keputusan. *Rule base* dibangun dan didesain dari fungsi keanggotaan yang sesuai. Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik–titik masukan ke dalam tingkat keanggotaan. Fungsi keanggotaan suatu himpunan fuzzy dapat ditentukan dengan fungsi segitiga, trapesium atau fungsi gaussian. *Inference engine* akan mengeluarkan output dalam himpunan *fuzzy* dan dikonversi menjadi nilai numerik. Proses ini disebut defuzzifikasi. Batasan nilai masukan dan keluaran serta fungsi dari keanggotaan didesain dengan tujuan untuk mendapatkan respon terbaik.



Gambar 2.5 Skema kontroler fuzzy

2.4.1 Himpunan Fuzzy

Untuk menggunakan logika fuzzy, langkah pertama dengan menentukan arti dari tiap nilai-nilai linguistik dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Nilai-nilai tersebut pada umumnya adalah suatu bahasa yang menunjukkan tingkatan tertentu. Definisi formal dari himpunan fuzzy ditunjukkan pada persamaan (2.20), dengan X adalah semesta pembicaraan, A adalah himpunan fuzzy, dan μ_A adalah fungsi keanggotaan fuzzy untuk himpunan A (Davvaz et al., 2021)

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (2.20)$$

2.4.2 Fungsi Keanggotaan Fuzzy (*Membership Function*)

Fungsi keanggotaan fuzzy (*membership function*) adalah suatu fungsi yang menunjukkan pemetaan titik-titik masukan data ke dalam nilai keanggotaannya (derajat keanggotaan) yang memiliki interval 0 sampai 1 (Eker & Torun, 2006). Ada beberapa fungsi yang dapat digunakan seperti:

1. Representasi segitiga (*Triangular Membership Function*)

Pada representasi segitiga ditentukan oleh 3 parameter (a, b, c) yang dapat dilihat sebagai berikut:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ \frac{b-x}{c-b}; & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (2.21)$$

2. Representasi trapesium (*Trapezium Membership Function*)

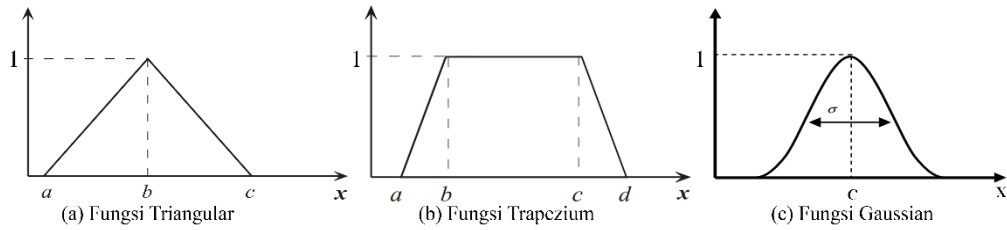
Pada representasi trapesium ditentukan oleh 4 parameter (a, b, c, d) sebagai berikut:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } d \leq c \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \frac{b-x}{c-b}; & c \leq x \leq d \end{cases} \quad (2.22)$$

3. Representasi gaussian (*Gaussian Membership Function*)

Pada representasi gaussian ditentukan oleh 2 parameter yaitu (c dan σ) dimana c adalah nilai tengah fungsi keanggotaan dan σ merupakan lebar fungsi keanggggotaan yang dapat dilihat melalui

$$\mu[x] = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (2.23)$$



Gambar 2.6 Tipe Fungsi Keanggotaan fuzzy

2.4.3 Operasi Logika Fuzzy

Operasi logika pada fuzzy merupakan operasi yang mengkombinasikan dan memodifikasi 2 atau lebih himpunan fuzzy. Nilai keanggotaan baru hasil operasi himpunan disebut *firing strength*, operasi logika fuzzy terdiri dari operator AND, OR, dan NOT.

Operator AND

Operator AND berhubungan dengan operasi *intersection* himpunan, predikat yang diperoleh dengan mengambil nilai minimum antara dua himpunan.

$$\mu A \cap B = \min (\mu A[x], \mu B[y]) \quad (2.24)$$

Operator OR

Operator OR berhubungan dengan operasi *union* pada himpunan, dimana predikat yang diperoleh dengan mengambil nilai maksimum antara dua himpunan.

$$\mu A \cup B = \max (\mu A[x], \mu B[y]) \quad (2.25)$$

Operasi NOT

Operator NOT berhubungan dengan operasi komplemen pada himpunan, dimana predikat diperoleh dari mengurangkan nilai keanggotaan elemen pada himpunan dari 2.

$$\mu A' = 1 - \mu A[x] \quad (2.26)$$

2.4.4 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses mengubah nilai tegas menjadi nilai fuzzy dengan menggunakan fungsi keanggotaan fuzzy. Apabila masukan tegas berasal dari hasil pengukuran suatu sensor, maka nilai tersebut diubah menjadi nilai fuzzy dengan menggunakan fungsi keanggotaan fuzzy yang telah ditentukan. Fungsi yang digunakan harus mencakup seluruh semesta dari masukan tegas (lebar hasil pengukuran).

Masukan tegas merupakan hasil pengukuran parameter eksternal dari sistem kontrol. Label adalah deskripsi nama yang menunjukkan suatu fungsi keanggotaan fuzzy yang memiliki domain (lebar fungsi keanggotaan fuzzy) tertentu. Semesta pembicaraan memiliki jarak yang mencakup seluruh masukan tegas.

2.4.5 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses mengubah konklusi dari inferensi fuzzy ke dalam bentuk aktual untuk melanjutkan proses. Terdapat beberapa prosedur defuzzifikasi, yaitu *Center of Area*, dan *Mean of Maxima*.

Center of Area

Metode *Center of Area* merupakan prosedur defuzzifikasi yang paling umum. Metode ini menentukan titik tengah area untuk yang merupakan titik pusat massa dari kombinasi fungsi-fungsi keanggotaannya. Formulasi perhitungan titik tersebut yang menjadi keluaran tegas (u^*)

ditunjukkan oleh persamaan (2.27), dengan b_i merupakan titik tengah dari area tiap fungsi keanggotaan dan $\int \mu_i$ merupakan area di bawah fungsi keanggotaan μ_i .

$$u^* = \frac{\sum_i b_i \int \mu_{(i)}}{\sum_i \int \mu_{(i)}} \quad (2.27)$$

Mean of Maxima

Metode *Mean of Maxima* mengambil semua nilai tiap fungsi keanggotaan dengan derajat keanggotaan maksimum dan menghitung nilai rata-rata sebagai keluaran tegas. Secara formal metode ini ditulis dengan

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n \{u \in U | \mu_U(u) = hgt\}}{n} \quad (2.28)$$

2.4.6 Sistem Inferensi Fuzzy

Sistem inferensi fuzzy merupakan bagian penting dalam logika fuzzy. Sistem ini menginterpretasikan nilai-nilai dari vektor masukan dan memberikan nilai yang sesuai ke vektor keluaran berdasarkan beberapa aturan himpunan fuzzy. Secara umum sistem inferensi fuzzy menggunakan pemetaan non-linier dari ruang masukan ke ruang keluaran dengan menggunakan logika fuzzy. Pemetaan ini diberikan oleh aturan *if-then*.

Aturan-aturan fuzzy yang telah tersusun akan digunakan dalam pada mekanisme sistem inferensi fuzzy. Mekanisme ini adalah proses pengambilan keputusan dari masing-masing premis sesuai dengan aturan fuzzy yang telah ditentukan. Pengambilan keputusan yang dilakukan terdiri dari lima langkah, yaitu fuzzifikasi masukan, aplikasi operator fuzzy, aplikasi metode implikasi, agregasi semua keluaran, dan defuzzifikasi.

Pada fuzzifikasi masukan dilakukan pemetaan masukan tegas menjadi nilai fuzzy, sehingga tiap masukan tegas memiliki nilai keanggotaan. Masukan selanjutnya diolah dengan operator fuzzy seperti AND, OR, dan NOT. Kemudian dilakukan perhitungan kuat penyulutan (*firing strength*) pada himpunan fuzzy untuk setiap variabel keluaran pada bagian konsekuen tiap aturannya yang disebut sebagai aplikasi metode implikasi. Semua hasil implikasi dari setiap aturan digabungkan untuk menghasilkan keluaran fuzzy. Contoh mekanisme inferensi fuzzy.

If x is A Then u is B

A dan B merupakan nilai linguistik yang didefinisikan oleh himpunan fuzzy dari variabel linguistik x dan u . u merupakan B adalah kesimpulan yang didapat dari premise x merupakan A yang terpenuhi. Jika masukan fuzzy lebih dari satu, pernyataan premis pada aturan fuzzy dapat menggunakan operator OR atau AND. Terdapat 2 model yang dapat dijelaskan yaitu model mamdani dan model sugeno.

Untuk model mamdani, apabila terdapat dua premis dan dua aturan, dan dipilih aturan AND maka aturan pada fuzzy-nya menjadi

Aturan 1 : *If x_1 is A_1 AND x_2 is B_1 then u is C_1*

Aturan 2 : *If x_2 is A_2 AND x_2 is B_2 then u is C_2*

Kemudian untuk model sugeno secara umum bentuk model fuzzy-nya adalah

$$\text{If } (x_1 \text{ is } A_1) \dots (x_n \text{ is } A_n) \text{ then } Z = f(x, y)$$

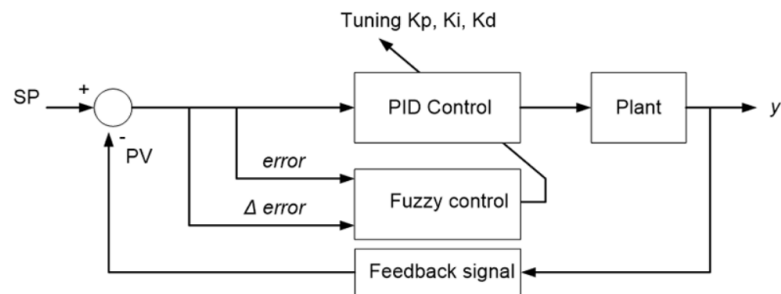
A_1, A_2, \dots, A_n Adalah himpunan fuzzy ke-i sebagai antesden. $Z = f(x,y)$ adalah fungsi tegas (biasanya merupakan fungsi linier dari x ke y). Misalkan diketahui 2 aturan berikut

Aturan 1 : *If x_1 is A_1 AND x_2 is B_1 then $Z_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$*

Aturan 2 : *If x_2 is A_2 AND x_2 is B_2 then $Z_1 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$*

2.5 Fuzzy-PID

Kontroler PID banyak digunakan karena bentuknya yang sederhana dan mudah diimplementasikan. Pada kondisi terjadi perubahan parameter beban, parameter kontroler PID harus sering di *tuning* agar kinerjanya tetap baik. Salah satu cara untuk menyetel parameter apabila terjadi perubahan ada dengan menggunakan logika fuzzy . Logika fuzzy digunakan untuk memilih nilai keluaran tiap parameter PID sesuai dengan kondisi sistem (Wenhao et al., 2008). Struktur kontroler Fuzzy-PID dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Struktur kontroler Fuzzy-PID

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

3.1 Bahan dan peralatan yang digunakan

3.1.1 Hardware

Hardware yang digunakan pada penelitian ini adalah laptop dengan spesifikasi pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Peralatan Pendukung Penelitian

Processor	Intel(R) Core(TM) i7-9750H 2.6GHz
Operating System	Windows 11 64-bit
RAM	DDR4 16GB 2666Mhz
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1650
Storage	512GB SSD

3.1.2 Software

Untuk mendukung pengerjaan Tugas Akhir ini terdapat beberapa *software* yang digunakan pada penelitian yaitu, MATLAB dan Simulink. MATLAB merupakan platform pemrograman yang didesain secara spesifik kepada *engineer* dan peneliti untuk menganalisis serta mendesain suatu sistem dan produk. Jantung dari platform MATLAB sendiri yaitu Bahasa pemrograman MATLAB, MATLAB menggunakan base matriks yang memungkinkan pengguna untuk menggunakan komputasi matematika secara natural. Pada Tugas Akhir ini akan digunakan perangkat lunak MATLAB R2022b.

Simulink merupakan sebuah *toolbox* tambahan MATLAB, fitur yang terdapat pada Simulink yaitu fungsi melakukan pemodelan, modifikasi model, simulasi, dan analisa terhadap suatu sistem. Pada pengerjaan Simulink dapat digunakan sebagai sarana dari pemodelan, simulasi, serta analisis dari sistem dinamik dengan menggunakan grafis antarmuka (GUI). Simulink sendiri terdiri dari kumpulan beberapa toolbox yang dapat digunakan untuk analisis sistem linier maupun non-linier. *Library* yang sering digunakan dalam Teknik Sistem Pengaturan antara lain *math*, *sinks*, *sources*, dsb.

3.2 Perancangan Model

3.2.1 Model Mobil

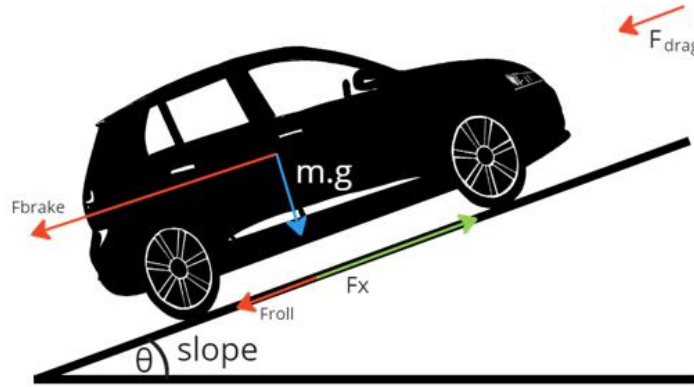
Model mobil yang digunakan pada Tugas Akhir ini mengacu pada model mobil yang telah digunakan pada penelitian dari (Fernández, 2012) dengan parameter mobil pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Parameter Model Mobil

Nama	Simbol	Nilai
Massa mobil	m	1050 kg
Percepatan gravitasi	g	9.81 m/s ²
Luas depan pada mobil	A_f	2.31 m ²
Massa jenis udara	ρ_{air}	1.225 kg/m ³
Konstanta <i>drag</i> udara	C_{drag}	1.083
Konstanta hambatan gulir	f_r	0.034
Radius roda	r_{eff}	0.316 m
Konstanta <i>stiffness longitudinal</i> roda	C_σ	80574

3.2.2 Dinamika Mobil

Pada pengerjaan Tugas Akhir ini, penelitian difokuskan pada gerak longitudinal mobil saat menghadapi tanjakan dan turunan pada jalan sehingga gerak lateral dan yaw pada mobil diabaikan serta dinamika motor, *drivetrain*, dan dinamika roda yang tidak dipertimbangkan serta rem yang disederhanakan, sehingga gaya yang bekerja pada mobil dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Gaya saat mobil melewati tanjakan.

Kemudian didapat persamaan untuk gerak longitudinal pada mobil seperti persamaan berikut

$$F_{drive} - F_{brake} - F_{drag} - F_{rolling} - F_{slope} = m \cdot a_x \quad (3.1)$$

dari persamaan diatas, gaya pada F_{drive} merupakan gaya maju yang didapat dari gaya longitudinal pada roda apabila diambil dari persamaan (2.1) maka persamaannya

$$F_{xr} - F_{brake} - F_{drag} - F_{rolling} - F_{slope} = m \cdot a_x \quad (3.2)$$

kemudian pada pemodelan mobil pada penelitian ini hanya digunakan 1 penggerak yaitu penggerak belakang dan kecepatan putar roda diasumsikan sama sehingga apabila disusun dengan mensubstitusikan dari persamaan (2.3), (2.4), (2.5), (2.6), dan (2.19) ke persamaan (3.3) didapatkan persamaan berikut:

$$C_{\sigma} \cdot \sigma_{xr} + C_{\sigma} \cdot \sigma_{xr} - b \cdot \max. force braking - \frac{1}{2} \rho_{air} C_{drag} A_f v_x^2 - f r m g \cos(\beta_x) - m g \sin(\beta_x) = m \cdot a_x \quad (3.3)$$

pada model ini untuk gaya pengereman disederhanakan menjadi b sebagai input [0-1]. Sebuah catatan juga bahwa pada model longitudinal mobil ini menggunakan *input* untuk gaya roda (u_1) dan konstanta b sebagai *input* pedal rem (u_2). Yang apabila jika dituliskan ke representasi state space model dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x} = f(x) + g(x, u)$$

dimana $f(x)$ merupakan vektor yang hanya dipengaruhi oleh state dan $g(x, u)$ dipengaruhi oleh *state* dan *input*,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{1}{m} (-F_{aero} - F_r - F_{slope}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} [F_{xr} - F_{brake}] \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

tetapi karena F_{xi} tergantung pada kecepatan roda, transformasi dalam vektor input diterapkan sebagai berikut:

$$u = \begin{bmatrix} F_{xr} \\ F_{brake} \end{bmatrix} = u = \begin{bmatrix} u1 \\ u2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_w \\ b_p \end{bmatrix}$$

Apabila dituliskan lebih lengkap, maka representasi state space model mobilnya dapat dilihat seperti berikut:

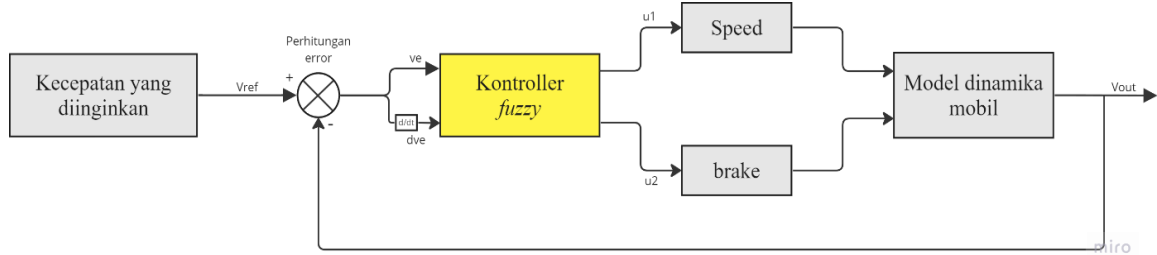
$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{1}{m} \left(-\frac{1}{2} \rho_{air} C_{drag} A_f v_x^2 - f r m g \cos(\beta_x) - m g \sin(\beta_x) \right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \left[C_\sigma \left(\frac{2 r_{eff} u_1 - 2 x_2}{r_{eff} u_1} \right) - u_2 \cdot \text{max. force braking} \right] \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.3 Diagram Blok

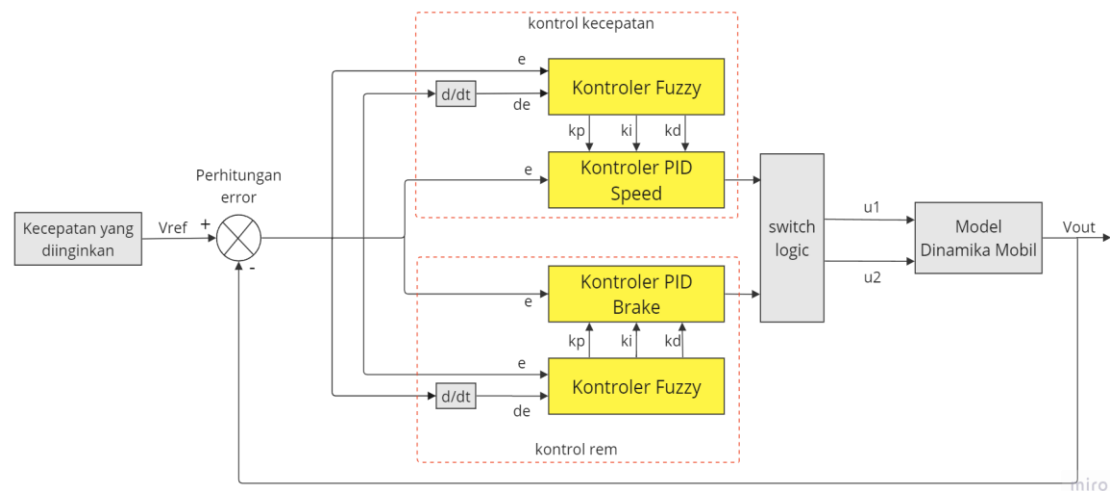
Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 menunjukkan diagram blok sistem. Blok-blok utama pada sistem ini terdapat blok kecepatan yang diinginkan, blok kontroler fuzzy,, blok kontroler PID, dan blok model dinamika mobil. Pada blok kecepatan referensi, keluaran dari blok ini merupakan kecepatan yang diatur atau telah di tetapkan yang menjadi kecepatan referensi mobil. Kemudian, pada blok kontroler fuzzy masukan dari blok ini adalah *error* kecepatan yang didapatkan dari perhitungan selisih kecepatan referensi dengan kecepatan keluaran dari sistem ini. Pada blok kontroler fuzzy, akan dilakukan perhitungan untuk menilai keluaran yang dibutuhkan sistem agar kecepatan keluarannya sesuai dengan kecepatan referensi.

Pada blok dinamika mobil mendapat 2 masukan dari kontroler, masukan pertama kontrol kecepatan yang berupa kecepatan roda dan masukan kedua adalah kontrol rem berupa nilai 0-1. Dari 2 masukan tersebut akan masuk ke perhitungan yang akan menghasilkan gaya F_x dan keluaran dari blok ini berupa V_{out} atau kecepatan aktual sistem ini.

Gambar 3.3 merupakan diagram kontrol Fuzzy-PID.



Gambar 3.2 Diagram blok sistem kontrol fuzzy pada mobil



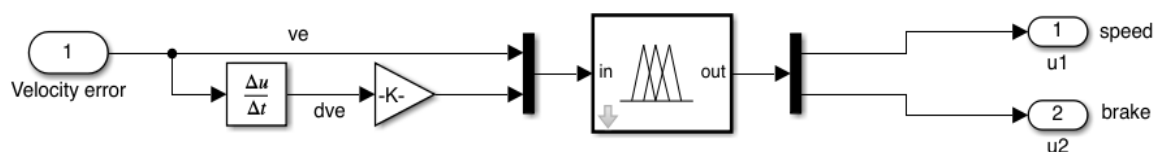
Gambar 3.3 Diagram blok sistem kontrol Fuzzy-PID pada mobil

3.4 Perancangan Kontroler

Kontroler yang digunakan pada sistem kontrol longitudinal mobil adalah kontroler fuzzy dan Fuzzy-PID. Kontrol ini digunakan untuk mengatur kecepatan putar roda yang masuk serta pengereman pada sistem. Dengan adanya kontroler fuzzy ini, akan bisa menentukan dari sistem harus menambah kecepatan atau mengerem untuk mencapai kecepatan yang diinginkan.

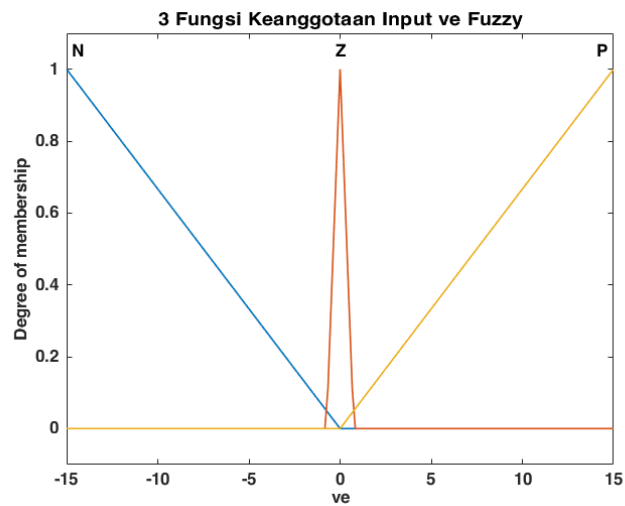
3.4.1 Kontroler Fuzzy

Struktur kontroler fuzzy dapat dilihat pada Gambar 3.4. Pada kontroler ini terdapat dua variabel masukan, yaitu *error* kecepatan atau selisih antara kecepatan referensi dengan kecepatan aktual sistem dan *delta error*. Dari kedua informasi tersebut kontroler akan menentukan besar kecepatan putar roda yang harus dipenuhi untuk mencapai kecepatan referensi atau menentukan besar rem yang dibutuhkan pada sistem ini.

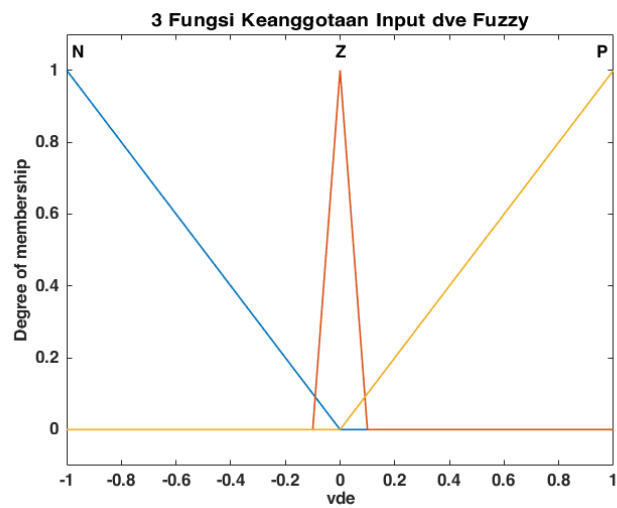


Gambar 3.4 Struktur kontroler fuzzy

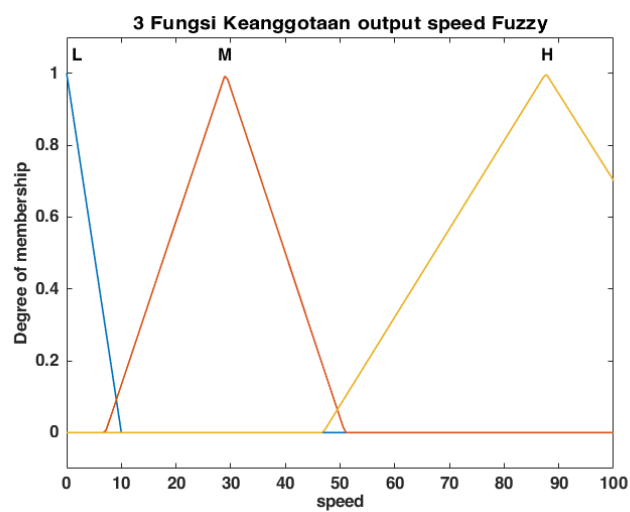
Pada sistem ini, fungsi keanggotaan dibagi menjadi 2 yaitu 3 dan 7 fungsi keanggotaan. Kemudian dilihat respon kontrol kecepatan menggunakan kontroler fuzzy. Untuk struktur fungsi fuzzy serta 3 fungsi keanggotaan pada kontroler fuzzy dapat dilihat pada Gambar 3.5, 3.6, 3.7, 3.8.



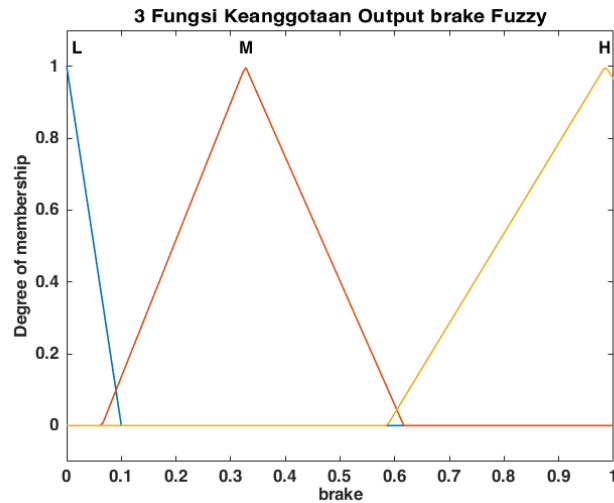
Gambar 3.5 3 Fungsi keanggotaan *error* kecepatan pada kontroler fuzzy



Gambar 3.6 Delta *error* pada 3 fungsi keanggotaan kontroler fuzzy



Gambar 3.7 3 fungsi keanggotaan keluaran *speed* fuzzy



Gambar 3.8 Keluaran fungsi keanggotaan *brake*

Tabel 3.3 Rule keluaran dari fuzzy 3 fungsi keanggotaan.

$\frac{v_e}{dv_e}$	N	Z	P
N	L	L	M
Z	L	M	H
P	M	H	H

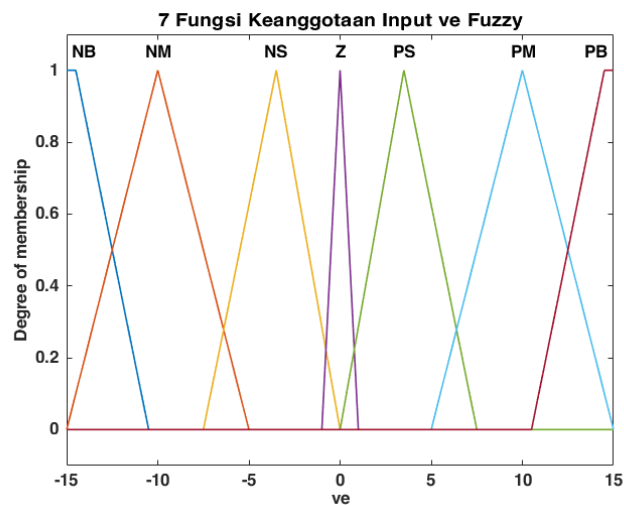
(a) Rule speed

$\frac{v_e}{dv_e}$	N	Z	P
N	H	H	L
Z	H	M	L
P	H	L	L

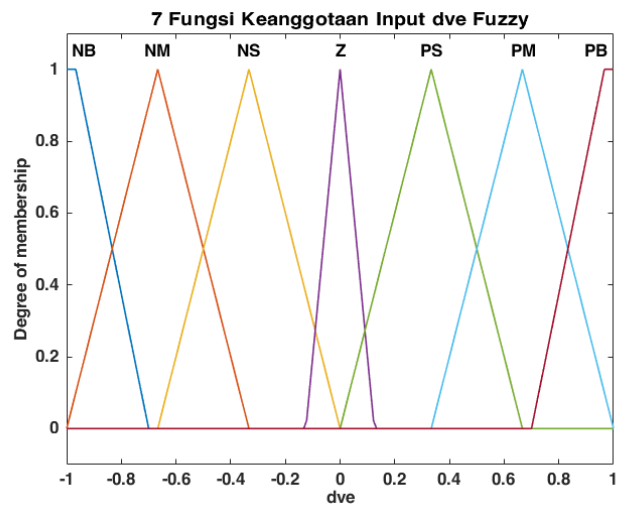
(b) Rule brake

pada Tabel 3.3 dapat dilihat *rules* yang bekerja pada setiap masukannya, untuk definisi masing-masing rules yaitu N = *negative*, Z = *zero*, P = *positive* L = *low*, M = *medium*, dan H = *high*.

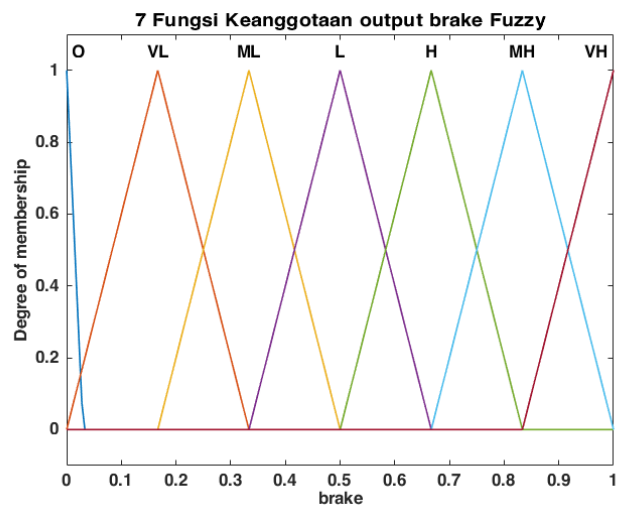
Kemudian dibuat fungsi keanggotaan untuk masukan serta keluaran dengan 7 fungsi keanggotaan kontroler fuzzy yang dapat dilihat melalui Gambar 3.9, 3.10, 3.11, dan 3.12



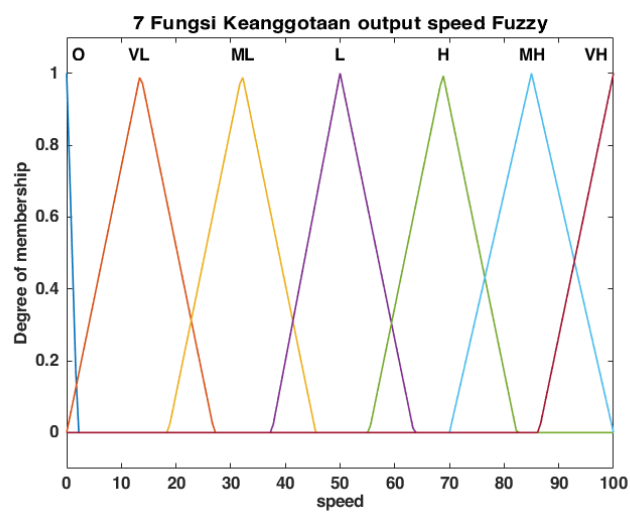
Gambar 3.9 Masukan *error* kecepatan fuzzy 7 fungsi keanggotaan



Gambar 3.10 Masukan *delta error* kecepatan 7 fungsi keanggotaan fuzzy



Gambar 3.11 Keluaran *brake* kontrol fuzzy 7 fungsi keanggotaan



Gambar 3.12 Keluaran *speed* kontroler fuzzy 7 fungsi keanggotaan

Tabel 3.4 *Rule* keluaran *speed* fuzzy 7 fungsi keanggotaan

$\frac{v_e}{dv_e}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	O	O	O	O	O	VL	ML
NM	O	O	O	O	VL	ML	L
NS	O	O	O	VL	ML	L	H
Z	O	O	VL	ML	L	H	MH
PS	O	VL	ML	L	H	MH	VH
PM	VL	ML	L	H	MH	VH	VH
PB	ML	L	H	MH	VH	VH	VH

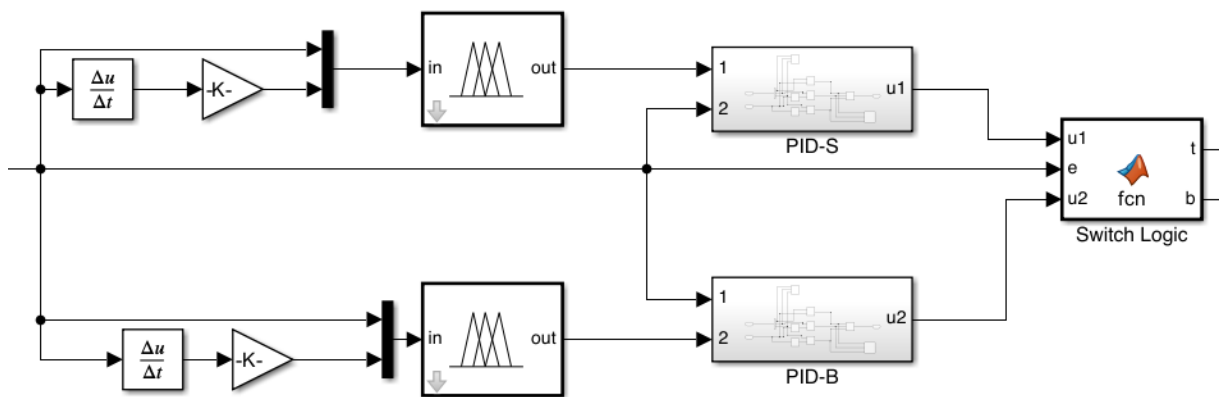
Tabel 3.5 *Rule* keluaran fuzzy *brake* 7 fungsi keanggotaan

$\frac{v_e}{dv_e}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	VH	VH	MH	H	L	ML	VL
NM	VH	MH	H	L	ML	VL	O
NS	MH	H	L	ML	VL	O	O
Z	H	L	ML	VL	O	O	O
PS	L	ML	VL	O	O	O	O
PM	ML	VL	O	O	O	O	O
PB	VL	O	O	O	O	O	O

Pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5 dapat dilihat *rules* yang bekerja pada setiap masukannya pada fuzzy 7 fungsi keanggotaan, untuk definisi masing-masing rules yaitu NB = *negative big*, NM = *negative medium*, NS = *negative small*, Z = *zero*, PS = *positive small*, PM = *positive medium*, PB = *positive big*, O = *near zero*, VL = *very low*, ML = *medium low*, H = *high*, MH = *medium high* dan VH = *very high*.

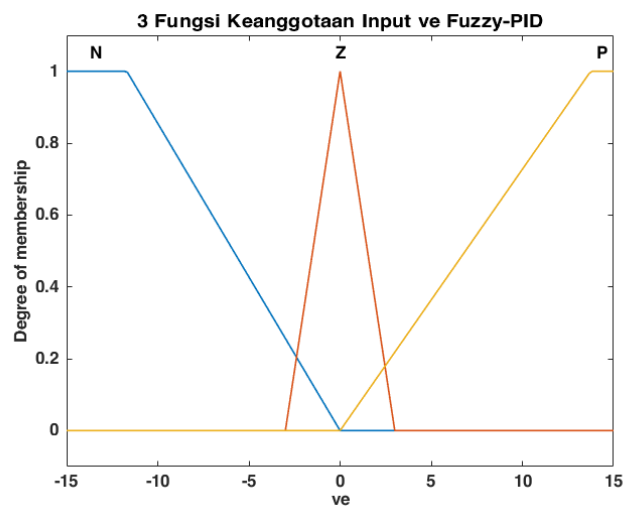
3.4.2 Kontroler Fuzzy-PID

Kontroler Fuzzy-PID merupakan paduan antara kontroler PID dan kontroler fuzzy. Pada kontroler Fuzzy-PID di penelitian ini, fungsi dari kontroler fuzzy adalah untuk menentukan parameter nilai k_p , k_i , dan k_d yang akan digunakan untuk mengontrol kecepatan mobil otonom. Program fuzzy digunakan sebagai *tuning* kendali PID. Kontroler Fuzzy-PID dapat dilihat pada Gambar 3.13.

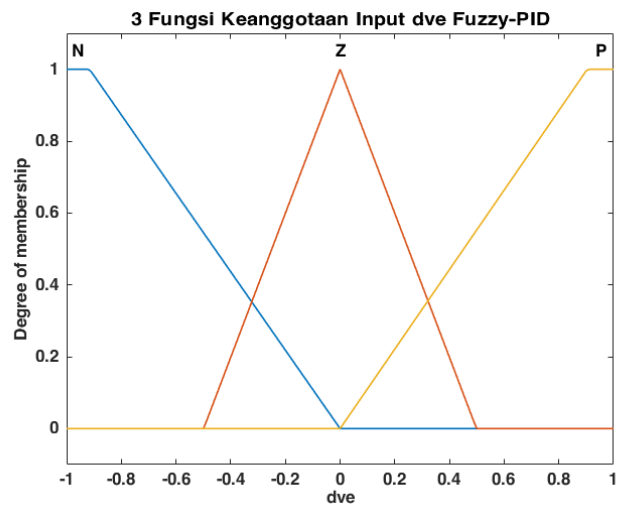


Gambar 3.13 Struktur Kontroler Fuzzy-PID

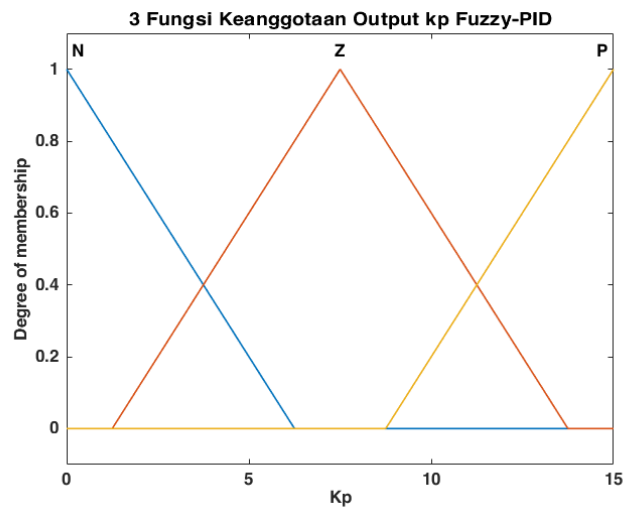
Pada kontroler Fuzzy-PID, digunakan variasi 3 dan 7 fungsi keanggotaan pada masukan dan keluarannya. Masukan pada kontroler ini berupa *error* kecepatan serta delta *error* yang kemudian akan masuk ke dalam fuzzy. Untuk keluaran dari fuzzy-nya berupa nilai k_p , k_i , dan k_d yang akan masuk ke dalam kontroler PID. Kemudian dapat dilihat untuk 3 fungsi keanggotaan masukan dan keluaran serta basis aturan yang digunakan pada kontroler Fuzzy-PID pada Gambar 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 dan pada tabel 3.18



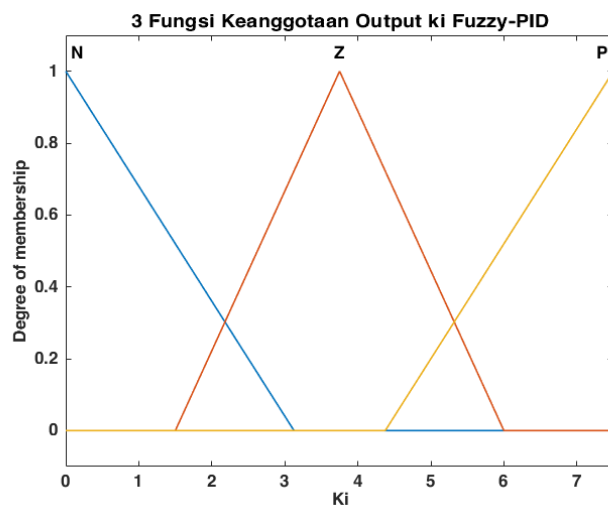
Gambar 3.14 3 fungsi keanggotaan pada masukan *error* kecepatan



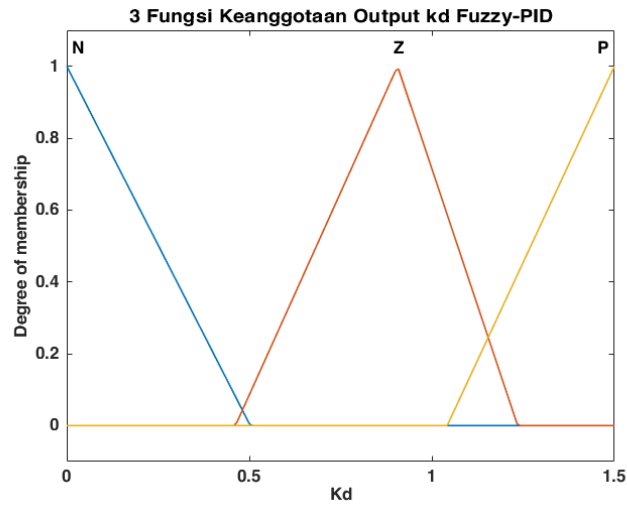
Gambar 3.15 Masukan delta *error* dengan 3 fungsi keanggotaan



Gambar 3.16 3 fungsi keanggotaan keluaran k_p



Gambar 3.17 3 fungsi keanggotaan keluaran k_i



Gambar 3.18 3 fungsi keanggotaan keluaran k_d

Tabel 3.6 Aturan keluaran k_p , k_i , dan k_d pada Fuzzy-PID

$\frac{v_e}{dv_e}$	N	Z	P
N	L	M	H
Z	H	M	H
P	H	H	H

(a) Rule k_p

$\frac{v_e}{dv_e}$	N	Z	P
N	L	M	M
Z	M	M	H
P	M	H	H

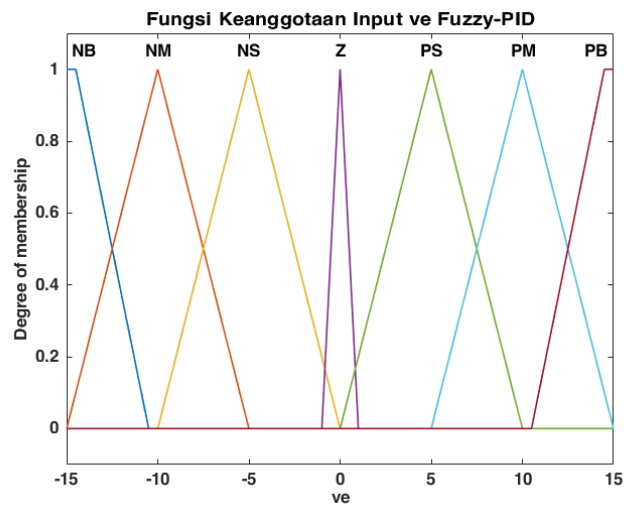
(b) Rule k_i

$\frac{v_e}{dv_e}$	N	Z	P
N	L	M	M
Z	M	M	H
P	M	H	H

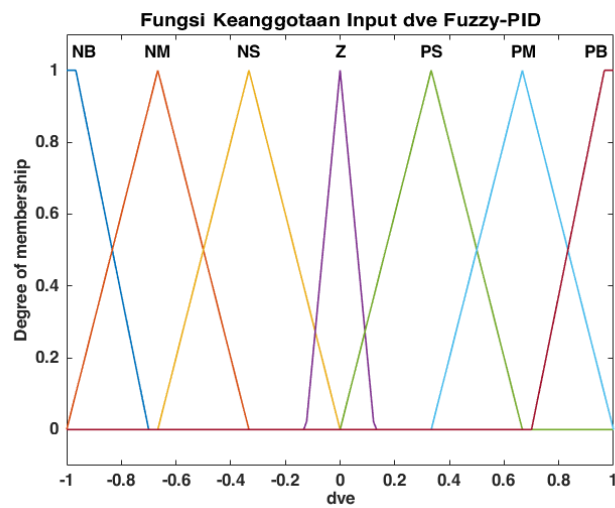
(c) Rule k_d

pada Tabel 3.6 dapat dilihat *rules* untuk tiap keluaran berdasarkan masukannya, untuk definisi masing-masing *rules* k_p , k_i , k_d yaitu N = *negative*, Z = *zero*, P = *positive* L = *low*, M = *medium*, dan H = *high*.

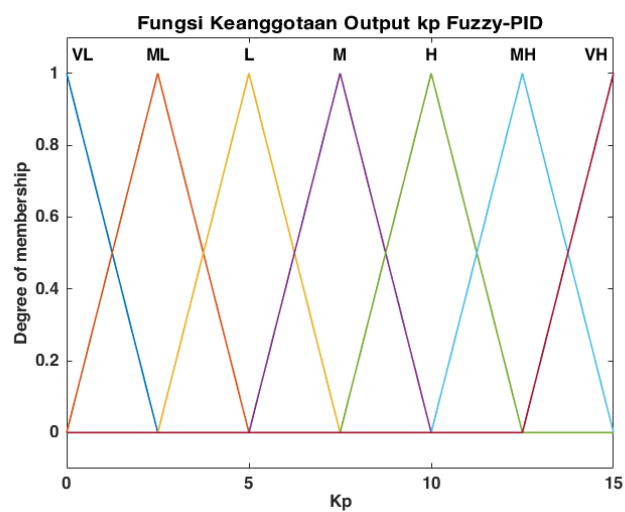
Kemudian, untuk perancangan kontroler Fuzzy-PID dengan 7 fungsi keanggotaan masukan v_e dan dv_e serta keluaran k_p , k_i , dan k_d seperti berikut:



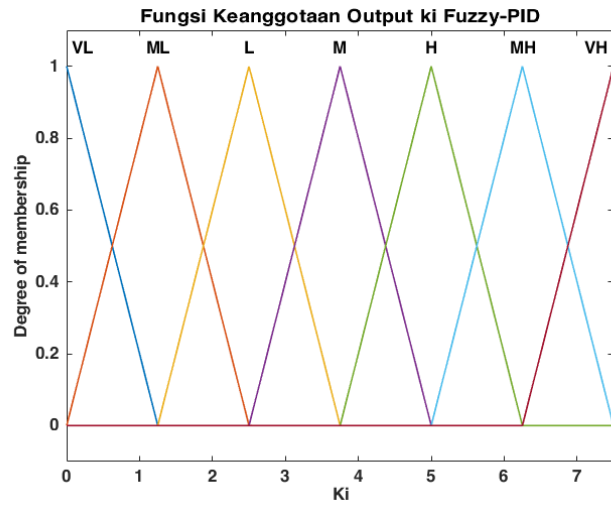
Gambar 3.19 Masukan *error* kecepatan Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan.



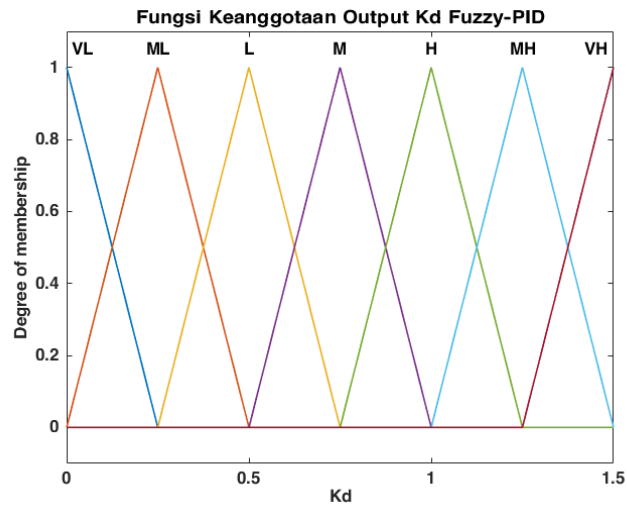
Gambar 3.20 Masukan *delta error* kecepatan Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan.



Gambar 3.21 Keluaran variabel k_p Fuzzy-PID.



Gambar 3.22 7 fungsi keanggotaan keluaran variabel k_i pada Fuzzy-PID.



Gambar 3.23 Keluaran 7 fungsi keanggotaan variabel k_d pada Fuzzy-PID.

Tabel 3.7 *Rule* keluaran k_p 7 Fungsi Keanggotaan Fuzzy-PID

$\frac{v_e}{dv_e}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	VL	ML	ML	L	L	M	M
NM	ML	ML	L	L	M	M	M
NS	ML	L	L	M	M	M	H
Z	L	L	M	M	M	H	H
PS	L	M	M	M	H	H	MH
PM	M	M	M	H	H	MH	VH
PB	M	M	H	H	MH	VH	VH

Tabel 3.8 *Rule* keluaran k_i Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan.

$\frac{v_e}{dv_e}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	VL	ML	ML	L	L	M	M
NM	ML	ML	L	L	M	M	M
NS	ML	L	L	M	M	M	H
Z	L	L	M	M	M	H	H
PS	L	M	M	M	H	H	MH
PM	M	M	M	H	H	MH	VH
PB	M	M	H	H	MH	VH	VH

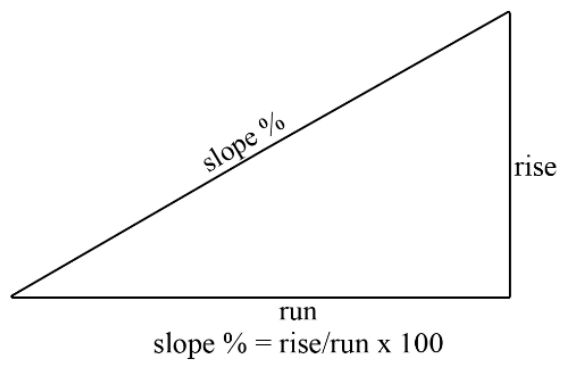
Tabel 3.9 *Rule* keluaran k_d Fuzzy-PID dengan 7 fungsi keanggotaan.

$\frac{v_e}{dv_e}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	VL	ML	L	M	H	MH	MH
NM	ML	L	M	H	MH	MH	VH
NS	L	M	H	MH	MH	VH	VH
Z	M	H	MH	MH	VH	VH	VH
PS	H	MH	MH	VH	VH	VH	VH
PM	MH	MH	VH	VH	VH	VH	VH
PB	MH	VH	VH	VH	VH	VH	VH

Pada Tabel 3.7, 3.8, dan 3.9 dapat dilihat *rules* yang bekerja pada tiap keluaran pada Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan untuk nilai k_p , k_i , k_d , definisi masing-masing masukan dan keluarannya yaitu NB = *negative big*, NM = *negative medium*, NS = *negative small*, Z = *zero*, PS = *positive small*, PM = *positive medium*, PB = *positive big*, VL = *very low*, ML = *medium low*, M = *medium*, H = *high*, MH = *medium high* dan VH = *very high*.

3.5 Skenario Pengujian Sistem

Pada penelitian ini, pengujian dilakukan dengan mencoba sistem dengan variasi sinyal masukan pada kecepatan referensi. Variasi masukan (V_{ref}) dibedakan menjadi 15 km/jam, 30 km/jam, dan 45 km/jam. Kemudian untuk pengujian selanjutnya dilakukan dengan penambahan gangguan berupa tanjakan atau turunan untuk melihat respon sistem apakah bisa mempertahankan kecepatannya saat menghadapi gangguan tersebut. Untuk mendesain gangguan slope yang terjadi dilakukan dengan cara merubah sudut jalan ($\beta_x = 0, \beta_x > 0$, dan $\beta_x < 0$) dengan masukan blok ke persamaan F_{slope} untuk menambah dinamika jalan yang akan dilewati. Skenario ini dihasilkan dengan menggunakan masukan *repeating sequence stair* dengan *time sampling* setiap 10 detik untuk mendesain slope yang terjadi pada pengujian dengan besaran tanjakan dan turunan (slope) 0% hingga 45%. Untuk menghitung besar slope seperti pada Gambar 3.24, pada penelitian ini panjang *run* dinormalisasi menjadi 100 m dan untuk besar *rise* digunakan *repeating sequence stair* untuk merubah-ubah nilai *rise* yang dapat di lihat pada lampiran. Besar tanjakan dapat dinyatakan seperti pada gambar 3.24.



Gambar 3.24 Perhitungan besar % slope

Halaman ini sengaja dikosongkan

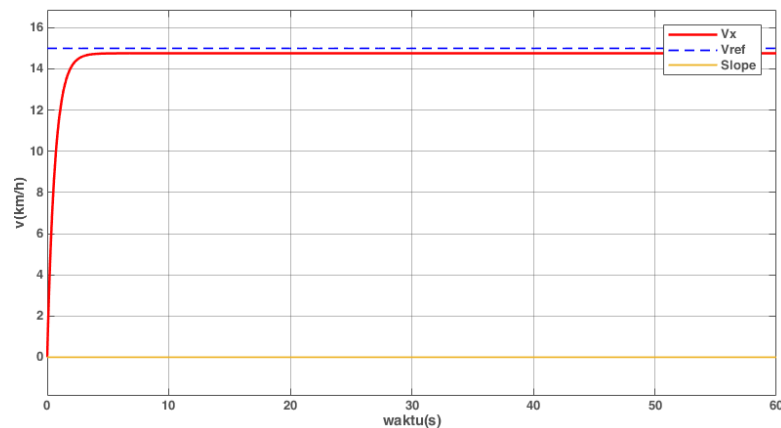
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil penelitian

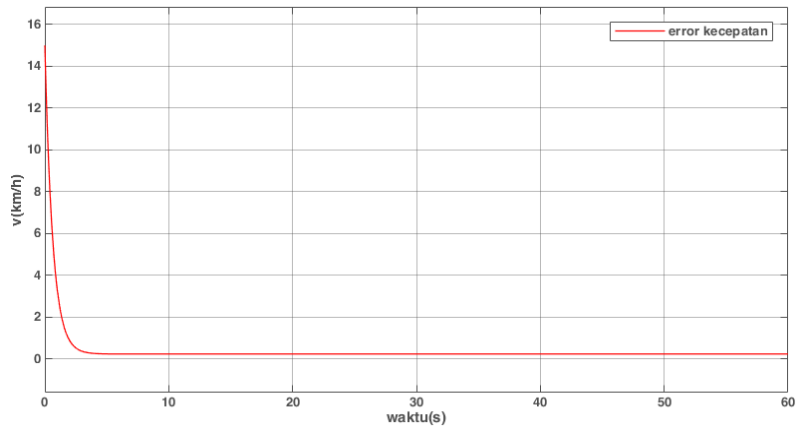
Hasil dari penelitian dibagi menjadi dua bagian yaitu pada skenario penelitian menggunakan kontroler fuzzy dan yang kedua merupakan kontroler fuzzy-PID.

4.1.1 Kontroler *Fuzzy*

Hasil pengujian yang pertama merupakan variasi masukan sinyal referensi kecepatan 15 km/h, 30 km/h, dan 45 km/h. Hasil dari kontrol kecepatan menggunakan kontroler fuzzy dapat dilihat pada Gambar 4.1 , 4.2, 4.3 dapat dilihat respon kinerja kontroler fuzzy dengan tiga fungsi keanggotaan pada masukan variasi kecepatan referensi tanpa tanjakan atau turunan. Dapat dilihat dari data tersebut pada kecepatan 15 km/h didapat nilai error steady state sebesar 0.2441 km/h dan RMSE sebesar 1.8716 km/h. Kemudian pada kecepatan 30 km/h didapat nilai error steady state sebesar 1.184 km/h dan nilai RMSE sebesar 3.954 km/h. Pada variasi kecepatan terakhir sebesar 45 km/h, didapat nilai error steady state dari data sebesar 2.1252 km/h dan nilai RMSE 7.5684 km/h. Berdasarkan data yang telah didapat, diketahui bahwa pada kontroler fuzzy semakin besar kecepatan referensi yang digunakan maka error yang terjadi semakin besar.

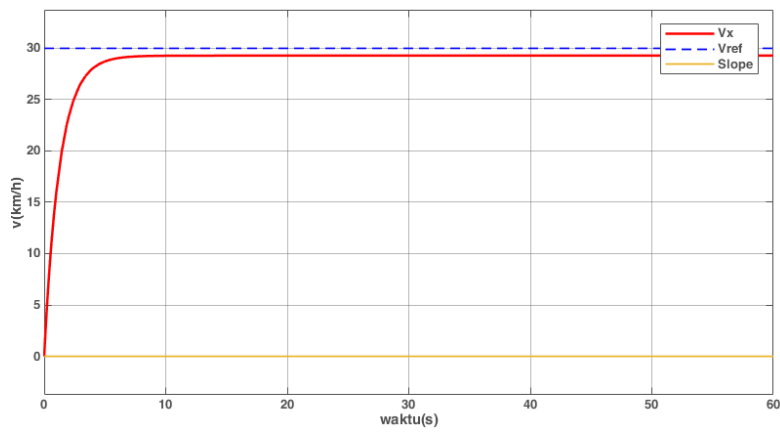


(a) Respon kontroler dengan masukan V_{ref} 15 km/h

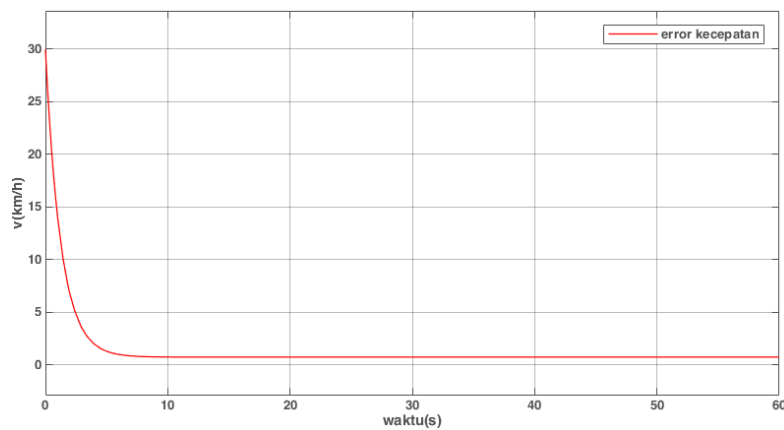


(b) besar *error* kecepatan pada V_{ref} 15 km/h

Gambar 4.1 Respon kontroler *fuzzy* pada kecepatan 15 km/h

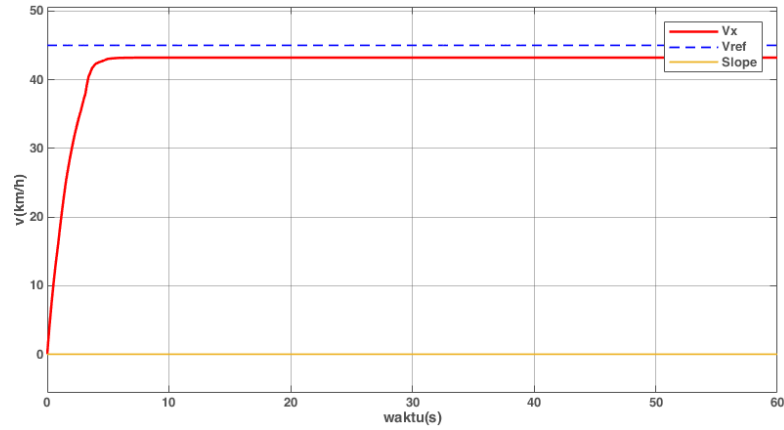


(a) Respon kontroler Fuzzy 3 fungsi keanggotaan pada V_{ref} 30 km/h

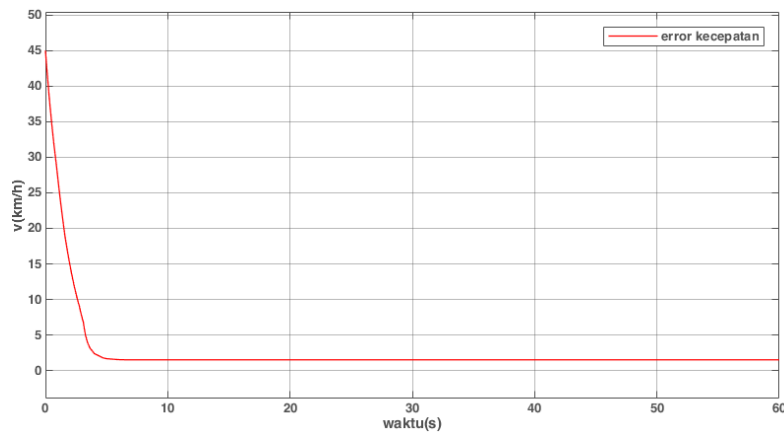


(b) Besar *error* pada masukan V_{ref} 30 km/h

Gambar 4.2 Kecepatan mobil dengan kontroler fuzzy pada kecepatan 30 km/h



(a) Respon kontroler pada V_{ref} 45 km/h

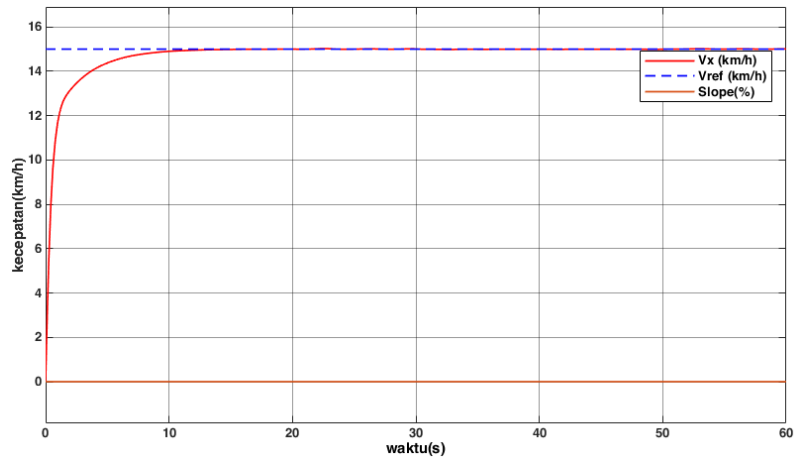


(b) Besar *error* pada V_{ref} 45 km/h

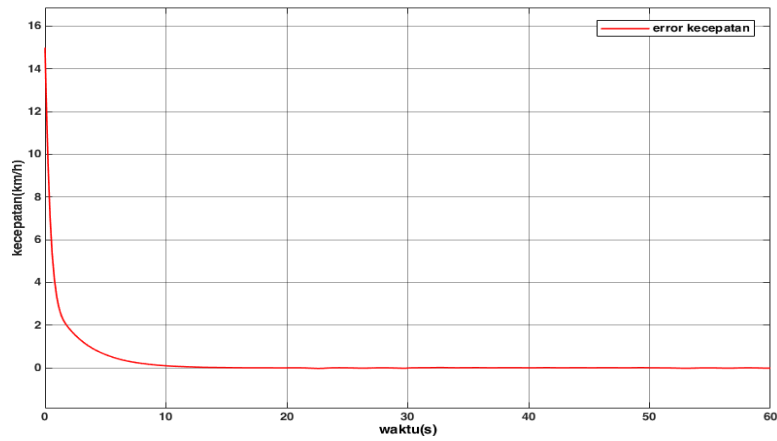
Gambar 4.3 Respon kontroler fuzzy 3 fungsi kenggotaan pada kecepatan 45 km/h

4.1.2 Kontroler *Fuzzy-PID*

Hasil pengujian yang pertama merupakan variasi masukan sinyal referensi kecepatan, hasil dari kontrol kecepatan menggunakan fuzzy-PID dapat dilihat pada Gambar 4.4, 4.5, dan 4.6. Berdasarkan hasil dari simulasi didapatkan nilai respon serta *error* dari masing-masing pengujian variasi sinyal referensi kecepatan. Pada variasi pertama 15 km/h, didapatkan data untuk nilai *error steady state* sebesar 0.03442 km/h dan nilai RMSE sebesar 1.2806 km/h. Pada variasi kecepatan 30 km/h, nilai dari RMSE yang didapat sebesar 3.4846 km/h dan nilai *error steady state* sebesar 0.06954 km/h. Untuk variasi terakhir kecepatan referensi 45 km/h didapat data untuk *error steady state* sebesar 0.07459 km/h dan nilai RMSE 4.7370 km/h. Dapat dilihat dari gambar 4.7, 4.9, 4.11 pada kontroler Fuzzy-PID respon saat kecepatan referensi tertinggi mengalami *overshoot* sebesar 9.16% yang kemudian kembali ke nilai *steady state*.

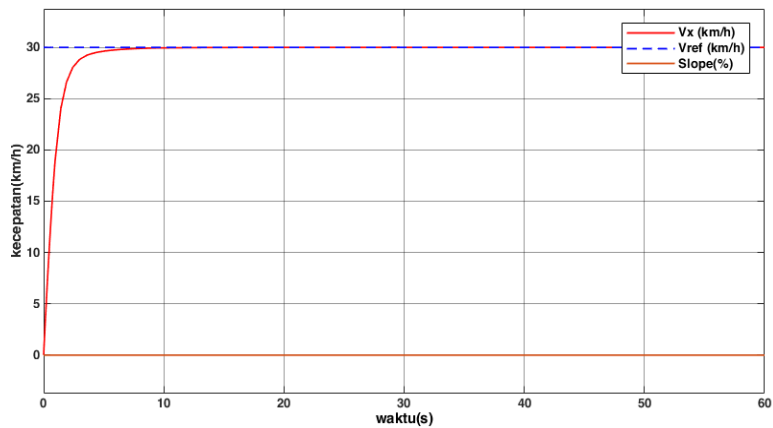


(a) Respon kontroler Fuzzy-PID pada V_{ref} 15 km/h

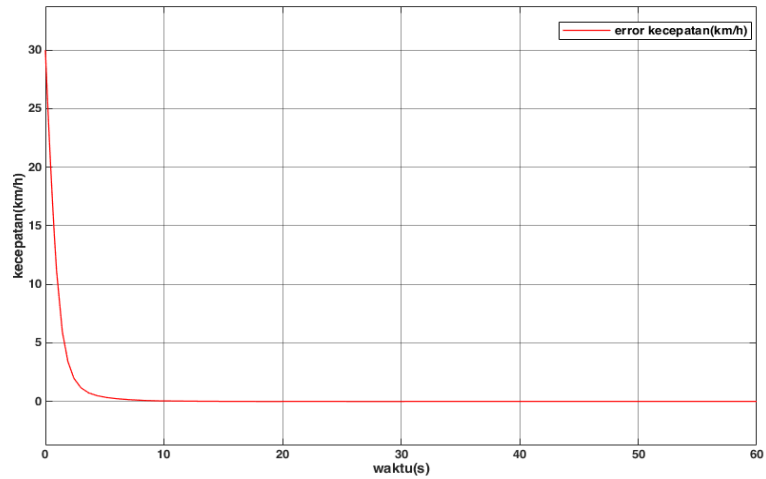


(b) *Error* kecepatan

Gambar 4.4 Respon sistem pada Fuzzy-PID dengan V_{ref} 15 km/h

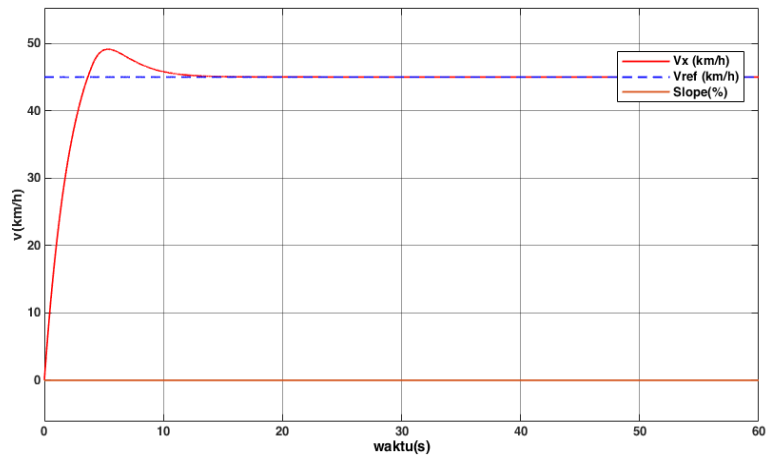


(a) Respon kontroler Fuzzy-PID pada V_{ref} 30 km/h

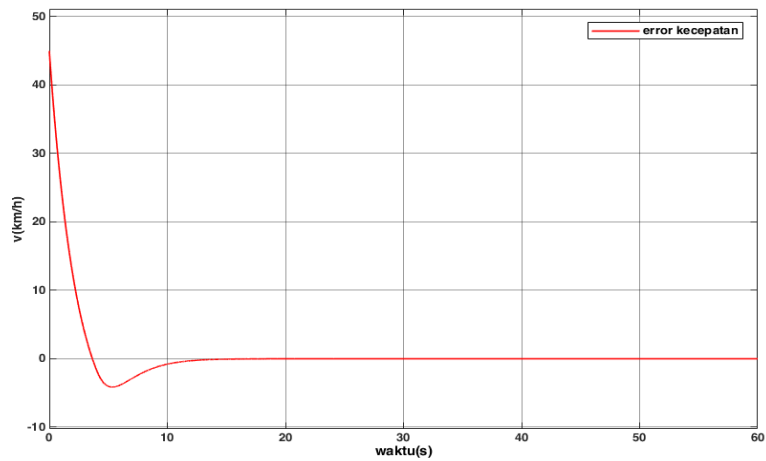


(b) *Error kecepatan pada V_{ref} 30 km/h*

Gambar 4.5 Respon *error* kecepatan saat kecepatan 30 km/h



(a) Respon sistem kontroler Fuzzy-PID pada V_{ref} 45 km/h

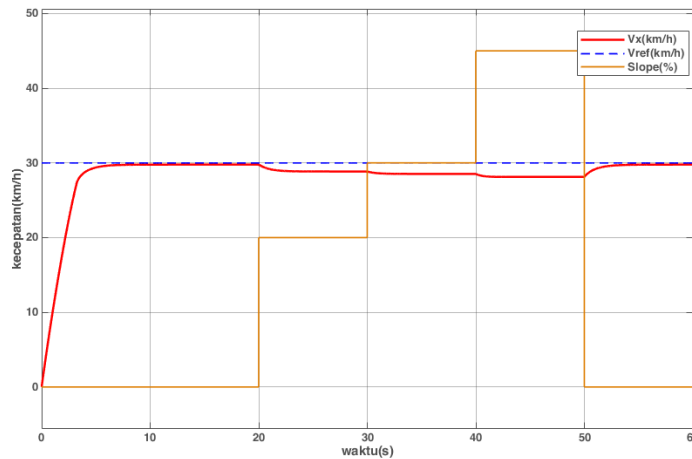


(b) *Error pada V_{ref} 45km/h*

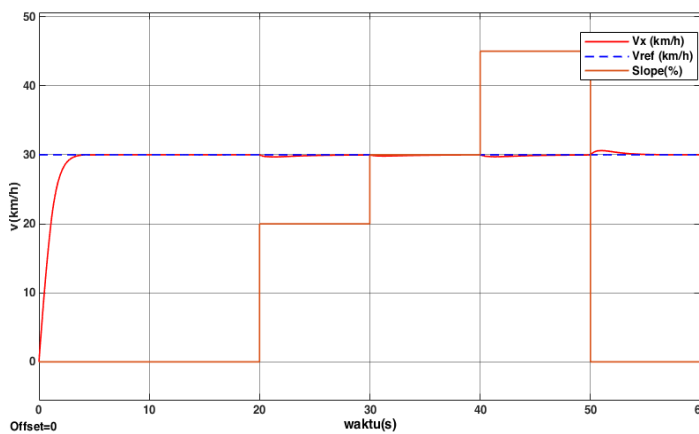
Gambar 4.6 Respon kontroler Fuzzy-PID pada kecepatan 45 km/h jalan datar

4.1.3 Kontroler Fuzzy dan Fuzzy-PID 3 MF pada jalan tanjakan

Pada skenario jalan menanjak berdasarkan Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 didapatkan respon sistem dari masing-masing kontroler. Pada kontroler Fuzzy didapat nilai RMSE sebesar 4.6064 km/h dan *error steady state* sebesar 2.197 km/h. Kemudian pada Fuzzy-PID berdasarkan hasil simulasi didapat nilai RMSE dan *error steady state* sebesar 3.8258 km/h dan 0.06730 km/h.



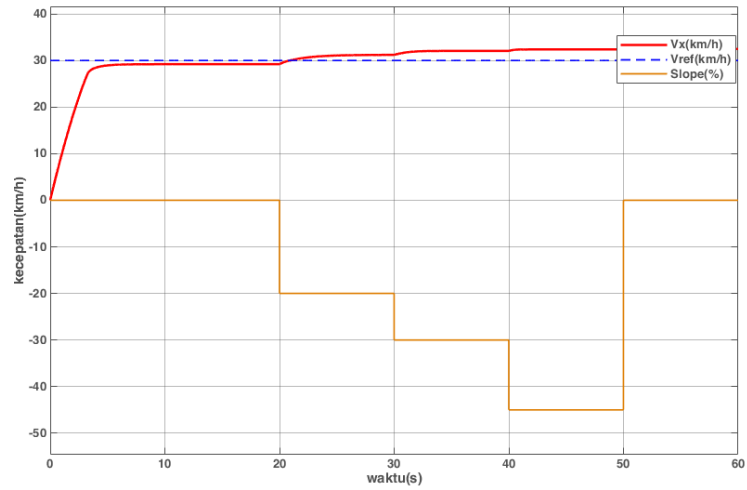
Gambar 4.7 Kontroler fuzzy 3 MF pada jalan Menanjak



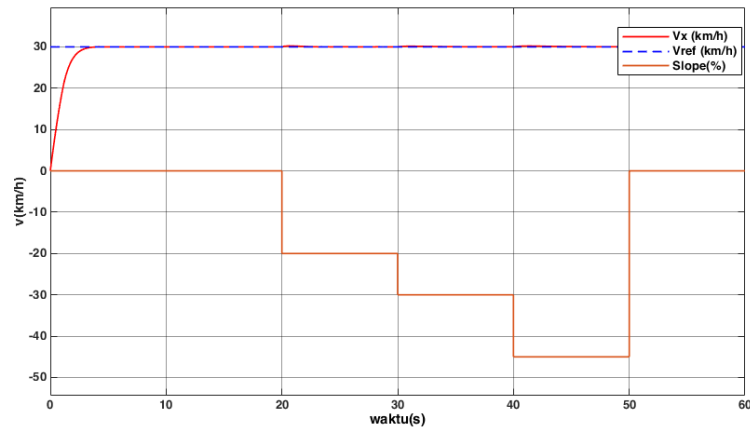
Gambar 4.8 Kontroler fuzzy-PID 3 MF pada jalan menanjak

4.1.4 Kontroler Fuzzy dan Fuzzy-PID 3 MF pada jalan dengan turunan

Dari Gambar 4.9 dan 4.10 dapat dilihat respon sistem berdasarkan masing-masing kontroler saat melewati jalan menurun. Pada kontroler fuzzy, dapat dilihat kecepatannya mengalami penambahan saat melewati jalan menurun dan didapat nilai RMSE sebesar 4.7726 km/h dan *error steady state* sebesar 2.372 km/h. Kemudian pada kontroler Fuzzy-PID nilai RMSE sebesar 3.7918 km/h dan *error steady state* sebesar 0.06816 km/h.

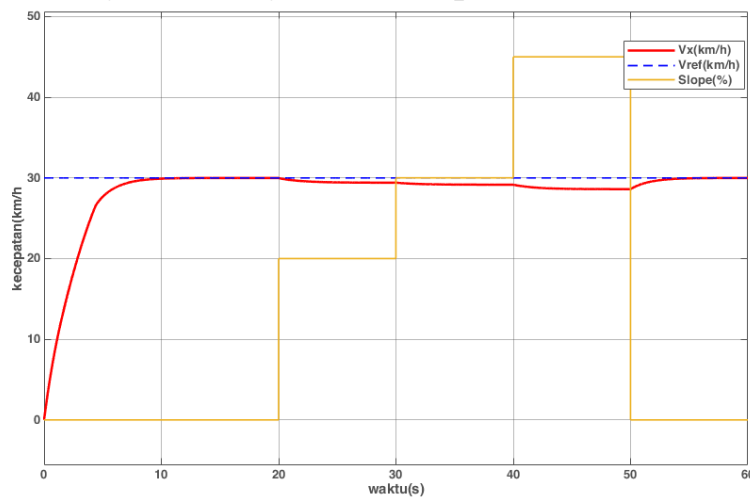


Gambar 4.9 Kontroler Fuzzy dengan 3 fungsi keanggotaan pada jalan menurun

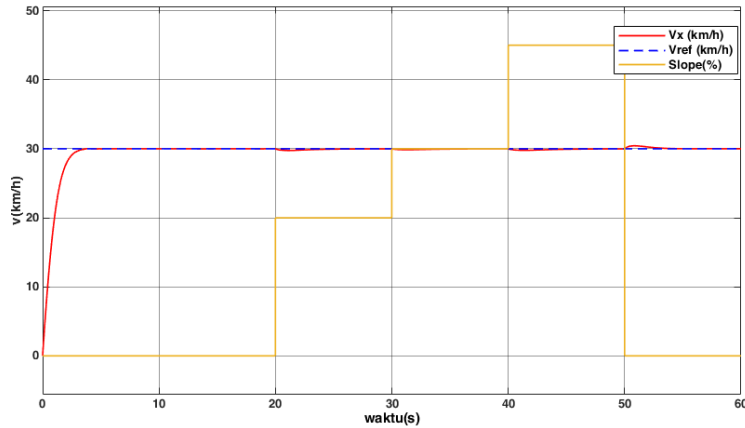


Gambar 4.10 Fuzzy-PID 3 fungsi keanggotaan pada jalan menurun

4.1.5 Kontroler Fuzzy dan Fuzzy-PID 7 MF pada skenario jalan menanjak



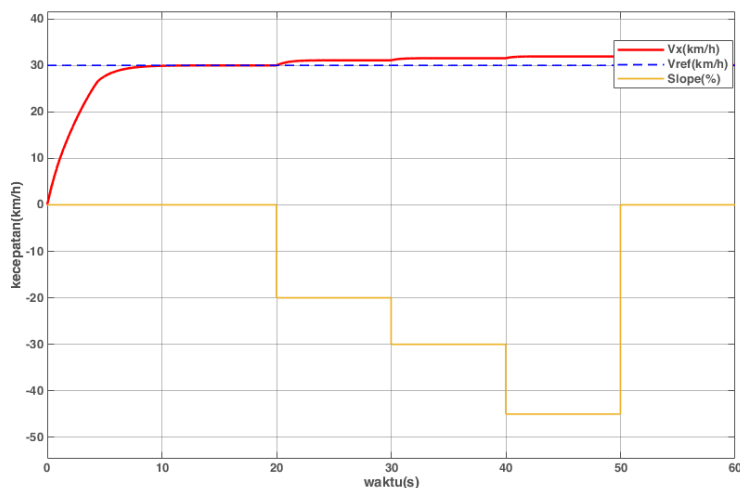
Gambar 4.11 Fuzzy dengan 7 fungsi keanggotaan pada jalan menanjak



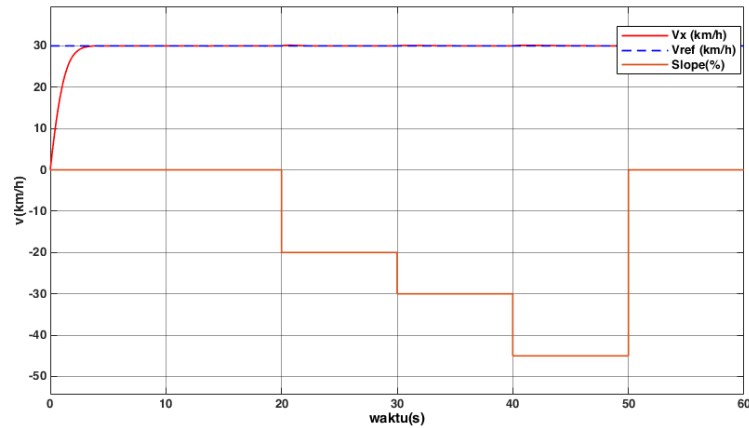
Gambar 4.12 Kontroler Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan pada jalan menanjak

Pada variasi kontroler fuzzy dan Fuzzy-PID dengan 7 fungsi keanggotaan didapatkan hasil dari Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 percobaan pada jalan menanjak untuk kontroler fuzzy dengan nilai RMSE sebesar 4.5144 km/h dan *error steady state* sebesar 2.170 km/h. Kemudian untuk kontroler Fuzzy-PID didapatkan besar nilai RMSE sebesar 3.6829 km/h dan *error steady state* sebesar 0.05955 km/h. Dari hasil diatas dapat diketahui jika kontroler Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan memiliki *error* yang lebih kecil dibandingkan dengan kontroler fuzzy 7 fungsi keanggotaan. Pada kontroler fuzzy, saat melewati jalan tanjakan kecepatan mobil akan berkurang mengikuti ketinggian tanjakan yang dilewati seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.17. Pada Fuzzy-PID, kontroler dapat merespon perubahan yang terjadi apabila terdapat jalan menanjak. Kontroler Fuzzy-PID dapat memulihkan kecepatan sesuai dengan kecepatan yang diinginkan seperti yang dapat diliat pada Gambar 4.18.

4.1.6 Kontroler Fuzzy dan Fuzzy-PID 7 MF pada skenario jalan menurun



Gambar 4.13 Kontroler Fuzzy pada jalan menanjak dengan 7 fungsi keanggotaan



Gambar 4.14 Kontroler Fuzzy-PID 7 fungsi keanggotaan pada jalan menurun

Pada pengujian jalan menurun digunakan variasi besar slope saat jalan menurun sebesar 20, 30, dan 45%. Berdasarkan hasil simulasi, didapat data RMSE dan *error steady state* untuk kontroler fuzzy dan Fuzzy-PID berturut-turut sebesar 4.5521 km/h dan 2.154 km/h pada Fuzzy serta 3.6232 km/h dan 0.06258 km/h pada Fuzzy-PID. Dari Gambar 4.13 diketahui kontroler fuzzy tidak dapat mempertahankan kecepatannya sesuai dengan kecepatan referensi walaupun telah mencapai nilai steady statenya. Pada Gambar 4.14 dapat dilihat respon kontroler Fuzzy-PID saat menghadapi perubahan yang terjadi saat turunan, kontroler dapat mengatasi adanya perubahan yang terjadi dan mempertahankan kecepatannya sesuai dengan referensi yang diberikan.

4.2 Pembahasan

Dari hasil simulasi didapat data yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 untuk skenario tanpa tanjakan dengan variasi kecepatan dan Tabel 4.2 untuk skenario dengan tanjakan dan turunan. Dari hasil simulasi variasi kecepatan tanpa tanjakan atau turunan dapat dilihat kontroler Fuzzy-PID memiliki RMSE serta error yang lebih kecil dibandingkan dengan kontroler fuzzy. Hal ini terlihat dari data yang diperoleh pada Tabel 4.1 dengan hasil RMSE dan *error steady state* pada variasi kecepatan 15, 30, 45 km/h pada kontroler Fuzzy-PID nilai RMSE berturut-turut yaitu 1.2806 km/h, 3.4846 km/h, dan 6.7370 km/h dan besar *error steady state* yaitu 0.3442 km/h, 0.6954 dan 0.07459 km/h. Pada kontroler fuzzy didapatkan nilai RMSE untuk setiap variasi kecepatannya sebesar 1.8716 km/h, 3.39542 km/h, 7.5684 km/h dan *error steady state* sebesar 0.2441 km/h, 1.1844 km/h, dan 2.1252 km.h.

Kemudian untuk skenario selanjutnya yaitu dengan tanjakan serta variasi fungsi keanggotaan untuk setiap kontrolernya didapatkan hasil untuk skenario tanjakan pada 3 fungsi keanggotaan kontroler Fuzzy-PID untuk nilai RMSE dan *error steady state* sebesar 3.8258 km/h dan 0.06730 km/h. Sedangkan pada kontroler fuzzy didapat nilai RMSE sebesar 4.6064 km/h dan *error steady state* 2.197 km/h. Lalu, pada kontroler dengan 7 fungsi keanggotaan didapat besar RMSE dan *error steady state* untuk kontroler Fuzzy-PID dan kontroler fuzzy berturut-turut sebesar 3.6829 km/h, 0.05955 km/h dan 4.5144 km/h, 2.170 km/h. Terlihat disini, untuk kedua variasi fungsi keanggotaan, kontroler dengan 3 fungsi keanggotaan memiliki *error* yang lebih besar dibanding kontroler dengan 7 fungsi keanggotaan. Kontroler Fuzzy-PID juga memiliki nilai RMSE serta *error steady state* yang lebih kecil dibanding kontroler fuzzy pada kedua variasi keanggotaannya.

Pada skenario jalan menurun dengan variasi fungsi keanggotaan, kontroler Fuzzy-PID memiliki error RMSE dan *error steady state* yang lebih kecil dibanding kontroler fuzzy sama seperti pada skenario sebelumnya. Hal ini dapat dilihat dari hasil simulasi masing-masing kontroler, pada kontroler Fuzzy-PID dengan 3 fungsi keanggotaan didapat nilai RMSE 3.7918 km/h dan *error steady state* 0.0618 km/h serta pada kontroler fuzzy, nilai RMSE 4.7726 km/h dan *error steady state* 2.372 km/h dengan 3 fungsi keanggotaan. Kemudian, pada kontroler dengan 7 fungsi keanggotaan didapat nilai RMSE serta *error steady state* sebesar 4.5521 km/h, dan 2.154 km/h pada kontroler Fuzzy. Sebaliknya, untuk kontroler Fuzzy-PID dengan nilai *error* yang lebih kecil didapat nilai RMSE 3.6232 km/h dan nilai *error steady state* 0.06258 km/h.

Dari hasil pengujian, kontroler fuzzy memiliki nilai *error* yang lebih besar dibanding kontroler Fuzzy-PID pada setiap pengujiannya, serta pada variasi kecepatan kedua kontroler akan memiliki *error* yang semakin besar apabila pada kecepatan referensi yang semakin tinggi. Kontroler fuzzy-PID pada percobaan jalan tanjakan dan jalan menurun. Kontroler dapat memulihkan kecepatannya kembali ke kecepatan referensi meskipun adanya perubahan state pada mobil yang menyebabkan mobil mengalami perlambatan saat melewati jalan tanjakan dan mengalami penambahan percepatan saat mobil melewati jalan menurun.

Tabel 4.1 RMSE hasil simulasi tanpa tanjakan dengan variasi kecepatan

Skenario Variasi kecepatan Tanpa tanjakan	Kontroler Fuzzy-PID		Kontroler Fuzzy	
	RMSE	Error Steady State	RMSE	Error Steady State
15 km/h	1.2806	0.03442	1.8716	0.2441
30 km/h	3.4846	0.06954	3.9542	1.1844
45 km/h	4.7370	0.07459	7.5684	2.1252

Tabel 4.2 RMSE hasil simulasi dengan skenario berbeda

Skenario	Kontroler Fuzzy-PID		Kontroler Fuzzy	
	RMSE	Error Steady State	RMSE	Error Steady State
3 fungsi keanggotaan dengan jalan tanjakan	3.8258	0.06730	4.6064	2.197
7 fungsi keanggotaan dengan jalan tanjakan	3.6829	0.05955	4.5144	2.170
3 fungsi keanggotaan dengan jalan menurun	3.7918	0.06816	4.7726	2.372
7 fungsi keanggotaan dengan jalan menurun	3.6232	0.06258	4.5521	2.154

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini, penggunaan kontroler Fuzzy-PID dapat memberikan hasil yang baik dengan dapat mempertahankan kecepatan mobil saat melewati jalan menanjak atau menurun meskipun mobil mengalami perubahan kondisi akibat adanya gaya *slope* yang ditimbulkan saat melewati jalan menanjak serta menurun. Kontroler juga memiliki nilai *error* yang lebih kecil dibanding kontroler fuzzy dengan nilai RMSE dan *error steady state* sebesar 3.6829 km/h dan 0.05955 km/h saat variasi jalan menanjak. Kemudian pada saat variasi jalan menurun, kontroler memiliki nilai *error steady state* sebesar 0.06258 km/h dan nilai RMSE 3.6232 km/h.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian yang serupa kedepannya adalah

- Mempertimbangkan dinamika motor, *driveline*, dan dinamika roda untuk penelitian kedepannya.
- Mempertimbangkan model *regenerative braking* saat melalui jalan menurun.
- Mempertimbangkan ketidakpastian dari faktor jalan dan faktor cuaca.
- Mempertimbangkan adanya beban tambahan penumpang yang ber-variasi.
- Penambahan kontrol kemudi pada mobil.
- Pengembangan kontroler pada kecepatan tinggi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Alcalá Baselga, E. (2016). *Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona Modelling, Planning and Nonlinear Control Techniques for Autonomous Vehicles Memoria Autor*. <https://unity3d.com/es>
- Amiruddin Putra, B., Abdul Kadir Effendi, R., & Santoso, A. (2021). Pengaturan Kemudi Kendaraan Otonom Four Wheel Steerdan Four Wheel Drive(4WS4WD) Menggunakan Model Predictive Control. *Pengaturan Kemudi Kendaraan Otonom Four Wheel Steerdan Four Wheel Drive(4WS4WD) Menggunakan Model Predictive Control*, 10(Autonomous Car 4WS4WD), 1–6.
- Babak, S. J., Hussain, S. A., Karakas, B., & Cetin, S. (2017). Control of autonomous ground vehicles: A brief technical review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 224(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/224/1/012029>
- Davvaz, B., Mukhlash, I., & Soleha, S. (2021). Himpunan Fuzzy dan Rough Sets. *Limits: Journal of Mathematics and Its Applications*, 18(1), 79. <https://doi.org/10.12962/limits.v18i1.7705>
- Dias, J. E. A., Pereira, G. A. S., & Palhares, R. M. (2015). Longitudinal Model Identification and Velocity Control of an Autonomous Car. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 776–786. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2341491>
- Eker, I., & Torun, Y. (2006). Fuzzy logic control to be conventional method. *Energy Conversion and Management*, 47(4), 377–394. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.05.008>
- Fernández, J. G. (2012). *A Vehicle Dynamics Model for Driving Simulators*.
- Jin, L., Zhang, R., Tang, B., & Guo, H. (2020). A Fuzzy-PID scheme for low speed control of a vehicle while going on a downhill road. *Energies*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/en13112795>
- Jo, K., Kim, J., Kim, D., Jang, C., & Sunwoo, M. (2014). Development of autonomous car-part i: Distributed system architecture and development process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(12), 7131–7140. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2321342>
- Khodayari, A., Ghaffari, A., Ameli, S., & Flahatgar, J. (2010). A historical review on lateral and longitudinal control of autonomous vehicle motions. *ICMET 2010 - 2010 International Conference on Mechanical and Electrical Technology, Proceedings*, 421–429. <https://doi.org/10.1109/ICMET.2010.5598396>
- Milanés, V., Villagrà, J., Pérez, J., & González, C. (2012). Low-speed longitudinal controllers for mass-produced cars: A comparative study. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(1), 620–628. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2148673>
- Raffin, A., Taragna, M., & Giorelli, M. (2017). *Adaptive longitudinal control of an autonomous vehicle with an approximate knowledge of its parameters*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/RoMoCo.2017.8003885>

Wenhao, Y., Lili, Z., & Wenzhan, D. (2008). *Self-Tuning Parameters Based on Fuzzy-PID Controller*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/CHICC.2008.4605681>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Parameter Mobil pada Script Matlab

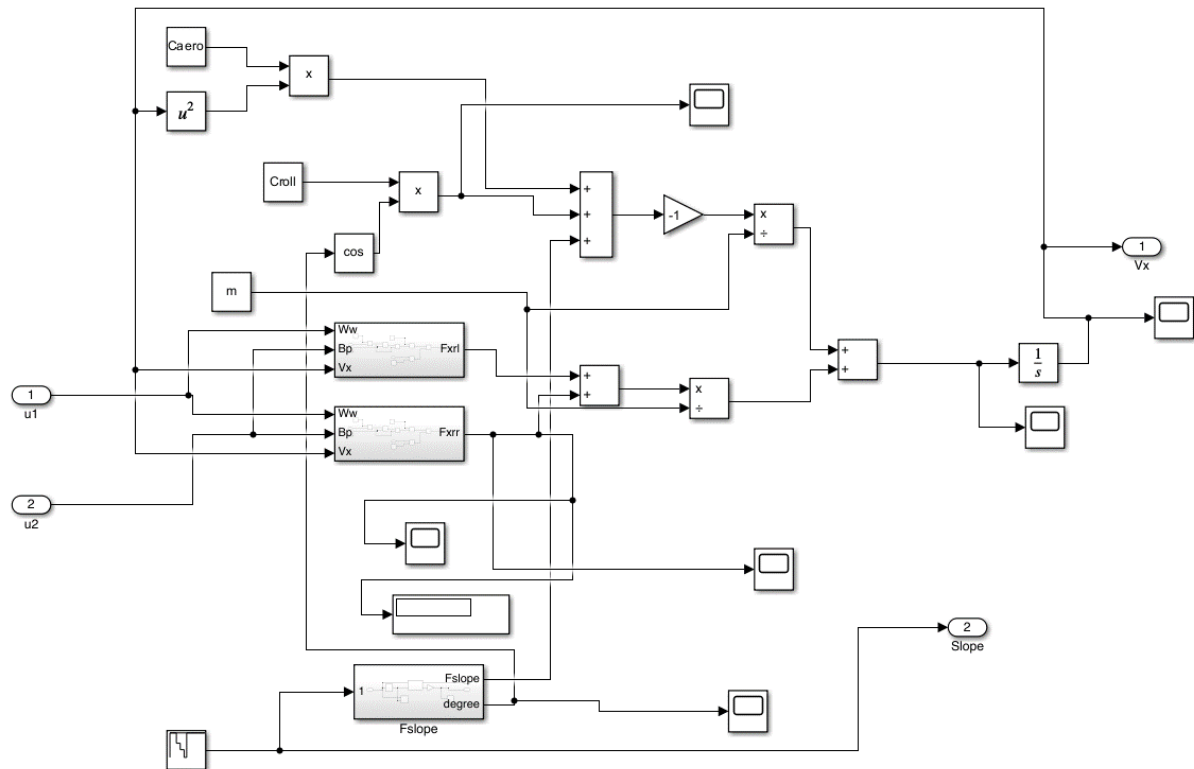
```

%% Car Parameter
m = 1050; % kg
rho = 1.205; % kg/m^3
Cdrag = 1.083; %
Afront= 2.31; %m
g = 9.81; %m/s^2
Csf = 80574; %
fr = 0.034; %
rnom = 0.310; %m
Bx = 0 ;
By = 0 ;
rst = rnom*0.98 ;
B = acos(rst/rnom);
%
reff = 0.316; %m

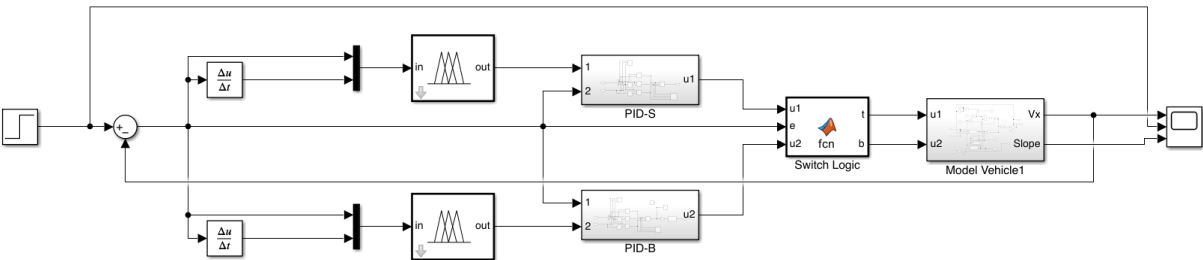
%%Parameter gabungan
Caero = 0.5*rho*Cdrag*Afront;
Croll = fr*m*g*cos(Bx);
Cslope = m*g*sin(Bx);

```

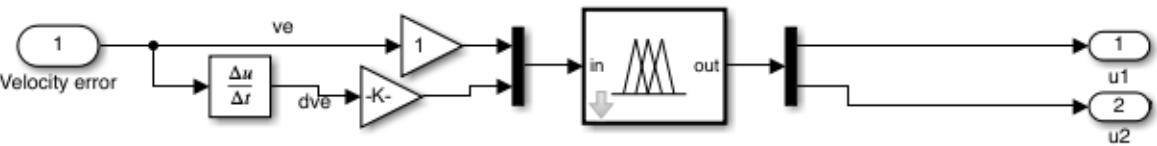
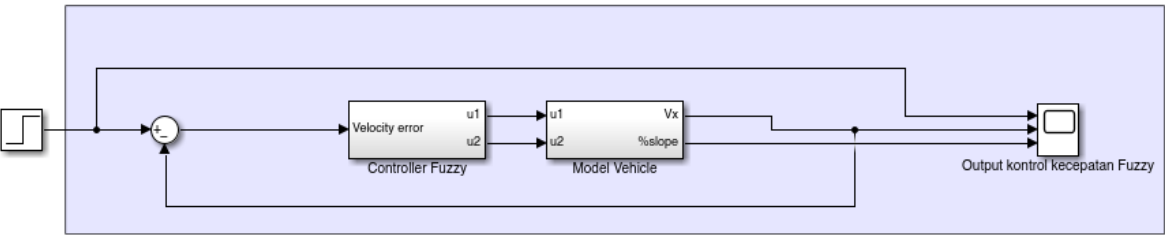
Lampiran 2. Model Longitudinal Mobil



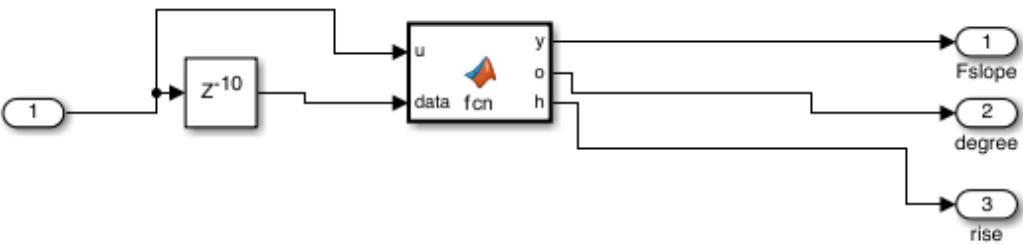
Lampiran 3. Model mobil dengan Kontrol Fuzzy-PID



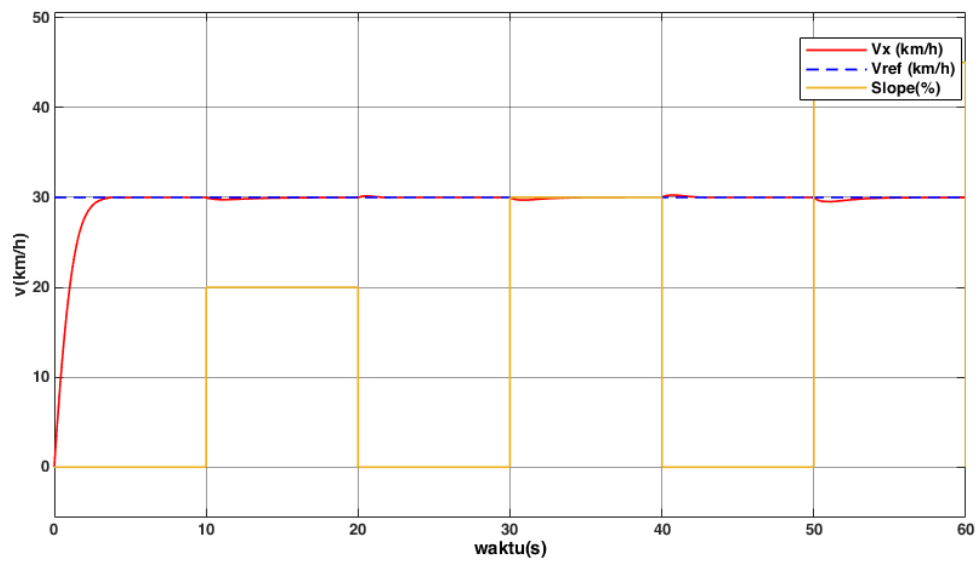
Lampiran 4. Mode; mobil dengan Kontrol Fuzzy



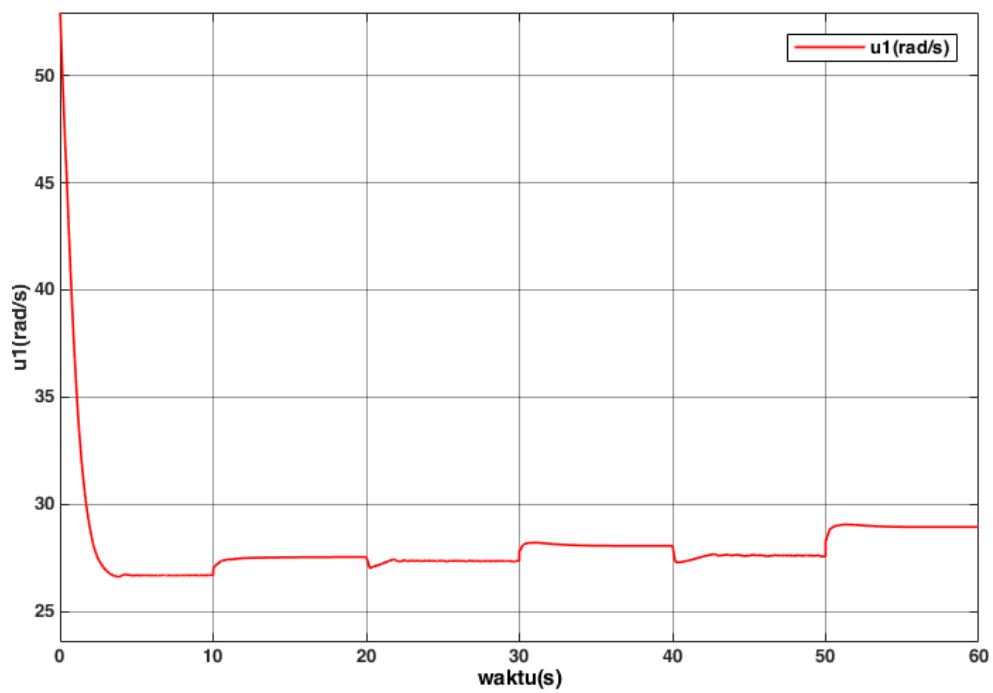
Lampiran 5. Desain Slope



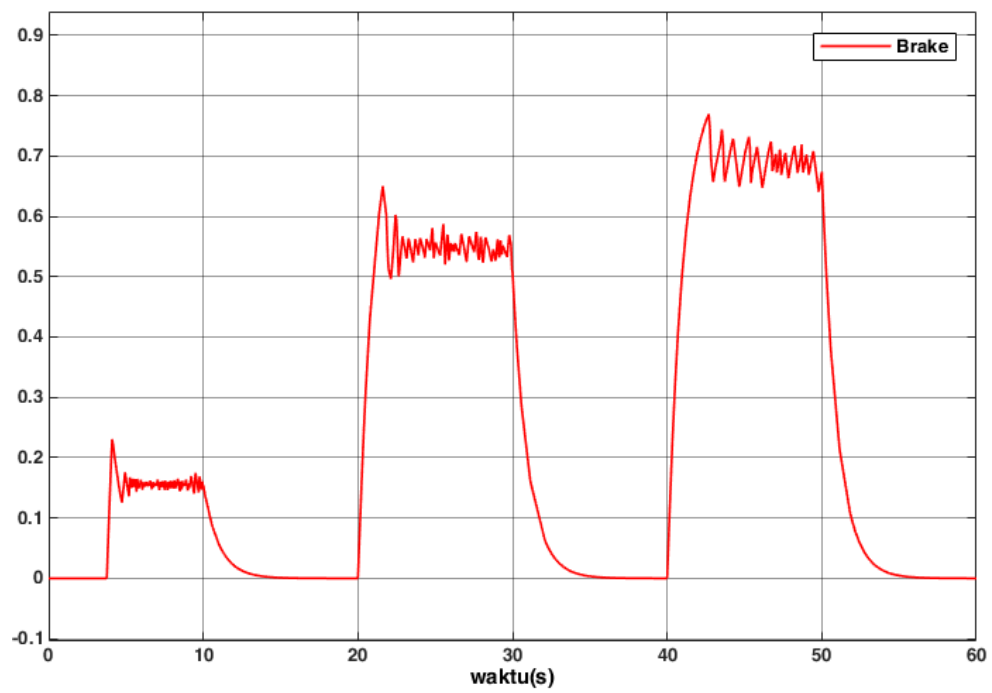
Lampiran 6. Percobaan dengan variasi slope beserta sinyal kontrol. Fuzzy-PID



Respon pada saat menanjak



Sinyal kontroler u1 Fuzzy-PID



Sinyal kontrol u2 Fuzzy-PID

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Sangasanga, 13 Juli 2001, merupakan anak terakhir dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK ABA Sangasanga, SDN 010 Sangasanga, SMPN 1 Sangasanga dan SMAN 3 Samarinda. Setelah lulus dari SMAN tahun 2019, Penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen Teknik Elektro FTEIC - ITS pada tahun 2019 dan terdaftar dengan NRP 07111940000122.

Di Departemen Teknik Elektro Penulis sempat aktif sebagai staff di HIMATEKTRO ITS divisi KOMINFO, penulis juga aktif sebagai Asisten Laboratorium Kontrol dan Otomasi serta di beberapa kegiatan Seminar yang diselenggarakan oleh Departemen, Himpunan Mahasiswa Teknik elektro (HIMATEKTRO), dan seminar-seminar yang ada di luar ITS.