PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA *AUTOMATED PEOPLE MOVER SYSTEM* MENGGUNAKAN PID *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* PARALEL DENGAN LOGIKA *FUZZY* SUGENO UNTUK TARGET KECEPATAN DAN POSISI TERHADAP VARIASI JUMLAH PENUMPANG

TUGAS AKHIR

Oleh

Muhammad Shafwan Faturrahman NIM: 13316006

Adi Dwi Yulianto NIM: 13316084

PROGRAM STUDI TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

2021

ABSTRAK

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA *AUTOMATED PEOPLE MOVER SYSTEM* MENGGUNAKAN PID *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* PARALEL DENGAN LOGIKA *FUZZY* SUGENO UNTUK TARGET KECEPATAN DAN POSISI TERHADAP VARIASI JUMLAH PENUMPANG

Oleh

Muhammad Shafwan Faturrahman **NIM: 13316006**
Adi Dwi Yulianto **NIM: 13316084**

(Program Studi Teknik Fisika)

Perkembangan teknologi telah memberikan pengaruh terhadap kemajuan di bidang transportasi, salah satunya adalah kereta *Automated People Mover System* (APMS) Bandara Internasional Soekarno-Hatta. APMS adalah sistem transportasi yang dirancang untuk beroperasi secara otomatis. Namun, saat ini masih dioperasikan secara manual karena perancangan kontrol kecepatan pada subsistem *Automatic Train Operation* (ATO) dalam sistem persinyalan *Communication Based Train Control* (CBTC) belum optimal sehingga mempengaruhi ketidaktepatan jadwal perjalanan kereta dan posisi pemberhentian kereta di terminal. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk merancang kontrol kecepatan kereta APMS yang mampu mengendalikan perjalanan kereta secara optimal dan otomatis.

Perancangan diawali dengan pemodelan sistem dinamika kereta dan pembentukan profil kecepatan kereta. Selanjutnya, kontrol kecepatan optimal dirancang menggunakan pengontrol *Proportional Integral Derivative Particle Swarm Optimization* (PID PSO) dengan fungsi objektif untuk meminimalkan *error* kecepatan dan posisi. Setelah itu, logika *fuzzy* Sugeno dirancang dan ditambahkan secara paralel dengan pengontrol PID PSO untuk memperbaiki respon sistem dengan mengompensasi kesalahan akibat perubahan jumlah penumpang sehingga diperoleh pengontrol yang mampu mengatasi ketidakpastian jumlah penumpang.

Pada penelitian ini terdapat tiga bagian simulasi pengontrol, yaitu PID *auto tuning* sebagai pembanding, PID PSO, dan PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno. Simulasi dilakukan dengan lima variasi jumlah penumpang untuk melihat perbandingan performansi pengontrol dalam menangani ketidakpastian jumlah penumpang. Hasil simulasi menunjukan bahwa pengontrol kecepatan kereta mampu mengendalikan perjalanan kereta berdasarkan referensi dengan rata-rata RMSE kecepatan sebesar $7{,}940 \times 10^{-4}$ untuk pengontrol PID PSO dan $7{,}620 \times 10^{-4}$ untuk pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno serta standar deviasi RMSE kecepatan sebesar $8{,}182 \times 10^{-5}$ untuk pengontrol PID PSO dan $4{,}228 \times 10^{-5}$ untuk pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno.

Kata kunci: *automated people mover system*, pengontrol PID, *particle swarm optimization*, logika *fuzzy* Sugeno.

ABSTRACT

SPEED CONTROL DESIGN OF THE AUTOMATED PEOPLE MOVER SYSTEM TRAIN USING PID PARTICLE SWARM OPTIMIZATION PARALLELED WITH FUZZY LOGIC SUGENO FOR SPEED AND POSITION TARGET TO NUMBER OF PASSENGERS VARIATIONS

By

Muhammad Shafwan Faturrahman ***NIM: 13316006***
Adi Dwi Yulianto ***NIM: 13316084***

(Engineering Physics Program)

Technology development has made an impact to the transportation system and Automated People Movers (APMS) at Soekarno-Hatta Airport is one of it. APMS is a transportation system designed to operated automatically. However, at the moment, the operation is still carried out manually because the speed controller on Automatic Train Operation (ATO) subsystem in signal of Communication Based Train Control (CBTC) does not work optimally which results in low performances in the time schedule and the final position of the train. Because of that, this research's goal is to make a speed control design of the APMS that controsl the operation of the train optimally and automatically.

The research begins with determination the dynamic system model of the train and the speed profile of the train. After that, the optimal speed control is designed to follow the reference of speed control using Proportional Integral Derivative Particle Swarm Optimization (PID PSO) with minimun errors as the objective function. Next, the fuzzy logic Sugeno is designed parallel with the PID PSO to compensate the error by the change of the number of passengers, so the train controller is able to overcome the uncertainty of the number of passengers.

In this research, there were three parts of control simulation, PID auto tuning as a comparison, PID PSO, and PID PSO paralleled with Fuzzy Logic Sugeno. Simulation was carried out by five variations of the train mass based on the number of passengers to compare the performance of each controller in handling the variation of condition caused by the uncertainty of number of passengers. The simulation result showed that the speed controller design can follow the train profile determined by means of speed Root Mean Square Error (RMSE) is $7{,}940 \times 10^{-4}$ for the PID PSO and $7{,}620 \times 10^{-4}$ for the PID PSO with Fuzzy Logic Sugeno and also standard deviation of speed RMSE is $8{,}182 \times 10^{-5}$ for the PID PSO and $4{,}228 \times 10^{-5}$ for the PID PSO with Fuzzy Logic Sugeno.

Keywords*: automated people mover system, PID controller, particle swarm optimization, fuzzy logic Sugeno.*

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA *AUTOMATED PEOPLE MOVER SYSTEM* MENGGUNAKAN PID *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* PARALEL DENGAN LOGIKA *FUZZY* SUGENO UNTUK TARGET KECEPATAN DAN POSISI TERHADAP VARIASI JUMLAH PENUMPANG

HALAMAN PENGESAHAN

Oleh

Muhammad Shafwan Faturrahman **NIM: 13316006**

Adi Dwi Yulianto **NIM: 13316084**

(Program Studi Teknik Fisika)

Institut Teknologi Bandung

Menyetujui

Tim Pembimbing

Tanggal 12 Januari 2021

Pembimbing 1	Pembimbing 2
Ir. Endra Joelianto, Ph.D.	Augie Widyotriatmo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 196607081992031003	NIP. 19770804201011001

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas rahmat-Nya tugas akhir berjudul "Perancangan Kontrol Kecepatan Kereta *Automated People Mover System* menggunakan PID *Particle Swarm Optimization* Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno untuk Target Kecepatan dan Posisi terhadap Variasi Jumlah Penumpang" ini dapat terselesaikan dengan baik. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan lulus sarjana Program Studi Teknik Fisika Institut Teknologi Bandung.

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Endra Joelianto Ph.D. dan Bapak Augie Widyotriatmo, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, masukan, saran dan kritik serta dukungan penuh kepada penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.
2. Bapak Taufiq dan Bapak Hermanto dari PT Len *Railways System* (LRS) (Persero), Tbk – Indonesia yang telah memberi data VOBC dan OCC serta parameter operasional kereta kepada penulis untuk penelitian ini.
3. Kedua Orang Tua serta keluarga penulis yang selalu mendukung, memotivasi dan mendoakan penulis selama penyusunan tugas akhir ini.
4. Teman–teman Laboratorium *Artificial Intelligence, Control and Automation* (AI-CA) beserta rekan-rekan Teknik Fisika ITB lainnya yang telah berjuang bersama dan saling mendukung selama penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca demi kesempurnaan tugas akhir ini. Penulis berharap tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan berkontribusi bagi pengembangan teknologi di Indonesia, khusunya dalam otomasi dan kontrol di bidang transportasi. Sekian dan terimakasih.

Bandung, Januari 2021

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
HALAMAN PENGESAHAN ..... **iii**
KATA PENGANTAR ..... **iv**
DAFTAR ISI ..... **v**
DAFTAR GAMBAR ..... **vii**
DAFTAR TABEL ..... **x**
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG ..... **xi**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan dan Sasaran 3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian 3
1.5 Metodologi Penelitian 4
1.6 Sistematika Penulisan 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **7**
2.1 *Automated People Mover System* (APMS) 7
2.2 Sistem Persinyalan *Communication Based Train Control* (CBTC) 8
2.3 Sistem *Automatic Train Control* (ATC) 9
2.3.1 Profil Kecepatan pada Subsistem *Automatic Train Operation* (ATO) 10
2.3.2 Kontrol Kecepatan pada Subsistem *Automatic Train Opeartion* (ATO) 11
2.4 Pengontrol *Proportional Integral Detivative* (PID) 11
2.5 Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) 12
2.6 Pengontrol Logika *Fuzzy* Sugeno 14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN **17**
3.1 Deskripsi Objek Penelitian 17
3.1.1 Spesifikasi Kereta 17
3.1.2 Asumsi Kereta 18
3.2 Pemodelan Sistem Dinamika Kereta 18

3.2.1 Penurunan Persamaan Ruang Keadaan 18
3.2.2 *Feedback Linearization* 21
3.3 Perancangan Profil Kecepatan Kereta 23
3.4 Perancangan Kontrol Kecepatan Kereta 27
3.4.1 PID *Particle Swarm Optimization* 28
3.4.2 Logika *Fuzzy* Sugeno 32
3.5 Perancangan Simulasi Pengontrol 39
3.5.1 PID *Auto Tuning* 40
3.5.2 PID *Particle Swarm Optimization* 40
3.5.3 PID *Particle Swarm Optimization* Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno 41
BAB IV HASIL DAN ANALISIS 42
4.1 Kontrol Kecepatan Kereta 42
4.1.1 PID *Particle Swarm Optimization* 42
4.1.2 Logika *Fuzzy* Sugeno 45
4.2 Simulasi Pengontrol 46
4.2.1 PID *Auto Tuning* 47
4.2.2 PID *Particle Swarm Optimization* 53
4.2.3 PID *Particle Swarm Optimization* Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno 59
4.3 Analisis Perbandingan Ketiga Pengontrol 64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 71
5.1 Kesimpulan 71
5.2 Saran 72
DAFTAR PUSTAKA 73
LAMPIRAN A. Simulasi Pengontrol PID *Auto Tuning* 76
LAMPIRAN B. Simulasi Pengontrol PID *Particle Swarm Optimization* 78
LAMPIRAN C. Simulasi Pengontrol PID *Particle Swarm Optimization* Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno 80
LAMPIRAN D. Pengujian Variasi Jumlah Penumpang Lain 82
LAMPIRAN E. Pengujian Variasi Massa Penumpang Lain 83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Diagram *Fishbone* Analisis Masalah 3
Gambar 1.2 Diagram Alir Metodologi Penelitian.....4
Gambar 2.1 Rute Perjalanan APMS Soekarno-Hatta [7].....7
Gambar 2.2 Batas Otoritas Pergerakan pada Sistem Persinyalan (a) Blok Tetap (b) Blok Bergerak [8].....8
Gambar 2.3 Ilustrasi struktur ATC [9].....9
Gambar 2.4 Profil Kecepatan pada ATO [2] 10
Gambar 2.5 Diagram Blok Pengontrol PID [13] 12
Gambar 2.6 Ilustrasi Perubahan Posisi dalam Algoritma PSO [17] 13
Gambar 2.7 Sistem Logika *Fuzzy* 14
Gambar 3.1 Diagram Gaya pada Sistem Pergerakan Kereta APMS [2].....19
Gambar 3.2 *Free Body Diagram* Dinamika Kereta 19
Gambar 3.3 Ilustrasi Kurva Percepatan ke Kecepatan.....24
Gambar 3.4 Ilustrasi Kurva Kecepatan yang Diinginkan 24
Gambar 3.5 Ilustrasi Kurva Percepatan yang Dirancang 25
Gambar 3.6 Ilustrasi Hasil Integral Kurva *Ramp*.....25
Gambar 3.7 Rancangan Profil Percepatan 25
Gambar 3.8 Profil Kereta (*Reference/Set Point*) (a) Kecepatan (b) Jarak/Posisi...26
Gambar 3.9 Struktur Pengontrol PID PSO 30
Gambar 3.10 Diagram Alir Algoritma PSO.....32
Gambar 3.11 Desain Logika *Fuzzy* Sugeno 33
Gambar 3.12 Fungsi Keanggotaan *Fuzzy* (a) Masukan 1 (b) Masukan 2 (c) Masukan 3 (d) *Konstanta* Keluaran 34
Gambar 3.13 Kombinasi Aturan *Fuzzy* untuk Pengontrol Posisi.....37
Gambar 3.14 Kombinasi Aturan *Fuzzy* untuk Pengontrol Kecepatan 38
Gambar 3.15 Ilustrasi Proses Perhitungan Keluaran Logika *Fuzzy Sugeno* (a) Evaluasi Aturan (b) Komposisi Keluaran dan Defuzifikasi.....39
Gambar 3.16 Blok Diagram Pengontrol PID *Auto Tuning* 40
Gambar 3.17 Blok Diagram Pengontrol PID PSO.....41
Gambar 3.18 Blok Diagram Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno.....41
Gambar 4.1 Historis *Fitness Value* pada Simulasi PSO (Beban Kosong) 42
Gambar 4.2 Historis *Fitness Value* pada Simulasi PSO (Beban Seperempat Penuh) 43
Gambar 4.3 Historis *Fitness Value* pada Simulasi PSO (Beban Setengah Penuh) 43
Gambar 4.4 Historis *Fitness Value* pada Simulasi PSO (Beban Tiga Perempat Penuh).....44
Gambar 4.5 Historis *Fitness Value* pada Simulasi PSO (Beban Penuh).....44
Gambar 4.6 *Surface Control* (a) *e_pos* dan *e_spd* terhadap *u_fuz* (b) *e_pos* dan *num_pass* terhadap *u_fuz* (c) *e_spd* dan *num_pass* terhadap *u_fuz* ..45
Gambar 4.7 Hasil Simulasi Kontrol Kecepatan menggunakan Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang

(c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang 47
Gambar 4.8 Profil Kecepatan Akhir Hasil Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang 48
Gambar 4.9 Hasil Simulasi Kontrol Posisi menggunakan Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang 49
Gambar 4.10 Profil Posisi Akhir Hasil Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang.....50
Gambar 4.11 Hasil Simulasi Kontrol Kecepatan menggunakan Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang 53
Gambar 4.12 Profil Kecepatan Akhir Hasil Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang.....54
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Kontrol Posisi menggunakan Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang 55
Gambar 4.14 Profil Posisi Akhir Hasil Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang.....56
Gambar 4.15 Hasil Simulasi Kontrol Kecepatan menggunakan Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang 59
Gambar 4.16 Profil Kecepatan Akhir Hasil Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang 60
Gambar 4.17 Hasil Simulasi Kontrol Posisi menggunakan Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang 61
Gambar 4.18 Profil Posisi Akhir Hasil Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang 62
Gambar L.1 Profil Percepatan Hasil Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang.....76

Gambar L.2 Profil Input Kontrol Hasil Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang.....77
Gambar L.3 Profil Percepatan Hasil Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang.....78
Gambar L.4 Profil Input Kontrol Hasil Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang.....79
Gambar L.5 Profil Percepatan Hasil Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang.....80
Gambar L.6 Profil Input Kontrol Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang.....81

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Fungsi Keanggotaan *Fuzzy* 15
Tabel 2.2 Operasi Logika *Fuzzy*.....15
Tabel 2.3 Teknik Defuzifikasi.....15
Tabel 3.1 Data Parameter Kereta [11].....17
Tabel 3.2 Variabel Sistem 23
Tabel 3.3 Variasi Jumlah Penumpang atau Beban Kereta 39
Tabel 4.1 Parameter PID PSO.....44
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kinerja *Fuzzy*.....46
Tabel 4.3 Nilai RMSE Kecepatan, RMSE Posisi dan Selisih Posisi Akhir Kereta menggunakan Pengontrol PID *Auto Tuning*.....51
Tabel 4.4 Batas Kecepatan, Percepatan dan Input Kontrol Kereta menggunakan Pengontrol PID *auto tuning*.....51
Tabel 4.5 Nilai RMSE Kecepatan, RMSE Posisi dan Selisih Posisi Akhir Kereta menggunakan Pengontrol PID PSO 57
Tabel 4.6 Batas Kecepatan, Percepatan dan Input Kontrol Kereta menggunakan Pengontrol PID PSO.....57
Tabel 4.7 Nilai RMSE Kecepatan, RMSE Posisi dan Selisih Posisi Akhir Kereta menggunakan Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno 63
Tabel 4.8 Batas Kecepatan, Percepatan dan Input Kontrol Pengontrol Kereta menggunakan PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno 63
Tabel 4.9 Hasil Performansi Ketiga Pengontrol untuk Semua Variasi Jumlah Penumpang Sesuai Perancangan 65
Tabel 4.10 Hasil Performansi Ketiga Pengontrol untuk Variasi Jumlah Penumpang Diluar Perancangan 66
Tabel 4.11 Hasil Performansi Pengontrol untuk Variasi Massa Penumpang Diluar Perancangan 67
Tabel 4.12 Hasil Perbandingan Kriteria Operasional Kereta pada Pengujian Variasi Jumlah Penumpang Sesuai Perancangan 68
Tabel 4.13 Hasil Perbandingan Kriteria Operasional Kereta pada Pengujian Variasi Jumlah Penumpang Diluar Perancangan 69
Tabel 4.14 Hasil Perbandingan Kriteria Operasional Kereta pada Pengujian Variasi Massa Penumpang Diluar Perancangan.....69

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
LRT	*Light Rapid Transit*	1
MRT	*Mass Rapid Transit*	1
APMS	*Automated People Mover System*	1
AGT	*Automated Guideway Transit*	3
CBTC	*Communication Based Train Control*	1
ATC	*Automatic Train Control*	1
ATO	*Automatic Train Operation*	1
ATP	*Automatic Train Protection*	1
ATS	*Automatic Train Supervision*	1
PID	*Proportional Integral Derivative*	2
PSO	*Particle Swarm Optimization*	2
IB	*Integrated Building*	4
PV	*Process Variable*	11
SP	*Set Point*	11
PSD	*Platform Screen Doors*	18
FBD	*Free Body Diagram*	18
RMSE	*Root Mean Square Error*	28
NF	*Negative Full*	34
NH	*Negative Half*	34
NE	*Negative Empty*	34
N	*Neutral*	34
PE	*Positive Empty*	34
PH	*Positive Half*	34
PF	*Positive Full*	34

LAMBANG

M	Massa kereta	19
μ	Koefisien gesekan	20
g	Konstanta gravitasi	20
k	Koefisien pegas	19
v	Kecepatan kereta	19
i	Kemiringan jalur	19
r	Sudut tikungan jalur	19
fr	Gaya resistansi kereta	20
B	Koefisien Davis 1	20
C	Koefisien Davis 2	20
Kp	Parameter proporsional	11
Ki	Parameter integral	11
Kd	Parameter derivatif	11
t	Waktu	19
J	Indeks performansi/fungsi objektif	29
$\mu[x]$	Fungsi keanggotaan	35

LAMBANG	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
u	Input kontrol	19
s	Posisi kereta	19
e_spd	*Error* kecepatan kereta	32
e_pos	*Error* posisi kereta	32
num_pass	Jumlah penumpang kereta	32
u_fuz	Input kontrol *fuzzy*	32
V	Kecepatan partikel	13
P	Posisi partikel	12
Pbest	Posisi terbaik lokal	13
Gbest	Posisi terbaik global	13
ω	Beban Inersia	13
c_1	Konstanta penyesuaian diri	13
c_2	Konstanta penyesuaian sosial	13
Te	Gaya traksi	18
Be	Gaya pengereman	18
Re	Gaya resistansi	18
Z	*Weighted average*	38

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem transportasi merupakan salah satu aspek penting untuk memenuhi kebutuhan manusia ketika berpindah dari suatu tempat ke tempat lain. Pesatnya perkembangan sistem dan teknologi transportasi mendorong Indonesia untuk meningkatkan sistem transportasi yang ada menjadi lebih pintar, terintegrasi dan berkelanjutan [1]. Salah satunya adalah sistem transportasi publik berbasis rel di daerah perkotaan atau *urban transit* seperti *Light Rail Transit* (LRT), *Mass Rapid Transit* (MRT), dan *Automated People Mover System* (APMS). Pada saat ini, kereta APMS telah dioperasikan di Bandara Internasional Soekarno-Hatta untuk menghubungkan tiga terminal yang terintegrasi dengan stasiun bandara [2].

Teknologi persinyalan yang digunakan dalam kereta APMS adalah *Communication Based Train Control* (CBTC). Teknologi ini memiliki perbedaan dibandingkan dengan sistem persinyalan konvensional yang terpasang di sepanjang jalur kereta di pulau Jawa dan Sumatera. Pada sistem konvensional, persinyalan hanya mengatur keamanan rute atau jalur rel agar tidak terjadi kecelakaan antar kereta. Sistem persinyalan tidak melakukan interaksi dengan sistem kereta sehingga sistem traksi dan sistem pengereman diatur secara manual oleh masinis. Sistem ini disebut *route control*. Sedangkan pada CBTC, selain mengatur kemanan rute dan keselamatan operasional kereta, sistem persinyalan melakukan interaksi dengan sistem kereta sehingga sistem traksi dan sistem pengereman diatur oleh sebuah sistem yang disebut *train control* [3].

Dalam perkembangannya, sistem kontrol kereta diintegrasikan dengan sistem otomasi menjadi sebuah sistem *Automatic Train Control* (ATC). Terdapat tiga subsistem ATC, yaitu *Automatic Train Protection* (ATP), *Automatic Train Operation* (ATO), dan *Automatic Train Supervision* (ATS). ATP berfungsi untuk mencegah tabrakan kereta dan keluarnya kereta dari jalur, ATO berfungsi dalam pergerakan dan pemberhentian kereta, dan ATS berfungsi untuk mengatur

perjalanan kereta sesuai jadwal [4]. CBTC masuk pada subsistem ATO dalam mengatur pergerakan kereta secara otomatis tanpa masinis atau *driverless*.

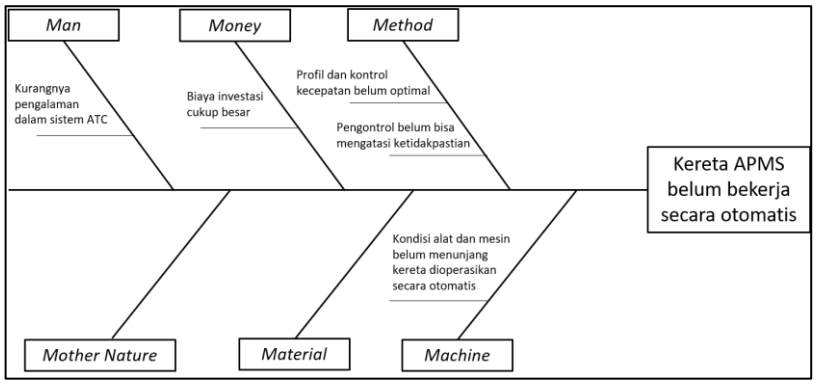
Pengontrol yang telah terpasang pada kereta APMS Bandara Internasional Soekarno-Hatta adalah PID. Namun, berdasarkan observasi lapangan dan referensi penelitian sebelumnya [2] diperoleh fakta bahwa kinerja pengontrol belum optimal sehingga pengoperasiannya masih manual menggunakan masinis. Selain itu, perancangan kontrol kecepatan belum memperhatikan ketidakpastian dan berbagai parameter lingkungan yang berpengaruh pada operasional kereta [2]. Oleh karena itu, dibutuhkan kontrol kecepatan yang mampu menangani ketidakpastian dalam operasional kereta, salah satunya jumlah penumpang atau beban kereta.

Penelitian ini dilakukan untuk merancang kontrol kecepatan optimal pada kereta APMS Bandara Internasional Soekarno-Hatta menggunakan pengontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) berbasis algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) paralel dengan logika *fuzzy* metode Sugeno. Ketidakpastian atau parameter lingkungan yang digunakan dalam penelitian ini adalah jumlah penumpang atau beban kereta. Dengan metode pengontrol ini diharapkan mampu menghasilkan respon profil kecepatan kereta sesuai referensi yang ditetapkan dengan nilai *error* kecil sehingga kereta bisa dioperasikan *driverless* secara penuh.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan utama yang dihadapi kereta APMS Bandara Internasional Soekarno-Hatta adalah kereta masih dioperasikan secara manual oleh masinis. Hal ini disebabkan karena profil dan kontrol kecepatan pada subsistem ATO belum memberikan kinerja yang baik sesuai standar operasional kereta sehingga kontrol otomatis belum bisa dilakukan secara penuh. Selain itu, terdapat faktor ketidakpastian dari lingkungan yang mempengaruhi perjalanan kereta, salah satunya perubahan jumlah penumpang akibat masuk dan keluarnya penumpang di setiap terminal yang berpengaruh pada massa kereta. Kondisi ini mengakibatkan kereta belum mampu berhenti tepat waktu di pintu terminal dengan selisih posisi akhir kecil sesuai toleransi yang ditetapkan.

Secara umum, permasalahan pada kereta APMS dapat dipetakan dalam diagram *fishbone* untuk melihat masalah utama dan penyebabnya secara lebih jelas.



Gambar 1.1 Diagram *Fishbone* Analisis Masalah

Berdasarkan Gambar 1.1, akar permasalahan utama yang akan diselesaikan yaitu metode dengan cara merancang kontrol kecepatan optimal kereta yang mampu mengatasi ketidakpastian agar kereta mampu bekerja secara otomatis.

1.3 Tujuan dan Sasaran

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang kontrol kecepatan optimal kereta APMS menggunakan pengontrol PID berbasis algoritma PSO.
2. Merancang kontrol kecepatan optimal kereta APMS menggunakan pengontrol PID PSO dengan logika *fuzzy* Sugeno.

Sasaran dari perancangan kontrol pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kereta mampu mengikuti referensi profil masukan dengan baik sesuai batas operasional yang telah ditetapkan.
2. Kereta mampu berhenti tepat di pintu terminal.
3. Pengontrol kereta mampu mengatasi ketidakpastian jumlah penumpang.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

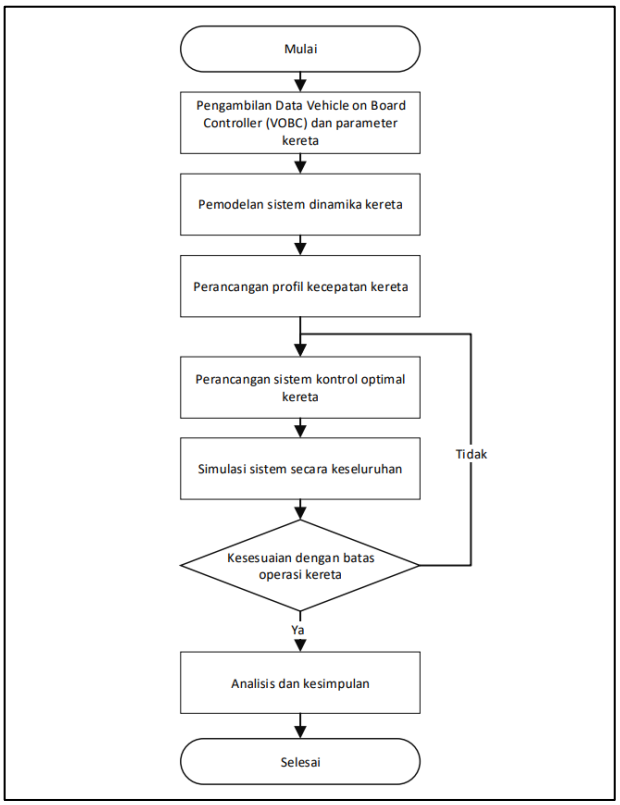
Ruang lingkup pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kereta yang dimodelkan adalah kereta layang (*skytrain)* Bandara Internasional Soekarno-Hatta, Tangerang, Banten, bersistem APM dan berjenis *Automated Guided Transit* (AGT) dengan 2 buah gerbong.

2. Sistem persinyalan yang digunakan kereta APMS adalah CBTC pada subsistem ATO untuk mengatur kecepatan kereta secara *driverless*.
3. Kecepatan maksimal operasional kereta adalah 4,5 m/s dengan percepatan dan perlambatan maksimal sebesar 1 m/s^2 berdasarkan data lapangan.
4. Fungsi objektif pada perancangan algoritma PSO adalah untuk meminimalkan *error* kecepatan dan posisi.
5. Simulasi dilakukan untuk perjalanan kereta dari terminal 1 menuju terminal *Integrated Building* (IB) sejauh 325 meter dengan total waktu 80 detik.
6. Toleransi selisih posisi akhir pemberhentian kereta adalah ± 10 cm.
7. Ketidakpastian yang digunakan adalah jumlah penumpang atau beban kereta.
8. Pengontrol yang dirancang adalah PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno.

1.5 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa langkah atau tahapan seperti yang diilustrasikan pada diagram alir di Gambar 1.2.



Gambar 1.2 Diagram Alir Metodologi Penelitian

Berdasarkan diagram alir pada Gambar 1.2, penelitian ini diawali dengan studi literatur dan pengambilan data VOBC serta OCC berupa data *logtrain* perjalanan kereta dan batas operasional kereta. Setelah itu, pemodelan sistem dinamika kereta APMS dilakukan dengan menggunakan analisis Hukum II Newton dan *feedback linearization.* Selanjutnya perancangan profil kecepatan sebagai referensi perjalanan kereta dilakukan dengan menggunakan batas dan kondisi batas operasional kereta yang telah diperoleh sebelumnya. Setelah model kereta dan profil kereta diperoleh, langkah selanjutnya adalah perancangan kontrol kecepatan optimal kereta dengan metode PID PSO dan logika *fuzzy* Sugeno. Kemudian dilanjutkan dengan simulasi pengontrol secara keseluruhan. Simulasi ini dilakukan sampai respon sistem kereta mampu mengikuti referensi yang diberikan dengan baik dan memenuhi kondisi operasional kereta yang ditetapkan dalam perancangan. Jika belum memenuhi batas operasional kereta maka akan dilakukan perbaikan dalam tahap perancangan kontrol optimal. Namun, jika sudah memenuhi batas operasional kereta maka akan dilanjutkan dengan tahap terakhir yaitu analisis dan kesimpulan terhadap hasil yang diperoleh.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan penelitian tugas akhir ini disusun berdasarkan sistematika penulisan sebagai berikut:

1. **Bab I Pendahuluan**, berisi gambaran umum penelitian seperti latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan sasaran penelitian, ruang lingkup penelitian, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.
2. **Bab II Tinjauan Pustaka**, membahas konsep dan teori yang berkaitan dengan penelitian seperti *Automated People Mover System* (APMS), sistem persinyalan *Communication Based Train Control* (CBTC), sistem *Automatic Train Control* (ATC) meliputi profil kecepatan pada subsistem *Automatic Train Operation* (ATO) dan kontrol kecepatan pada subsistem *Automatic Train Operation* (ATO), pengontrol *Proportional Integral Derivative* (PID), algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan pengontrol logika *fuzzy* Sugeno.

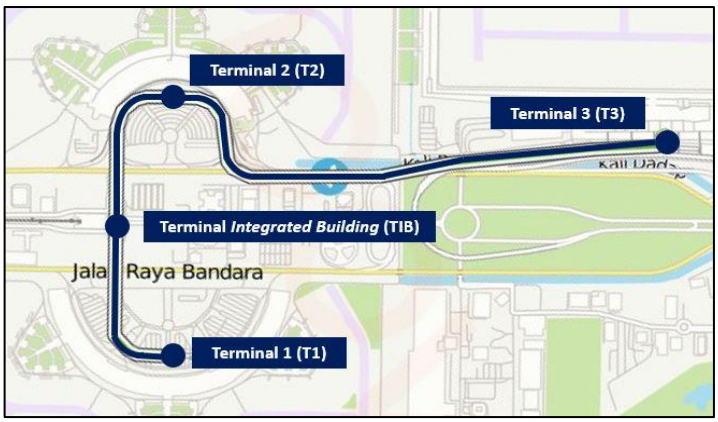
3. **Bab III Metodologi Penelitian**, menjelaskan langkah-langkah penelitian secara detail seperti deskripsi objek penelitian meliputi spesifikasi dan asumsi kereta, pemodelan sistem dinamika kereta meliputi penurunan persamaan ruang keadaan (*state space*) dan *feedback linearization*, perancangan profil kecepatan kereta, perancangan kontrol kecepatan kereta meliputi PID PSO dan logika *fuzzy* Sugeno serta rancangan simulasi pengontrol meliputi PID *auto tuning* sebagai pembanding, PID PSO dan PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno.
4. **Bab IV Hasil dan Analisis**, memaparkan hasil penelitian dan analisis hasil penelitian berupa hasil perancangan kontrol kecepatan kereta yang terdiri dari PID PSO dan logika *fuzzy* Sugeno, simulasi dan analisis pengontrol PID *auto tuning*, PID PSO, dan PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno terhadap variasi jumlah penumpang serta perbandingan dan analisis ketiga jenis pengontrol yang ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel.
5. **Bab V Kesimpulan dan Saran**, berisi kesimpulan yang memuat ketercapaian dari tujuan penelitian dan saran yang direkomendasikan penulis berdasarkan hasil penelitian ini untuk penelitian selanjutnya.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Automated People Mover System* (APMS)

APMS merupakan sebuah sistem transportasi tingkat tinggi yang dapat beroperasi secara otomatis tanpa memerlukan pengemudi. Jalur yang digunakan APMS bersifat tetap dan akan berulang secara terus-menerus secara pasti. Oleh karena itu alat transportasi dengan metode ini cenderung lebih mudah untuk dikontrol [5]. Pada umumnya, APMS didesain untuk digunakan dalam durasi waktu yang singkat dengan banyak titik pemberhentian. Banyaknya *transit* ini menjadikan APMS suatu pilihan yang tepat untuk digunakan karena cenderung lebih mudah untuk dikontrol. Namun, penggunaan APMS harus tetap mengutamakan keselamatan dan keamanan operasional [5]. Oleh karena itu, APMS memerlukan suatu pengontrol kecepatan optimal yang mampu menyesuaikan kondisi dan ketidakpastian di sepanjang perjalanan.

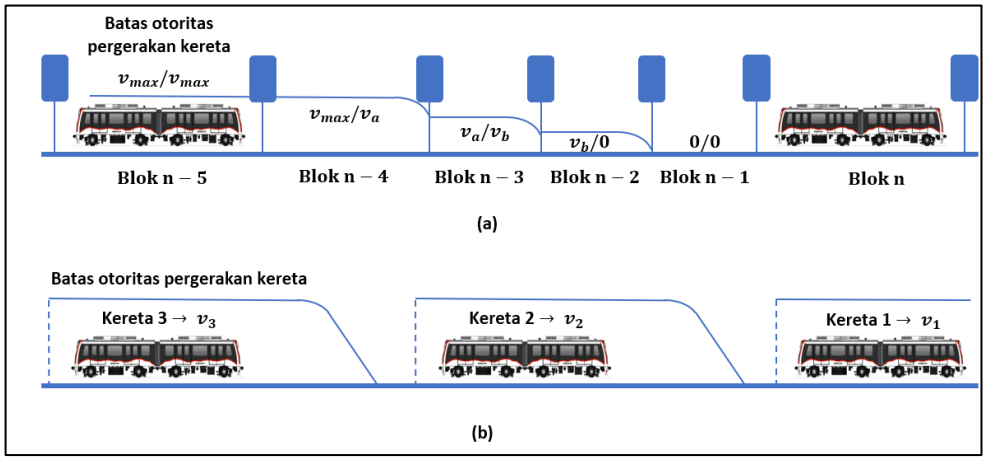
Alat transportasi yang cocok dengan sistem ini yaitu kereta. Dalam tugas akhir ini, objek yang digunakan adalah kereta layang atau kalayang (*skytrain*) Bandara Internasional Soekarno-Hatta yang difungsikan untuk mengangkut penumpang antar terminal dan stasiun bandara sepanjang 3,05 km dengan empat titik pemberhentian yaitu terminal 1 (T1), terminal 2 (T2), terminal 3 (T3), dan terminal IB dan dengan total waktu perjalanan selama 12 menit untuk setiap jalurnya [6]. Rute yang digunakan kereta APMS ditunjukan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rute Perjalanan APMS Soekarno-Hatta **[7]**

2.2 Sistem Persinyalan *Communication Based Train Control* (CBTC)

CBTC adalah perkembangan terbaru dari sistem persinyalan kereta api. Pada era digital saat ini, semua perangkat dapat terhubung melalui suatu jalur komunikasi data. Salah satunya yaitu sistem persinyalan kereta api. CBTC memiliki kemampuan untuk menentukan posisi kereta api secara akurat dan presisi. Hal ini didukung oleh kemampuan sistem dalam melakukan komunikasi data dua arah antara kereta api dengan perangkat yang terdistribusi sepanjang lintasan secara kontinu. Hal itu bertujuan untuk memastikan kereta api berada pada jarak aman dengan kereta lainnya [8] seperti diilustrasikan pada Gambar 2.2.



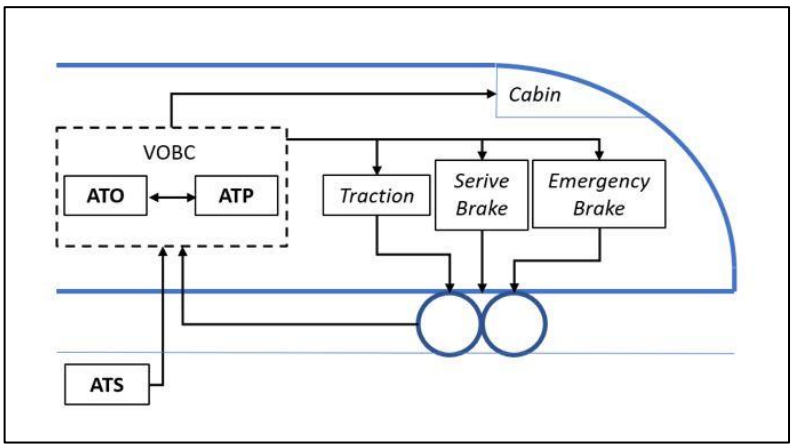
Gambar 2.2 Batas Otoritas Pergerakan pada Sistem Persinyalan (a) Blok Tetap (b) Blok Bergerak **[8]**

Sistem CBTC telah dikenal sebagai arah pengembangan sistem kontrol untuk sistem kereta di dunia. Secara khusus, dengan perkembangan komunikasi seluler yang semakin cepat, penerapan dan aplikasinya juga semakin mudah. Saat ini, CBTC telah digunakan dalam sistem transportasi kereta kota, seperti kereta ringan dan sistem bawah tanah. Aplikasi CBTC memiliki fitur-fitur seperti sistem pengiriman lebih fleksibel dan efisien, keamanan dan keandalan sistem tinggi, mudah bagi CBTC untuk dipindahkan dari sistem yang sekarang, biaya pemeliharaan untuk CBTC lebih rendah karena sirkuit lintasan dikeluarkan dari sistem, sistem kontrol jaringan kereta akan menuju sistem cerdas, jaringan dan komprehensif. CBTC adalah sebagai pusat otak dan saraf dari sistem kereta api. Pengembangan dan penerapan CBTC akan mengikuti arah perkembangan dari sistem kontrol otomatis kereta [3].

Dalam tugas akhir ini, kereta APMS Bandara Internasional Soekarno-Hatta menggunakan sistem persinyalan *Comunication Based Train Control* (CBTC). Sistem ini juga disebut *train control* sehingga sistem sinyal dapat berinteraksi dengan sistem kereta dalam mengontrol traksi maupun pengereman dengan tetap menjaga keamanan rute dan keselamatan operasional kereta.

2.3 Sistem *Automatic Train Control* (ATC)

ATC merupakan bentuk integrasi sistem otomasi dengan kontrol kereta. Kontrol kereta adalah proses pengaturan pergerakan kereta untuk tujuan keselamatan dan efisiensi. Proses ini dilakukan dengan mengombinasikan beberapa elemen seperti manusia dan mesin yang terletak di kereta, sepanjang lintasan, stasiun maupun di ruang kontrol. Terdapat tiga subsistem dalam ATC, yaitu ATP untuk mencegah tabrakan dan tergelincir, ATO untuk mengontrol pergerakan kereta dan berhenti di stasiun atau terminal, dan ATS untuk mengatur perjalanan kereta sesuai dengan jadwal [4]. Subsistem ATO dan ATP dalam VOBC saling bekerja sama untuk mengontrol perjalanan kereta melalui pemberian gaya traksi maupun pengereman sesuai rencana operasi kereta yang telah ditetapkan pada subsistem ATS seperti diilustrasikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Ilustrasi struktur ATC **[9]**

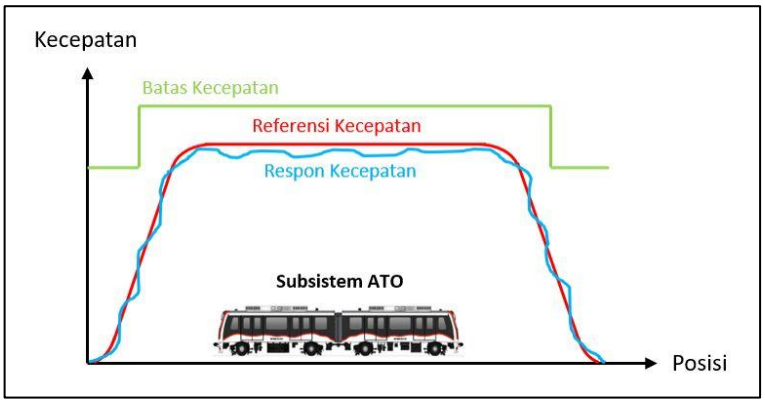
Sistem kontrol kereta memiliki kemampuan untuk merasakan dan memproses informasi, membuat keputusan dan mengirimkan perintah. Sebagai contoh, sistem kontrol kereta dapat merasakan kecepatan kereta, menentukan bahwa kecepatan harus ditingkatkan, memberikan sinyal perintah yang sesuai untuk motor, dan memantau bahwa hasil yang diinginkan telah tercapai. Namun, dengan adanya

otomatisasi, semua peralatan atau elemen yang telah terintegrasi mendapatkan tenaga listrik di pinggir jalan, membawanya ke kereta, mengubahnya menjadi energi mekanik, dan menyediakan upaya traktif. Peralatan untuk memilih rute kereta dan mengirimkan perintah ke *aline switching* yang sesuai adalah bagian dari sistem kontrol kereta. Namun, komponen dari jalur kereta api yang benar-benar bergerak seperti *switch point* bukan bagian dari sistem kontrol kereta [10].

Dalam tugas akhir ini, perancangan kontrol kereta secara otomatis dilakukan oleh subsistem ATO pada sistem persinyalan CBTC. Secara umum, prinsip kontrol otomatis adalah mendekatkan sistem terkontrol menuju nilai tertentu yang menjadi referensi atau acuan tanpa bantuan masinis. Oleh karena itu, subsistem ATO akan selalu bekerja sama dengan subsistem ATP dalam sistem ATC untuk menjaga kecepatan tidak melebihi batas kecepatan operasional.

2.3.1 Profil Kecepatan pada Subsistem *Automatic Train Operation* (ATO)

Kontrol kereta secara otomatis dilakukan dengan memberikan profil kecepatan sebagai *set point* atau referensi bagi kereta dalam mengendalikan kecepatannya. Profil kecepatan tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Profil Kecepatan pada ATO **[2]**

Gambar 2.4 diatas menunjukkan profil kecepatan sebagai *set point* atau referensi bagi sistem untuk mengontrol kecepatan kereta sepanjang perjalanan. Garis hijau merupakan batas kecepatan operasional kereta yang diperbolehkan. Garis merah merupakan profil kecepatan yang diberikan pada sistem ATO dan tidak boleh melebihi batas kecepatan garis hijau. Sedangkan garis biru merupakan respon pengontrol kereta dalam mengikuti profil kecepatan yang sudah diberikan [2].

Dalam tugas akhir ini, profil kecepatan kereta dirancang dengan menggunakan kondisi batas parameter operasional kereta seperti batas percepatan, batas kecepatan, batas posisi dan waktu tempuh perjalanan kereta.

2.3.2 Kontrol Kecepatan pada Subsistem *Automatic Train Opeartion* (ATO)

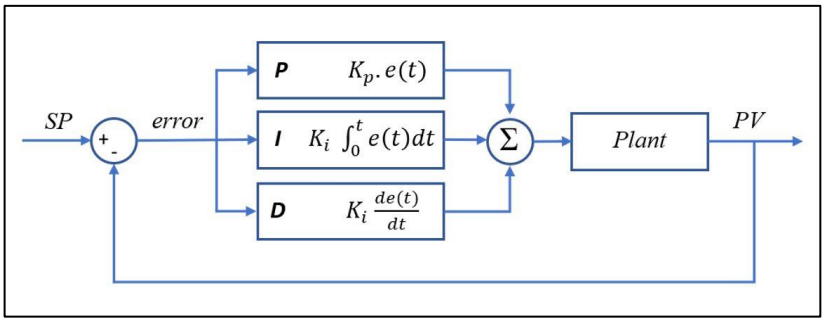
Kontrol kecepatan kereta secara otomatis dilakukan pada subsistem ATO menggantikan peran masinis seperti ketika kereta dioperasikan dalam mode manual. Oleh karena itu, dalam pengontrolan, setiap subsistem saling bekerja bersama dalam menjaga kecepatan kereta sesuai dengan referensi, khusunya ATO dan ATP [11].

Pada tugas akhir ini, peneliti memfokuskan pada subsistem ATO dalam perancangan kontrol kecepatan kereta sesuai referensi. Kontrol kecepatan kereta menggunakan dua jenis pengontrol yang umum digunakan, yaitu pengontrol PID dan pengontrol logika *fuzzy*. Pemilihan pengontrol ini didasarkan pada jenis pengontrol yang telah terpasang pada kereta layang bandara yaitu PID. Sementara logika *fuzzy* ditambahkan untuk memperbaiki respon sistem dalam mengompensasi kesalahan dan perubahan jumlah penumpang.

2.4 Pengontrol *Proportional Integral Detivative* (PID)

Pengontrol PID adalah suatu jenis pengontrol yang umum digunakan dalam dunia industri. Pengontrol ini menggunakan sistem umpan balik (*feedback*) untuk menghitung nilai *error* yang merupakan selisih dari nilai yang diinginkan (*set point*, SP) dengan nilai yang dimanipulasi (*manipulated process variable*, PV). Hasil *error* kemudian akan disesuaikan sedekat mungkin dengan nol, sehingga hasil PV tidak jauh berbeda dengan nilai SP [12].

Pengontrol PID memiliki tiga buah parameter yang saling berkaitan dalam mengontrol sistem agar sesuai dengan referensi yang ditetapkan, yaitu *proportional* (P, Kp), *integral* (I, Ki) dan *derivative* (D, Kd). Ketiga komponen parameter ini tersusun dalam suatu blok diagram PID pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram Blok Pengontrol PID **[13]**

Dalam pengontrolan, istilah *proportional* artinya memberikan tindakan kontrol yang sebanding dengan sinyal kesalahan melalui faktor penguatan secara keseluruhan. Istilah *integral* artinya mengurangi kesalahan kondisi tunak melalui kompensasi frekuensi rendah oleh *integrator*. Istilah *derivative* artinya meningkatkan respon *transient* melalui kompensasi frekuensi tinggi oleh *differentiator* [14].

2.5 Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO)

PSO adalah salah satu teknik optimasi dan termasuk jenis teknik komputasi evolusi. Metode ini memiliki kinerja yang bagus untuk memecahkan persoalan yang mempunyai karakteristik *nonlinear* dan *nondifferentiability*, *multiple optima*, dimensi besar melalui adaptasi yang diturunkan dari teori *psychology-social* [15] [16].

Algoritma ini pertama kali diperkenalkan oleh James Kennedy dan Russell Eberhart pada tahun 1995. Algoritma ini diilustrasikan seperti sekelompok burung yang sedang mencari makan. Setiap burung dalam kelompok tersebut akan mencari makanan yang terdapat dalam suatu wilayah tertentu. Ketika terdapat salah satu burung yang mendapatkan sumber makanan, maka burung lainnya akan menuju ke lokasi burung yang telah mendapatkan sumber makanan tersebut. Jika terdapat banyak burung yang memiliki sumber makanan, maka kelompok burung tersebut akan mengarah ke lokasi burung yang memiliki sumber makanan terbanyak [15].

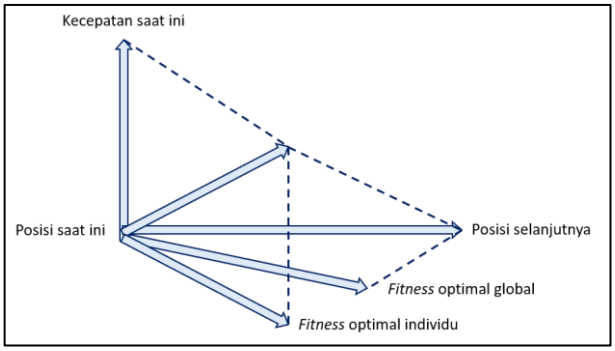
Dalam algoritma ini, burung dimisalkan sebuah partikel yang terdapat pada suatu koloni tertentu. Setiap burung dalam koloni tersebut tentunya memiliki posisi (P) awal yang berbeda-beda dalam wilayah tertentu. Burung akan terbang atau bergerak dengan kecepatan (V) untuk berpindah posisi dari suatu tempat ke tempat lainnya.

Pada ilustrasi tersebut, ketersediaan jumlah makanan dapat dinyatakan sebagai sebuah fungsi objektif dari koloni burung. Sedangkan ketersediaan jumlah makanan pada setiap posisi burungnya dinyatakan sebagai *fitness value*. Dalam algoritma ini, pergerakan setiap burung akan dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor pertama adalah konstanta penyesuaian diri (c_1), yaitu sebuah konstanta yang menyatakan daya tarik burung terhadap posisi terbaiknya (P_{best}). Faktor kedua adalah konstanta penyesuaian sosial (c_2), yaitu sebuah konstanta yang menyatakan daya tarik burung terhadap posisi terbaik dari koloni tersebut (G_{best}). Jika ingin didapatkan suatu posisi yang terbaik rata-rata dalam mendapatkan posisinya maka kedua konstanta ini harus memiliki nilai yang sama. Sedangkan faktor ketiga adalah beban inersia (ω), yaitu suatu konstanta yang menyatakan pengaruh kecepatan sebelumnya terhadap kecepatan pada saat ini. Namun penentuan kecepatan dari setiap burung tersebut dipengaruhi juga oleh vektor acak (r_1,r_2). Dengan mempertimbangkan beberapa faktor tersebut, perumusan kecepatan dan posisi untuk setiap burung dinyatakan oleh persamaan (2.2) dan (2.1) [15] [17].

$$V(t) = \omega V(t-1) + c_1 r_1 (P_{best} - P(t-1)) + c_2 r_2 (G_{best} - P(t-1)) \quad (2.1)$$

$$P(t) = P(t-1) + V(t) \quad (2.2)$$

Pada gambar 2.6 dapat dilihat ilustrasi perubahan posisi dari sebuh partikel dalam algoritma PSO. Perubahan posisi (kecepatan) tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor seperi yang telah dijelaskan pada persamaan (2.1), yaitu perubahan posisi sebelumnya, jarak relatif partikel terhadap posisi terbaiknya, dan jarak relatif partikel terhadap posisi terbaik dalam koloninya. Dengan begitu dapat ditentukan posisi partikel yang akan dituju setelahnya.

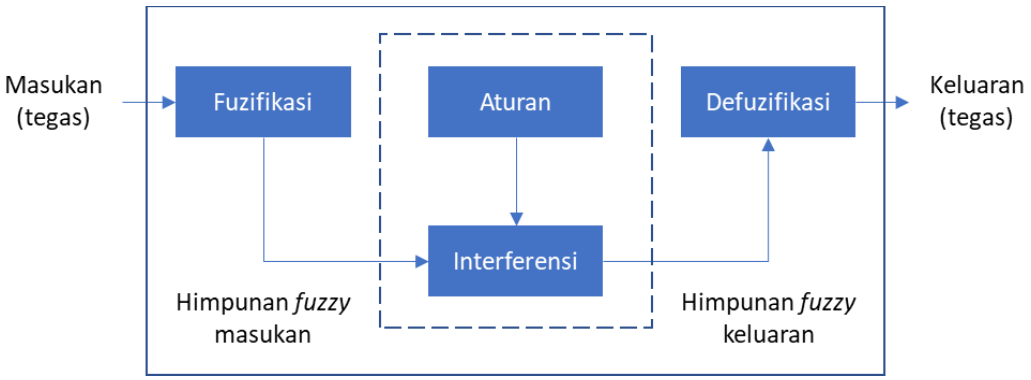


Gambar 2.6 Ilustrasi Perubahan Posisi dalam Algoritma PSO **[17]**

Dalam tugas akhir ini, algoritma PSO akan digunakan dalam mencari parameter PID terbaik untuk mengontrol kecepatan dan posisi kereta APMS. Parameter PID yang akan dicari terdiri dari 3 buah konstanta pengontrol kecepatan (Kp_1, Ki_1, Kd_1) dan 3 buah konstanta pengontrol posisi (Kp_2, Ki_2, Kd_2). Jika diilustrasikan ke dalam algoritma ini maka posisi (*P*) setiap partikel menyatakan kombinasi parameter PID yang terdiri dari 6 buah konstanta yaitu Kp_1, Ki_1, Kd_1, Kp_2, Ki_2 dan Kd_2. Sedangkan kecepatan (*V*) menyatakan besarnya perubahan kombinasi parameter PID untuk setiap partikelnya.

2.6 Pengontrol Logika *Fuzzy* Sugeno

Logika *fuzzy* adalah sebuah bentuk pendekatan untuk melakukan komputasi berdasarkan derajat kebenaran (*degree of truth*). Logika *fuzzy* menggunakan nilai diantara 1 dan 0. Logika ini dibuat untuk menyelesaikan permasalahan komputasi dengan memberikan penilaian terhadap suatu hal yang lebih bersifat alami atau sesuatu yang tidak bisa dikategorikan secara absolut 1 atau 0 [18].

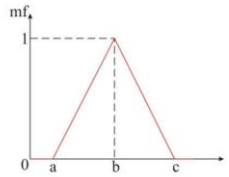
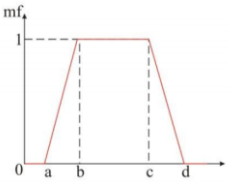


Gambar 2.7 Sistem Logika *Fuzzy*

Dari Gambar 2.7, sistem *fuzzy* terdiri dari tiga proses utama [19], yaitu:

1. Fuzifikasi (*fuzzyfication*) adalah proses mengubah masukan-masukan tegas yang nilai kebenarannnya bersifat pasti (*crisp input*) ke dalam himpunan *fuzzy* (*fuzzy input*) berupa derajat keanggotaan untuk masing-masing rentang semesta (sumbu *x*) di semua variabel. Nilai masukan dipetakan ke dalam derajat keanggotaan dengan menggunakan fungsi berikut:

Tabel 2.1 Fungsi Keanggotaan *Fuzzy*

Fungsi Keanggotaan	Pernyataan Matematis	Ilustrasi
Segitiga	$\mu(x,a,b,c) = \begin{cases} 0; & x < a \; atau \; x > c \\ \dfrac{x-a}{b-a}; & a \le x \le b \\ \dfrac{c-x}{c-b}; & b < x \le c \end{cases}$	
Trapesium	$\mu(x,a,b,c,d) = \begin{cases} 0; & x < a \; atau \; x > d \\ \dfrac{x-a}{b-a}; & a \le x \le b \\ 1; & b < x \le c \\ \dfrac{d-x}{d-c}; & c < x \le d \end{cases}$	

2. Interferensi (*interference*) adalah proses pengambilan keputusan pada logika *fuzzy* menggunakan *fuzzy input* dan *fuzzy rules* yang telah ditetapkan sehingga diperoleh himpunan kesimpulan sebagai *fuzzy output*.

Tabel 2.2 Operasi Logika *Fuzzy*

Operator	Pernyataan Matematis
AND	$\mu A \cap B = min(\mu A[x], \mu B[y])$
OR	$\mu A \cup B = max(\mu A[x], \mu B[y])$

3. Defuzifikasi (*deffuzyfication*) adalah proses mengubah himpunan kesimpulan (*fuzzy output*) menjadi keluaran-keluaran tegas yang nilai kebenarannya bersifat pasti (*crisp value*).

Tabel 2.3 Teknik Defuzifikasi

Teknik	Pernyataan Matematis
Centroid	$Z_{COA} = \int z\,\mu A(z) z\,dz \,/\, \int z\,\mu A(z)\,dz$
Weighted Average	$Z_{WA} = w_1 z_1 + w_2 z_2 \,/\, w_1 + w_2$

Pada tugas akhir ini, digunakan metode *fuzzy* Sugeno orde nol. Metode ini diperkenalkan pada tahun 1985 oleh Takagi-Sugeno Kang. *Fuzzy* Sugeno orde nol

menggunakan nilai konstanta dalam desain keluaran. Sedangkan desain masukan menggunakan interval himpunan *fuzzy* seperti pada metode Mamdani [20]. Logika *fuzzy* digunakan sebagai kompensator pengontrol PID untuk menambah atau mengurangi nilai kecepatan berdasarkan *error* dan parameter lingkungan berupa jumlah penumpang atau beban kereta. Dengan ini, hasil pengontrol diharapkan lebih optimal dan adaptif terhadap perubahan lingkungan.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Deskripsi Objek Penelitian

Objek penelitian pada tugas akhir ini adalah kereta APMS atau yang dikenal kereta layang (*skytrain*) Bandara Internasional Soekarno-Hatta, Tangerang, Banten. Kereta ini sudah dioperasikan untuk mengangkut penumpang antar terminal dan stasiun bandara. Namun, sampai saat ini, kereta masih dalam tahap pengembangan untuk bisa dioperasikan secara otomatis (*driverless*). Salah satu bagian penting yang perlu dirancang dalam otomatisasi kereta adalah profil dan kontrol kecepatan optimal pada subsistem ATO pada sistem persinyalan CBTC.

3.1.1 Spesifikasi Kereta

Kereta yang digunakan pada sistem kereta layang (*skytrain*) Bandara Internasional Soekarno-Hatta adalah kereta pengangkut penumpang (APMS) dengan dua buah gerbong. Setiap rangkaian kereta dilengkapi dengan teknologi *Automated Guideway Transit* (AGT). Kapasitas maksimal kereta adalah 88 orang dan kapasitas nominalnya adalah 68 orang.

Data parameter kereta pada sistem kereta layang (*skytrain*) Bandara Internasional Soekarno-Hatta diperoleh dari pihak PT Len Industri (Persero) sebagai pihak yang merancang, membangun dan memelihara operasional kereta serta dari referensi penelitian sebelumnya. Data parameter tersebut terdapat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Parameter Kereta **[11]**

Parameter	Nilai Nominal	Satuan
Massa beban kosong (m)	34	ton
Koefisien gesekan (μ)	0,002	-
Konstanta gravitasi (g)	9,8	m/s^2
Koefisien pegas (k)	1000	kN/m

Penelitian ini dilakukan pada jalur diantara terminal 1 dan terminal *Integrated Building* (IB). Terminal 1 diperuntukan bagi penerbangan domestik sedangkan terminal IB merupakan terminal penghubung antara sistem kalayang (*skytrain*)

dengan sistem kereta Jabodetabek. Jarak terminal T1 menuju terminal IB sejauh 325 meter dengan waktu tempuh 80 detik Setiap terminal pemberhentian kereta dilengkapi dengan *Platform Screen Doors* (PSD) yang akan membuka secara otomatis bersamaan dengan pintu kereta. Oleh karena itu, posisi akhir pemberhentian kereta harus tepat dengan batas toleransi ± 10 cm dan kecepatan akhir kereta harus mulus sampai berhenti tanpa ada isolasi atau bergerak mundur.

3.1.2 Asumsi Kereta

Pada penelitian ini digunakan beberapa asumsi seperti massa rata-rata penumpang, kategori muatan penumpang, dan kondisi jalur. Massa rata-rata penumpang yang digunakan sebesar 60 kg per orang. Beban barang-barang penumpang seperti koper dan tas sudah dimasukan kedalam total massa rata-rata penumpang. Dalam simulasi, kereta dikategorikan ke dalam lima jenis muatan penumpang yaitu beban kosong (0 penumpang), beban seperempat penuh (22 penumpang), beban setengah penuh (44 penumpang), beban tiga perempat penuh (66 penumpang) dan beban penuh (88 penumpang). Kondisi jalur diasumsikan rata tanpa memperhitungkan gradien ketinggian dan sudut tikungan jalur.

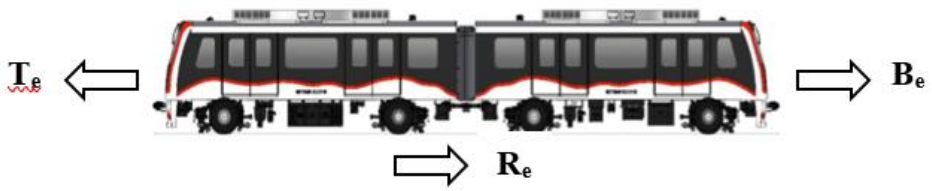
3.2 Pemodelan Sistem Dinamika Kereta

Model perjalanan kereta dari dan menuju setiap terminal atau stasiun dapat diturunkan berdasarkan persamaan gerak kereta dan diagram gaya bebas atau *Free Body Diagram* (FBD) kereta. Selanjutnya, pembentukan persamaan ruang keadaan (*state space*) dilakukan dengan menggunakan analisis Hukum II Newton dan *feedback linearization* dari dinamika kereta.

3.2.1 Penurunan Persamaan Ruang Keadaan

Dalam persamaan gerak kereta terdapat tiga gaya yang saling berinterkasi yaitu gaya traksi (T_e), gaya pengereman (B_e), dan resistansi kereta (R_e). Gaya traksi adalah gaya yang digunakan kereta untuk bergerak dan menambah kecepatan, gaya pengereman adalah gaya yang dihasilkan oleh sistem pengereman kereta untuk mengurangi kecepatan dan berhenti, sedangkan resistansi kereta adalah gaya hambat yang dihasilkan oleh karakteristik kereta dan jalur kereta. Ketiga gaya ini

diilustrasikan pada sistem kereta APMS seperti pada Gambar 3.1 dan diturunkan dengan menggunakan Hukum II Newton seperti pada persamaan berikut:



Gambar 3.1 Diagram Gaya pada Sistem Pergerakan Kereta APMS **[2]**

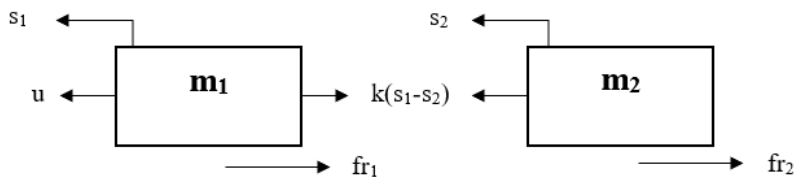
$$\Sigma F = ma \tag{3.1}$$

$$T_e(v) - B_e(v) - R_e(v,i,r) = m\frac{dv}{dt} \tag{3.2}$$

$$u - R_e(v,i,r) = m\frac{dv}{dt} \tag{3.3}$$

dimana selisih gaya traksi dan gaya pengereman dinyatakan sebagai *u* atau input kontrol (positif menyatakan percepatan dan negatif menyatakan perlambatan), *v* adalah kecepatan kereta, *i* adalah kemiringan lintasan, *r* adalah radius kurva lintasan, *m* adalah massa kereta dan *t* adalah waktu tempuh kereta.

Berdasarkan persamaan gerak kereta pada Gambar 3.1, dapat diuraikan kembali secara spesifik gaya-gaya yang bekerja pada kereta dalam FBD di Gambar 3.2. Persamaan ruang keadaan (*state space*) kereta diturunkan menggunakan analisis Hukum II Newton dari FBD sistem kereta APMS sebagai berikut:



Gambar 3.2 *Free Body Diagram* Dinamika Kereta

Dalam sistem dinamika kereta ini, konstanta pegas (*k)* dan waktu tempuh perjalanan kereta (*t*) adalah variabel independen, sedangkan jarak tempuh atau posisi kereta (*s*) dan kecepatan kereta (*v*) adalah variabel keadaan sistem.

Model kereta APMS ini adalah nonlinear karena ada pengaruh dari gaya hambatan berupa *mechanical resistance* dan *aerodynamics drag* yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$fr_i = \mu m_i g v_i + m_i g(Bv_i + Cv_i^2) \tag{3.4}$$

dimana:

fr_i	=	gaya resistansi kereta (N)
μ	=	koefisien gesek
m_i	=	massa kereta (ton)
g	=	konstanta gravitasi (m/s^2)
v_i	=	kecepatan kereta (m/s)
B	=	koefisien Davis (0,02)
C	=	koefisien Davis (0,00042)
i	=	gerbong ke-

Selanjutnya, persamaan gerak pada *free body diagram* dapat diturunkan menjadi persamaan-persamaan berikut:

$$u - k(s_1 - s_2) - fr_1 = m_1 \frac{dv_1}{dt} \tag{3.5}$$

$$k(s_1 - s_2) - fr_2 = m_2 \frac{dv_2}{dt} \tag{3.6}$$

Substitusi (3.4) ke (3.5) sehingga diperoleh persamaan berikut:

$$u - k(s_1 - s_2) - \mu m_1 g v_1 - m_1 g(Bv_1 + Cv_1^2) = m_1 \frac{dv_1}{dt} \tag{3.7}$$

$$\frac{1}{m_1}u - \frac{k}{m_1}s_1 + \frac{k}{m_1}s_2 - \mu g v_1 - g(Bv_1 + Cv_1^2) = \frac{dv_1}{dt} \tag{3.8}$$

Substitusi (3.4) ke (3.6) sehingga diperoleh persamaan berikut:

$$k(s_1 - s_2) - \mu m_2 g v_2 - m_2 g(Bv_2 + Cv_2^2) = m_2 \frac{dv_2}{dt} \tag{3.9}$$

$$\frac{k}{m_2}s_1 - \frac{k}{m_2}s_2 - \mu g v_2 - g(Bv_2 + Cv_2^2) = \frac{dv_2}{dt} \tag{3.10}$$

Variabel keadaan sistem adalah:

$$x_1 = s_1 \tag{3.11}$$

$$x_2 = \dot{x}_1 = v_1 \tag{3.12}$$

$$x_3 = s_2 \tag{3.13}$$

$$x_4 = \dot{x}_3 = v_1 \tag{3.14}$$

Diperoleh persamaan ruang keadaan sebagai berikut:

$$\dot{x}_1 = x_2 \tag{3.15}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{dv_1}{dt} \tag{3.16}$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \tag{3.17}$$

$$\dot{x}_4 = \frac{dv_2}{dt} \tag{3.18}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k/m_1 & -\mu g - gB - gCx_2 & k/m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k/m_2 & 0 & -k/m_2 & -\mu g - gB - gCx_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \tag{3.19}$$

3.2.2 *Feedback Linearization*

Persamaan ruang keadaan (3.19) adalah persamaan nonlinear. Pendekatan linearisasi dilakukan dengan mengubah model sistem awal menjadi model sistem ekuivalen dengan bentuk sederhana. Proses linearisasi ini dilakukan karena metode perancangan kontrol yang digunakan memerlukan sistem yang direpresentasikan dalam bentuk persamaan ruang keadaan linear.

Pada pemodelan ini, kereta dimodelkan secara ideal. Pada saat kereta bergerak, pergerakan gerbong 2 akan mengikuti pergerakan gerbong 1. Gerbong 1 dan 2 dihubungkan oleh *coupler* yang dimodelkan sebagai model pegas dengan simpangan terbatas. Selanjutnya, struktur massa kereta dianggap sebagai *rigid body*. Sehingga variabel keadaan x_3 dianggap sebagai variabel yang memiliki ketidakpastian yang dibatasi dan variabel keadaan x_4 memiliki nilai yang mirip atau mendekati nilai variabel keadaan x_2. Dengan melihat faktor nonlinearitas pada gerbong 1, maka linearisasi umpan balik hanya dilakukan untuk variabel keadaan x_2 saja.

Linearisasi umpan balik dilakukan dengan metode *input-state feedback linearization* [21]. Terdapat sistem nonlinear dengan bentuk berikut:

$$\dot{x} = Ax + B\gamma(x)[u - \alpha(x)] \tag{3.20}$$

dengan $x \in R^n$ adalah variabel keadaan, *A* adalah matriks berukuran *n x n*, *B* adalah matriks berukuran *n x p*, dan pasangan (*A*,*B*) adalah pasangan yang terkontrol, dengan $\alpha: R^n \to R^p$ dan $\gamma: R^n \to R^{pxp}$ dapat didefinisikan di dalam domain $D \in R^n$, dimana *D* adalah set yang terbuka dan terkoneksi, yang mengandung asal dari sistem dan matriks $\gamma(x)$ adalah nonsingular untuk setiap $x \in D$. Linearisasi dilakukan dengan menggunakan umpan balik variabel keadaan:

$$u = \alpha(x) + \beta(x)U \tag{3.21}$$

dengan $\beta(x) = \gamma^{-1}(x)$, untuk mendapatkan persamaan ruang keadaan yang linear:

$$\dot{x} = Ax + BU \tag{3.22}$$

Untuk kestabilan pilih $U = -Kx$ sehingga umpan balik variabel keadaan yang melinearkan menjadi:

$$u = \alpha(x) - \beta(x)Kx. \tag{3.23}$$

Berdasarkan persamaan ruang keadaan (3.19), persamaan nonlinear dari variabel keadaan x_2 dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \frac{k}{m_1}x_1 + \frac{k}{m_2}x_3 - g(\mu + B) + (-gCx_2^2) + \frac{1}{m_1}u \\ &= X + f(x) + U \end{aligned} \tag{3.24}$$

dimana $X = \frac{k}{m_1}x_1 + \frac{k}{m_2}x_3 - g(\mu + B)$ adalah fungsi linear, $f(x) = -gCx_2^2$ adalah fungsi nonlinear dan $U = \frac{1}{m_1}u$ adalah input kontrol.

Selanjutnya pilih input kontrol *u* yang mampu menghilangkan fungsi nonlinear:

$$u = m_1 gCx_2^2 + m_1 U \tag{3.25}$$

Sehingga persamaan (3.24) menjadi:

$$\dot{x}_2 = -\frac{k}{m_1}x_1 + \frac{k}{m_2}x_3 - g(\mu + B)x_2 + U \tag{3.26}$$

Berdasarkan bentuk umum input kontrol yang baru, maka $\alpha(x) = m_1 g C x_2^2$ dan $\beta(x) = m_1 = \gamma^{-1}(x)$. Selanjutnya $U = -Kx$ sehingga $u = m_1 g C x_2^2 - m_1 K x_2$.

Maka, persamaan ruang keadaan (*state space*) linear adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x_1} \\ \dot{x_2} \\ \dot{x_3} \\ \dot{x_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k/m_1 & -\mu g - gB & k/m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k/m_2 & 0 & -k/m_2 & -\mu g - gB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} U \quad (3.27)$$

dengan keterangan variabel sistem ditampilkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variabel Sistem

Variabel	Keterangan
x_1	Posisi gerbong 1
x_2	Kecepatan gerbong 1
x_3	Posisi gerbong 2
x_4	Kecepatan gerbong 2
U	Input kontrol (gaya)
y	Keluaran sistem (kecepatan dan posisi)

Persamaan ruang keadaan (3.27) adalah persamaan linear yang digunakan sebagai model kereta APMS pada perancangan dan simulasi pengontrol.

3.3 Perancangan Profil Kecepatan Kereta

Profil kecepatan kereta dibentuk dengan menggunakan batas dan kondisi batas parameter operasional kereta yang diperoleh dari pihak bandara untuk menjamin profil yang dirancang telah aman dan memenuhi standar operasional kereta. Batas percepatan (a) dan batas kecepatan (v) kereta yang digunakan sebagai berikut:

$$1 \leq a(t) \leq 1 \ (m/s^2) \quad (3.28)$$

$$0 \leq v(t) \leq 4{,}5 \ (m/s) \quad (3.29)$$

Sementara kondisi batas kecepatan dan jarak (s) ditentukan dengan total waktu tempuh (t) maksimal sebesar 80 detik berdasarkan referensi dari data perjalanan kereta sebagai berikut:

$$v(0) = 0\ (m/s)$$

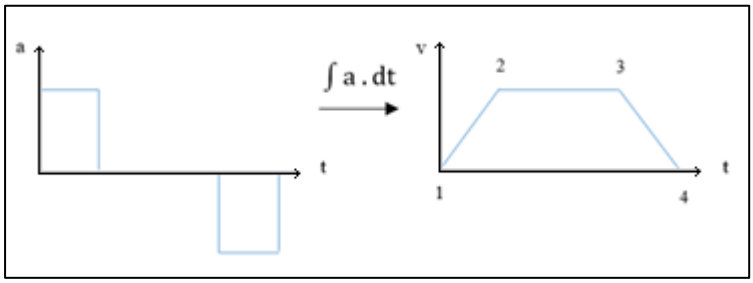
$$v(80) = 0\ (m/s)$$

$$s(0) = 0\ (m)$$

$$s(80) = 325\ (m)$$

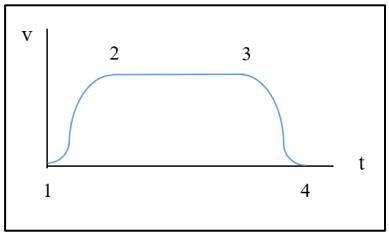
Selain batas dan kondisi batas tersebut, terdapat parameter lain yang ingin dipenuhi ketika kereta mulai bergerak, saat menuju dan melewati batas kecepatan stabil maupun saat kereta akan berhenti. Kondisi ini harus dipenuhi oleh pengontrol sehingga pergerakan kereta menjadi lebih halus (*smooth*).

Perancangan profil kecepatan kereta diawali dengan perancangan profil percepatan berdasarkan analisis kurva pada Gambar 3.3.



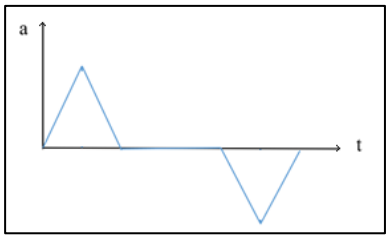
Gambar 3.3 Ilustrasi Kurva Percepatan ke Kecepatan

Pada Gambar 3.3 profil kecepatan yang terbentuk dari rancangan profil percepatan masih kaku. Padahal dalam perancangan profil kecepatan untuk sistem ini diinginkan profil yang mulus (*smooth*). Dengan begitu terdapat empat buah titik yang harus diperbaiki yaitu titik 1, 2, 3 dan 4. Profil kecepatan baru yang diinginkan dinyatakan pada Gambar 3.4.



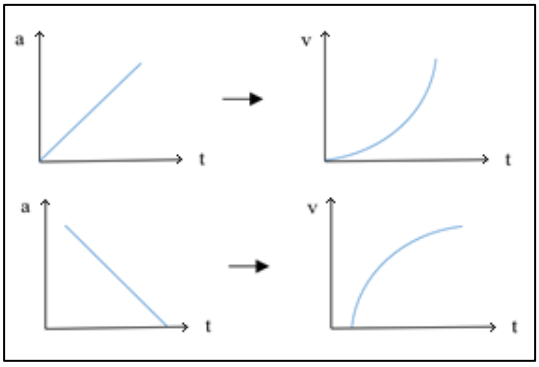
Gambar 3.4 Ilustrasi Kurva Kecepatan yang Diinginkan

Oleh karena itu, profil percepatan yang akan dirancang seharusnya menggunakan empat buah sinyal *ramp* untuk menggantikan sinyal *step* yang ditunjukan oleh Gambar 3.5.



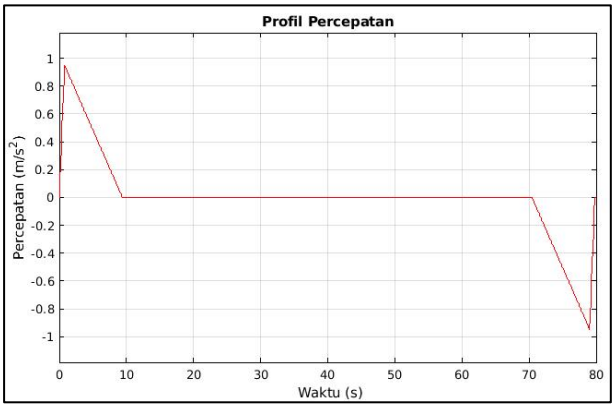
Gambar 3.5 Ilustrasi Kurva Percepatan yang Dirancang

Hal ini sesuai dengan pengaruh sinyal *ramp* saat diintegralkan yang ditunjukan oleh Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Ilustrasi Hasil Integral Kurva *Ramp*

Profil percepatan dirancang dengan memanfaatkan sinyal *ramp* dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Rancangan Profil Percepatan

Batas operasional percepatan kereta yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

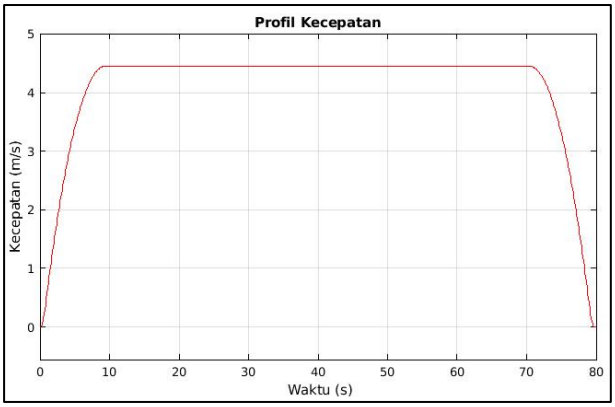
$$-0.9475 \leq a(t) \leq 0{,}9465\ (m/s^2) \tag{3.30}$$

Selanjutnya, profil kecepatan diperoleh dengan mengintegralkan profil percepatan dan profil jarak atau posisi diperoleh dengan mengintegralkan profil kecepatan sebagai berikut:

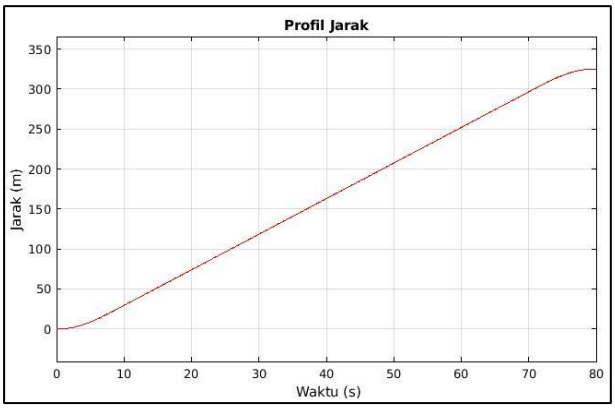
$$v = \int_0^t a\, dt \ldots (x.x) \tag{3.31}$$

$$s = \int_0^t v\, dt \ldots (x.x) \tag{3.32}$$

Hasil profil kecepatan dan jarak atau posisi ditampilkan pada Gambar 3.8.



(a)



(b)

Gambar 3.8 Profil Kereta (*Reference/Set Point*) (a) Kecepatan (b) Jarak/Posisi

Batas operasional kecepatan dan posisi yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

$$0 \leq v(t) \leq 4{,}45\ (m/s) \tag{3.33}$$

$$v(0) = 0\ (m/s) \text{ dan } v(80) = 0\ (m/s) \tag{3.34}$$

$$s(0) = 0\ (m) \text{ dan } s(80) = 325\ (m) \tag{3.35}$$

Profil kecepatan pada Gambar 3.8(a) menyatakan perjalanan kereta dari titik awal (terminal 1) menuju titik akhir (terminal IB) dengan total waktu 79,8 detik hingga kereta berhenti dengan sempurna. Berdasarkan profil kecepatan diatas dapat dilihat bahwa kereta bergerak dengan kecepatan tidak lebih dari 4,5 m/s dan dengan percepatan tidak lebih dari 1 m/s^2 serta tidak kurang dari 1 m/s^2 sesuai dengan batasan yang ditetapkan. Kecepatan maksimal yang dicapai kereta sebesar 4,45 m/s dengan percepatan maksimal sebesar 0,9475 m/s^2 dan perlambatan minimal sebesar 0,9465 m/s^2. Selain itu, berdasarkan profil jarak pada Gambar 3.8(b) terlihat bahwa kereta mampu berhenti di posisi yang telah ditentukan yaitu di titik 325 meter. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perancangan profil kecepatan dan jarak yang dilakukan dapat mempertimbangkan berbagai batas dan kondisi batas seperti batas percepatan, batas kecepatan, batas jarak dan waktu. Profil kecepatan dan jarak ini akan digunakan sebagai referensi atau *set point* dalam simulasi pengontrol.

3.4 Perancangan Kontrol Kecepatan Kereta

Pembacaan kecepatan kereta secara langsung didapatkan dari sensor *rotary encoder* yang telah terpasang pada roda kereta. Kesalahan kecepatan didapatkan dari selisih kecepatan kereta terhadap referensi profil masukan kecepatan. Sedangkan posisi kereta didapatkan dengan mengintegrasikan kecepatan kereta dengan menggunakan sebuah integrator. Bacaan posisi kereta diatur ulang setiap kali kereta melewati *balise*. *Balise* adalah sebuah perangkat yang diletakan pada rel kereta untuk mengkalibrasi pembacaan posisi kereta. *Balise* ini diletakkan di sepanjang jalur kereta setiap 50 m. Kesalahan posisi didapatkan dari selisih posisi kereta terhadap referensi profil masukan posisi. Sedangkan untuk jumlah penumpang kereta, peneliti mengasumsikan bahwa pada kereta terdapat sebuah sensor yang dapat mendeteksi jumlah penumpang yang masuk ke dalam kereta ataupun yang keluar dari kereta. Pada penelitian ini akan dirancang pengontrol yang dapat memanfaatkan data kecepatan, data posisi dan data jumlah penumpang untuk menghasilkan profil masukan kontrol yang akan diberikan kepada motor sebagai aktuator dari kereta.

Pada tahap sebelumnya telah diperoleh model kereta dan profil kecepatan sebagai referensi dari perjalanan kereta, tahap selanjutnya adalah perancangan kontrol

kecepatan optimal kereta agar respon sistem kereta yang dimodelkan dapat mengikuti referensi yang telah ditetapkan. Perancangan kontrol dilakukan menggunakan pengontrol PID paralel dengan logika *fuzzy*. Pengontrol PID dipilih karena jenis pengontrol yang terpasang pada sistem kereta layang bandara adalah PID. Sementara logika *fuzzy* dirancang dan ditambahkan untuk memperbaiki respon yang dapat mengompensasi pengontrol PID dengan cara menambah atau mengurangi input kontrol ke sistem berdasarkan ketidakpastian berupa jumlah penumpang atau beban kereta.

3.4.1 PID *Particle Swarm Optimization*

Parameter PID akan dicari menggunakan algoritma PSO. Algoritma ini akan mencari kombinasi parameter PID terbaik untuk mengontrol kecepatan dan posisi kereta. Simulasi dilakukan selama 100 detik yang terdiri dari 80 detik perjalanan kereta dan 20 detik untuk memastikan kereta telah berhenti. Pengontrol PID akan dirancang untuk meminimalkan kesalahan kecepatan dan kesalahan posisi terhadap referensi profil masukan untuk setiap waktunya. Untuk mengukur kesalahan tersebut, digunakan fungsi objektif berupa *Root Mean Square Error* (RMSE). RMSE merupakan salah satu jenis fungsi objektif yang mampu merepresentasikan *error* dari sebuah kinerja suatu sistem. Oleh karena itu, fungsi objektif pada algoritma PSO yang digunakan terdiri dari dua komponen, yaitu RMSE kecepatan dan RMSE posisi.

Selain itu, fungsi objektif ini dirancang dengan mempertimbangkan kinerja operasional kereta yang terdiri dari batas kecepatan, kecepatan akhir maksimal kereta dalam 80 detik perjalanan dan posisi akhir kereta dalam 80 detik perjalanan. Kecepatan kereta dibatasi lebih dari atau sama dengan 0 m/s untuk memastikan kereta tidak berjalan mundur dan kecepatan kereta tidak boleh melebihi 4,5 m/s sesuai batas operasional kereta yang berlaku di bandara. Kecepatan akhir maksimal kereta dalam 80 detik perjalanan diharapkan kurang dari 0,0005 m/s. Hal ini bertujuan untuk memastikan kecepatan kereta setelah 80 detik perjalanan tidak memberikan pergerakan yang signifikan. Posisi akhir kereta setelah 80 detik perjalanan berada pada rentang 324,99 m sampai 325 m. Hal ini bertujuan untuk memastikan kereta telah sampai pada tujuan yaitu terminal IB.

Berdasarkan rancangan fungsi objektif yang telah dijelaskan, perumusan fungsi objektif dapat didefinisikan pada persamaan (3.36) dan (3.37), dengan batasan yang ditunjukan pada persamaan (3.38), (3.39), dan (3.40) sebagai berikut:

$$J = RMSE_{spd} + RMSE_{pos} \tag{3.36}$$

$$J = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[r_{2_i}(t) - x_{2_i}(t)\right]^2\right]^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[r_{1_i}(t) - x_{1_i}(t)\right]^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.37}$$

dengan batasan:

$$0 \leq x_2(t) \leq 4{,}5\ (m/s) \tag{3.38}$$

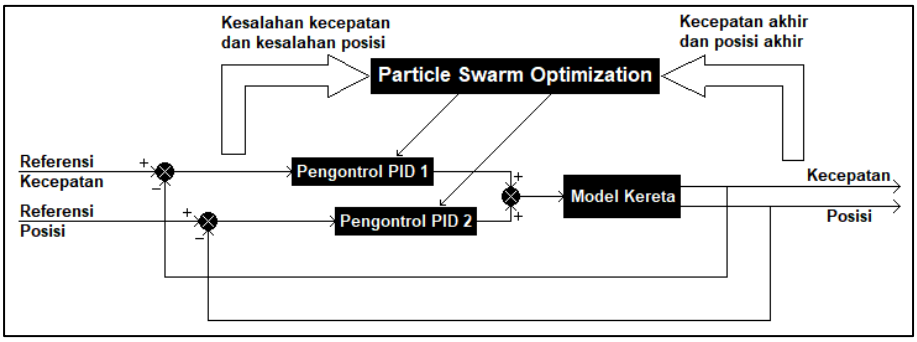
$$x_2(t_f) < 0{,}0005\ (m/s) \tag{3.39}$$

$$324{,}99 < x_1(t_f) < 325\ (m) \tag{3.40}$$

dimana:

x_1	=	Posisi kereta
x_2	=	Kecepatan kereta
r_1	=	Referensi posisi kereta
r_2	=	Referensi kecepatan kereta
N	=	Jumlah data
t	=	Waktu simulasi
t_f	=	Nilai waktu akhir (80 detik)

Pada Gambar 3.9 dapat dilihat struktur pengontrol PID PSO yang digunakan untuk mencari parameter PID. Pada gambar tersebut terlihat masukan PSO yang akan dijadikan pertimbangan dalam perhitungan fungsi objektif. Masukan PSO terdiri dari data kesalahan kecepatan (selisih respon kecepatan terhadap referensi profil kecepatan), data kesalahan posisi (selisih respon posisi terhadap referensi profil posisi), data kecepatan dan data posisi. Simulasi dilakukan sebanyak lima kali untuk semua variasi jumlah penumpang yaitu 0 penumpang, 22 penumpang, 44 penumpang, 66 penumpang, dan 88 penumpang.



Gambar 3.9 Struktur Pengontrol PID PSO

Tahapan dalam menentukan parameter PID menggunakan algoritma PSO yaitu:

1. Menentukan fungsi objektif beserta batasannya seperti yang terdapat pada persamaan (3.36), (3.37), (3.38), (3.39) dan (3.40)
2. Menentukan beban inersia (ω), konstanta penyesuaian diri (c_1) dan konstanta penyesuaian sosial (c_2). Beban inersia ditentukan dari rentang yang terdapat pada perangkat lunak Matlab yaitu 0,1 sampai 1,1. Sedangkan konstanta c_1 dan c_2 ditentukan dari parameter yang digunakan pada percobaan Changhong [17]. Nilai beban inersia sebesar 0,2, konstanta penyesuaian diri sebesar 1,49, dan konstanta penyesuaian sosial sebesar 1,49.
3. Menentukan jumlah partikel.

   Jumlah partikel yang digunakan adalah 100. Jumlah ini ditentukan berdasarkan besarnya batas pencarian yang diberikan pada simulasi PSO dan banyaknya variabel yang menentukan partikel (6 variabel yang terdiri dari 3 konstanta pengontrol kecepatan dan 3 konstanta pengontrol posisi).
4. Menentukan nilai batas simulasi.

   Konstanta batas yang digunakan yaitu 30000 dengan bobot parameter PID sebesar [1,1 0,22 0,04] sebagai batas atas dan [0 0 0] sebagai batas bawah. Nilai batas tersebut diberikan kepada pengontrol kecepatan dan pengontrol posisi dengan nilai yang sama. Nilai batas simulasi ditentukan secara bebas dalam penelitian karena tidak ada referensi yang dapat membatasi penggunaan nilai batas ini. Namun, pada penelitian ini dipilih sebuah nilai batas yang dapat memenuhi fungsi objektif yang telah ditentukan. Selain itu, nilai batas juga mempertimbangkan banyaknya titik lokal minimal yang

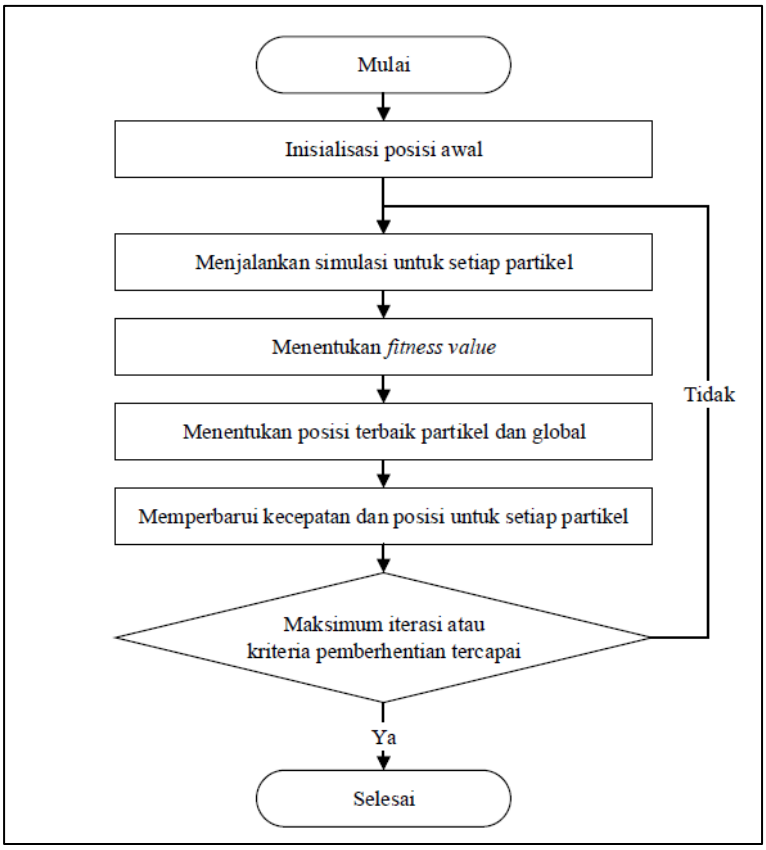
mungkin didapatkan. Oleh karena itu, digunakan kombinasi nilai batas [1,1 0,22 0,04] untuk lebih mengarahkan PSO agar mendapatkan suatu titik lokal minimal yang sama untuk setiap variasi jumlah penumpang. Kombinasi nilai batas tersebut didapatkan dari percobaan selama penelitian dilakukan.

5. Menentukan kriteria pemberhentian simulasi.

   Kriteria pemberhentian simulasi pada penelitian ini ditentukan oleh jumlah iterasi maksimal dan jumlah iterasi pemberhentian minimal. Jumlah iterasi maksimal yang digunakan yaitu 150 iterasi karena berdasarkan percobaan yang telah dilakukan pada penelitian, iterasi maksimal tidak pernah melebihi 150 iterasi. Sedangkan jumlah iterasi pemberhentian minimal yaitu sebesar 30 iterasi.

6. Menjalankan algoritma PSO seperti pada Gambar 3.10.

   Algoritma PSO diawali dengan inisialisasi posisi awal yang terdiri dari kombinasi 6 parameter PID (Kp_1, Ki_1, Kd_1, Kp_2, Ki_2, Kd_2). Dilanjutkan dengan simulasi yang dilakukan untuk setiap partikelnya. Pada saat simulasi berjalan, algoritma PSO akan menghitung *fitness value* berdasarkan fungsi objektif yang telah ditentukan. Setelah itu, akan diperoleh posisi terbaik untuk partikelnya sendiri (terbaik lokal) dan posisi terbaik dalam koloni tersebut (terbaik global). Iterasi akan terus berjalan selama kriteria pemberhentian tercapai. Jika simulasi telah berjalan tanpa perubahan posisi terbaik global sejumlah iterasi pemberhentian minimal, maka simulasi akan berhenti. Selain itu, jika simulasi telah berjalan sejumlah iterasi pemberhentian maksimal, maka simulasi juga akan berhenti.

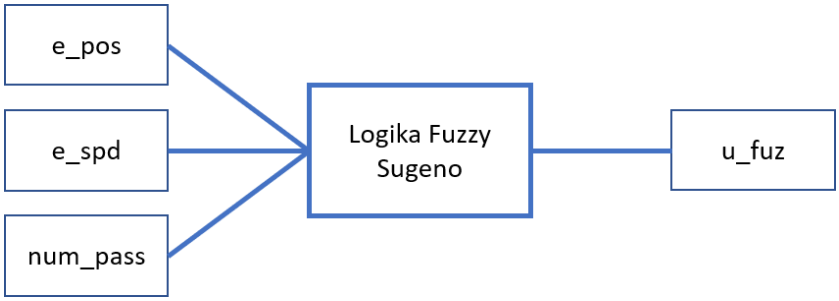


Gambar 3.10 Diagram Alir Algoritma PSO

3.4.2 Logika *Fuzzy* Sugeno

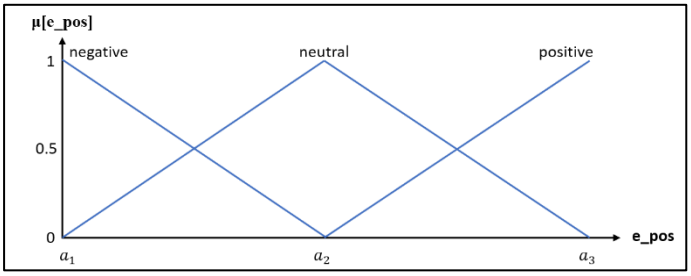
Pengontrol berbasis logika *fuzzy* yang digunakan pada penelitian ini yaitu logika *fuzzy* Sugeno berorde nol. Logika *fuzzy* ini ditambahkan sebagai kompensator pengontrol PID PSO untuk memperbaiki respon sistem dengan cara menambah atau mengurangi input kontrol ke sistem. Hal ini bertujuan agar pengontrol mampu menangani ketidakpastian jumlah penumpang atau beban kereta sehingga lebih adaptif.

Pengontrol *fuzzy* didesain secara paralel dengan blok pengontrol PID PSO dengan tiga variabel masukan berupa *e_pos* (selisih respon posisi sistem terhadap referensi profil masukan posisi), *e_spd* (selisih respon kecepatan sistem terhadap referensi profil masukan kecepatan) dan *num_pass* (jumlah penumpang) serta satu variabel keluaran berupa *u_fuz* (input kontrol *fuzzy* sebagai kompensator pengontrol PID PSO). Desain logika *fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 3.11.

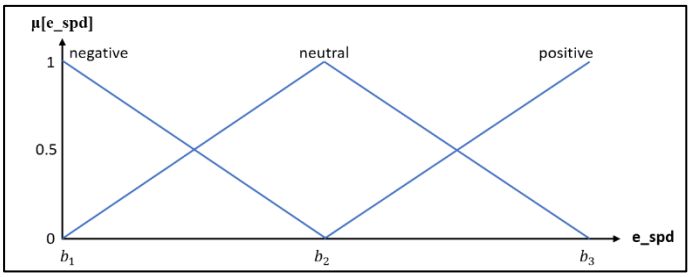


Gambar 3.11 Desain Logika *Fuzzy* Sugeno

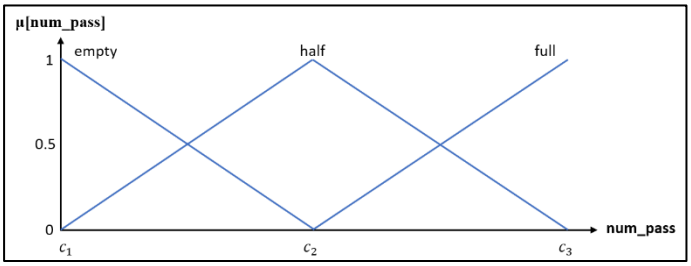
Selanjutnya, setiap variabel memiliki nilai linguistik dan nilai fungsi keanggotaannya masing-masing. Proses penentuan fungsi keanggotaan *fuzzy* dimulai dengan menentukan perbandingan antara masukan *e_pos* dan *e_spd*. Kedua variabel masukan ini ditentukan dari perbandingan parameter pengontrol yang setara dengan *proportional gain* terhadap kesalahan kecepatan (Kp pada pengontrol kecepatan ditambah dengan Kd pada pengontrol posisi) dan parameter pengontrol yang setara dengan *proportional gain* terhadap kesalahan posisi (Kp pada pengontrol posisi ditambah dengan Ki pada pengontrol kecepatan). Sedangkan masukan *num_pass* ditentukan dari rentang jumlah penumpang kereta yaitu ketika kereta kosong atau nol penumpang dan ketika kereta penuh atau 88 penumpang. Keluaran *u_fuz* ditentukan secara manual berdasarkan percobaan pada penelitian. *u_fuz* dirancang agar RMSE yang dihasilkan ketika jumlah penumpang kosong sama dengan ketika jumlah penumpang penuh. Selain itu besarnya keluaran *u_fuz* juga ditentukan berdasarkan kecepatan akhir kereta yang tidak boleh bernilai negatif. Setelah didapatkan dua konstanta untuk kondisi penumpang kosong dan penumpang penuh, maka konstanta diantaranya ditentukan dengan menggunakan interpolasi. Dengan begitu didapatkan fungsi keanggotaan *fuzzy* seperti pada Gambar 3.12.



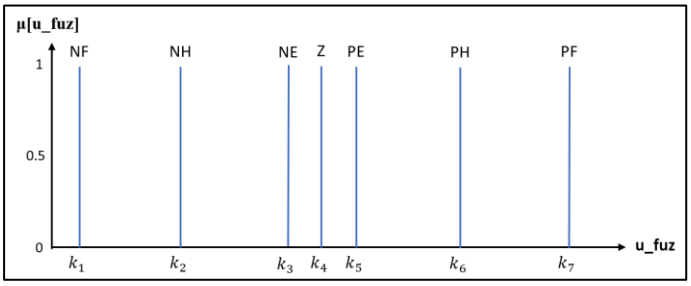
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3.12 Fungsi Keanggotaan *Fuzzy* (a) Masukan 1 (b) Masukan 2 (c) Masukan 3 (d) *Konstanta* Keluaran

Pada Gambar 3.12 diatas, variabel *error* posisi dan kecepatan masing-masing dibagi menjadi tiga himpunan *fuzzy* yaitu *negative*, *neutral*, dan *positive*. Variabel jumlah penumpang juga dibagi menjadi tiga himpunan *fuzzy* yaitu *empty*, *half*, dan *full*. Sedangkan variabel keluaran *fuzzy* dibagi menjadi tujuh nilai konstanta yaitu NF (*neg-full*), NH (*neg-half*), NE (*neg-emp*), Z (*neutral*), PE (*pos-emp*), PH (*pos-half*), dan PF (*pos-full*).

Proses logika *fuzzy* terdiri dari tiga tahapan utama yaitu fuzifikasi, interferensi dan defuzifikasi sebagai berikut:

Proses pertama adalah fuzifikasi, yaitu merubah nilai tegas menjadi nilai himpunan *fuzzy*. Fungsi keanggotaan dan perhitungannya menggunakan representasi kurva segitiga untuk masukan dan konstanta untuk keluaran sebagai berikut:

1. Variabel *e_pos*.
   a. Fungsi keanggotaan himpunan *negative* berada pada rentang a_1 sampai a_2 dengan perhitungan:

$$\mu_{negative}[x] = \begin{cases} \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 0, & a_2 < x \leq a_3 \end{cases} \quad (3.41)$$

   b. Fungsi keanggotaan himpunan *neutral* berada pada rentang a_1 sampai a_3 dengan perhitungan:

$$\mu_{neutral}[x] = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 < x \leq a_3 \end{cases} \quad (3.42)$$

   c. Fungsi keanggotaan himpunan *positive* berada pada rentang a_2 sampai a_3 dengan perhitungan:

$$\mu_{positive}[x] = \begin{cases} 0, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{x - a_2}{a_3 - a_2}, & a_2 < x \leq a_3 \end{cases} \quad (3.43)$$

2. Variabel *e_spd*.
   a. Fungsi keanggotaan himpunan *negative* berada pada rentang b_1 sampai b_2 dengan perhitungan:

$$\mu_{negative}[x] = \begin{cases} \frac{b_2 - x}{b_2 - b_1}, & b_1 \leq x \leq b_2 \\ 0, & b_2 < x \leq b_3 \end{cases} \quad (3.44)$$

   b. Fungsi keanggotaan himpunan *neutral* berada pada rentang b_1 sampai b_3 dengan perhitungan:

$$\mu_{neutral}[x] = \begin{cases} \frac{x - b_1}{b_2 - b_1}, & b_1 \leq x \leq b_2 \\ \frac{b_3 - x}{b_3 - b_2}, & b_2 < x \leq b_3 \end{cases} \quad (3.45)$$

   c. Fungsi keanggotaan himpunan *positive* berada pada rentang b_2 sampai b_3 dengan perhitungan:

$$\mu_{positive}[x] = \begin{cases} 0, & b_1 \leq x \leq b_2 \\ \dfrac{x - b_2}{b_3 - b_2}, & b_2 < x \leq b_3 \end{cases} \tag{3.46}$$

3. Variabel *num_pass*.
   a. Fungsi keanggotaan himpunan *empty* berada pada rentang c_1 sampai c_2 dengan perhitungan:

$$\mu_{empty}[x] = \begin{cases} \dfrac{c_2 - x}{c_2 - c_1}, & c_1 \leq x \leq c_2 \\ 0, & c_2 < x \leq c_3 \end{cases} \tag{3.47}$$

   b. Fungsi keanggotaan himpunan *half* berada pada rentang c_1 sampai c_3 dengan perhitungan:

$$\mu_{half}[x] = \begin{cases} \dfrac{x - c_1}{c_2 - c_1}, & c_1 \leq x \leq c_2 \\ \dfrac{c_3 - x}{c_3 - c_2}, & c_2 < x \leq c_3 \end{cases} \tag{3.48}$$

   c. Fungsi keanggotaan himpunan *full* berada pada rentang c_2 sampai c_3 dengan perhitungan:

$$\mu_{full}[x] = \begin{cases} 0, & c_1 \leq x \leq c_2 \\ \dfrac{x - c_2}{c_3 - c_2}, & c_2 < x \leq c_3 \end{cases} \tag{3.49}$$

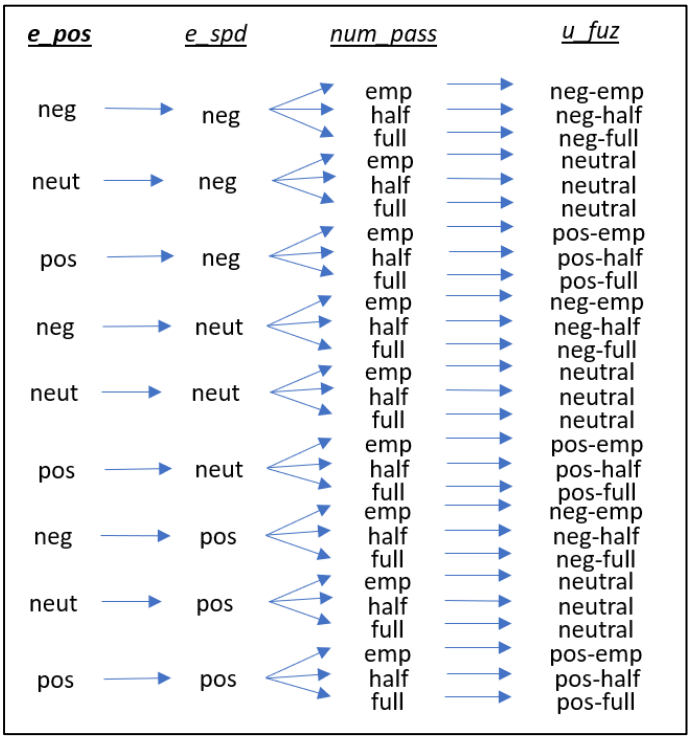
4. Variabel *u_fuz*

   Variabel keluaran berupa *u_fuz* terdiri dari 7 nilai konstanta dengan rentang k_1 sampai k_7 dengan rincian *neutral* bernilai k_4, untuk *neg-full* bernilai k_1, untuk *neg-half* bernilai k_2, untuk *neg-empty* bernilai k_3, untuk *pos-full* bernilai k_7, untuk *pos-half* bernilai k_6, dan *pos-empty* bernilai k_5.

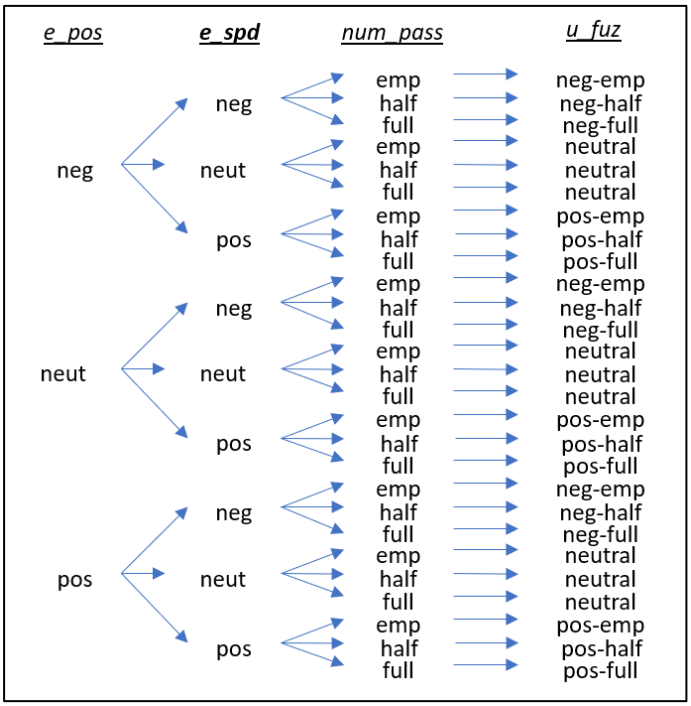
Fungsi keanggotaan untuk variabel masukan ini dirancang sesuai respon sistem ketika diberi variasi jumlah penumpang. Berdasarkan respon tersebut, interval keluaran *fuzzy* untuk penumpang kosong adalah lebih kecil dibandingkan dengan penumpang penuh sehingga setiap kombinasi masukan hanya akan memiliki satu keluaran yang sesuai dengan variasi jumlah penumpangnya.

Proses kedua adalah interferensi berupa perhitungan basis aturan sesuai dengan masukan yang telah dirancang untuk menghasilkan keluaran. Pada desain *fuzzy* Sugeno ini, keluaran *fuzzy* dirancang untuk dapat berperan sebagai pengontrol

kecepatan dan juga sebagai pengontrol posisi. Untuk pengontrol posisi, *e_pos* akan divariasikan terhadap *num_pass* kemudian dihubungkan dengan semua variasi *e_spd* seperti pada Gambar 3.13. Sedangkan untuk pengontrol kecepatan, *e_spd* akan divariasikan terhadap *num_pass* dan kemudian dihubungkan dengan semua variasi *e_pos* seperti pada Gambar 3.15. Kedua hasil keluaran tersebut digabungkan dalam satu keluaran *fuzzy* dengan nilai dan rentang yang sama. Masukan-masukan dan keluaran ini dihubungkan dengan logika operasi yaitu *if*-AND-AND-*then*.

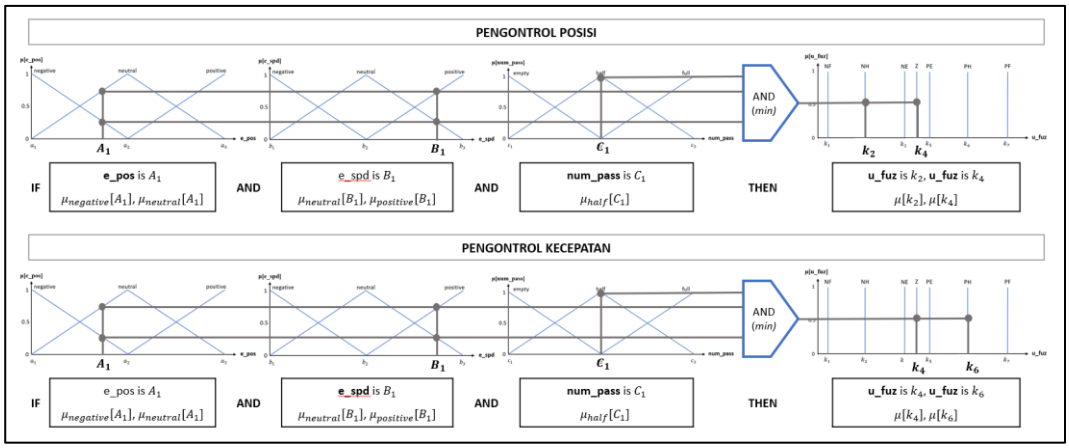


Gambar 3.13 Kombinasi Aturan *Fuzzy* untuk Pengontrol Posisi

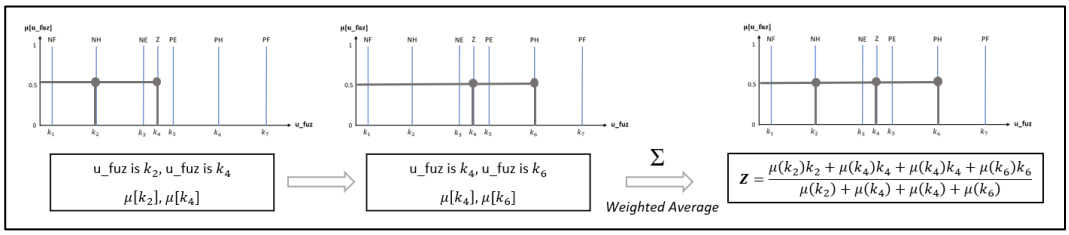


Gambar 3.14 Kombinasi Aturan *Fuzzy* untuk Pengontrol Kecepatan

Proses ketiga adalah defuzifikasi untuk menentukan keluaran berupa nilai tegas dari komputasi dan perhitungan aturan *fuzzy*. Proses ini menggunakan teknik *weighted average* (*Z*), yaitu rata-rata yang dihitung dengan menggunakan bobot setiap nilai konstanta keluaran. Pada Gambar 3.15(a), terlihat proses evaluasi aturan untuk masing-masing pengontrol posisi dan kecepatan sesuai aturan yang telah ditentukan pada tahap interferensi. Untuk setiap aturan, bobot masing-masing variabel masukan akan dihubungkan dengan operator logika tertentu sehingga diperoleh bobot untuk masing-masing nilai konstanta keluaran. Selanjutnya, proses defuzifikasi dilakukan dengan merata-ratakan semua nilai konstanta keluaran beserta bobotnya pada setiap aturan seperti pada Gambar 3.15(b). Proses ini akan berjalan selama simulasi untuk semua kemungkinan aturan yang terjadi sehingga diperoleh keluaran *fuzzy* bernilai tegas (*crisp value*).



(a)



(b)

Gambar 3.15 Ilustrasi Proses Perhitungan Keluaran Logika *Fuzzy Sugeno* (a) Evaluasi Aturan (b) Komposisi Keluaran dan Defuzifikasi

3.5 Perancangan Simulasi Pengontrol

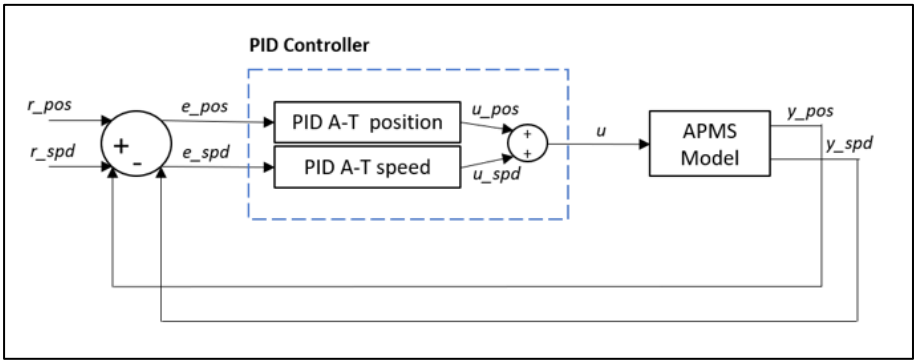
Pada tugas akhir ini, simulasi terdiri dari tiga bagian yaitu PID *auto tuning* sebagai pembanding, PID PSO, dan PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno. Ketiga simulasi pengontrol ini akan mengontrol kecepatan dan posisi kereta secara bersamaan. Setiap rancangan simulasi pengontrol diberikan lima variasi jumlah penumpang yang berpengaruh pada beban kereta seperti pada Tabel 3.4. Selanjutnya, simulasi dilakukan pada perangkat lunak Matlab R2020.

Tabel 3.3 Variasi Jumlah Penumpang atau Beban Kereta

Kondisi Kereta	Jumlah Penumpang (orang)	Massa (kg)
Beban kosong	0	34000
Beban seperempat penuh	22	35320
Beban setengah penuh	44	36640
Beban tiga perempat penuh	66	37960
Beban penuh	88	39280

3.5.1 PID *Auto Tuning*

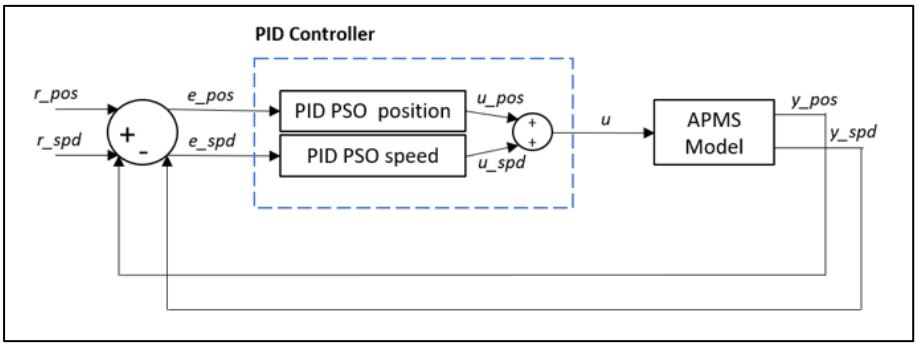
Simulasi bagian pertama adalah pengontrol PID *auto tuning*. Metode *auto tuning* ini digunakan sebagai pembanding kedua pengontrol lain yang diperoleh dari perancangan dengan metode PSO dan *fuzzy* Sugeno. Dalam proses *auto tune*, parameter PID telah diperoleh untuk masing-masing pengontrol kecepatan dan posisi pada setiap variasi jumlah penumpang. Dari simulasi didapatkan performansi berupa RMSE kecepatan, RMSE posisi, selisih posisi akhir beserta batas operasional kereta. Blok diagram simulasi pengontrol PID *auto tuning* ditampilkan pada Gambar 3.16. Pada Gambar 3.16, keluaran pengontrol kecepatan dan posisi akan dijumlahkan sehingga menjadi sebuah input kontrol bagi sistem kereta.



Gambar 3.16 Blok Diagram Pengontrol PID *Auto Tuning*

3.5.2 PID *Particle Swarm Optimization*

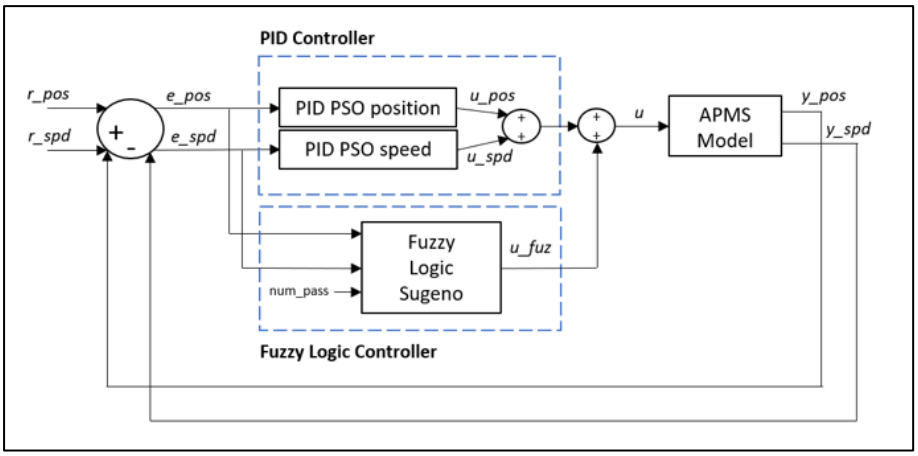
Simulasi bagian kedua adalah pengontrol PID PSO. Pengontrol PID PSO yang digunakan sudah divariasikan terhadap jumlah penumpang saat proses *tuning* dengan PSO. Pada simulasi ini, parameter Kp, Ki, dan Kd berperan mengatur respon sistem berupa kecepatan dan posisi operasional kereta agar mendekati atau mencapai referensi berupa profil kecepatan kereta yang telah ditetapkan. Variasi massa saat simulasi diberikan pada model kereta dengan merubah nilai parameter *m* pada *state space*. Selanjutnya hitung dan cek nilai RMSE kecepatan, RMSE posisi dan selisih posisi pemberhentian kereta, batasan kecepatan dan percepatan serta input kontrol untuk setiap kondisi. Blok diagram simulasi pengontrol PID PSO ditampilkan pada Gambar 3.17. Pada Gambar 3.17, keluaran pengontrol kecepatan dan posisi akan dijumlahkan sehingga menjadi sebuah input kontrol bagi sistem kereta.



Gambar 3.17 Blok Diagram Pengontrol PID PSO

3.5.3 PID *Particle Swarm Optimization* Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno

Simulasi bagian ketiga adalah pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno. Rancangan ini menggunakan PID PSO saat beban kosong dan tambahan logika *fuzzy* dengan masukan jumlah penumpang sebagai kompensator PID. *Fuzzy* disusun secara paralel dengan PID PSO untuk memperbaiki respon sistem dan mengompensasi *error* dengan menambah atau mengurangi kecepatan kereta berdasarkan variasi jumlah penumpang. Variasi jumlah penumpang saat simulasi diberikan pada model kereta dan masukan logika *fuzzy*. Setelah itu, diperoleh performansi simulasi berupa RMSE kecepatan, RMSE posisi, posisi akhir serta batas operasional. Blok diagram simulasi pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno ditampilkan pada Gambar 3.18. Pada Gambar 3.18, keluaran pengontrol PID PSO berupa penjumlahan keluaran pengontrol kecepatan dan posisi akan dijumlahkan kembali dengan keluaran *fuzzy* menjadi sebuah input kontrol bagi sistem kereta.



Gambar 3.18 Blok Diagram Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno

BAB IV
HASIL DAN ANALISIS

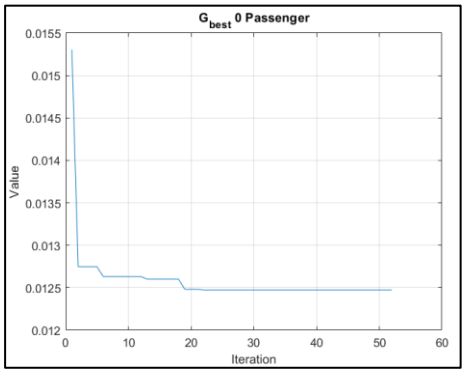
4.1 Kontrol Kecepatan Kereta

Terdapat dua jenis pengontrol yang dirancang, yaitu PID PSO dan logika *fuzzy* Sugeno serta satu pengontrol PID *auto tuning* yang diperoleh dari PID *tuner* pada perangkat lunak Matlab sebagai pembanding. Hasil simulasi PSO untuk *tuning* PID ditampilkan dalam bentuk historis *fitness value* pada setiap variasi jumlah penumpang. Sementara hasil parameter Kp, Ki, dan Kd untuk pengontrol posisi dan kecepatan pada setiap variasi jumlah penumpang dinyatakan dalam bentuk tabel. Hasil perancangan logika *fuzzy* Sugeno ditampilkan dalam bentuk *surface control* sebagai keluaran *fuzzy* beserta pengujian kinerja dan performanya dalam menangani perubahan jumlah penumpang.

4.1.1 PID *Particle Swarm Optimization*

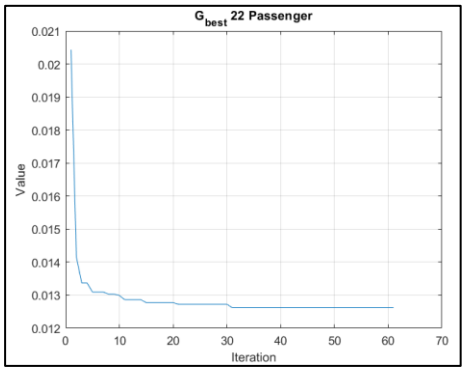
Proses simulasi algoritma PSO untuk *tuning* PID dilakukan pada 5 variasi jumlah penumpang yaitu ketika tanpa penumpang atau beban kosong, 22 penumpang atau beban seperempat penuh, 44 penunmpang atau beban setengah penuh, 66 penumpang atau beban tiga perempat penuh, dan 88 penumpang atau beban penuh.

Pada simulasi tanpa penumpang atau beban kosong didapatkan *fitness value* terbaik sebesar 0,012474 dari 52 iterasi seperti pada Gambar 4.1. Berikut merupakan historis *fitness value* selama simulasi berjalan:



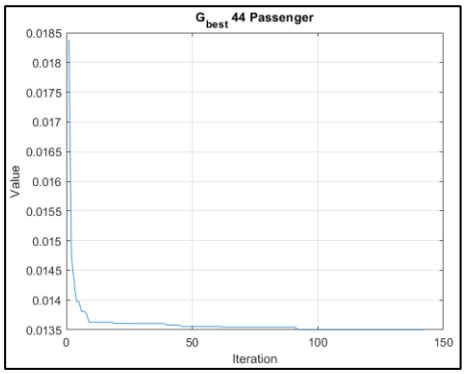
Gambar 4.1 Historis *Fitness Value* pada Simulasi PSO (Beban Kosong)

Pada simulasi 22 penumpang atau beban seperempat penuh didapatkan *fitness value* terbaik sebesar 0,012620 dari 61 iterasi seperti pada Gambar 4.2. Berikut merupakan historis *fitness value* selama simulasi berjalan:



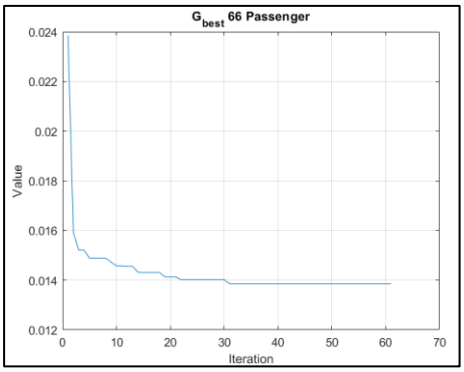
Gambar 4.2 Historis *Fitness Value* pada Simulasi PSO (Beban Seperempat Penuh)

Pada simulasi 44 penumpang atau beban setengah penuh didapatkan *fitness value* terbaik sebesar 0,013501 dari 142 iterasi seperti pada Gambar 4.3. Berikut merupakan historis *fitness value* selama simulasi berjalan:



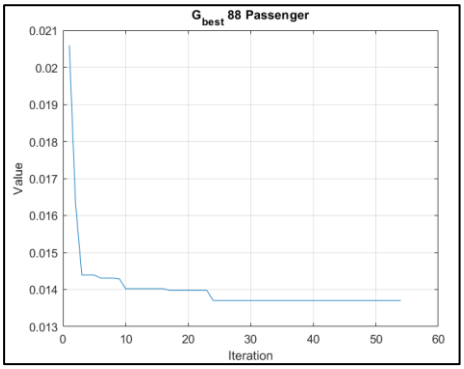
Gambar 4.3 Historis *Fitness Value* pada Simulasi PSO (Beban Setengah Penuh)

Pada simulasi 66 penumpang atau beban tiga perempat penuh didapatkan *fitness value* terbaik sebesar 0,013854 dari 61 iterasi seperti pada Gambar 4.4. Berikut merupakan historis *fitness value* selama simulasi berjalan:



Gambar 4.4 Historis *Fitness Value* pada Simulasi PSO (Beban Tiga Perempat Penuh)

Pada simulasi 88 penumpang atau beban penuh didapatkan *fitness value* terbaik sebesar 0,013706 dari 54 iterasi seperti pada Gambar 4.5. Berikut merupakan historis *fitness value* selama simulasi berjalan:



Gambar 4.5 Historis *Fitness Value* pada Simulasi PSO (Beban Penuh)

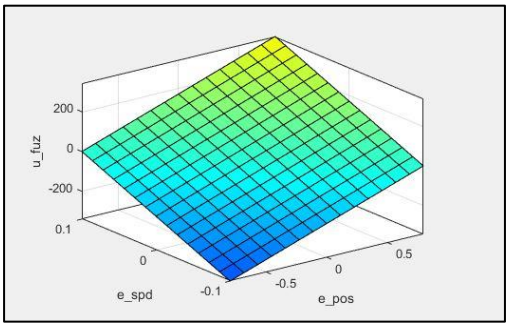
Hasil parameter PID untuk kecepatan dan posisi yang didapatkan dari simulasi algoritma PSO ditampilkan pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Parameter PID PSO

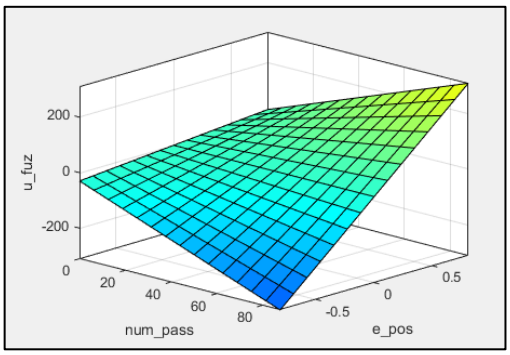
Kondisi	Kecepatan			Posisi		
	Kp	Ki	Kd	Kp	Ki	Kd
0 Penumpang	31259,4202	61,3843	616,2994	4005,7011	0,0140	166,3701
22 Penumpang	32354,0508	160,4718	1023,2080	4007,6263	0	16,4475
44 Penumpang	30887,9898	0	9,1969	4002,2351	0	199,6437
66 Penumpang	31340,2691	2575,4347	1,5166	1279,5644	0,0024	0,4835
88 Penumpang	32933,7176	535,8184	205,7499	3551,5393	0,0120	155,7254

4.1.2 Logika *Fuzzy* Sugeno

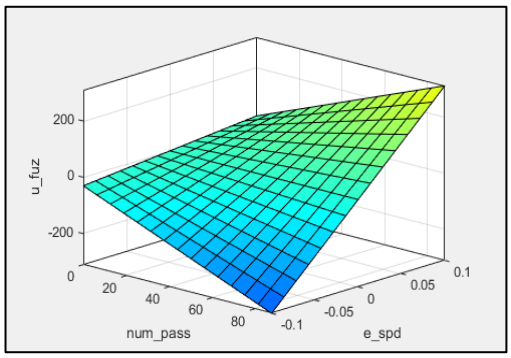
Pada perancangan *fuzzy* digunakan pengontrol PID PSO ketika penumpang kosong karena memiliki *fitness value* terkecil jika dibandingkan dengan variasi jumlah penumpang lainnya. Perbandingan rentang variabel *e_pos* dan *e_spd* ditentukan dari perbandingan parameter PID seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada Subsubbab 3.4.2. Dengan begitu didapatkan variabel *e_pos* dengan nilai konstanta a_1 sebesar -0,81, a_2 sebesar 0, dan a_3 sebesar 0,81 serta variabel *e_spd* dengan nilai konstanta b_1 sebesar -0,1, b_2 sebesar 0, dan b_3 sebesar 0,1. Sementara variabel *num_pass* menggunakan nilai konstanta c_1 sebesar 0, c_2 sebesar 44, dan c_3 sebesar 88 sesuai kapasitas jumlah penumpang kereta. Sedangkan variabel keluaran *u_fuz* menggunakan nilai konstanta k_1 sebesar -620, k_2 sebesar -340, k_3 sebesar -60, k_4 sebesar 0, k_5 sebesar 60, k_6 sebesar 340, dan k_7 sebesar 620. Hasil keluaran pengontrol *fuzzy* diperoleh berdasarkan proses defuzifikasi yang diilustrasikan dalam *surface control* pada Gambar 4.6 berikut:



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.6 *Surface Control* (a) *e_pos* dan *e_spd* terhadap *u_fuz* (b) *e_pos* dan *num_pass* terhadap *u_fuz* (c) *e_spd* dan *num_pass* terhadap *u_fuz*

Gambar 4.6(a) menyatakan hubungan antara *e_pos* dan *e_spd* ketika *num_pass* sebesar 44 penumpang. Gambar 4.6(a) tersebut memperlihatkan bahwa jika *e_pos* dan *e_spd* semakin besar, maka keluaran *fuzzy* (*u_fuz*) akan semakin besar dan begitupun sebaliknya. Gambar 4.6(b) menyatakan hubungan antara *e_pos* dan *num_pass* ketika *e_spd* sebesar 0 m/s. Gambar 4.6(b) tersebut memperlihatkan bahwa jika *e_pos* dan *num_pass* semakin besar, maka keluaran *fuzzy* (*u_fuz*) akan semakin besar dan begitupun sebaliknya. Gambar 4.6(c) menyatakan hubungan antara *e_spd* dan *num_pass* ketika *e_pos* sebesar 0 m. Gambar 4.6(c) tersebut memperlihatkan bahwa jika *e_spd* dan *num_pass* semakin besar, maka keluaran *fuzzy* (*u_fuz*) akan semakin besar dan begitupun sebaliknya.

Pengujian kinerja logika *fuzzy* Sugeno dilakukan untuk masukan *e_pos* bernilai 0,08 dan *e_spd* bernilai 0,01 dengan variasi masukan jumlah penumpang bernilai 0, 22, 44, 66, 88. Hasil pengujian kinerja *fuzzy* ditampilkan pada Tabel 4.2 berikut:

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kinerja *Fuzzy*

Masukan 1 (*error* posisi)	Masukan 2 (*error* kecepatan)	Masukan 3 (jumlah penumpang)	Keluaran *fuzzy*
0,08	0,01	0	6
0,08	0,01	22	20
0,08	0,01	44	34
0,08	0,01	66	48
0,08	0,01	88	62

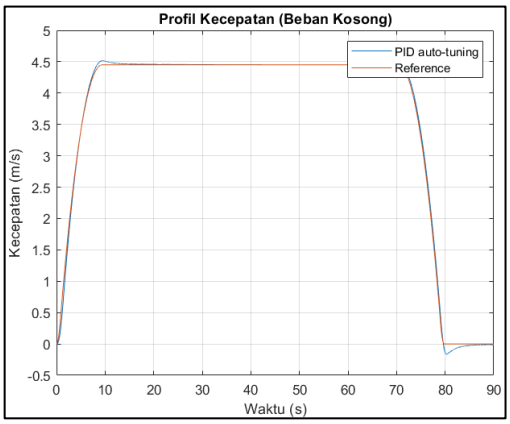
Hasil pengujian pada Tabel 4.2 membuktikan bahwa pengontrol *fuzzy* mampu mengatasi ketidakpastian jumlah penumpang dengan menambah nilai keluaran *fuzzy* (*u_fuz*) seiring penambahan jumlah penumpang atau beban kereta saat *e_pos* dan *e_spd* bernilai sama.

4.2 Simulasi Pengontrol

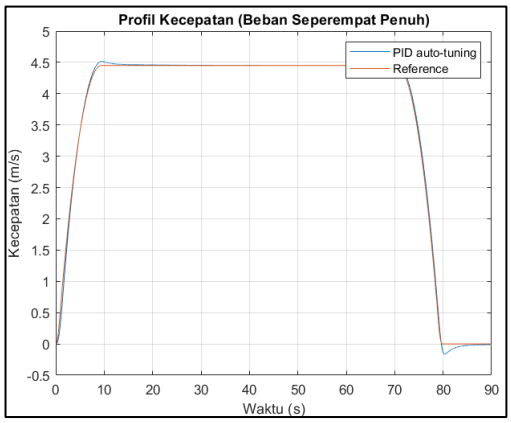
Hasil simulasi pengontrol diawali dengan PID *auto tuning* sebagai pembanding. Selanjutnya hasil simulasi pengontrol dari perancangan dengan PID PSO dan PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno. Masing-masing hasil simulasi pengontrol sudah diberikan lima variasi jumlah penumpang atau beban kereta dan hasilnya disajikan dalam bentuk profil kecepatan dan profil posisi terkontrol beserta data RMSE kecepatan, RMSE posisi, selisih posisi akhir dan kondisi batas operasional.

4.2.1 PID *Auto Tuning*

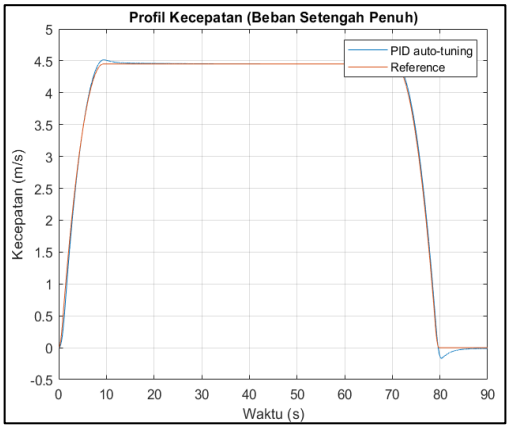
Simulasi PID *auto tuning* dilakukan selama 90 detik untuk memperlihatkan kondisi kecepatan akhir tetapi operasional yang diharapkan tetap 80 detik. Hasil simulasi berupa profil kecepatan kereta ditampilkan pada Gambar 4.7.



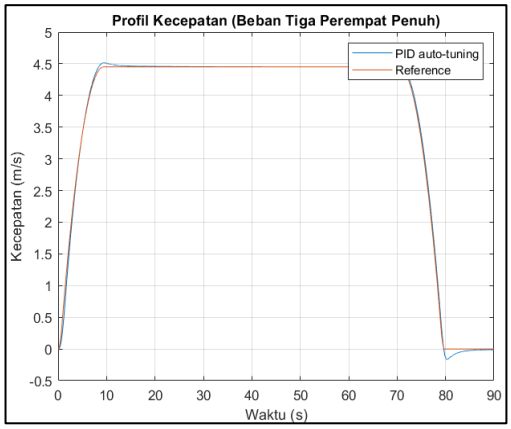
(a)



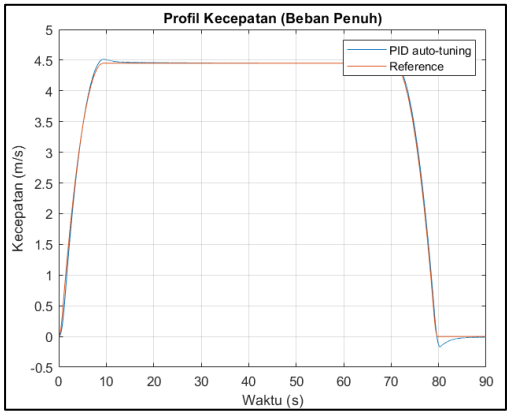
(b)



(c)



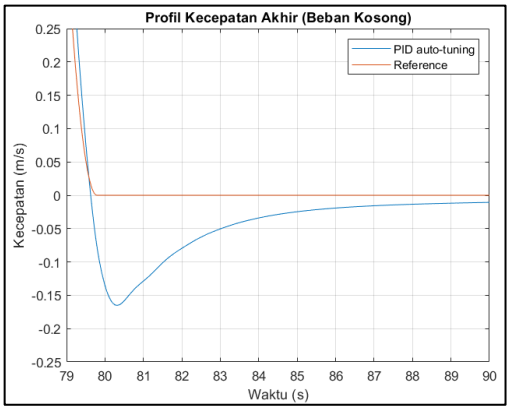
(d)



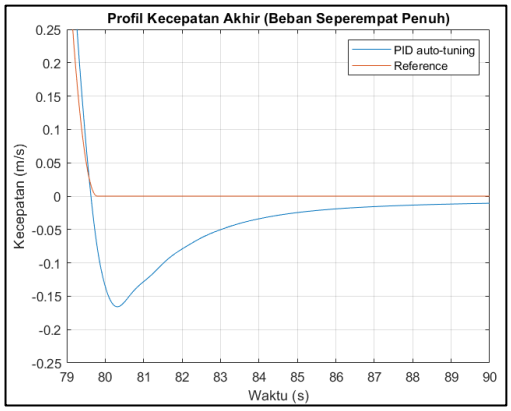
(e)

Gambar 4.7 Hasil Simulasi Kontrol Kecepatan menggunakan Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

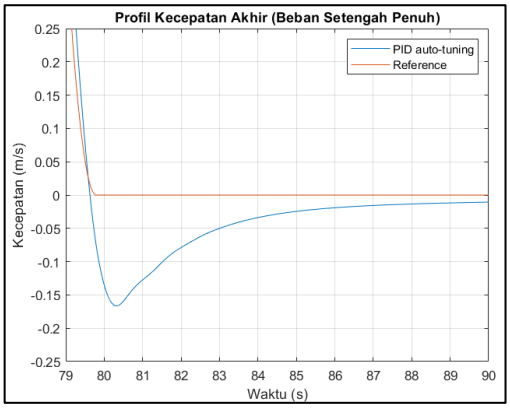
Perbesaran profil kecepatan akhir pengontrol PID *auto tuning* ditampilkan pada Gambar 4.8.



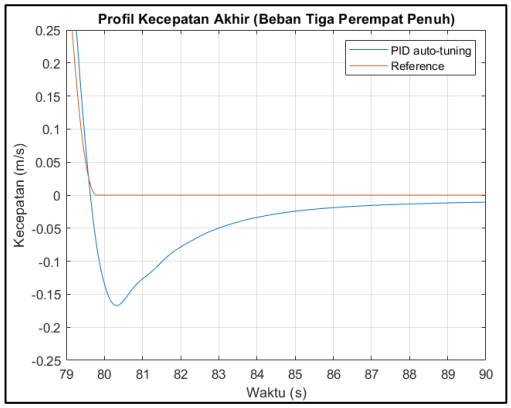
(a)



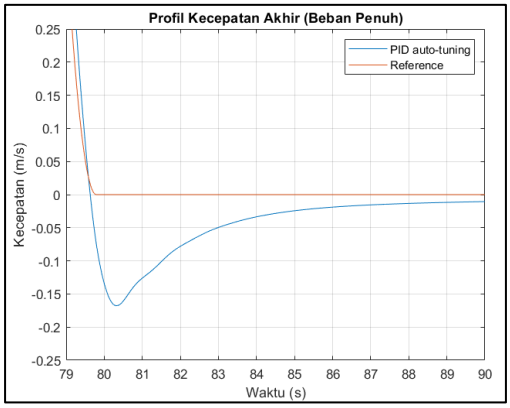
(b)



(c)



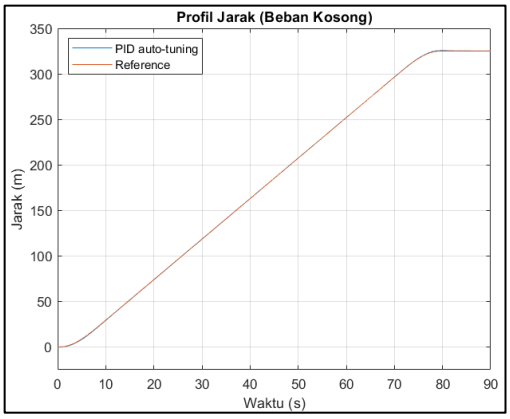
(d)



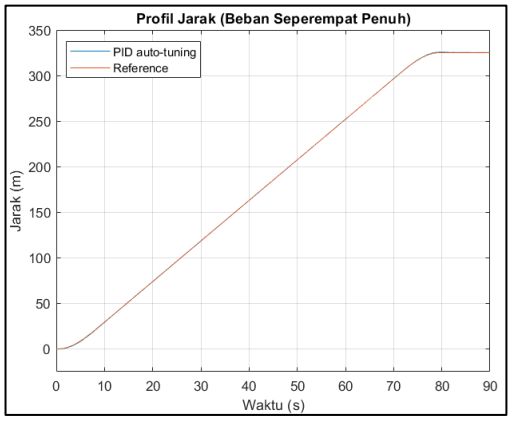
(e)

Gambar 4.8 Profil Kecepatan Akhir Hasil Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

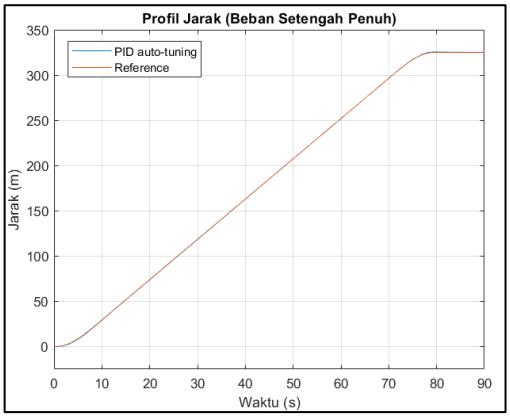
Hasil simulasi berupa profil posisi kereta untuk setiap variasi jumlah penumpang dengan menggunakan pengontrol PID *auto tuning* ditampilkan pada Gambar 4.9.



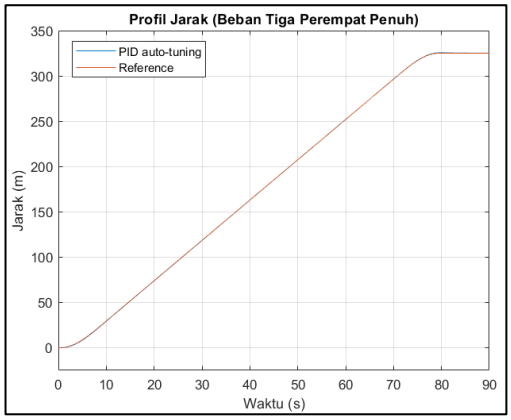
(a)



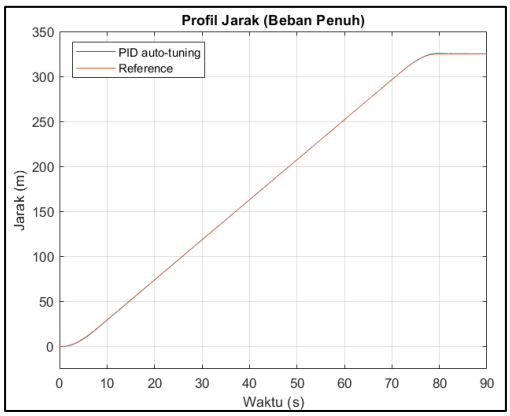
(b)



(c)



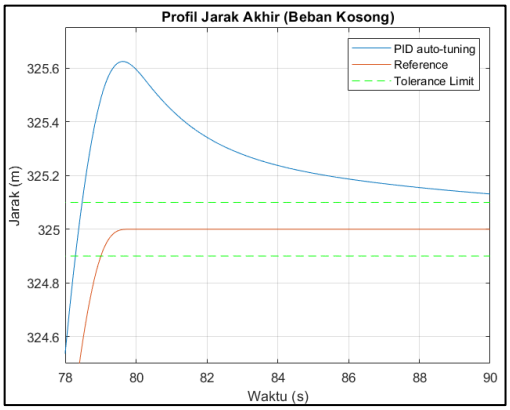
(d)



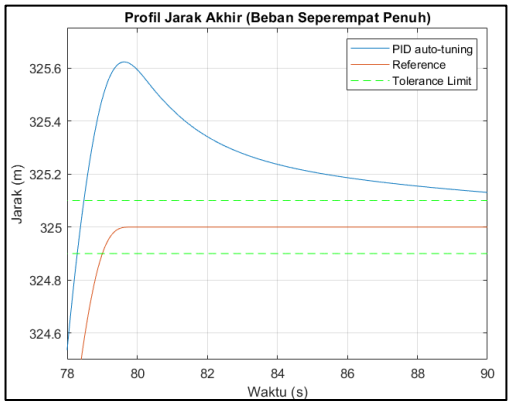
(e)

Gambar 4.9 Hasil Simulasi Kontrol Posisi menggunakan Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

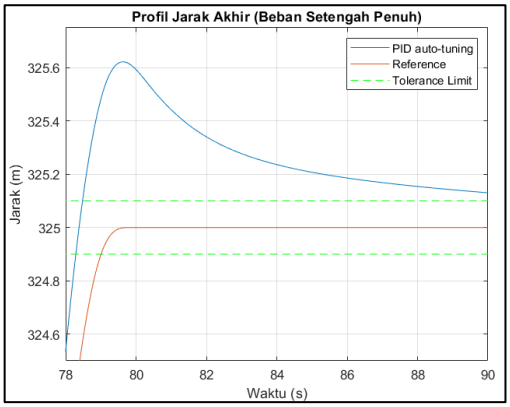
Perbesaran profil posisi akhir pengontrol PID *auto tuning* ditampilkan pada Gambar 4.10.



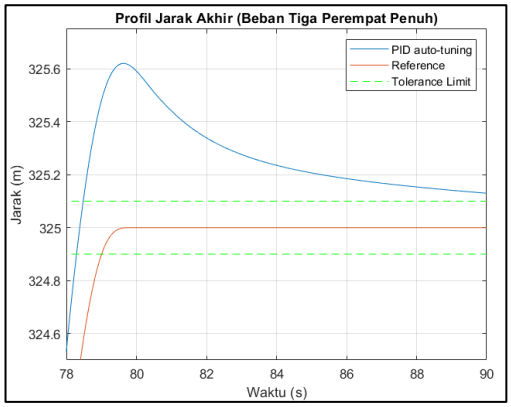
(a)



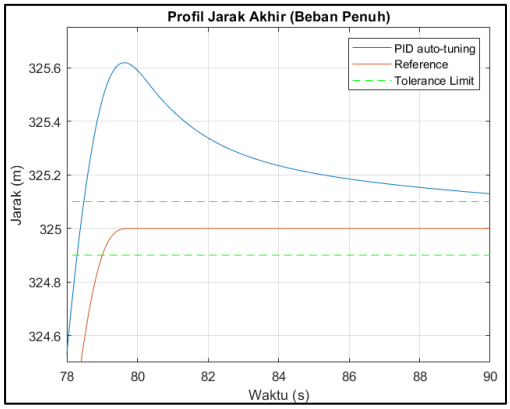
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.10 Profil Posisi Akhir Hasil Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

Profil percepatan dan profil input kontrol hasil simulasi pengontrol PID *auto tuning* terlampir pada Gambar L.1 dan Gambar L.2 di Lampiran A.

Perbandingan nilai RMSE kecepatan, RMSE posisi dan selisih posisi akhir untuk setiap variasi jumlah penumpang pada kontrol kecepatan kereta dengan pengontrol PID *auto tuning* selama 80 detik ditampilkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Nilai RMSE Kecepatan, RMSE Posisi dan Selisih Posisi Akhir Kereta menggunakan Pengontrol PID *Auto Tuning*

Kondisi	RMSE Kecepatan	RMSE Posisi	Selisih Posisi Akhir (m)
0 Penumpang	$4{,}340 \times 10^{-2}$	0,1950	0,5956
22 Penumpang	$4{,}370 \times 10^{-2}$	0,1945	0,5944
44 Penumpang	$4{,}320 \times 10^{-2}$	0,1940	0,5931
66 Penumpang	$4{,}320 \times 10^{-2}$	0,1935	0,5919
88 Penumpang	$4{,}310 \times 10^{-2}$	0,1930	0,5907

Kondisi batas operasional kereta dari pengontrol PID *auto tuning* selama 80 detik diperoleh dari Gambar 4.7, Gambar L.1, dan Gambar L.2. Nilai untuk setiap variasi jumlah penumpang ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Batas Kecepatan, Percepatan dan Input Kontrol Kereta menggunakan Pengontrol PID *auto tuning*

Kondisi	Kecepatan (m/s)		Percepatan (m/s^2)		Input Kontrol (kN)	
	Min	*Max*	*Min*	*Max*	*Min*	*Max*
0 Penumpang	-0,1350	4,515	-0,9459	0,9850	-58,71	81,17
22 Penumpang	-0,1350	4,515	-0,9459	0,9876	-60,99	84,30
44 Penumpang	-0,1350	4,515	-0,9459	0,9901	-63,27	87,44
66 Penumpang	-0,1350	4,515	-0,9459	0,9926	-65,55	90,59
88 Penumpang	-0,1340	4,515	-0,9459	0,9950	-67,82	93,76

Hasil simulasi PID *auto tuning* digunakan sebagai pembanding dari dua pengontrol lainnya yang dirancang pada penelitian ini. Simulasi pengontrol kecepatan dan posisi dilakukan selama 90 detik. Hal ini digunakan untuk memperlihatkan profil secara keseluruhan. Namun, batas waktu operasional yang diharapkan tetap 80 detik sebagaimana dijelaskan pada tahap perancangan. Gambar 4.7 memperlihatkan

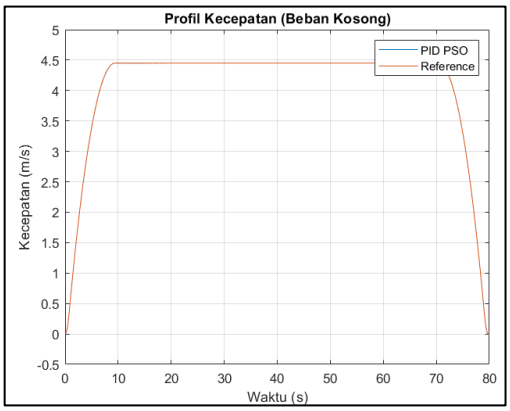
hasil simulasi kontrol kecepatan kereta menggunakan pengontrol PID *auto tuning*. Pada hasil simulasi dapat dilihat bahwa kecepatan kereta belum mampu mengikuti referensi yang telah ditetapkan karena masih melanggar batas kecepatan operasional kereta. Kecepatan kereta mengalami *overshoot* sekitar 1,34% atau sebesar 0,065 dari referensi yang diberikan pada saat kereta akan menuju kecepatan stabil di detik ke-9,5. Selain itu, pada saat kereta akan berhenti, kecepatan kereta mengalami *undershoot* sekitar 10% atau sebesar 0,162 dari titik nol di detik ke-80,35. Sementara pada Gambar 4.8 memperlihatkan perbesaran profil kecepatan dari Gambar 4.7 untuk selang waktu satu detik terakhir. Pada Gambar 4.8 tersebut terlihat adanya proses *undershoot* hingga menuju titik nol. Hal ini menunjukan bahwa perjalanan kereta belum mampu berhenti dengan mulus dan tepat waktu sesuai referensi yang diberikan. Sedangkan hasil pengontrol posisi terdapat pada Gambar 4.9 dengan perbesaran untuk selang waktu dua detik terakhir pada Gambar 4.10. Hasilnya menunjukan bahwa posisi kereta belum mampu mengikuti referensi yang diberikan dan masih melanggar toleransi posisi akhir. Selisih posisi akhir kereta terhadap referensi posisi akhir masih cukup besar sekitar 13 cm di detik ke-90 dan sekitar 59 cm di detik ke-80. Hal ini menunjukan bahwa posisi pemberhentian kereta masih melewati batas toleransi yang diberikan.

Meskipun pengontrol PID *auto tuning* ini belum mampu mengendalikan perjalanan kereta dengan baik, tapi pengontrol cukup baik dalam memenuhi batas operasional percepatan yang ditetapkan. Kereta tidak melewati batas percepatan dan perlembatan sebesar 1 m/s^2, tetapi batas kecepatan minimal dan maksimalnya tetap dilanggar. Hal ini menunjukan bahwa pengontrol tidak aman jika digunakan dalam operasional desain kereta.

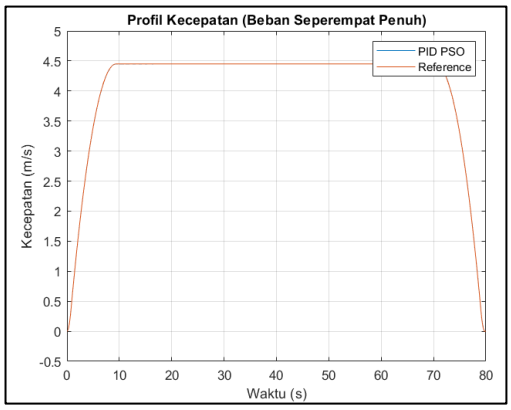
Secara keseluruhan, performansi yang dihasilkan dari pengontrol ini masih belum baik karena melanggar ketentuan dan batasan operasional yang dirancang. Oleh karena itu, dirancang pengontrol PID PSO dan pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno untuk mengatasi permasalahan yang dihadapi PID *auto tuning*. Rancangan pengontrol ini diharapkan mampu menghasilkan performansi sesuai dengan ketentuan dan batasan operasional kereta.

4.2.2 PID *Particle Swarm Optimization*

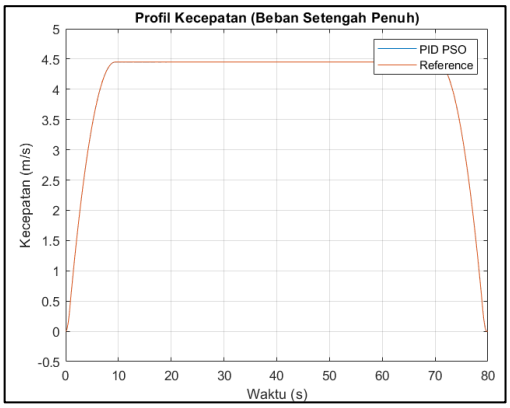
Hasil simulasi berupa profil kecepatan kereta untuk setiap variasi jumlah penumpang dengan menggunakan pengontrol PID PSO ditampilkan pada Gambar 4.11.



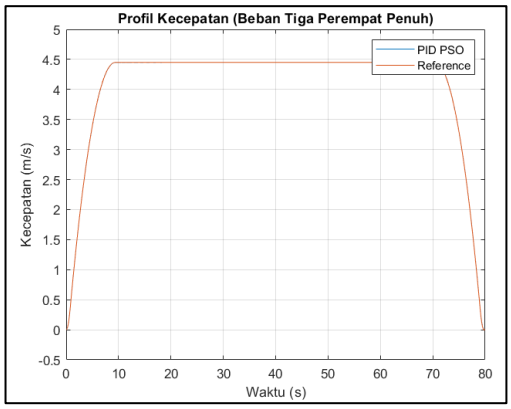
(a)



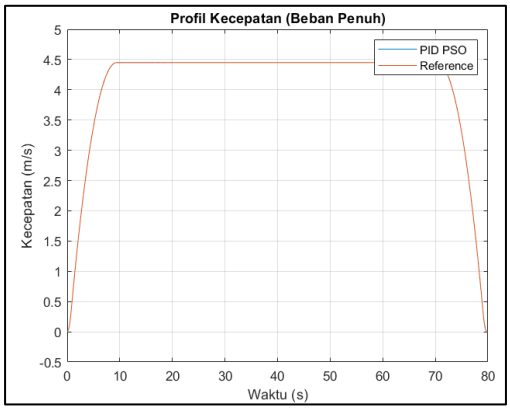
(b)



(c)



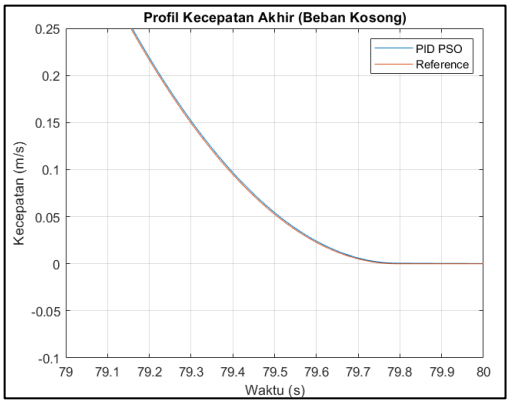
(d)



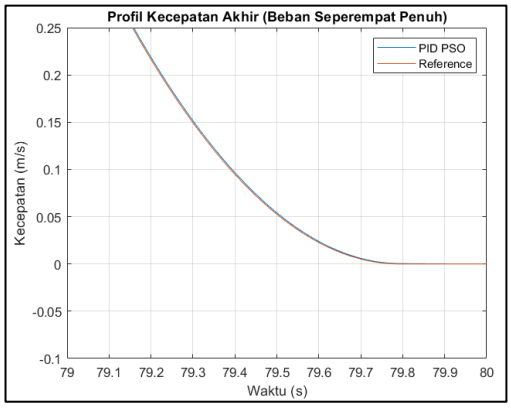
(e)

Gambar 4.11 Hasil Simulasi Kontrol Kecepatan menggunakan Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

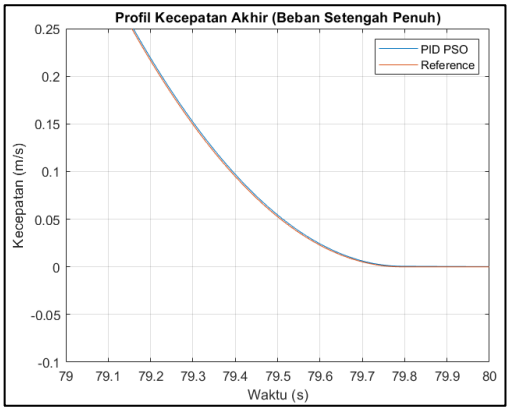
Perbesaran profil kecepatan untuk selang waktu satu detik terakhir dari pengontrol PID PSO ditampilkan pada Gambar 4.12.



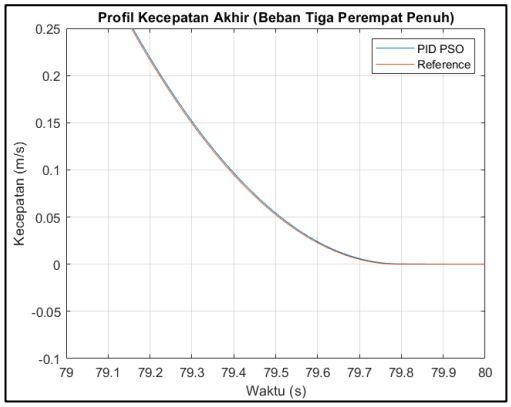
(a)



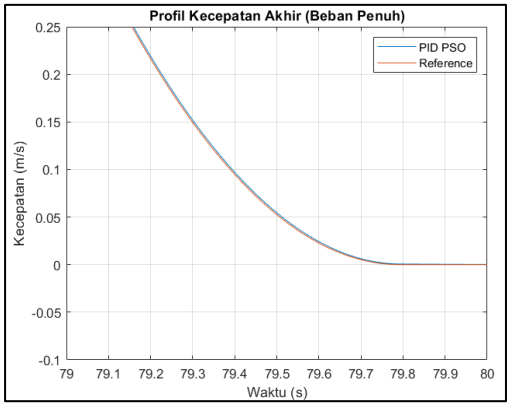
(b)



(c)



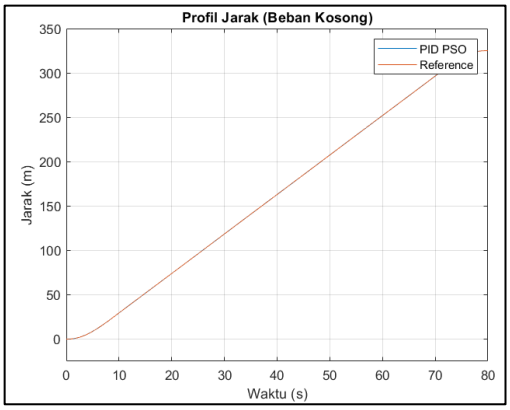
(d)



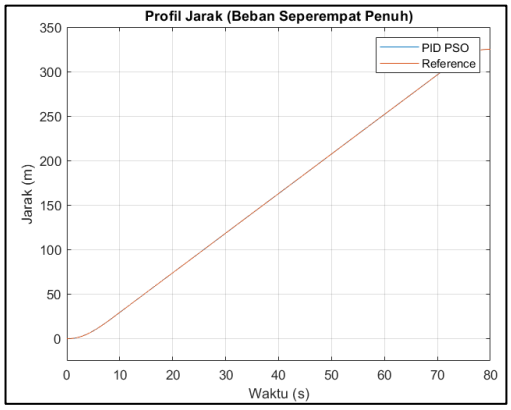
(e)

Gambar 4.12 Profil Kecepatan Akhir Hasil Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

Hasil simulasi berupa profil posisi kereta untuk setiap variasi jumlah penumpang dengan menggunakan pengontrol PID PSO ditampilkan pada Gambar 4.13.

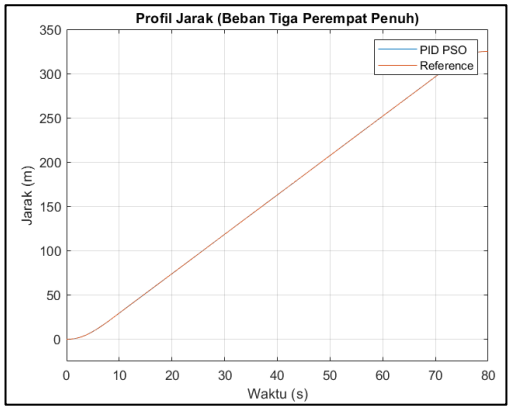


(a)

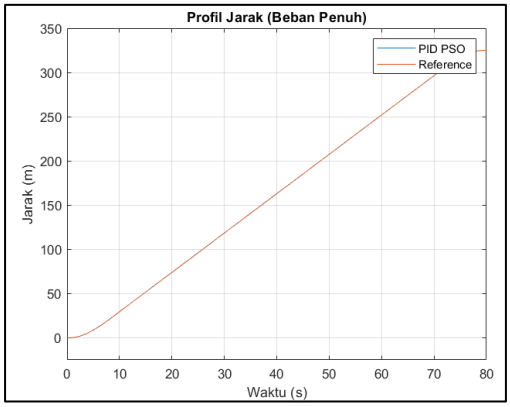


(b)

(c)



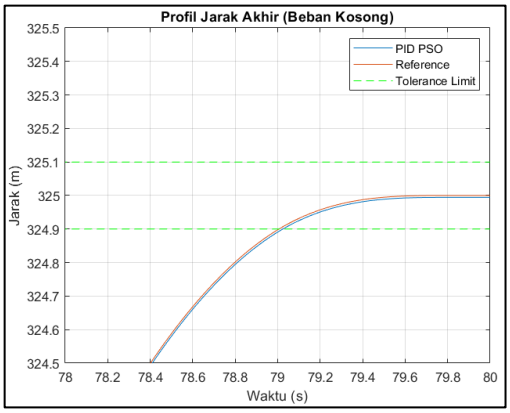
(d)



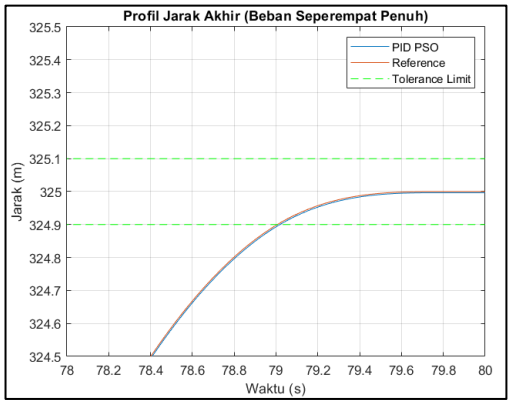
(e)

Gambar 4.13 Hasil Simulasi Kontrol Posisi menggunakan Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

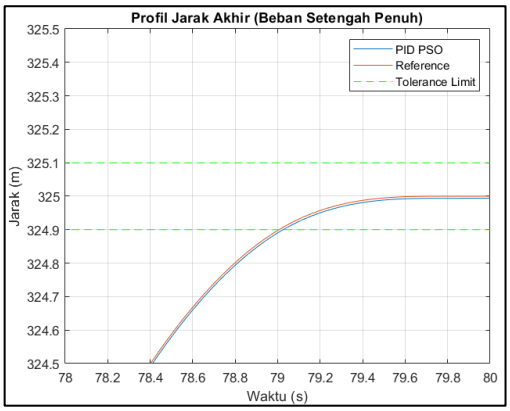
Perbesaran profil posisi untuk selang waktu dua detik terakhir dari pengontrol PID PSO ditampilkan pada Gambar 4.14.



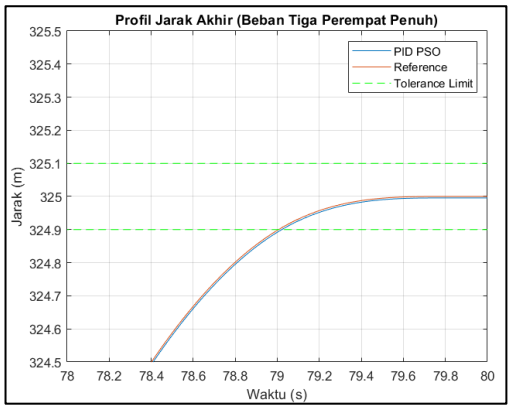
(a)



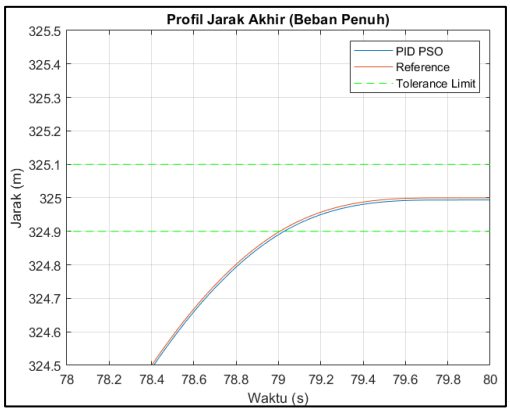
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.14 Profil Posisi Akhir Hasil Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

Profil percepatan dan profil input kontrol hasil simulasi pengontrol PID PSO terlampir pada Gambar L.3 dan Gambar L.4 di Lampiran B.

Perbandingan nilai RMSE kecepatan, RMSE posisi dan selisih posisi akhir untuk setiap variasi jumlah penumpang pada kontrol kecepatan kereta dengan pengontrol PID PSO ditampilkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Nilai RMSE Kecepatan, RMSE Posisi dan Selisih Posisi Akhir Kereta menggunakan Pengontrol PID PSO

Kondisi	RMSE Kecepatan	RMSE Posisi	Selisih Posisi Akhir (m)
0 Penumpang	$7{,}780 \times 10^{-4}$	$1{,}327 \times 10^{-2}$	$5{,}544 \times 10^{-3}$
22 Penumpang	$7{,}060 \times 10^{-4}$	$1{,}367 \times 10^{-2}$	$3{,}370 \times 10^{-3}$
44 Penumpang	$8{,}430 \times 10^{-4}$	$1{,}458 \times 10^{-2}$	$5{,}945 \times 10^{-3}$
66 Penumpang	$7{,}950 \times 10^{-4}$	$1{,}583 \times 10^{-2}$	$4{,}347 \times 10^{-3}$
88 Penumpang	$8{,}490 \times 10^{-4}$	$1{,}487 \times 10^{-2}$	$6{,}215 \times 10^{-3}$

Kondisi batas operasional kereta dari pengontrol PID PSO diperoleh dari Gambar 4.11, Gambar L.3 dan Gambar L.4. Nilai untuk setiap variasi jumlah penumpang ditampilkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Batas Kecepatan, Percepatan dan Input Kontrol Kereta menggunakan Pengontrol PID PSO

Kondisi	Kecepatan (m/s)		Percepatan (m/s^2)		Input Kontrol (kN)	
	Min	*Max*	*Min*	*Max*	*Min*	*Max*
0 Penumpang	0	4,450	-0,9489	0,9463	-59,42	87,61
22 Penumpang	0	4,450	-0,9491	0,9462	-61,58	92,13
44 Penumpang	0	4,450	-0,9488	0,9464	-63,95	95,27
66 Penumpang	0	4,450	-0,9492	0,9468	-66,45	99,87
88 Penumpang	0	4,450	-0,9489	0,9461	-68,93	102,9

Gambar 4.11 memperlihatkan hasil simulasi kontrol kecepatan kereta menggunakan pengontrol PID PSO. Pada hasil simulasi dapat dilihat bahwa kecepatan kereta mampu mengikuti referensi yang ditetapkan dengan baik tanpa melanggar batas operasional yang berlaku. Sementara pada Gambar 4.12 memperlihatkan perbesaran profil kecepatan dari Gambar 4.11 untuk selang waktu

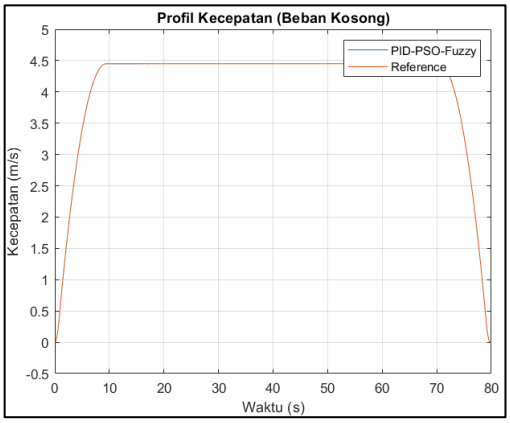
satu detik terakhir. Dari gambar terlihat bahwa pengontrol PID PSO mampu mengendalikan kereta hingga berhenti di terminal dengan *error* kecepatan relatif kecil sebagaimana ditampilkan nilai RMSE-nya pada Tabel 4.5. Sedangkan hasil pengontrol posisi terdapat pada Gambar 4.13 dengan perbesaran untuk selang waktu dua detik terakhir pada Gambar 4.14. Hasilnya menunjukan bahwa referensi posisi mampu diikuti oleh sistem dengan *error* cukup kecil sebagaimana ditampilkan nilai RMSE-nya pada Tabel 4.5. Salah satu hasil penting dari kontrol posisi ini adalah posisi pemberhentian akhir kereta hampir tepat di pintu terminal dengan selisih sekitar 5 mm.

Selain mengendalikan perjalanan kereta hingga berhenti tepat waktu dan tepat posisi, pengontrol yang dirancang juga harus memenuhi batas operasional yang ditetapkan untuk keamanan dan keselamatan. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.6 yang menunjukan bahwa kecepatan tidak melebihi 4,5 m/s dan percepatan serta perlambatan tidak melebihi 1 m/s^2 sehingga aman jika digunakan. Kecepatan minimal kereta tidak ada yang bernilai negatif, artinya kereta tidak mengalami *undershoot* atau kereta tidak bergerak mundur ketika akan berhenti.

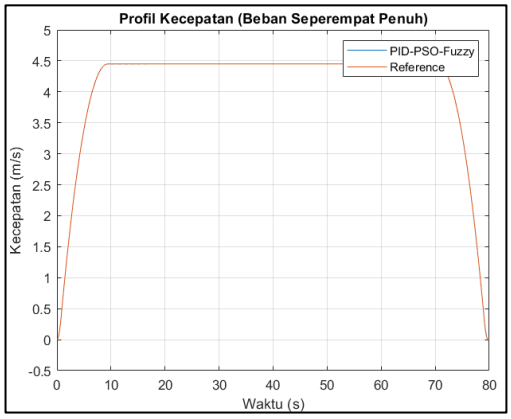
Berdasarkan data hasil simulasi, nilai RMSE kecepatan, RMSE posisi maupun selisih posisi pemberhentian akhir untuk setiap kondisi beban kereta cenderung stabil. Meskipun, hasil RMSE kecepatan dan RMSE posisi masih memberikan hasil yang berbeda pada setiap variasi jumlah penumpang, pengontrol PID PSO telah dapat beradaptasi dengan baik dalam mengatasi perubahan jumlah penumpang. Untuk perbedaan pada hasil RMSE kecepatan dan RMSE posisi pada setiap variasi jumlah penumpang, disebabkan karena partikel pada simulasi PSO jatuh atau terjebak pada minimal lokal yang berbeda. Hal ini menyebabkan parameter PID yang didapatkan tidak memberikan hasil yang seragam atau membentuk suatu pola tertentu untuk setiap perubahan jumlah penumpang. Selain itu, besarnya batas atas dan batas bawah pada setiap simulasi tidak berubah sehingga ada kemungkinan titik minimal yang dapat dicapai partikel dalam setiap simulasinya berbeda. Meskipun begitu, secara keseluruhan, hasil yang didapatkan bisa dikatakan telah baik dalam meminimalkan *error* kecepatan maupun posisi dan telah memenuhi seluruh batas operasional kereta yang telah ditetapkan.

4.2.3 PID *Particle Swarm Optimization* Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno

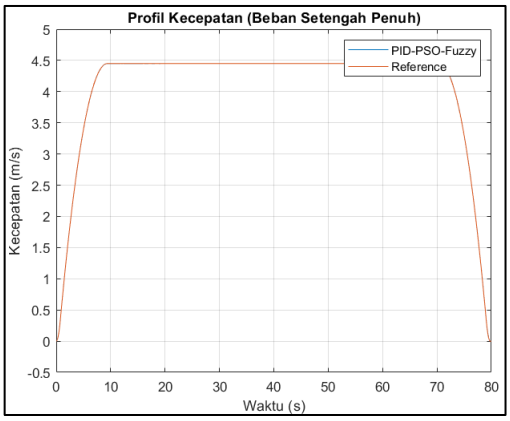
Hasil simulasi berupa profil kecepatan kereta menggunakan pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno ditampilkan pada Gambar 4.15.



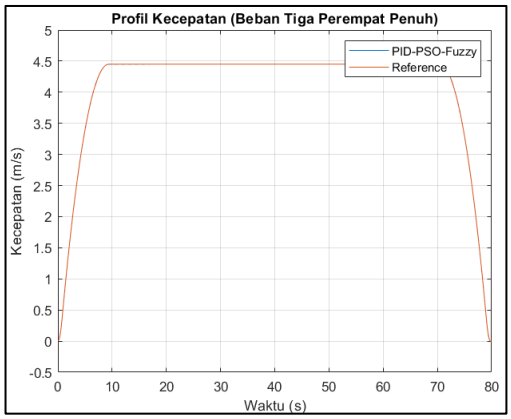
(a)



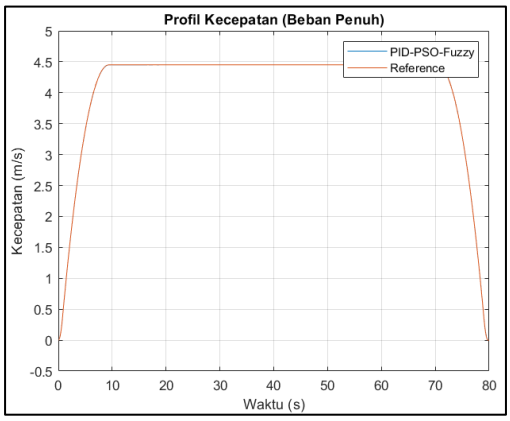
(b)



(c)



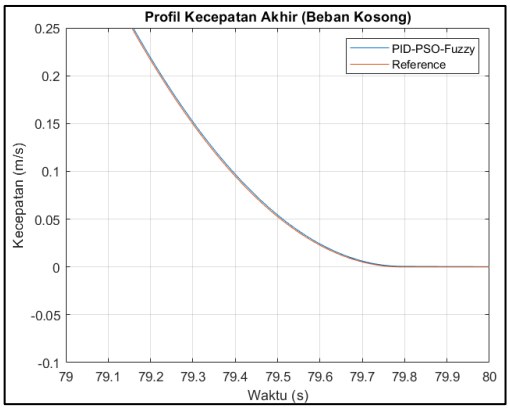
(d)



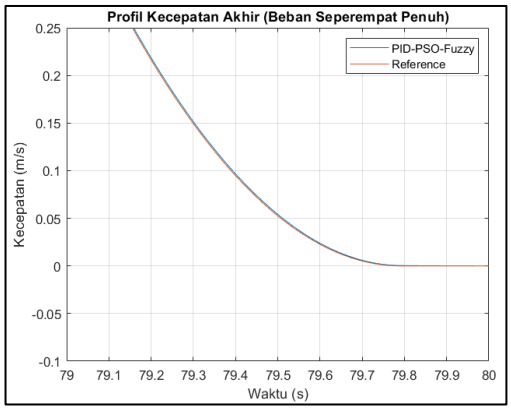
(e)

Gambar 4.15 Hasil Simulasi Kontrol Kecepatan menggunakan Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

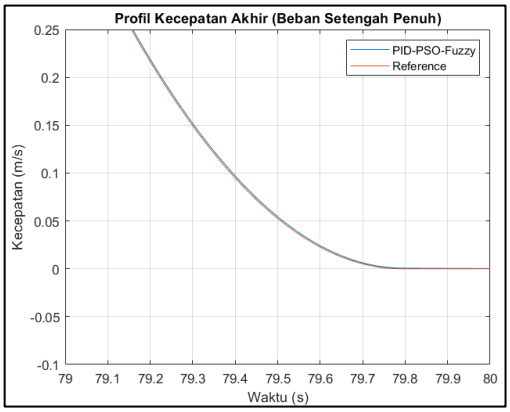
Perbesaran profil kecepatan untuk selang waktu satu detik terakhir dari pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno ditampilkan pada Gambar 4.16.



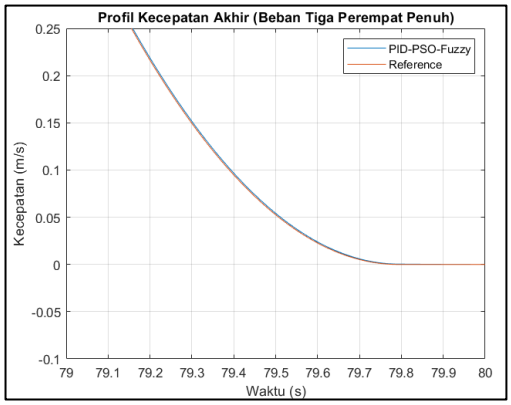
(a)



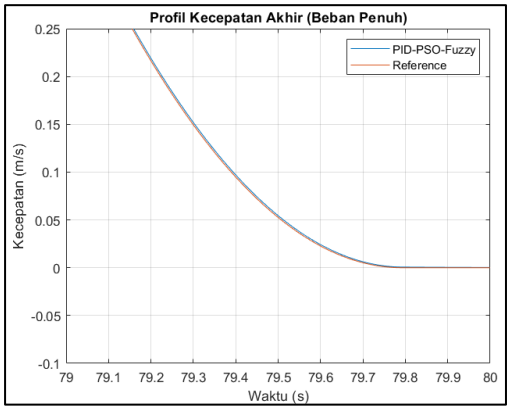
(b)



(c)



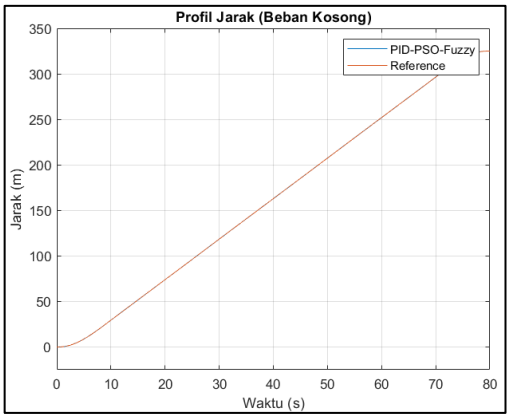
(d)



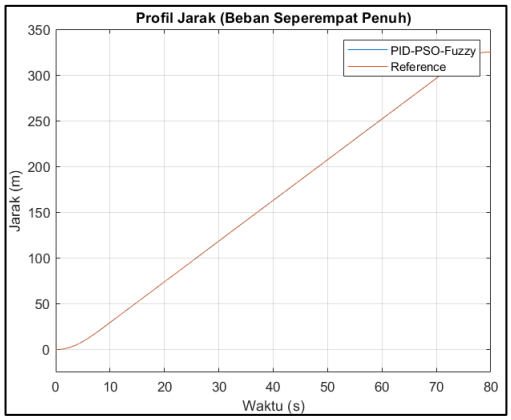
(e)

Gambar 4.16 Profil Kecepatan Akhir Hasil Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

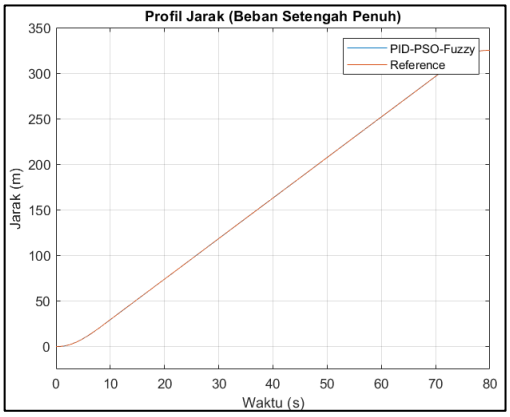
Hasil simulasi berupa profil posisi kereta untuk setiap variasi jumlah penumpang menggunakan pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno ditampilkan pada Gambar 4.17.



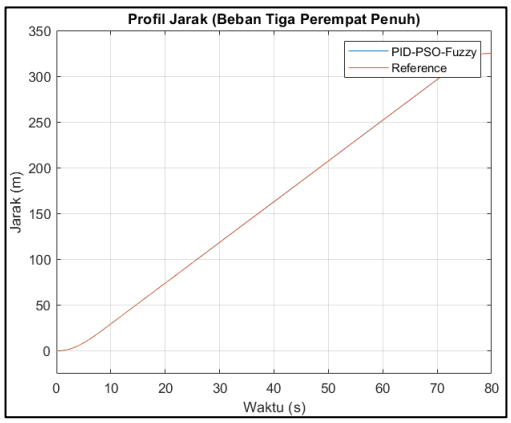
(a)



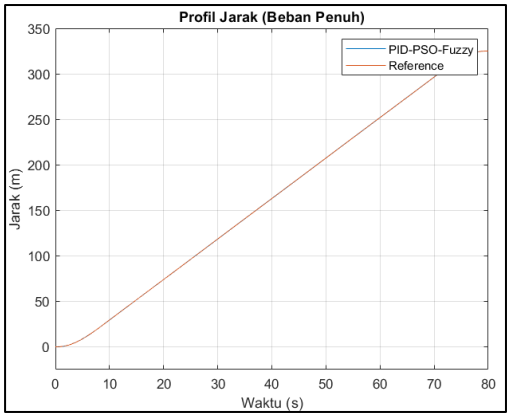
(b)



(c)



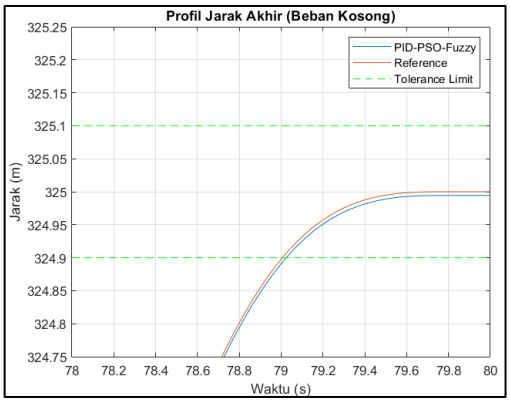
(d)



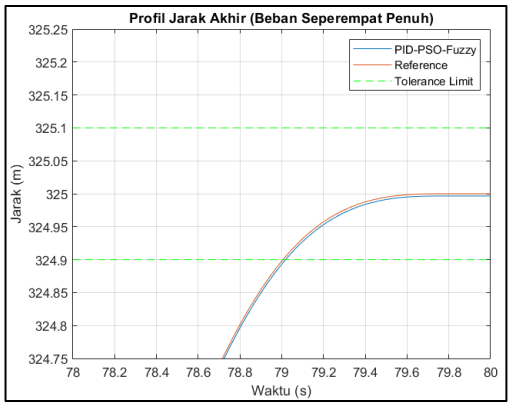
(e)

Gambar 4.17 Hasil Simulasi Kontrol Posisi menggunakan Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

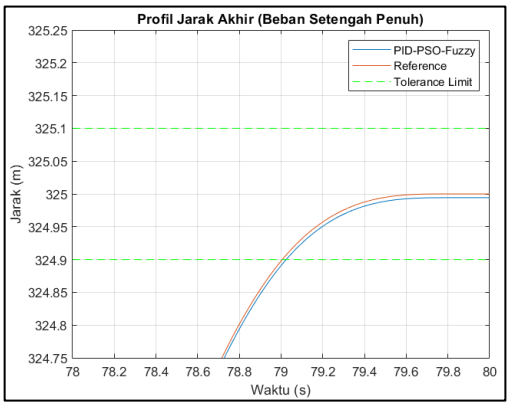
Perbesaran profil posisi untuk selang waktu dua detik terakhir dari pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno ditampilkan pada Gambar 4.18.



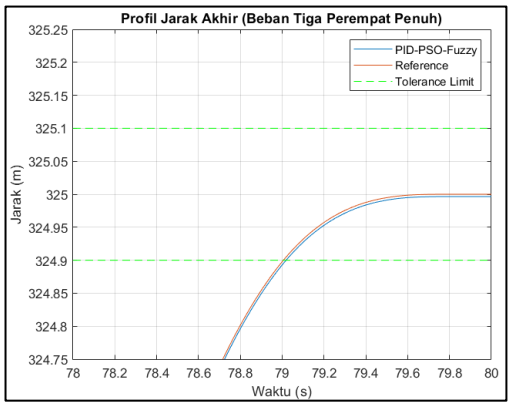
(a)



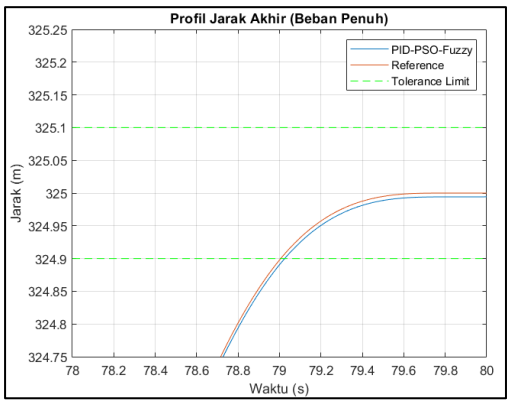
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.18 Profil Posisi Akhir Hasil Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

Profil kecepatan dan input kontrol hasil simulasi pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno terlampir pada Gambar L.5 dan L.6 di Lampiran C.

Perbandingan nilai RMSE kecepatan, RMSE posisi dan selisih posisi akhir kereta untuk setiap variasi jumlah penumpang pada kontrol kecepatan kereta menggunakan pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno ditampilkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Nilai RMSE Kecepatan, RMSE Posisi dan Selisih Posisi Akhir Kereta menggunakan Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno

Kondisi	RMSE Kecepatan	RMSE Posisi	Selisih Posisi Akhir (m)
0 Penumpang	$7{,}710 \times 10^{-4}$	$1{,}315 \times 10^{-2}$	$5{,}522 \times 10^{-3}$
22 Penumpang	$7{,}030 \times 10^{-4}$	$1{,}360 \times 10^{-2}$	$3{,}334 \times 10^{-3}$
44 Penumpang	$7{,}950 \times 10^{-4}$	$1{,}360 \times 10^{-2}$	$5{,}637 \times 10^{-3}$
66 Penumpang	$7{,}250 \times 10^{-4}$	$1{,}404 \times 10^{-2}$	$3{,}446 \times 10^{-3}$
88 Penumpang	$8{,}160 \times 10^{-4}$	$1{,}402 \times 10^{-2}$	$5{,}748 \times 10^{-3}$

Kondisi batas operasional kereta dari pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno diperoleh dari Gambar 4.14, Gambar L.5, dan Gambar L.6. Nilai untuk setiap variasi jumlah penumpang ditampilkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Batas Kecepatan, Percepatan dan Input Kontrol Pengontrol Kereta menggunakan PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno

Kondisi	Kecepatan (m/s)		Percepatan (m/s^2)		Input Kontrol (kN)	
	Min	*Max*	*Min*	*Max*	*Min*	*Max*
0 Penumpang	0	4,450	-0,9489	0,9463	-59,42	87,62
22 Penumpang	0	4,450	-0,9490	0,9463	-61,57	92,13
44 Penumpang	0	4,450	-0,9489	0,9461	-63,96	95,29
66 Penumpang	0	4,450	-0,9491	0,9461	-66,43	99,89
88 Penumpang	0	4,450	-0,9489	0,9459	-68,93	102,9

Gambar 4.15 memperlihatkan hasil simulasi kontrol kecepatan kereta menggunakan pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno. Simulasi pengontrol kecepatan memperlihatkan bahwa kecepatan kereta mampu mengikuti referensi kecepatan yang diberikan dengan *error* kecil dengan nilai RMSE

ditampilkan pada Tabel 4.6. Perbesaran profil kecepatan akhir ditampilkan pada Gambar 4.16 untuk selang waktu satu detik terakhir. Hasilnya menunjukan bahwa kereta akan menuju berhenti di 0,2 detik terakhir sesuai referensinya. Sedangkan simulasi pengontrol posisi ditampilkan pada Gambar 4.17 dengan perbesaran posisi akhir kereta untuk selang waktu dua detik terakhir pada Gambar 4.18. Hasilnya menunjukan bahwa posisi kereta mampu mengikuti referensi posisi yang diberikan dengan *error* kecil dengan nilai RMSE ditampilkan pada Tabel 4.6. Selisih posisi akhir terhadap referensi juga menunjukan nilai yang kecil, yaitu sekitar 4 mm.

Pengontrol dirancang agar memenuhi kondisi batas operasional kereta. Hasilnya ditampilkan pada Tabel 4.8 yang memperlihatkan bahwa batas kecepatan dan percepatan berhasil dipenuhi oleh pengontrol ini. Kecepatan maksimal yang dicapai sebesar 4,45 m/s, percepatan maksimal yang diperoleh sebesar 0,9463 m/s^2 dengan perlambatan maksimal sebesar 0,9489 m/s^2. Artinya kereta akan tetap aman jika dioperasikan dengan pengontrol ini.

Dalam simulasi ini, terdapat kombinasi pengontrol antara PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno. Parameter PID PSO yang digunakan yaitu parameter PID ketika beban kosong atau tidak ada penumpang. Hal ini dikarenakan PID ini dapat mengatur lebih baik dibandingkan dengan variasi jumlah penumpang lainnya. Peran logika *fuzzy* Sugeno yaitu mengatur perubahan keluaran yang dihasilkan oleh PID PSO. Dapat dilihat pada Tabel 4.7 bahwa perubahan RMSE posisi kereta cenderung lebih stabil jika dibandingkan dengan pengontrol PID PSO yang terdapat pada Tabel 4.5. Selain itu perubahan RMSE kecepatan yang dihasilkan juga memiliki rentang yang lebih kecil dibandingkan dengan pengontrol PID PSO. Namun tentunya pengontrol PID PSO parelel dengan logika *fuzzy* Sugeno ini belum sempurna. Hal itu dapat dilihat dari adanya perbedaan RMSE yang dihasilkan pada setiap perubahan jumlah penumpang, meskipun begitu pengontrol ini telah dapat bekerja dengan baik tanpa melanggar batas operasi kereta yang telah ditentukan.

4.3 Analisis Perbandingan Ketiga Pengontrol

Analisis perbandingan ketiga pengontrol dilakukan pada pengujian variasi jumlah penumpang sesuai perancangan. Selain itu, dilakukan pengujian variasi jumlah penumpang diluar perancangan dan variasi massa penumpang diluar perancangan.

Perbandingan hasil pengontrol PID *auto tuning*, PID PSO, dan PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno untuk seluruh variasi jumlah penumpang sesuai perancangan dilakukan pada kondisi beban kosong (0 penumpang), beban seperempat penuh (22 penumpang), beban setengah penuh (44 penumpang), beban tiga perempat penuh (66 penumpang), dan beban penuh (88 penumpang) sesuai data-data yang telah diperoleh pada Subbab 4.2. Hasil performansi pengontrol untuk masing-masing kontrol kecepatan dan posisi dinyatakan dalam bentuk rata-rata dan standar deviasi sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Performansi Ketiga Pengontrol untuk Semua Variasi Jumlah Penumpang Sesuai Perancangan

Pengontrol	Rata-rata RMSE		Rata-rata Selisih Posisi Akhir (m)	Standar Deviasi RMSE		Standar Deviasi Selisih Posisi Akhir
	Kecepatan	Posisi		Kecepatan	Posisi	
PID Auto Tuning	$4{,}332 \times 10^{-2}$	0,1940	0,5931	$2{,}135 \times 10^{-4}$	$7{,}071 \times 10^{-4}$	$1{,}739 \times 10^{-3}$
PID PSO	$7{,}940 \times 10^{-4}$	$1{,}438 \times 10^{-2}$	$5{,}084 \times 10^{-3}$	$5{,}182 \times 10^{-5}$	$9{,}174 \times 10^{-4}$	$1{,}068 \times 10^{-3}$
PID PSO - Logika *Fuzzy* Sugeno	$7{,}620 \times 10^{-4}$	$1{,}366 \times 10^{-2}$	$4{,}737 \times 10^{-3}$	$4{,}228 \times 10^{-5}$	$3{,}323 \times 10^{-4}$	$1{,}103 \times 10^{-3}$

Dari hasil performansi kontrol kecepatan dan posisi di Tabel 4.9, pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno memiliki performansi yang paling baik diantara pengontrol lainnya. Hal ini dibuktikan oleh data rata-rata dan standar deviasi terkecil. Standar deviasi merepresentasikan sebaran data performansi, semakin kecil standar deviasi yang didapatkan maka sebaran data semakin dekat dengan rata-rata data tersebut. Dengan begitu, standar deviasi dapat dijadikan tolak ukur dalam menentukan *adaptability* pengontrol yang digunakan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa pengontrol PID PSO dengan logika *fuzzy* Sugeno paling adaptif jika dibandingkan dengan pengontrol lainnya karena memiliki standar deviasi terkecil. Hal ini dikarenakan perancangan logika *fuzzy* Sugeno dilakukan secara manual sehingga dapat diatur dengan lebih baik lagi. Selanjutnya, hasil performansi pengontrol PID PSO tidak terlalu jauh berbeda dengan PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno. Namun, standar deviasi RMSE posisi dari pengontrol ini lebih besar dari pengontrol PID *auto tuning*. Hal ini dapat terjadi

karena pada pengontrol PID PSO, partikel terbaik dapat terjebak pada minimal lokal yang berbeda pada setiap variasi jumlah penumpangnya seperti yang telah dijelaskan pada Subsubbab 4.2.2. Terakhir, performansi pengontrol PID *auto tuning* memberikan hasil yang kurang baik dibandingkan dengan pengontrol PID PSO maupun pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno karena melanggar ketentuan dan batas operasional kereta yang berlaku sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.3 dan 4.4. Hal ini terjadi karena proses penalaan PID *auto tuning* hanya dapat dilakukan pada respon *step* sehingga tidak dapat memberikan hasil yang maksimal terhadap kinerja pengontrolan kereta.

Untuk melihat dan memastikan kemampuan pengontrol PID PSO dengan logika *fuzzy* Sugeno terutama peran logika *fuzzy* Sugeno dalam menangani perubahan jumlah penumpang maka dilakukan simulasi pengujian untuk variasi jumlah penumpang diluar perancangan yaitu pada kondisi beban seperdelapan penuh (11 penumpang), beban tiga perdelapan penuh (33 penumpang), beban lima perdelapan penuh (55 penumpang), dan beban tujuh perdelapan penuh (77 penumpang). Parameter Kp, Ki, dan Kd pengontrol PID *auto tuning* dan pengontrol PID PSO yang digunakan dalam pengujian ini didapatkan dengan menggunakan teknik interpolasi. Hasil batas percepatan dan kecepatan operasional serta selisih posisi akhir untuk setiap variasi jumlah penumpang pada pengujian ini ditampilkan pada Tabel L.1-L.3 di Lampiran D. Sedangkan perbandingan hasil performansi ketiga pengontrol untuk seluruh variasi jumlah penumpang dinyatakan dalam bentuk rata-rata dan standar deviasi pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil Performansi Ketiga Pengontrol untuk Variasi Jumlah Penumpang Diluar Perancangan

Pengontrol	Rata-rata RMSE		Rata-rata Selisih Posisi Akhir (m)	Standar Deviasi RMSE		Standar Deviasi Selisih Posisi Akhir
	Kecepatan	Posisi		Kecepatan	Posisi	
PID Auto Tuning	$4{,}325 \times 10^{-2}$	0,1939	0,5931	$1{,}118 \times 10^{-4}$	$5{,}590 \times 10^{-4}$	$1{,}375 \times 10^{-3}$
PID PSO	$7{,}830 \times 10^{-4}$	$1{,}428 \times 10^{-2}$	$4{,}733 \times 10^{-3}$	$4{,}995 \times 10^{-5}$	$7{,}949 \times 10^{-4}$	$9{,}901 \times 10^{-4}$
PID PSO - Logika *Fuzzy* Sugeno	$7{,}750 \times 10^{-4}$	$1{,}365 \times 10^{-2}$	$5{,}078 \times 10^{-3}$	$4{,}530 \times 10^{-5}$	$1{,}658 \times 10^{-4}$	$1{,}024 \times 10^{-3}$

Hasil simulasi pengujian untuk variasi jumlah penumpang diluar perancangan pada Tabel 4.10 menunjukan bahwa pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno tetap memberikan performansi terbaik dibandingkan dengan pengontrol PID PSO maupun pengontrol PID *auto tuning*. Hal ini terlihat dari rata-rata dan standar deviasi RMSE kecepatan dan posisi untuk pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno memberikan nilai terkecil dibandingkan kedua pengontrol lainnya. Selain itu, pada Tabel 4.10 juga terlihat bahwa standar deviasi RMSE posisi pengontrol PID PSO menunjukan nilai lebih besar dari pengontrol PID *auto tuning* sebagaimana telah dijelaskan pada pengujian sebelumnya.

Simulasi pengujian selanjutnya dilakukan terhadap ketidakpastian rata-rata massa penumpang. Pada penelitian ini diasumsikan bahwa massa penumpang adalah 60 kg. Namun, untuk menguji kemampuan dari pengontrol yang telah dirancang, maka dilakukan pengujian lain diluar nilai yang telah ditetapkan. Pengujian ini dilakukan ketika kereta dalam kondisi beban setengah penuh atau 44 penumpang. Pengujian dilakukan dengan massa penumpang sebesar 90%, 95%, 105% dan 110% dari massa penumpang awal. Hasil batas percepatan dan kecepatan operasional kereta serta selisih posisi akhir kereta untuk setiap variasi massa penumpang pada pengujian ini ditampilkan pada Tabel L.4-L.6 di Lampiran D. Sedangkan perbandingan hasil performansi ketiga pengontrol untuk seluruh variasi massa penumpang dinyatakan dalam bentuk rata-rata dan standar deviasi pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Performansi Pengontrol untuk Variasi Massa Penumpang Diluar Perancangan

Pengontrol	Rata-rata RMSE		Rata-rata Selisih Posisi Akhir (m)	Standar Deviasi RMSE		Standar Deviasi Selisih Posisi Akhir
	Kecepatan	Posisi		Kecepatan	Posisi	
PID Auto Tuning	$4{,}323 \times 10^{-2}$	0,1940	0,5931	$2{,}385 \times 10^{-4}$	$1{,}107 \times 10^{-3}$	$3{,}637 \times 10^{-3}$
PID PSO	$7{,}810 \times 10^{-4}$	$1{,}473 \times 10^{-2}$	$4{,}239 \times 10^{-3}$	$3{,}246 \times 10^{-5}$	$1{,}479 \times 10^{-4}$	$9{,}698 \times 10^{-4}$
PID PSO - Logika *Fuzzy* Sugeno	$7{,}747 \times 10^{-4}$	$1{,}365 \times 10^{-2}$	$5{,}076 \times 10^{-3}$	$3{,}355 \times 10^{-5}$	$1{,}658 \times 10^{-4}$	$9{,}664 \times 10^{-4}$

Pada Tabel 4.11 dapat dilihat bahwa hasil pengontrol PID PSO dan PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno tetap memberikan performansi yang jauh lebih baik dari pengontrol PID *auto tuning* dan performansi pengontrol PID PSO paralel

dengan logika *fuzzy* Sugeno tetap memberikan nilai yang lebih baik dari pengontrol PID PSO saja.

Selanjutnya, untuk melihat performansi ketiga pengontrol terhadap ketiga simulasi pengujian maka dilakukan perbandingan berdasarkan tiga kriteria operasional kereta berikut:

1. Batas percepatan yaitu -1 m/s^2 sampai 1 m/s^2.
   Kesesuaian batas percepatan menentukan banyaknya batas percepatan yang dapat dikategorikan aman atau tidak melanggar batas operasional kereta yang berlaku. Dituliskan dalam bentuk N_a/N (jumlah variasi yang memenuhi batas percepatan/jumlah variasi total)
2. Batas kecepatan yaitu 0 m/s sampai 4,5 m/s dan tidak boleh bernilai negatif.
   Kesesuaian batas kecepatan menentukan banyaknya batas kecepatan yang dapat dikategorikan aman atau tidak melanggar batas operasional kereta yang berlaku. Dituliskan dalam bentuk N_v/N (jumlah variasi yang memenuhi batas kecepatan/jumlah variasi total)
3. Toleransi posisi akhir yaitu $\pm$ 10 cm terhadap 325 m.
   Kesesuaian posisi akhir menentukan banyaknya posisi akhir yang dapat dikategorikan aman atau tidak melanggar toleransi posisi akhir kereta yang berlaku. Dituliskan dalam bentuk N_s/N (jumlah variasi yang memenuhi toleransi posisi akhir/jumlah variasi total)

Hasil perbandingan kriteria operasional ketiga pengontrol pada pengujian variasi jumlah penumpang sesuai perancangan (0, 22, 44, 66, 88 penumpang) ditampilkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Hasil Perbandingan Kriteria Operasional Kereta pada Pengujian Variasi Jumlah Penumpang Sesuai Perancangan

Kriteria	Pengontrol		
	PID *Auto Tuning*	PID PSO	PID PSO - Logika *Fuzzy* Sugeno
Kesesuaian batas percepatan	5/5	5/5	5/5
Kesesuaian batas kecepatan	0/5	5/5	5/5
Kesesuaian posisi akhir	0/5	5/5	5/5

Hasil perbandingan kriteria operasional ketiga pengontrol pada pengujian variasi jumlah penumpang diluar perancangan (11, 33, 55, 77 penumpang) ditampilkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Hasil Perbandingan Kriteria Operasional Kereta pada Pengujian Variasi Jumlah Penumpang Diluar Perancangan

Kriteria	Pengontrol		
	PID *Auto Tuning*	PID PSO	PID PSO - Logika *Fuzzy* Sugeno
Kesesuaian batas percepatan	4/4	4/4	4/4
Kesesuaian batas kecepatan	0/4	4/4	4/4
Kesesuaian posisi akhir	0/4	4/4	4/4

Hasil perbandingan kriteria operasional ketiga pengontrol pada pengujian variasi massa penumpang diluar perancangan (90%, 95%, 105%, dan 110% dari massa penumpang awal) ditampilkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Hasil Perbandingan Kriteria Operasional Kereta pada Pengujian Variasi Massa Penumpang Diluar Perancangan

Kriteria	Pengontrol		
	PID *Auto Tuning*	PID PSO	PID PSO - Logika *Fuzzy* Sugeno
Kesesuaian batas percepatan	4/4	4/4	4/4
Kesesuaian batas kecepatan	0/4	1/4	¾
Kesesuaian posisi akhir	0/4	4/4	4/4

Pada tabel 4.12 dan 4.13 terlihat bahwa pengontrol PID PSO dan pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno mampu memenuhi semua kriteria operasional kereta. Sedangkan pengontrol PID *auto tuning* hanya mampu memenuhi kriteria operasional percepatan kereta. PadaTabel 4.14 terlihat bahwa ketiga pengontrol PID PSO dan pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno mampu memenuhi kriteria operasional percepatan dan posisi akhir. Namun, pada pengontrol PID PSO hanya ada satu variasi yang memenuhi kriteria operasional kecepatan kereta dan pada pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno hanya ada satu variasi yang melanggar kriteria operasional kecepatan

kereta. Sedangkan pengontrol PID *auto tuning* hanya mampu memenuhi kriteria operasional percepatan kereta seperti pada dua pengujian lainnya.

Seluruh hasil yang didapatkan pada simulasi ini sebanding dengan usaha yang diberikan pada tahap perancangan pengontrol. Pada perancangan pengontrol PID *auto tuning,* usaha yang dilakukan sangat sedikit jika dibandingkan dengan perancangan dua pengontrol lainnya. Pengontrol diperoleh dengan cara memasukan model kereta ke dalam PID *tuner* yang tersedia pada perangkat lunak Matlab. Hasil yang didapatkan belum mampu mengikuti referensi dengan baik dan masih melanggar standar operasional kereta. Pada perancangan pengontrol PID PSO, usaha yang dilakukan cukup banyak, dimulai dengan menentukan *hyperparameter* optimal hingga simulasi yang dilakukan untuk setiap variasi jumlah penumpang. Hasil yang didapatkan mampu memenuhi standar operasional kereta yang telah ditetapkan. Namun, pada pengujian variasi massa penumpang diluar perancangan, pengontrol PID PSO belum dapat bekerja dengan maksimal. Pada perancangan pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno, usaha yang dilakukan relatif lebih banyak. Pada perancangan ini diperlukan satu variasi jumlah penumpang hasil dari PID PSO. Sedangkan untuk proses penentuan *fuzzy* dimulai dari pemilihan model *fuzzy* yang sesuai dengan sistem kereta dan proses penalaan dilakukan secara manual sehingga dapat ditemukan model *fuzzy* yang sesuai. Hasil yang didapatkan mampu memenuhi standar operasional kereta yang telah ditetapkan. Pada pengujian variasi massa penumpang diluar perancangan, pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno ini dapat bekerja lebih baik dari pengontrol PID PSO saja, meskipun belum sempurna.

Berdasarkan analisis yang telah dijelaskan, dapat disimpulkan bahwa pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno adalah pengontrol terbaik untuk mengontrol kereta APMS pada tugas akhir ini.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Perancangan pengontrol PID menggunakan algoritma PSO telah dilakukan dan diperoleh parameter Kp, Ki, dan Kd pada Tabel 4.1. Hasil simulasi pengontrol PID PSO pada model kereta APMS menunjukan bahwa sistem mampu mengikuti referensi dengan performansi sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.5. Pengontrol PID PSO mampu menangani ketidakpastian jumlah penumpang dengan rata-rata RMSE kecepatan sebesar $7{,}940 \times 10^{-4}$ dan standar deviasi RMSE kecepatan sebesar $5{,}182 \times 10^{-5}$ dengan rata-rata selisih posisi akhir sebesar $5{,}084 \times 10^{-3}$ m dan standar deviasi selisih posisi akhir sebesar $1{,}068 \times 10^{-3}$ m.
2. Perancangan pengontrol logika *fuzzy* metode Sugeno telah dilakukan dan menghasilkan *surface control* yang adaptif terhadap ketidakpastian jumlah penumpang pada Gambar 4.6. Pengontrol logika *fuzzy* Sugeno dikombinasikan dengan parameter PID PSO saat kondisi beban kosong di Tabel 4.1. Hasil simulasi pengontrol PID PSO dan logika *fuzzy* Sugeno pada model kereta APMS menunjukan bahwa sistem mampu mengikuti referensi dengan performansi sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.7. Pengontrol PID PSO dengan logika *fuzzy* Sugeno mampu menangani ketidakpastian jumlah penumpang dengan rata-rata RMSE kecepatan sebesar $7{,}620 \times 10^{-4}$, standar deviasi RMSE kecepatan sebesar $4{,}228 \times 10^{-5}$ dengan rata-rata selisih posisi akhir sebesar $4{,}737 \times 10^{-3}$ m dan standar deviasi selisih posisi akhir sebesar $1{,}103 \times 10^{-3}$ m.

5.2 Saran

Saran dari penulis berdasarkan hasil penelitian ini untuk penelitian selanjutnya agar lebih baik adalah sebagai berikut:

1. Pada simulasi pengujian variasi massa diluar perancangan, hasil pengontrol PID PSO belum mampu memenuhi batas kecepatan operasional kereta. Oleh karena itu, diperlukan sebuah pengontrol yang adaptif terhadap massa penumpang atau beban kereta secara langsung. Selain itu, untuk menentukan kombinasi parameter PID terbaik, perlu dicoba metode PSO yang dapat meminimalkan kemungkinan terpilihnya suatu titik lokal minimal yang berbeda untuk setiap simulasinya. Metode PSO tersebut antara lain seperti *Improved* PSO, *Chaotic* PSO, ataupun metode lainnya yang dapat menentukan kombinasi parameter PID lebih baik. Jika digunakan metode PSO yang sama, maka dapat dilakukan perubahan dan perbaikan parameter yang telah digunakan pada penelitian ini, seperti beban inersia, konstanta pengendalian diri, konstanta pengendalian sosial ataupun batas pencarian parameter PID.
2. Seperti halnya pengontrol PID PSO, simulasi pengujian variasi massa diluar perancangan untuk pengontrol PID PSO paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno juga belum mampu memenuhi batas kecepatan operasional kereta. Oleh karena itu, diperlukan sebuah pengontrol yang adaptif terhadap massa penumpang atau beban kereta secara langsung. Selain itu, untuk memperbaiki kinerja dari *fuzzy*, dapat juga digunakan sebuah pengontrol *fuzzy* dengan metode lainnya seperti *self-tuning fuzzy* agar hasil yang didapatkan dapat disesuaikan secara otomatis.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Kominfo, "Menhub Bicara Pentingnya Pengembangan Sistem Angkutan Massal di Kawasan Perkotaan," Kominfo, Jakarta, 2019.

[2] Suryana, Lucas Elbert, "Pengontrol PID Robas H∞ Integral-Backstepping dengan Strategi Kontrol Optimal pada Kereta Automated People Movers," p. 2, Maret 2019.

[3] Bin, N., T. Tao, Q. K. Min, and G.C., Hai, "CBTC (Communication Based Train Control): System And Development," vol. 88, p. 8, 2006.

[4] Tang, T., and Huang L.J., "A Survey of Control ALgorithm for Automatic Train Operation," *China Railway*, vol. 25, no. 2, pp. 98-102, 2003.

[5] Sproule, Wiliam J., "Airport Development with Automated People Mover System," no. 1308, pp. p. 125-129, 1991.

[6] "Soekarno-Hatta International Airport," PT Angkasa Pura II, 2020. [Online]. Available: https://soekarnohatta-airport.co.id/panduanpenumpang/transportation/19/kalayang#:~:text=Kalayang%20(Kereta%20Melayang)%20atau%20Automatic,ke%20stasiun%20kerta%20api%20bandara.. [Accessed Desember 2020].

[7] "len.co.id," PT Len Industri (Persero), 2016. [Online]. Available: https://www.len.co.id/kinerja-len-2016-pembangunan-urban-transport/. [Accessed 20 November 2020].

[8] Nazarudin, Yul Yunazwin, "Perancangan Sistem Communication-Based Train Control (CBTC) Berbasis Sensor Fusion," *Otomasi, Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 10, no. 2, p. 112, 2018.

[9] Yin, Jiateng, "Research and Development of Automatic Train Operation for Railway Transportation System: A Survey," *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, p. 554, December 2017.

[10] Teague, Olin E., "Automatic Train Control in Rail Rapid Transit," Office of Technology Assessement, Washington D.C., 1976.

[11] Hermanto, "Sistem Kontrol Automatic Train Operation (ATO) menggunakan Robust Model Predictive Control pada Kereta AGT 2-Cars," Bandung, Des 2018.

[12] Ogata, Katsuhito, Modern Control Engineering 4th Edition, Prentice Hall, 2002.

[13] DEWESoft, "PID Control," Online Pro, 2019.

[14] Ang, Kiam Heong, Gregory Chong and Li Yun, "PID Control System Analysis, Design, and Technology," *IEEE Transactions on Control System Technology 13(4)*, pp. 559-576, 2005.

[15] Kennedy, James and and R. C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, Australia, 1995.

[16] Gaing, Z. L., "A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System," in *IEEE Trans. Energy Conversion*, June 2004.

[17] Changhong, Jiang, Chao Zhang and Hong Xu " An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Parameter Optimiztion of Proportional-Integral-Derivatice controller," 2017.

[18] Rouse, M., Fuzzy Logic, Programming, 2016.

[19] Wang, Li-Xin, "A Course in Fuzzy Systems and Control International Edition," 1997.

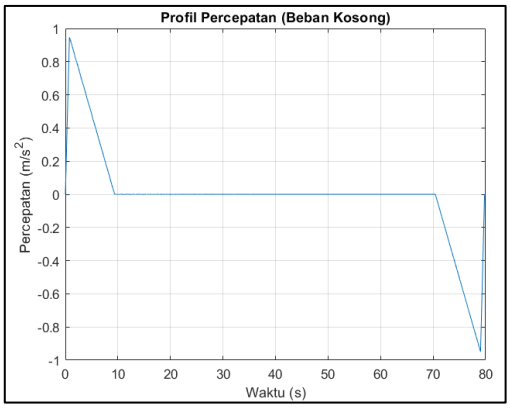
[20] Takagi, Tomohiro and Sugeno Michio, "Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vols. SMC-15, Januray/February 1985.

[21] Khalil, H. K., and Grizzle J. W., "Nonlinear Systems," in *Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.*, 2002.

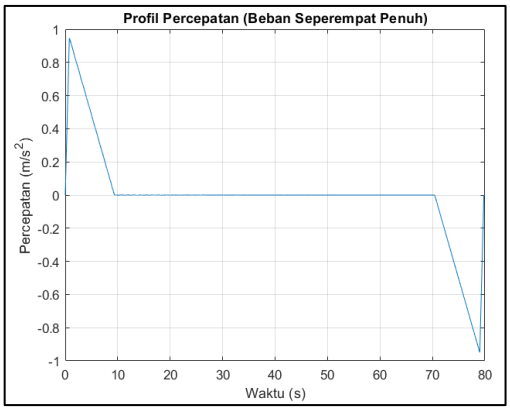
LAMPIRAN

LAMPIRAN A. Simulasi Pengontrol PID *Auto Tuning*

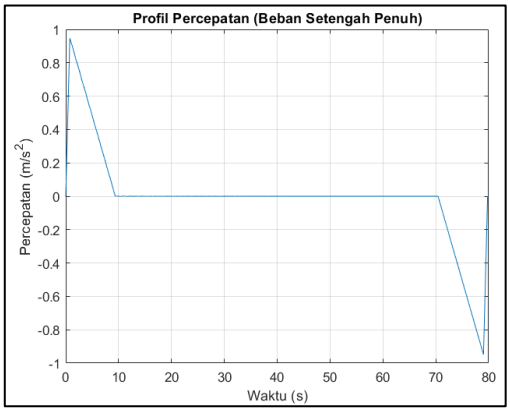
Hasil profil percepatan dari simulasi pengontrol PID *auto tuning* ditampilkan pada Gambar L.1 untuk melihat dan memastikan batas percepatan telah memenuhi batas operasional kereta. Nilai batasnya ditampilkan dalam Tabel 4.4 di Subsubbab 4.2.1.



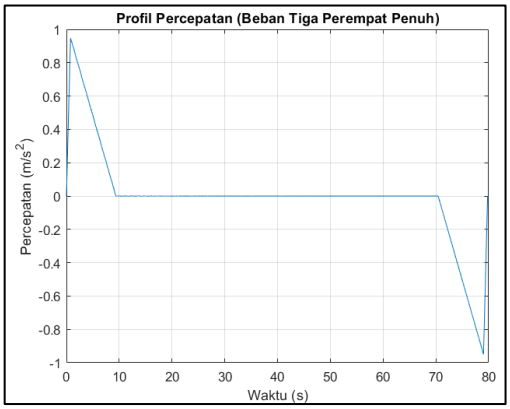
(a)



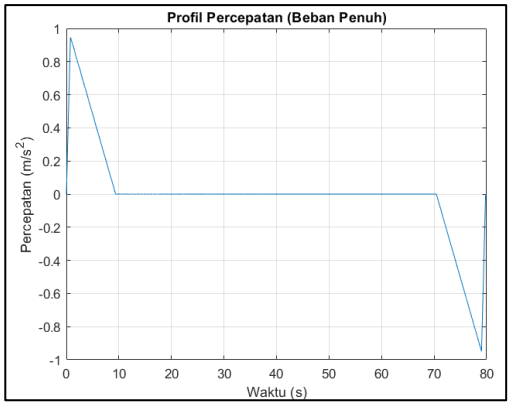
(b)



(c)



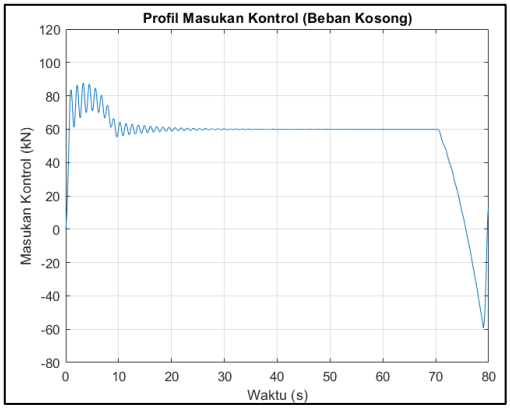
(d)



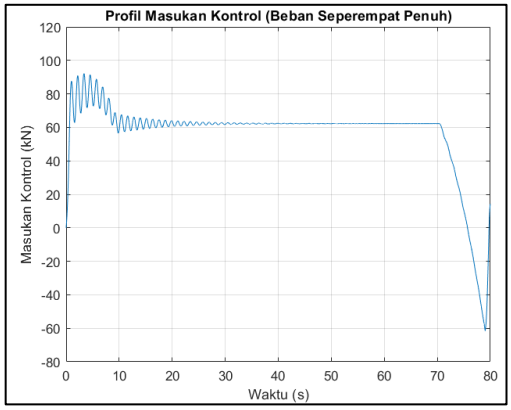
(e)

Gambar L.1 Profil Percepatan Hasil Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

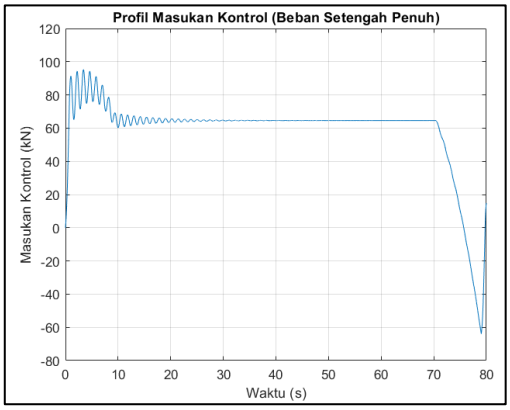
Hasil profil input kontrol dari simulasi pengontrol PID *auto tuning* ditampilkan pada Gambar L.2. Rentang nilai input kontrol yang dihasilkan telah menyerupai referensi pada penelitian sebelumnya [11] sehingga dapat diasumsikan aman. Nilai batasnya ditampilkan di Tabel 4.4 di Subsubbab 4.2.1.



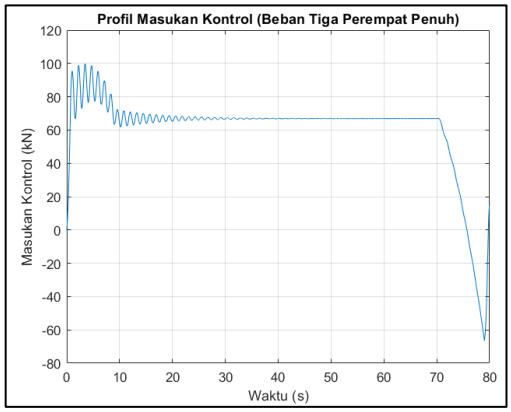
(a)



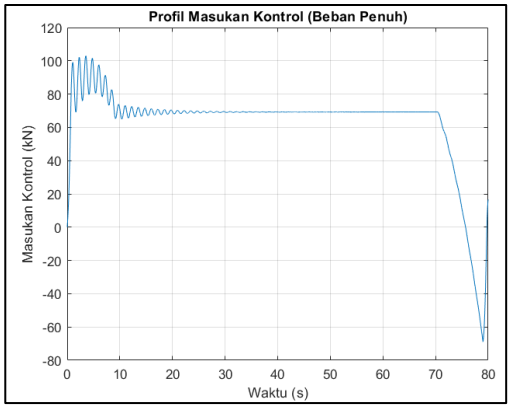
(b)



(c)



(d)

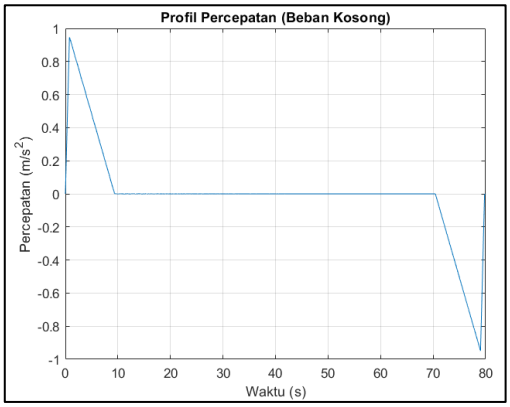


(e)

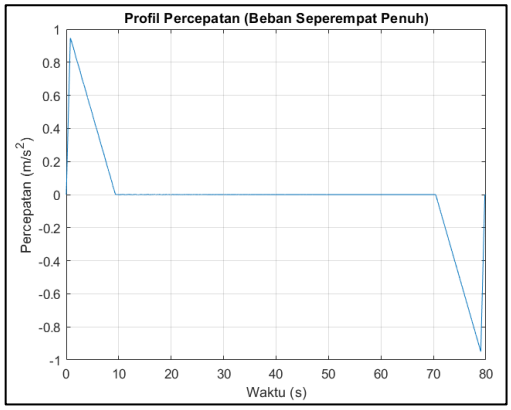
Gambar L.2 Profil Input Kontrol Hasil Pengontrol PID *Auto Tuning* (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

LAMPIRAN B. Simulasi Pengontrol PID *Particle Swarm Optimization*

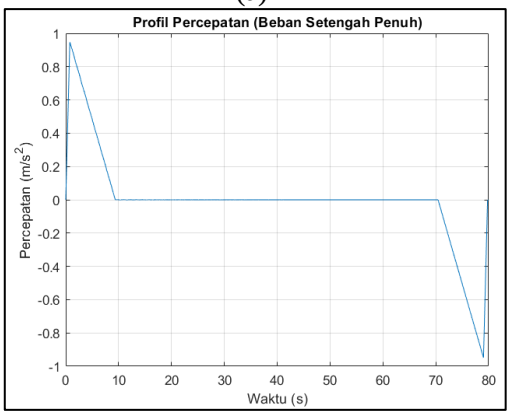
Hasil profil percepatan dari simulasi pengontrol PID PSO ditampilkan pada Gambar L.3 untuk melihat dan memastikan batas percepatan telah memenuhi batas operasional kereta. Nilai batasnya ditampilkan dalam Tabel 4.6 di Subsubbab 4.2.2.



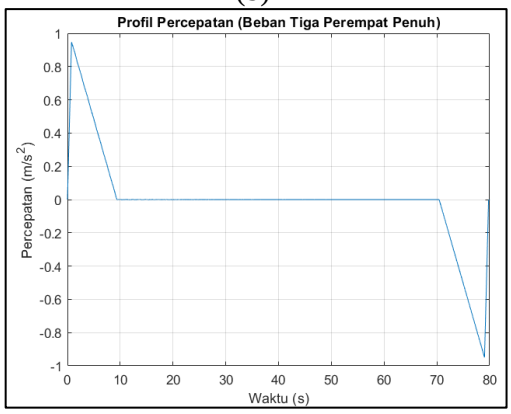
(a)



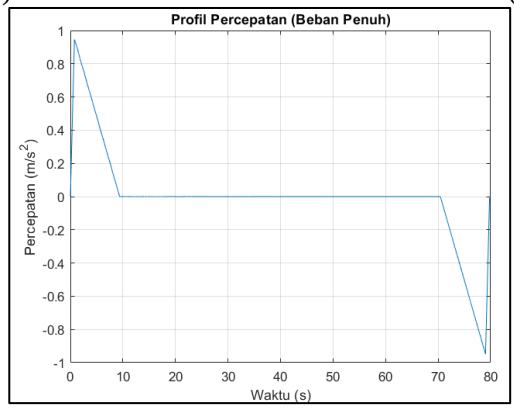
(b)



(c)



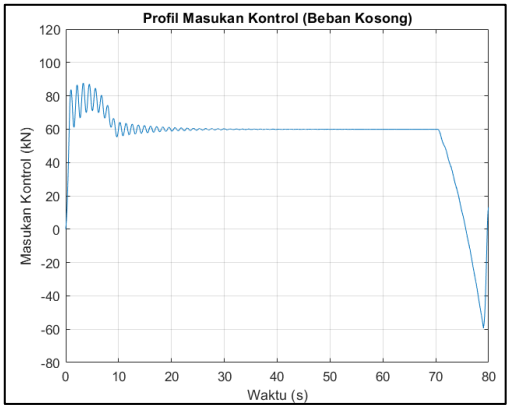
(d)



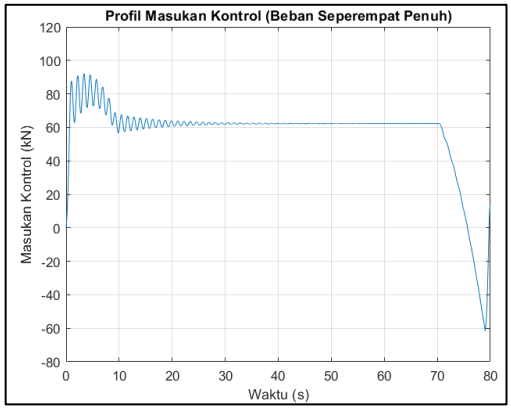
(e)

Gambar L.3 Profil Percepatan Hasil Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

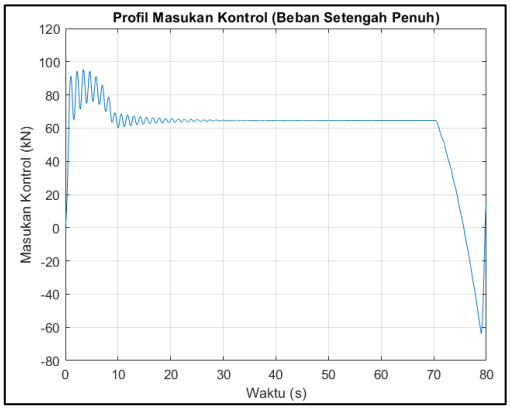
Hasil profil input kontrol dari simulasi pengontrol PID PSO ditampilkan pada Gambar L.4. Rentang nilai input kontrol yang dihasilkan telah menyerupai referensi pada penelitian sebelumnya [11] sehingga dapat diasumsikan aman. Nilai batasnya ditampilkan di Tabel 4.6 di Subsubbab 4.2.2.



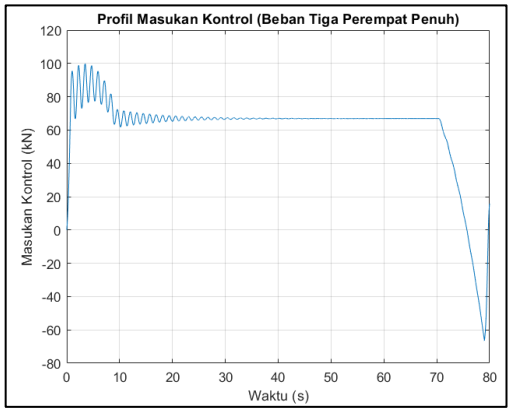
(a)



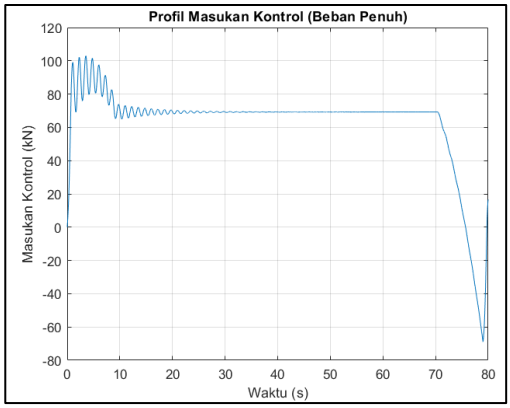
(b)



(c)



(d)

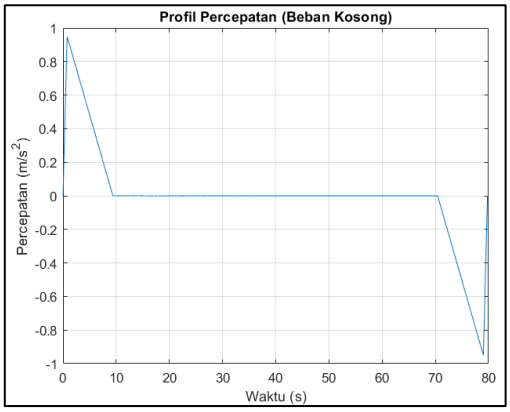


(e)

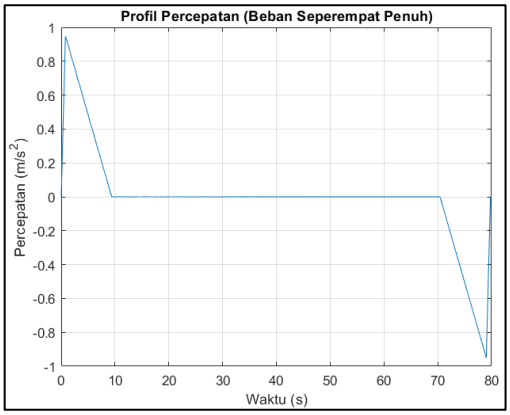
Gambar L.4 Profil Input Kontrol Hasil Pengontrol PID PSO (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

LAMPIRAN C. Simulasi Pengontrol PID *Particle Swarm Optimization* Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno

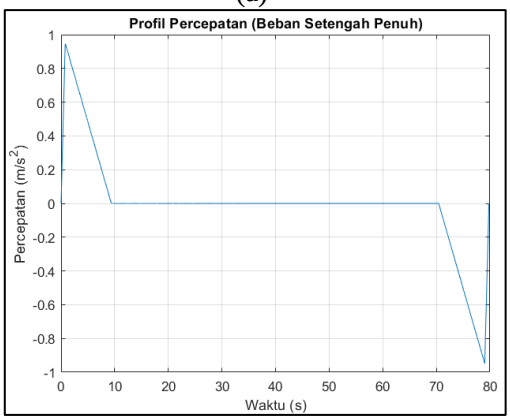
Hasil profil percepatan dari simulasi pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno ditampilkan pada Gambar L.5 untuk melihat dan memastikan batas percepatan telah memenuhi batas operasional kereta seperti pada Subsubbab 4.2.3.



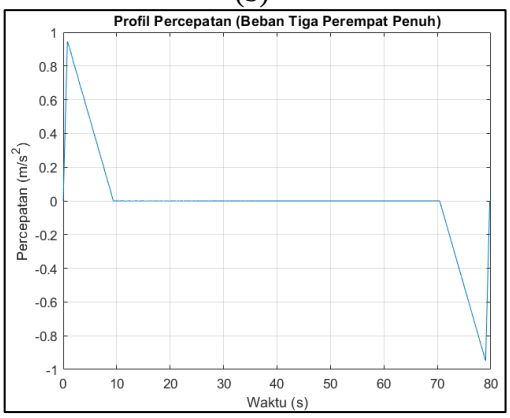
(a)



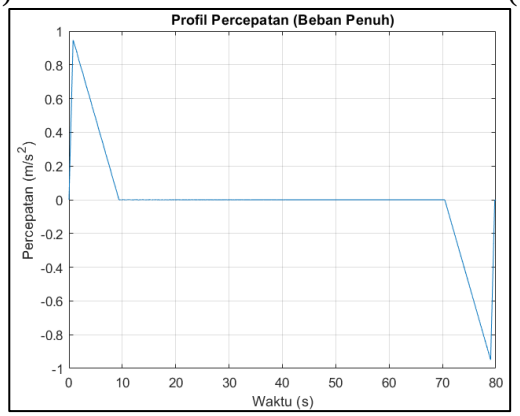
(b)



(c)



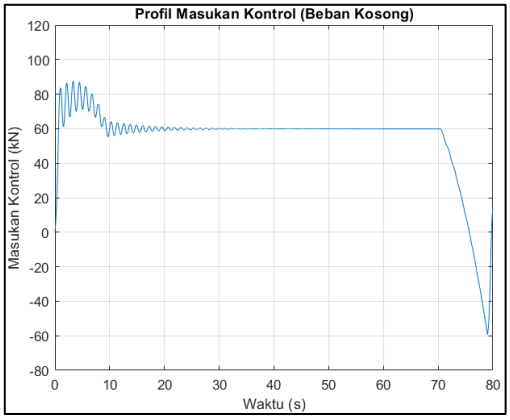
(d)



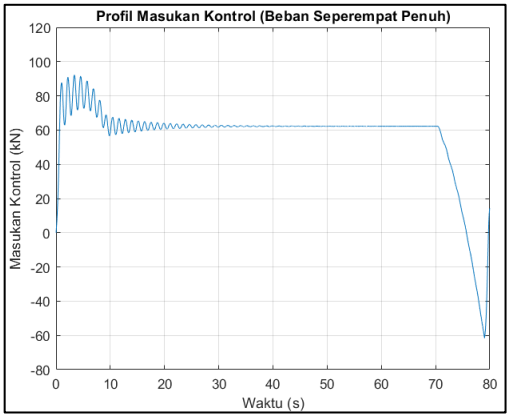
(e)

Gambar L.5 Profil Percepatan Hasil Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

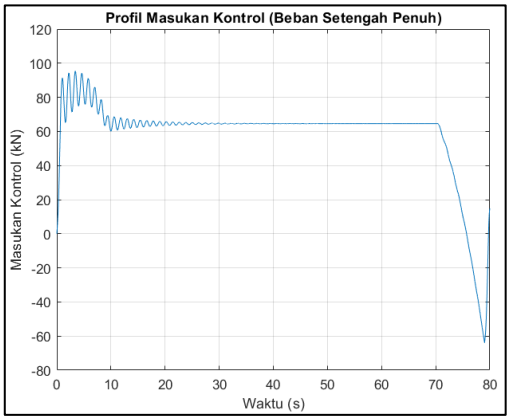
Hasil profil input kontrol dari simulasi pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno ditampilkan pada Gambar L.6. Rentang nilai input kontrol yang dihasilkan telah menyerupai referensi pada penelitian sebelumnya [11] sehingga dapat diasumsikan aman sesuai penjelasan pada Subsubbab 4.2.3.



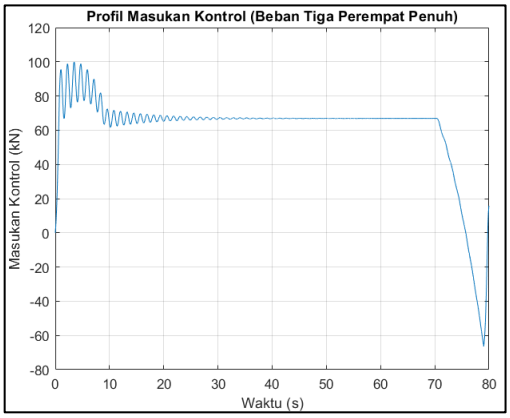
(a)



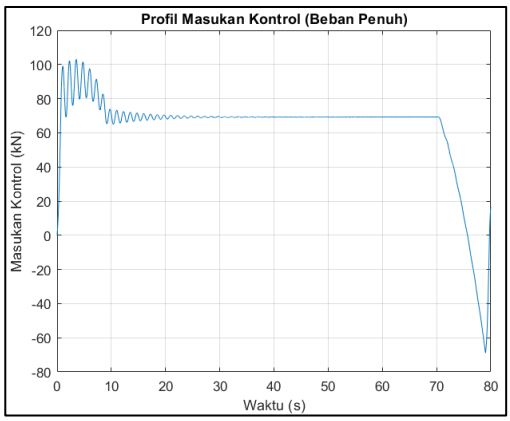
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar L.6 Profil Input Kontrol Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno (a) Kondisi 0 Penumpang (b) Kondisi 22 Penumpang (c) Kondisi 44 Penumpang (d) Kondisi 66 Penumpang (e) Kondisi 88 Penumpang

LAMPIRAN D. Pengujian Variasi Jumlah Penumpang Lain

Pada Lampiran D ini ditampilkan tabel hasil batas operasional kereta berupa batas percepatan, batas kecepatan, dan selisih posisi akhir untuk ketiga pengontrol pada pengujian variasi jumlah penumpang lain diluar perancangan yaitu 11, 33, 55, dan 77 penumpang dengan massa penumpang sebesar 60 Kg. Hasil pengontrol PID *auto tuning* ditampilkan pada Tabel L.1, hasil pengontrol PID PSO ditampilkan pada Tabel L.2, dan hasil pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno ditampilkan pada Tabel L.3.

Tabel L.1 Batas Operasional Kereta untuk Pengontrol PID *Auto Tuning* pada Pengujian Variasi Jumlah Penumpang Diluar Perancangan

Kondisi	Percepatan (m/s^2)		Kecepatan (m/s)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min	*Max*	*Min*	*Max*	
11 Penumpang	-0,9459	0,9863	-0,1351	4,515	0,5949
33 Penumpang	-0,9459	0,9889	-0,1349	4,514	0,5937
55 Penumpang	-0,9459	0,9914	-0,1346	4,514	0,5925
77 Penumpang	-0,9459	0,9938	-0,1343	4,514	0,5912

Tabel L.2 Batas Operasional Kereta untuk Pengontrol PID PSO pada Pengujian Variasi Jumlah Penumpang Diluar Perancangan

Kondisi	Percepatan (m/s^2)		Kecepatan (m/s)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min	*Max*	*Min*	*Max*	
11 Penumpang	-0,9491	0,9463	0	4,450	$3,337 \times 10^{-3}$
33 Penumpang	-0,9490	0,9461	0	4,450	$5,760 \times 10^{-3}$
55 Penumpang	-0,9490	0,9466	0	4,450	$5,569 \times 10^{-3}$
77 Penumpang	-0,9491	0,9465	0	4,450	$4,265 \times 10^{-3}$

Tabel L.3 Batas Operasional Kereta untuk Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno pada Pengujian Variasi Jumlah Penumpang Diluar Perancangan

Kondisi	Percepatan (m/s^2)		Kecepatan (m/s)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min	*Max*	*Min*	*Max*	
11 Penumpang	-0,9490	0,9464	0	4,450	$3,305 \times 10^{-3}$
33 Penumpang	-0,9489	0,9461	0	4,450	$5,612 \times 10^{-3}$
55 Penumpang	-0,9489	0,9460	0	4,450	$5,670 \times 10^{-3}$
77 Penumpang	-0,9489	0,9459	0	4,450	$5,724 \times 10^{-3}$

LAMPIRAN E. Pengujian Variasi Massa Penumpang Lain

Pada Lampiran E ini ditampilkan tabel hasil batas operasional kereta berupa batas percepatan, batas kecepatan, dan selisih posisi akhir untuk ketiga pengontrol pada pengujian variasi massa penumpang lain diluar perancangan yaitu 90%, 95%, 105%, dan 110% dari massa penumpang awal pada saat kondisi 44 penumpang. Hasil pengontrol PID *auto tuning* ditampilkan pada Tabel L.4, hasil pengontrol PID PSO ditampilkan pada Tabel L.5, dan hasil pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno ditampilkan pada Tabel L.6.

Tabel L.4 Batas Operasional Kereta untuk Pengontrol PID *Auto Tuning* pada Pengujian Variasi Massa Penumpang Diluar Perancangan

Kondisi	Percepatan (m/s^2)		Kecepatan (m/s)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min	*Max*	*Min*	*Max*	
90%	-0,9459	0,9902	-0,1344	4,514	0,5885
95%	-0,9459	0,9902	-0,1346	4,515	0,5908
105%	-0,9459	0,9902	-0,1349	4,515	0,5954
110%	-0,9459	0,9902	-0,1351	4,515	0,5977

Tabel L.5 Batas Operasional Kereta Akhir untuk Pengontrol PID PSO pada Pengujian Variasi Massa Penumpang Diluar Perancangan

Kondisi	Percepatan (m/s^2)		Kecepatan (m/s)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min	*Max*	*Min*	*Max*	
90%	-0,9488	0,9465	0	4,450	$5,919 \times 10^{-3}$
95%	-0,9490	0,9468	$-1,2 \times 10^{-5}$	4,450	$3,658 \times 10^{-3}$
105%	-0,9490	0,9468	$-1,3 \times 10^{-5}$	4,450	$3,684 \times 10^{-3}$
110%	-0,9490	0,9468	$-1,4 \times 10^{-5}$	4,450	$3,697 \times 10^{-3}$

Tabel L.6 Batas Operasional Kereta untuk Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika *Fuzzy* Sugeno pada Pengujian Variasi Massa Penumpang Diluar Perancangan

Kondisi	Percepatan (m/s^2)		Kecepatan (m/s)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min	*Max*	*Min*	*Max*	
90%	-0,9490	0,9461	0	4,450	$5,613 \times 10^{-3}$
95%	-0,9490	0,9461	0	4,450	$5,628 \times 10^{-3}$
105%	-0,9490	0,9462	$-5,0 \times 10^{-6}$	4,450	$3,403 \times 10^{-3}$
110%	-0,9490	0,9461	0	4,450	$5,662 \times 10^{-3}$