Presentasi Tugas Akhir

TF4092 Tugas Akhir

Perancangan Kontrol Kecepatan Kereta *Automated People Mover System* menggunakan PID *Particle Swarm Optimization* dengan Logika *Fuzzy* Sugeno untuk Target Kecepatan dan Posisi terhadap Variasi Jumlah Penumpang

Oleh:

Muhammad Shafwan Faturrahman 13316006

Adi Dwi Yulianto 13316084

Pembimbing:

Ir. Endra Joelianto, Ph.D.

Augie Widyotriatmo, S.T., M.T., Ph.D.

Penguji:

Prof. Dr. Harijono A. Tjokronegoro

Dr. Ing. Ir. Parsaulian I. Siregar

Laboratorium AI-CA, Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, 2021

DAFTAR ISI PRESENTASI

1 PENDAHULUAN

2 TEORI DASAR

3 METODOLOGI

4 HASIL DAN ANALISIS

5 PENUTUP

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang, Rumusan Masalah, Tujuan dan Sasaran serta Batasan Penelitian

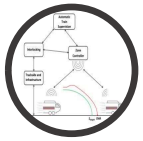
LATAR BELAKANG

KEMAJUAN TRANSPORTASI

Perkembangan teknologi dan sistem transportasi yang pintar, terintegrasi dan berkelanjutan [1]

KERETA APMS

Automated People Movers System (APMS) atau *skytrain* Bandara Soetta sebagai bentuk transportasi terpadu

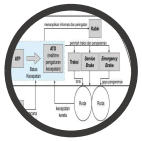


SISTEM CBTC

Pada *Communication Based Train Control* (CBTC) terdapat interaksi antara sistem persinyalan dengan sistem kereta APMS [3]

KONTROL OTOMATIS

Kontrol kereta APMS otomatis dilakukan oleh subsistem *Automatic Train Operation* (ATO) pada sistem CBTC [4]



KONDISI LAPANGAN

Kereta APMS Bandara Soetta masih dioperasikan secara manual oleh masinis karena operasional otomatis belum optimal [2]

TUGAS AKHIR INI

Perancangan kontrol kecepatan kereta APMS

RUMUSAN MASALAH

Perjalanan kereta masih dioperasikan secara manual oleh masinis

↓

Rancangan profil kecepatan dan kontrol kecepatan kereta belum mampu menghasilkan performa optimal

↓

Adanya gangguan atau ketidakpastian sistem kereta seperti perubahan massa kereta akibat perubahan jumlah penumpang

Error posisi atau jarak akhir pemberhentian kereta masih besar sehingga kereta belum berhenti tepat di pintu terminal

TUJUAN DAN SASARAN

Tujuan:

01 Merancang kontrol kecepatan optimal kereta APMS menggunakan pengontrol PID berbasis algoritma PSO

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

Sasaran:

01 Kereta mampu mengikuti profil yang diberikan

02 Kereta mampu berhenti tepat waktu di pintu terminal

03 Pengontrol kereta mampu mengatasi ketidakpastian jumlah penumpang

BATASAN PENELITIAN

1. Kereta yang dimodelkan secara ideal adalah kalayang (*skytrain)* Bandara Internasional Soekarno-Hatta, Tangerang, Banten
2. Sistem persinyalan yang digunakan kereta APMS adalah CBTC pada subsistem ATO untuk mengatur kecepatan kereta secara *driverless*
3. Kecepatan maksimal operasional kereta APMS adalah 4,5 m/s dengan percepatan dan perlamabatan sebesar 1 m/s^2 berdasarkan data lapangan
4. Toleransi selisih posisi atau jarak akhir sebesar $\pm$10 cm
5. Fungsi objektif yang digunakan pada perancangan algoritma PSO adalah *error* minimal
6. Simulasi dilakukan untuk perjalanan kereta dari terminal 1 menuju terminal *Integrated Building* (IB) sejauh 325 meter
7. Ketidakpastian yang digunakan adalah jumlah penumpang atau beban kereta
8. Jenis pengontrol yang didesain adalah PID PSO dan logika *fuzzy* Sugeno

2. TEORI DASAR

Automated People Mover System (APMS), Subsistem *Automatic Train Operation* (ATO), PID *Particle Swarm Optimization* (PID PSO) dan Logika *Fuzzy* Sugeno

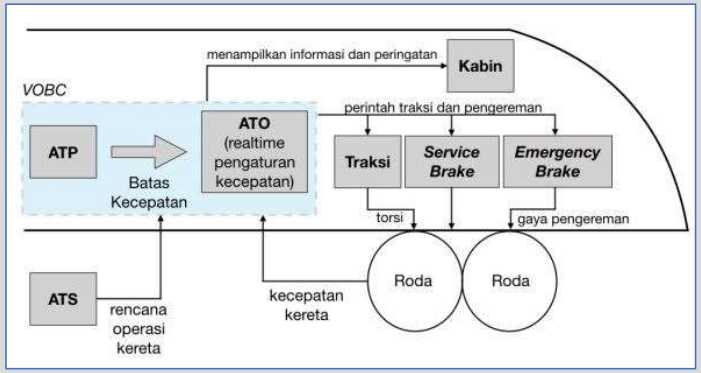
AUTOMATED PEOPLE MOVER SYSTEM (APMS)

APMS merupakan sebuah sistem transportasi tingkat tinggi yang dapat beroperasi secara **otomatis** tanpa memerlukan pengemudi [5]

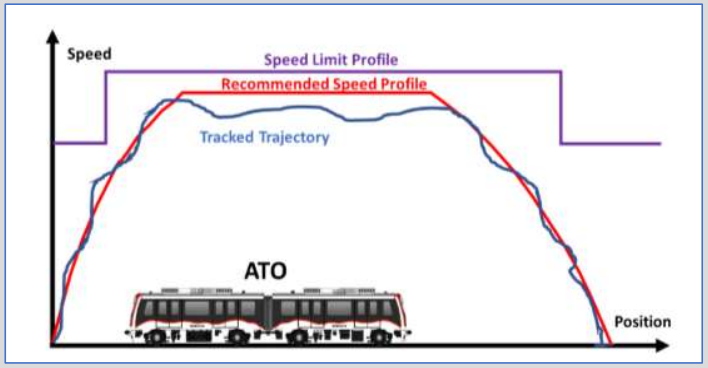
Pada umumnya, APMS didesain untuk digunakan dalam durasi **waktu yang singkat** dengan **banyak titik pemberhentian** [5]

Alat transportasi yang cocok dengan sistem ini yaitu **kereta**

SUBSISTEM *AUTOMATIC TRAIN OPERATION* (ATO)



Gambar 2.1 Sistem ATC pada Kereta



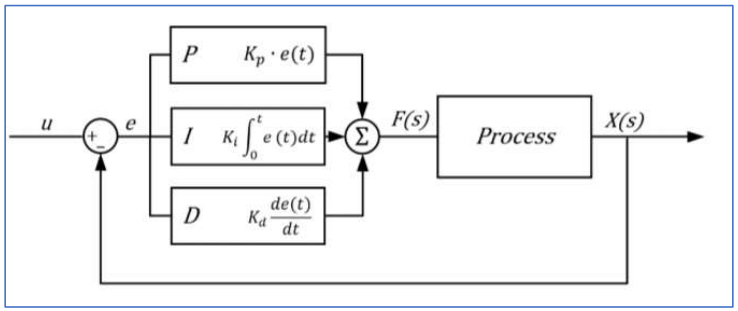
Gambar 2.2 Ilustrasi Profil Kecepatan pada Sistem ATO

Sistem ATO pada sistem persinyalan CBTC berperan dalam mengendalikan **kereta** secara **otomatis**

ATO selalu bekerja sama dengan ATP dalam menjaga **keselamatan** dari sistem pengontrolan otomatis ATO [11]

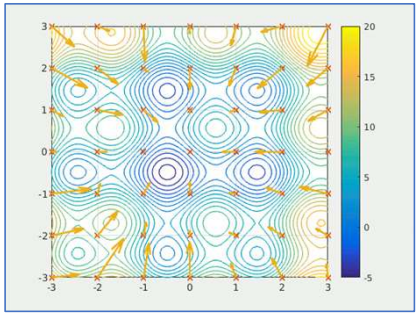
Profil kecepatan diberikan pada sistem ATO sebagai acuan atau **referensi kereta** dalam mengendalikan kecepatan secara otomatis

PID *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PID PSO)



Gambar 2.3 Blok Diagram Pengontrol PID

Parameter Kp, Ki, dan Kd akan **mengendalikan sistem** agar hasil PV (*manipulated process value*) tidak jauh berbeda dengan nilai SP (*set point*)



Gambar 2.4 Ilustrasi Algoritma PSO

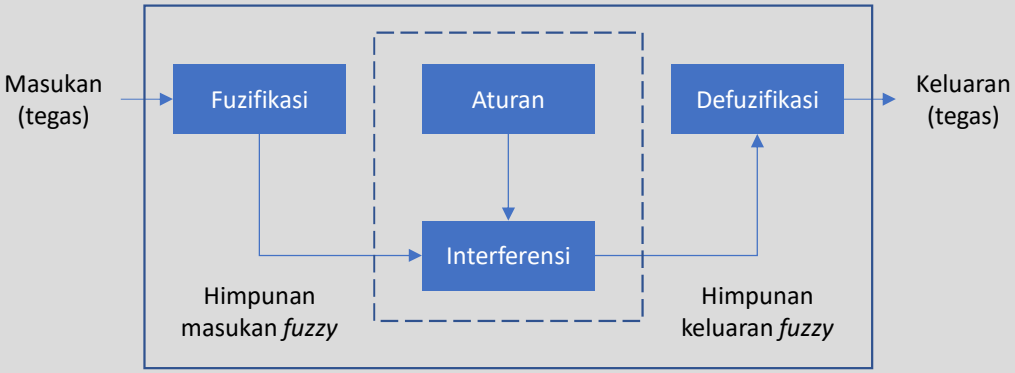
Algoritma PSO memanfaatkan setiap agen dalam sebuah koloni (*swarm*) dalam mencari **titik minimal** dari **fungsi objektif** yang telah ditentukan [15]

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 (P_{best}(i,t) - P_i(t)) + c_2 r_2 (G_{best}(t) - P_i(t)) \quad (2.1)$$

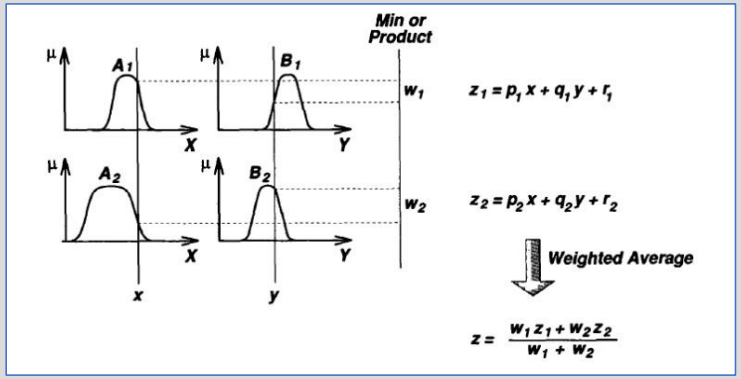
$$P_i(t+1) = P_i(t) + V_i(t+1) \quad (2.2)$$

- V: kecepatan
- ω: beban inertia
- c_1: beban self-adjustment
- c_2: beban social-adjustment
- r_1, r_2: variabel acak (0-1)
- p: posisi

LOGIKA *FUZZY* SUGENO



Gambar 2.5 Proses *Fuzzy*



Gambar 2.6 Proses Logika *Fuzzy* Sugeno

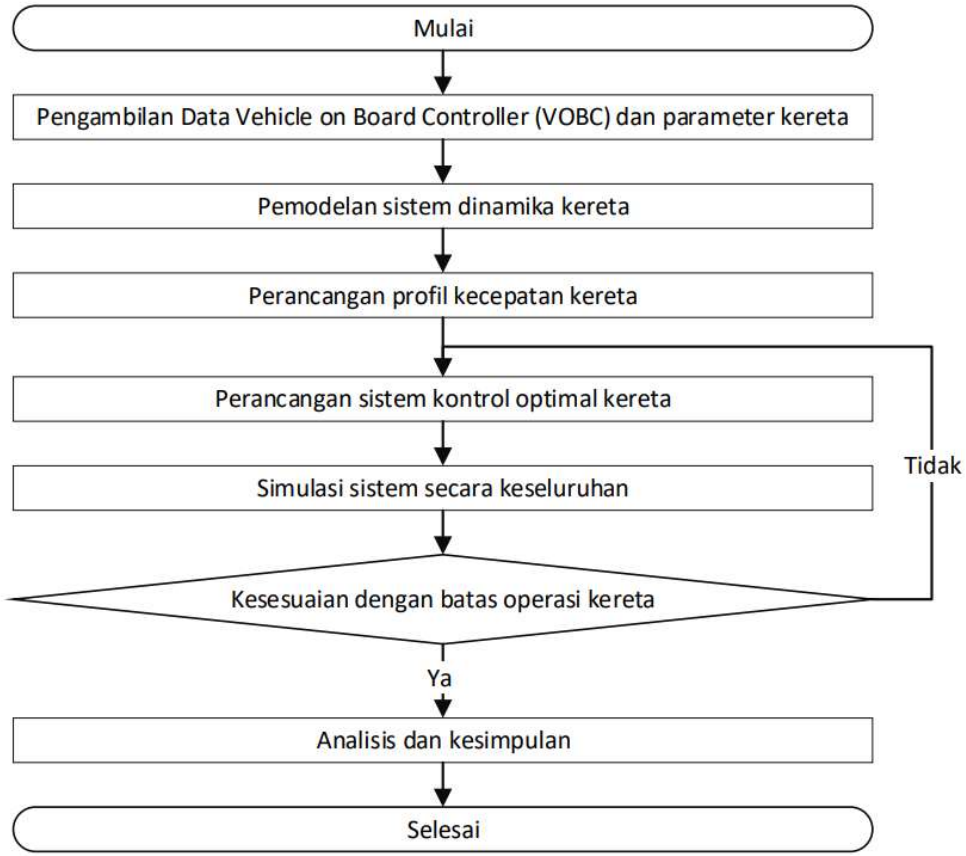
Proses utama dalam *fuzzy* adalah **fuzifikasi, interferensi dan defuzifikasi** [20]

Pada metode *fuzzy* sugeno, **output** berupa **persamaan linier** atau **konstanta** [21]

3. METODOLOGI

Skema, Deskripsi Objek Penelitian, Pemodelan Sistem Dinamika Kereta, Perancangan Profil Kecepatan Kereta, Perancangan Kontrol Kecepatan Kereta dan Perancangan Simulasi Pengontrol

SKEMA



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

DESKRIPSI OBJEK PENELITIAN

Gambar 3.2 Kereta APMS Bandara Soetta

Gambar 3.3 Jalur Kereta APMS Bandara Soetta

Objek	: APMS Bandara Internasional Soekarno-Hatta
Lokasi	: Terminal 1 – Terminal *Integrated Building* (IB)

Spesifikasi

Tabel 3.1 Data Parameter Kereta

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

Tabel 3.2 Kondisi Operasional Kereta

Parameter	Nilai	Satuan
Jarak T1-TIB	325	meter
Waktu tempuh T1-TIB	80	detik
Kapasitas maksimal	88	orang
Toleransi pemberhentian	± 10	cm

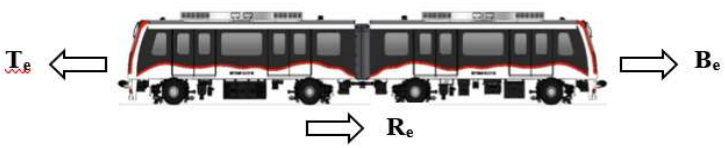
Asumsi

- Massa rata-rata penumpang (termasuk barang bawaan) adalah **60 kg**
- Kondisi **jalur rata** tanpa memperhitungkan gradien ketinggian jalur dan sudut tikungan jalur
- Terdapat **5 variasi jumlah penumpang** dalam simulasi

PEMODELAN SISTEM DINAMIKA KERETA (1)

Analisis Hukum II Newton

Berdasarkan **persamaan gerak kereta**:



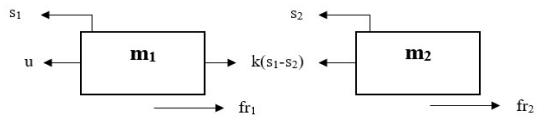
Gambar 3.4 Diagram Gaya pada Sistem Pergerakan Kereta APMS

Diperoleh persamaan:

$$T_e(v) - B_e(v) - R_e(v,i,r) = m\frac{dv}{dt} \qquad (3.1)$$

$$u - R_e(v,i,r) = m\frac{dv}{dt} \qquad (3.2)$$

Berdasarkan ***free body diagram***:



Gambar 3.5 *Free Body Diagram* Dinamika Kereta

Diperoleh persamaan:

$$u - k(s_1 - s_2) - fr_1 = m_1\frac{dv_1}{dt} \qquad (3.3)$$

$$k(s_1 - s_2) - fr_2 = m_2\frac{dv_2}{dt} \qquad (3.4)$$

fr berupa *mechanical resistance* dan *aerodynamics drag*:

$$fr_i = \mu m_i g v_i + m_i g\left(B v_i + C v_i^2\right) \qquad (3.5)$$

T_e	=	Gaya traksi
B_e	=	Gaya pengereman
R_e	=	Resistensi kereta
v	=	Kecepatan kereta
i	=	Kemiringan lintasan
r	=	Radius kurva lintasan
m	=	Massa kereta
t	=	Waktu tempuh
fr_i	=	Gaya hambatan gerbong i
μ	=	Koefisien gesek
g	=	Konstanta gravitasi
B,C	=	Koefisien Davis

Variabel keadaan:

$$\begin{aligned} x_1 &= s_1 \\ x_2 &= \dot{x}_1 = v_1 \\ x_3 &= s_2 \\ x_4 &= \dot{x}_3 = v_1 \end{aligned}$$

Persamaan ruang keadaan:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k/m_1 & -\mu g - gB - gCx_2 & k/m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k/m_2 & 0 & -k/m_2 & -\mu g - gB - gCx_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \qquad (3.6)$$

Nonlinear State-Space

PEMODELAN SISTEM DINAMIKA KERETA (2)

Feedback Linearization

- Teknik yang digunakan adalah ***input-state linearization***
- Kereta dimodelkan secara **ideal**
- Variabel keadaan x_3 dianggap memiliki ketidakpastian **yang dibatasi**
- Variabel keadaan x_4 memiliki nilai yang **mendekati** nilai variabel keadaan x_2

Konsep *Input-State Feedback Linearization* [22]

Bentuk umum sistem persamaan nonlinier:

$$\dot{x} = Ax + B\gamma(x)[u - \alpha(x)] \qquad (3.7)$$

Persamaan ruang keadaan yang memiliki bentuk seperti persamaan (3.7) dapat dilinearkan dengan menggunakan umpan balik variabel keadan:

$$u = \alpha(x) + \beta(x)U \qquad (3.8)$$

Dengan $\beta(x) = \gamma^{-1}(x)$, sehingga diperoleh persamaan ruang keadaan yang linier:

$$\dot{x} = Ax + BU \qquad (3.9)$$

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

$$u = \alpha(x) - \beta(x)Kx \qquad (3.10)$$

Bentuk **persamaan nonlinier** dari variabel keadaan x_2 adalah:

$$\dot{x}_2 = \underbrace{-\frac{k}{m_1}x_1 + \frac{k}{m_2}x_3 - g(\mu + B)}_{\text{Fungsi linier}} + \underbrace{(-gCx_2^2)}_{\text{Fungsi nonlinier}} + \underbrace{\frac{1}{m_1}u}_{\text{Input kontrol}} \qquad (3.11)$$

Pilih u yang mampu menghilangkan fungsi nonlinier:

$$u = m_1 gCx_2^2 + m_1 U \qquad (3.12)$$

Persamaan dari variable keadaan x_2 menjadi:

$$\dot{x}_2 = -\frac{k}{m_1}x_1 + \frac{k}{m_2}x_3 - g(\mu + B)x_2 + U \qquad (3.13)$$

Sehingga **persamaan ruang keadaan** (3.6) menjadi:

$$\begin{bmatrix} \dot{x_1} \\ \dot{x_2} \\ \dot{x_3} \\ \dot{x_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k/m_1 & -\mu g - gB & k/m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k/m_2 & 0 & -k/m_2 & -\mu g - gB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} U \qquad (3.14)$$

Linear State-Space

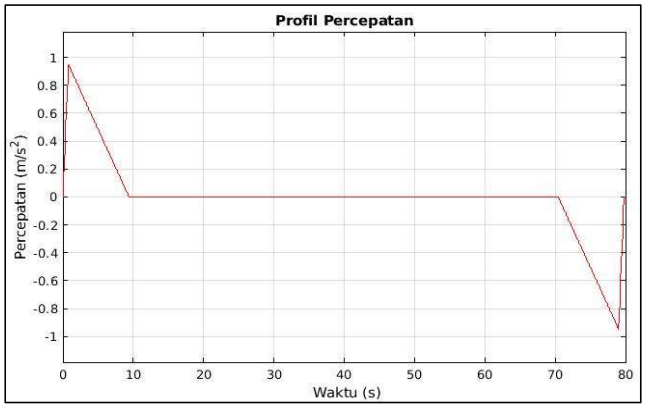
PERANCANGAN PROFIL KECEPATAN KERETA (1)

Proses Perancangan

Profil percepatan, kecepatan dan jarak kereta didesain berdasarkan **batas dan kondisi batas parameter operasional kereta**:

$$-1 \leq a(t) \leq 1\ (m/s^2) \quad (3.15)$$
$$0 \leq v(t) \leq 4{,}5\ (m/s) \quad (3.16)$$
$$v(0) = 0\ (m/s) \quad (3.17)$$
$$v(80) = 0\ (m/s) \quad (3.18)$$
$$s(0) = 0\ (m) \quad (3.19)$$
$$s(80) = 325\ (m) \quad (3.20)$$

Pertama, bentuk **profil percepatan** yang didasarkan pada **kondisi batas** serta parameter lain yang ingin dipenuhi ketika kereta mulai bergerak, saat menuju dan melewati batas kecepatan stabil maupun saat kereta akan berhenti sehingga pergerakan kereta menjadi lebih halus (*smooth*).



Gambar 3.7 Profil Percepatan Kereta

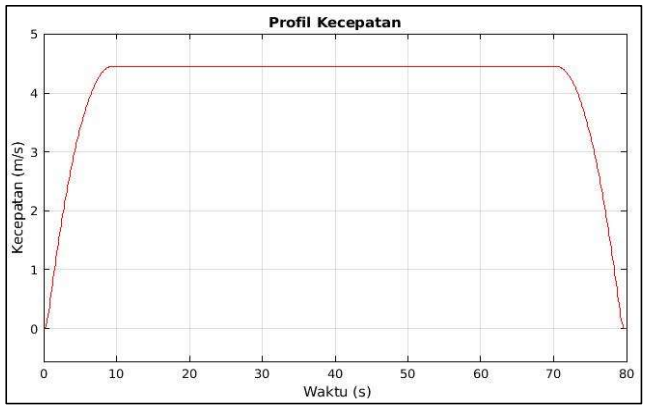
$$-0{,}9475 \leq a(t) \leq 0{,}9465\ (m/s^2) \quad (3.21)$$

PERANCANGAN PROFIL KECEPATAN KERETA (2)

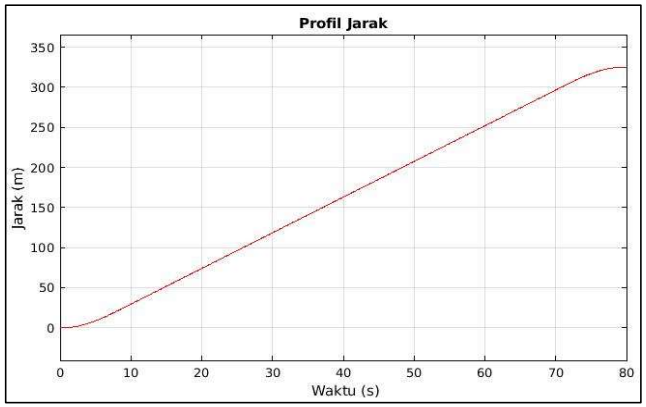
Hasil Perancangan

Profil kecepatan dan jarak diperoleh dengan integral:

$$v = \int_0^t a\,dt \quad \textbf{dan} \quad s = \int_0^t v\,dt \qquad (3.22)$$



(a)



(b)

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

$$0 \leq v(t) \leq 4{,}45\ (m/s) \qquad (3.23)$$

$$v(0) = 0\ (m/s) \text{ dan } v(80) = 0\ (m/s) \qquad (3.24)$$

$$s(0) = 0\ (m)\ \textit{dan}\ s(80) = 325\ (m) \qquad (3.25)$$

Profil kecepatan dan jarak sudah memenuhi batas dan kondisi batas

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA (1)

Metode 1

PENGONTROL PID PSO

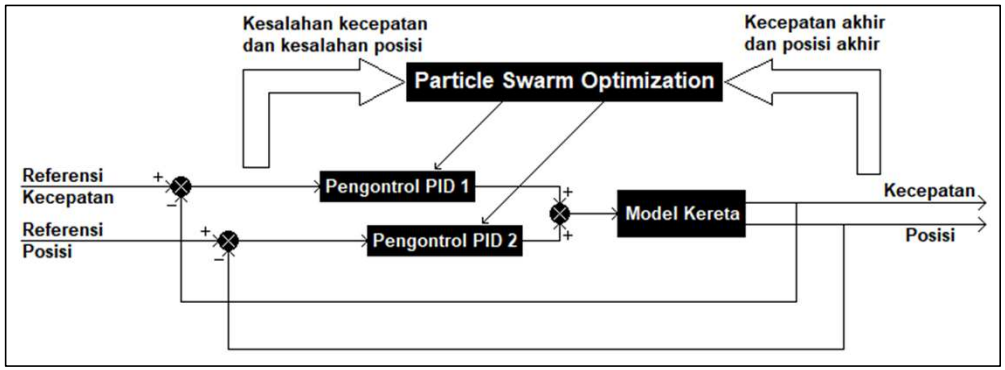
Metode 2

PENGONTROL LOGIKA *FUZZY* SUGENO

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA (2)

PID PSO

Tahapan *tuning* PID menggunakan algoritma PSO:



Gambar 3.9 Struktur Kontroler PID PSO

1. Menentukan **jumlah partikel** atau *agent* dalam koloni (***swarm***) yaitu 100. Jumlah iterasi 150 dan kriteria pemberhentian minimal 30 iterasi

2. Menentukan **nilai batas**. 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

3. Menentukan konstanta **beban inersia** (ω), konstanta **penyesuaian diri** (c_1) dan konstanta **penyesuaian sosial** (c_2)

w	0,2
c_1	1,49
c_2	1,49

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA (3)

PID PSO

Tahapan *tuning* PID menggunakan algoritma PSO:

4. Menentukan **fungsi objektif** untuk meminimalkan *error*

$$J = RMSE_{spd} + RMSE_{pos}$$

$$J = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[r_{2_i}(t) - x_{2_i}(t)\right]^2\right]^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[r_{1_i}(t) - x_{1_i}(t)\right]^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.26)$$

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

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

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

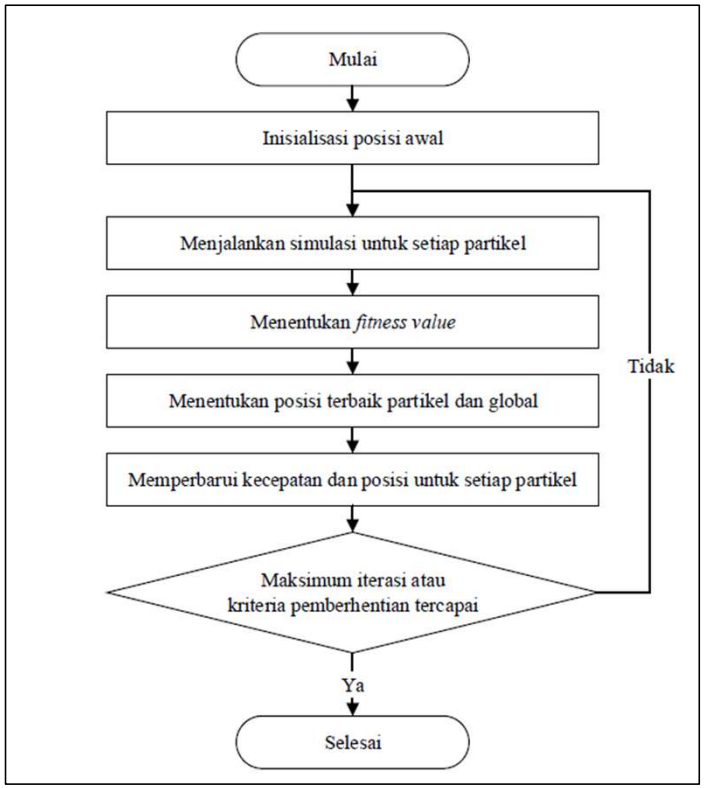
x_1	=	Respon posisi kereta
x_2	=	Respon kecepatan kereta
r_1	=	Referensi posisi kereta
r_2	=	Referensi kecepatan kereta
N	=	Jumlah data
t	=	Waktu simulasi
t_f	=	Nilai waktu akhir (80 detik)

5. Menjalankan **algoritma PSO**

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA (4)

PID PSO

Tahapan *tuning* PID menggunakan algoritma PSO:

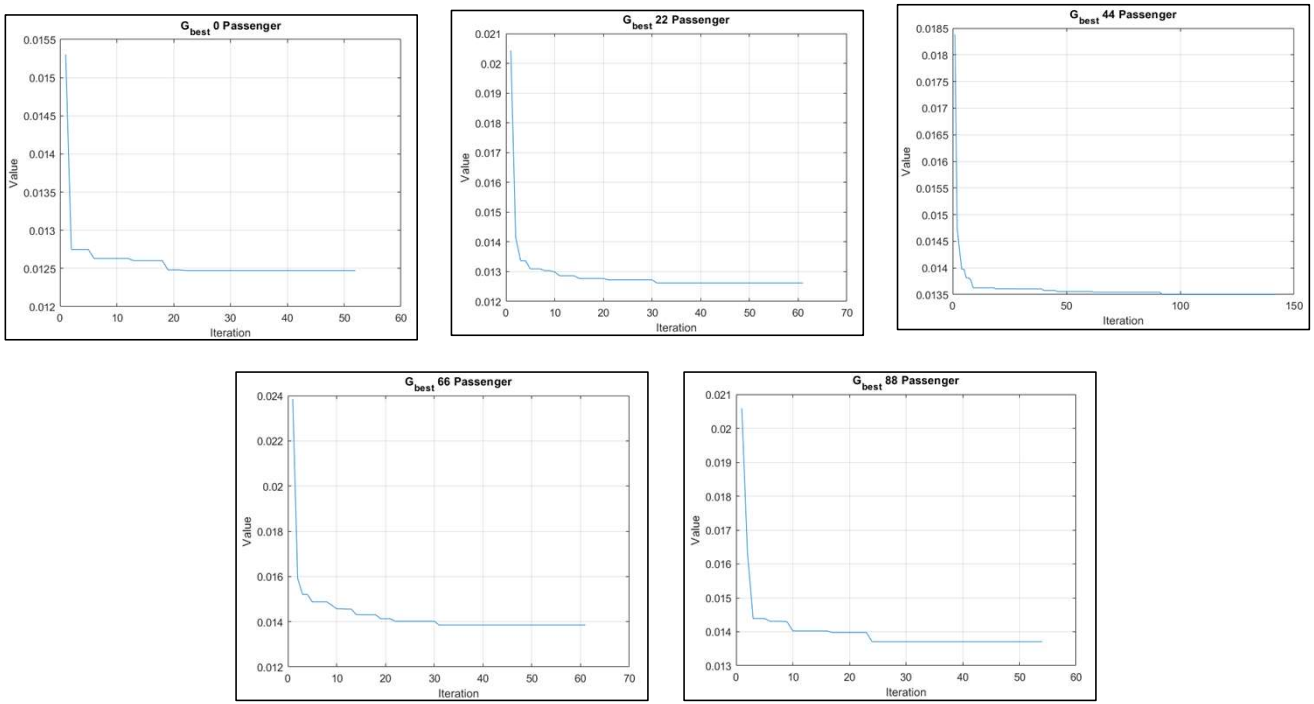


Gambar 3.10 Algoritma PSO

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA (5)

PID PSO

Hasil *tuning* PID menggunakan algoritma PSO:



Gambar 3.11 Historis *Fitness Value* pada Simulasi PSO untuk Semua Variasi Jumlah Penumpang

Tabel 3.3 Hasil *Fitness Value* Terbaik

Kondisi	Fitness Value	Iterasi
0 Penumpang	0,012474	52
22 Penumpang	0,012620	61
44 Penumpang	0,013501	142
66 Penumpang	0,013854	61
88 Penumpang	0,013706	54

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA (6)

PID PSO

Hasil *tuning* PID menggunakan algoritma PSO:

Tabel 3.4 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

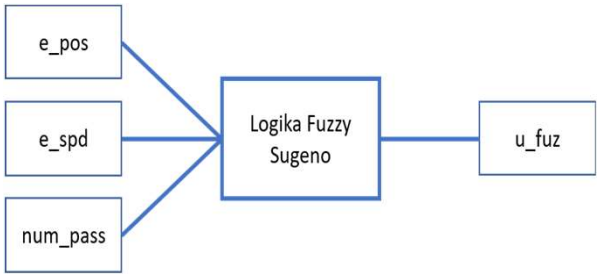
Pengontrol PID PSO telah disesuaikan untuk semua variasi jumlah penumpang

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA (7)

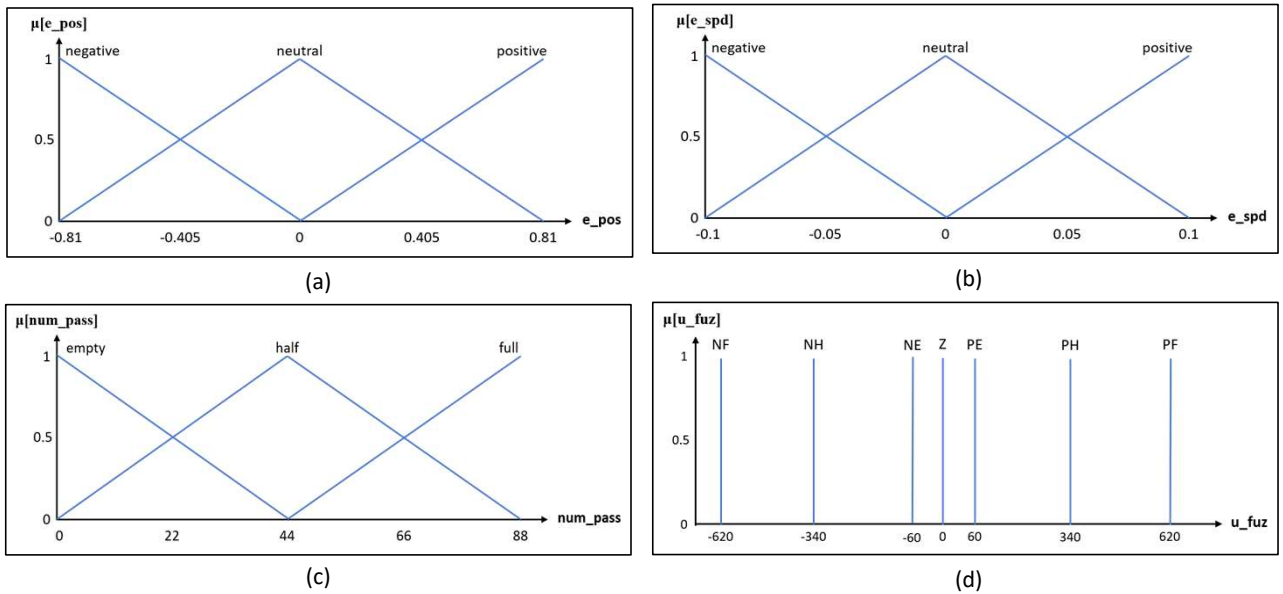
LOGIKA *FUZZY*

Desain logika *fuzzy* sugeno orde 0:

Proses **fuzifikasi** menggunakan representasi **kurva segitiga**



Gambar 3.12 Desain Logika *Fuzzy*



Gambar 3.13 Fungsi Keanggotaan *Fuzzy* (a) Masukan *error* posisi (b) Masukan *error* kecepatan (c) Masukan jumlah penumpang (d) Konstanta Keluaran

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA (8)

LOGIKA *FUZZY*

Aturan Logika *Fuzzy*:

Proses **interferensi** menggunakan operator logika **if-AND-AND-then**

1. Pengontrol Kecepatan

e_pos	*e_spd*	*num_pass*	*u_fuz*
neg	neg	emp	neg-emp
		half	neg-half
		full	neg-full
	neut	emp	neutral
		half	neutral
		full	neutral
	pos	emp	pos-emp
		half	pos-half
		full	pos-full
neut	neg	emp	neg-emp
		half	neg-half
		full	neg-full
	neut	emp	neutral
		half	neutral
		full	neutral
	pos	emp	pos-emp
		half	pos-half
		full	pos-full
pos	neg	emp	neg-emp
		half	neg-half
		full	neg-full
	neut	emp	neutral
		half	neutral
		full	neutral
	pos	emp	pos-emp
		half	pos-half
		full	pos-full

2. Pengontrol Posisi

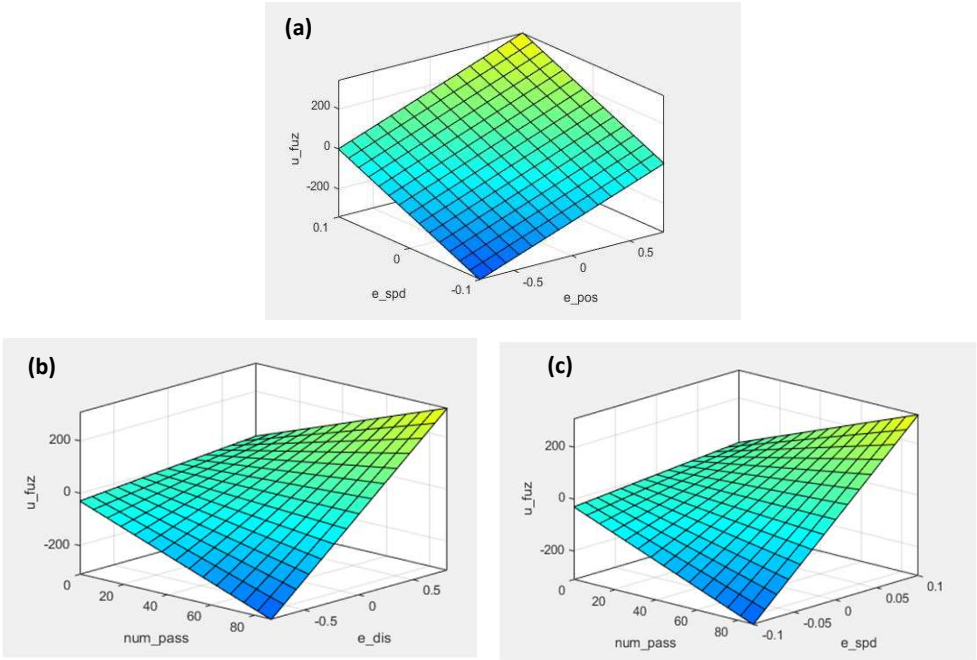
e_pos	*e_spd*	*num_pass*	*u_fuz*
neg	neg	emp	neg-emp
		half	neg-half
		full	neg-full
neut	neg	emp	neutral
		half	neutral
		full	neutral
pos	neg	emp	pos-emp
		half	pos-half
		full	pos-full
neg	neut	emp	neg-emp
		half	neg-half
		full	neg-full
neut	neut	emp	neutral
		half	neutral
		full	neutral
pos	neut	emp	pos-emp
		half	pos-half
		full	pos-full
neg	pos	emp	neg-emp
		half	neg-half
		full	neg-full
neut	pos	emp	neutral
		half	neutral
		full	neutral
pos	pos	emp	pos-emp
		half	pos-half
		full	pos-full

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA (9)

LOGIKA *FUZZY*

Hasil Keluaran *Fuzzy*:

Proses **defuzifikasi** menggunakan teknik ***weighted average***



Gambar 3.14 *Surface Control* (a) *e_pos – e_spd* (b) *e_pos – num_pass* (c) *e_spd – num_pass*

PERANCANGAN KONTROL KECEPATAN KERETA (10)

LOGIKA *FUZZY*

Hasil Pengujian *Fuzzy*:

Tabel 3.5 Hasil Pengujian *Fuzzy*

Masukan 1 (error posisi)	Masukan 2 (error kecepatan)	Masukan 3 (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**

Pengontrol *fuzzy* mampu mengontrol kecepatan dan jarak kereta sekaligus

Pengontrol *fuzzy* mampu menangani ketidakpastian jumlah penumpang

PERANCANGAN SIMULASI PENGONTROL (1)

3 Bagian Simulasi dan 5 Variasi Jumlah Penumpang

PID *Auto Tuning*

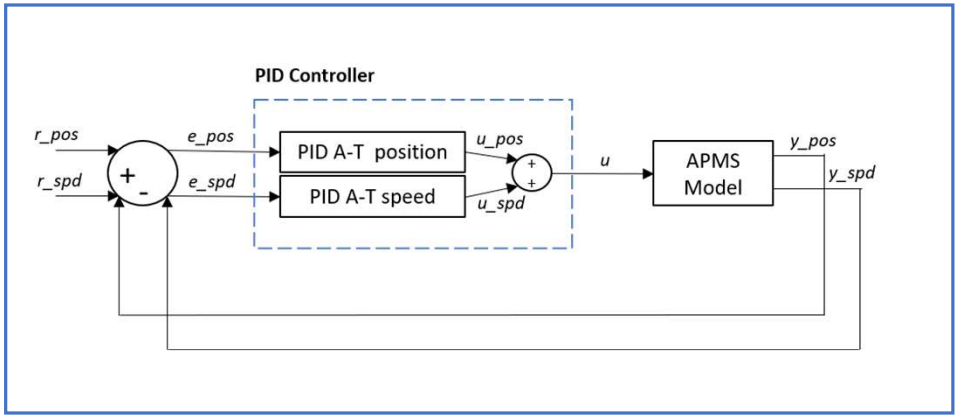
PID PSO

PID PSO – Logika *Fuzzy* Sugeno

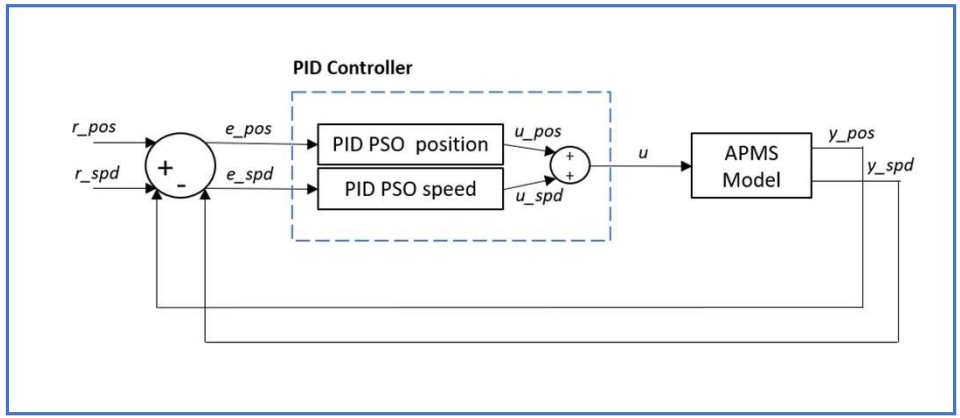
Tabel 3.6 Variasi Jumlah Penumpang

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

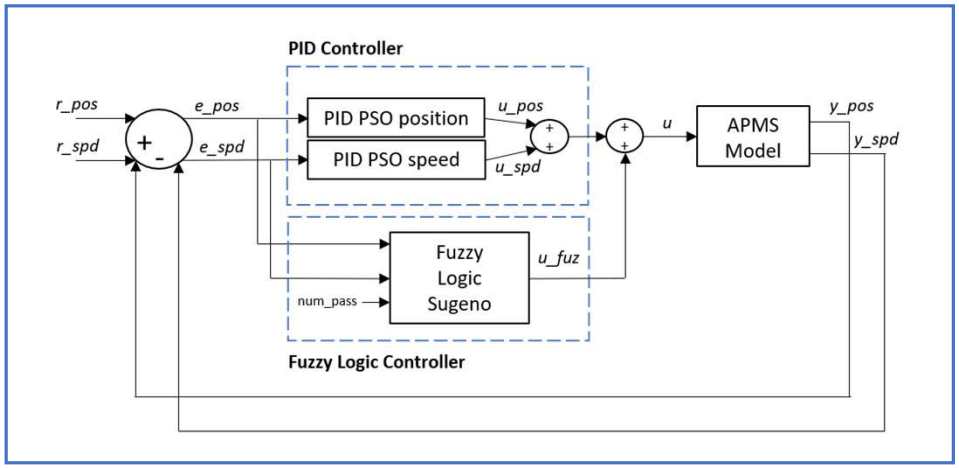
PERANCANGAN SIMULASI PENGONTROL (2)



Gambar 3.15 Blok Diagram Pengontrol PID *Auto Tuning*



Gambar 3.16 Blok Diagram Pengontrol PID PSO



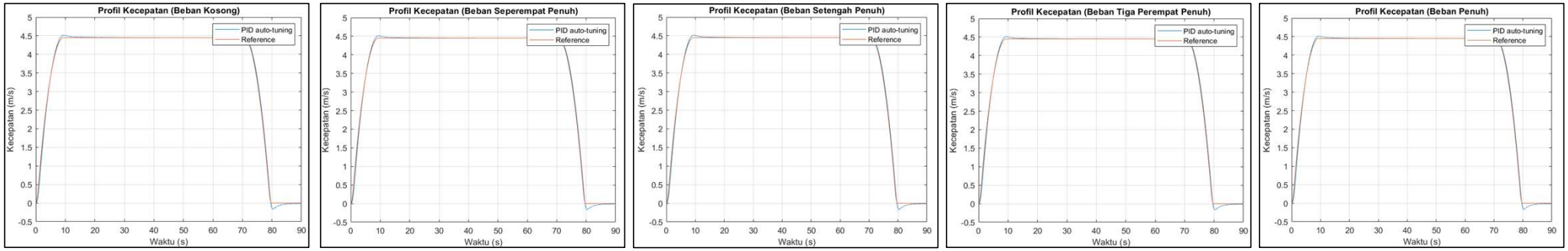
Gambar 3.17 Blok Diagram Pengontrol PID PSO – Logika *Fuzzy* Sugeno

4. HASIL DAN ANALISIS

Simulasi Pengontrol PID *Auto Tuning*, Pengontrol PID PSO, Pengontrol PID PSO – Logika *Fuzzy* Sugeno dan Analisis Perbandingan Ketiga Pengontrol

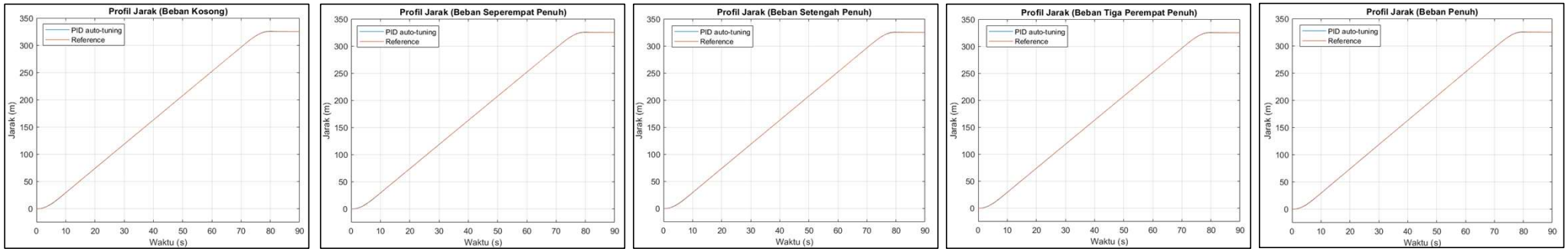
PENGONTROL PID *AUTO TUNING* (1)

Hasil Simulasi Pengontrol Kecepatan



Gambar 4.1 Profil Kecepatan Total untuk Semua Variasi Jumlah Penumpang

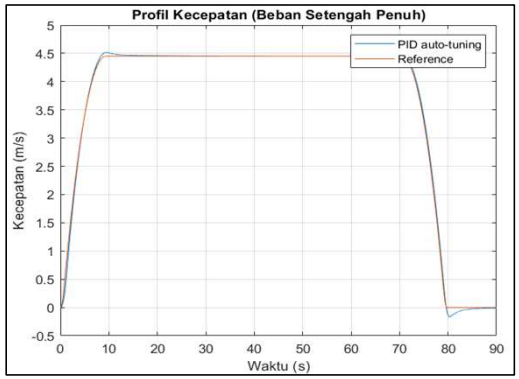
Hasil Simulasi Pengontrol Posisi



Gambar 4.2 Profil Jarak/Posisi Total untuk Semua Variasi Jumlah Penumpang

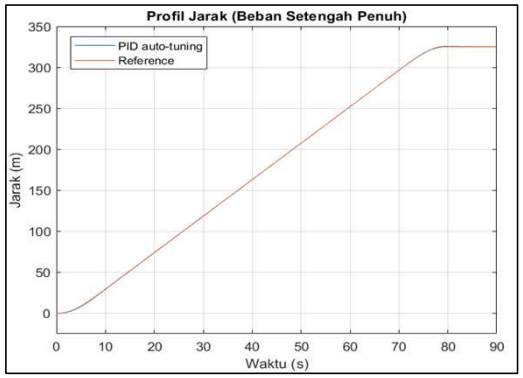
PENGONTROL PID *AUTO TUNING* (2)

Hasil Simulasi Kondisi 44 Penumpang

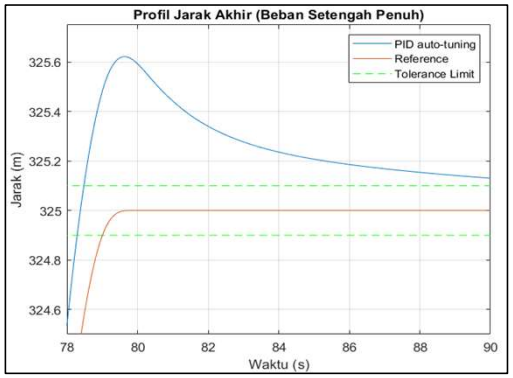


Gambar 4.3 Profil Kecepatan Total

Gambar 4.4 Profil Kecepatan Akhir



Gambar 4.5 Profil Posisi Total



Gambar 4.6 Profil Posisi Akhir

Tabel 4.1 Nilai Waktu Berhenti, RMSE Kecepatan dan Selisih Jarak Akhir Pengontrol PID *Auto Tuning*

Kondisi	RMSE Kecepatan	RMSE Posisi	Selisih Posisi Akhir (m)
0 Penumpang	0,0434	0,1950	0,5956
22 Penumpang	0,0437	0,1945	0,5944
44 Penumpang	0,0432	0,1940	0,5931
66 Penumpang	0,0432	0,1935	0,5919
88 Penumpang	0,0431	0,1930	0,5907

Tabel 4.2 Batas Kecepatan, Percepatan dan Input Kontrol Pengontrol PID *Auto Tuning*

Kondisi	Kecepatan (m/s)		Percepatan (m/s^2)		Input Kontrol (kN)	
	Min(-)	Max	Min(-)	Max	Min(-)	Max
0 Penumpang	0,135	4,515	0,9459	0,9850	58,7097	81,1685
22 Penumpang	0,135	4,515	0,9459	0,9876	60,9884	84,3037
44 Penumpang	0,135	4,515	0,9459	0,9901	63,2671	87,4360
66 Penumpang	0,135	4,515	0,9459	0,9926	65,5460	90,5987
88 Penumpang	0,134	4,515	0,9459	0,9950	67,8245	93,7626

PENGONTROL PID PSO (1)

Hasil Simulasi Pengontrol Kecepatan

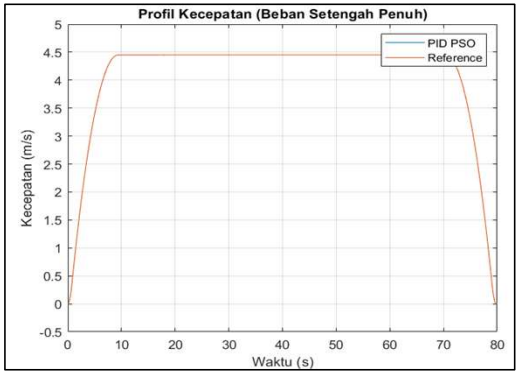
Gambar 4.7 Profil Kecepatan Total untuk Semua Variasi Jumlah Penumpang

Hasil Simulasi Pengontrol Posisi

Gambar 4.8 Profil Jarak/Posisi Total untuk Semua Variasi Jumlah Penumpang

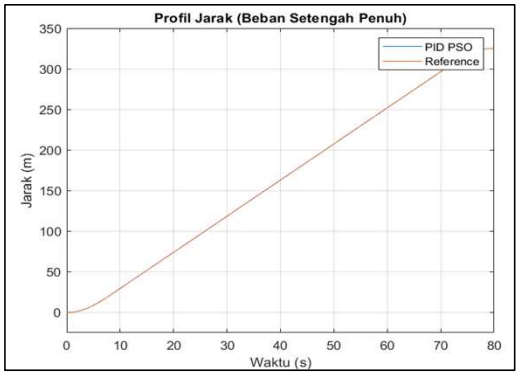
PENGONTROL PID PSO (2)

Hasil Simulasi Kondisi 44 Penumpang

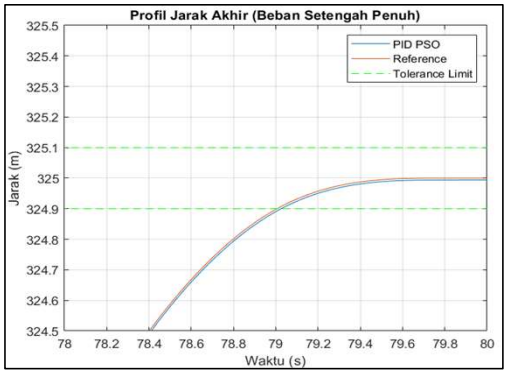


Gambar 4.9 Profil Kecepatan Total

Gambar 4.10 Profil Kecepatan Akhir



Gambar 4.11 Profil Posisi Total



Gambar 4.12 Profil Posisi Akhir

Tabel 4.3 Nilai Waktu Berhenti, RMSE Kecepatan dan Selisih Jarak Akhir Pengontrol PID PSO

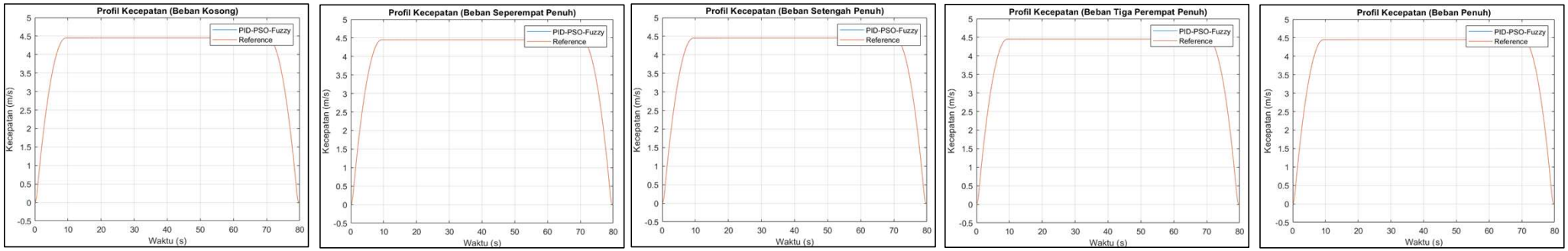
Kondisi	RMSE Kecepatan	RMSE Posisi	Selisih Posisi Akhir (m)
0 Penumpang	$7{,}7800 \times 10^{-4}$	0,0132	$5{,}5440 \times 10^{-3}$
22 Penumpang	$7{,}0600 \times 10^{-4}$	0,0136	$3{,}3700 \times 10^{-3}$
44 Penumpang	$8{,}4300 \times 10^{-4}$	0,0145	$5{,}9450 \times 10^{-3}$
66 Penumpang	$7{,}9500 \times 10^{-4}$	0,0158	$4{,}3470 \times 10^{-3}$
88 Penumpang	$8{,}4900 \times 10^{-4}$	0,0148	$6{,}2150 \times 10^{-3}$

Tabel 4.4 Batas Kecepatan, Percepatan dan Input Kontrol Pengontrol PID PSO

Kondisi	Kecepatan (m/s)		Percepatan (m/s^2)		Input Kontrol (kN)	
	Min	Max	Min(-)	Max	Min(-)	Max
0 Penumpang	0,000	4,450	0,9489	0,9463	59,4172	87,6111
22 Penumpang	0,000	4,450	0,9491	0,9462	61,5815	92,1349
44 Penumpang	0,000	4,450	0,9488	0,9464	63,9553	95,2673
66 Penumpang	0,000	4,450	0,9492	0,9468	66,4487	99,8697
88 Penumpang	0,000	4,450	0,9489	0,9461	68,9264	102,981

PENGONTROL PID PSO – LOGIKA *FUZZY* SUGENO (1)

Hasil Simulasi Pengontrol Kecepatan



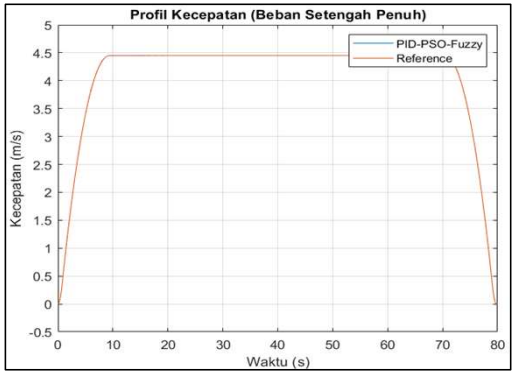
Gambar 4.13 Profil Kecepatan Total untuk Semua Variasi Jumlah Penumpang

Hasil Simulasi Pengontrol Posisi

Gambar 4.14 Profil Jarak/Posisi Total untuk Semua Variasi Jumlah Penumpang

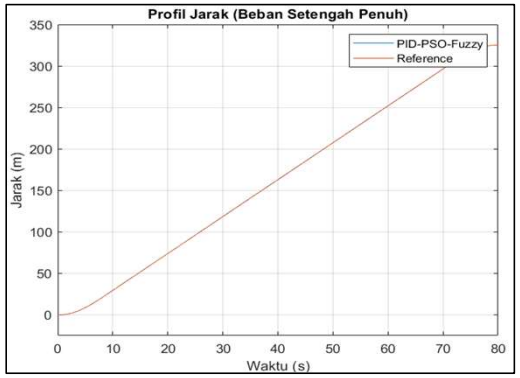
PENGONTROL PID PSO – LOGIKA *FUZZY* SUGENO (2)

Hasil Simulasi Kondisi 44 Penumpang



Gambar 4.15 Profil Kecepatan Total

Gambar 4.16 Profil Kecepatan Akhir



Gambar 4.17 Profil Posisi Total

Gambar 4.18 Profil Posisi Akhir

Tabel 4.5 Nilai Waktu Berhenti, RMSE Kecepatan dan Selisih Jarak Akhir Pengontrol PID PSO – *Fuzzy*

Kondisi	RMSE Kecepatan	RMSE Posisi	Selisih Jarak Akhir (m)
0 Penumpang	$7{,}7100 \times 10^{-4}$	0,0131	$5{,}5220 \times 10^{-3}$
22 Penumpang	$7{,}0300 \times 10^{-4}$	0,0136	$3{,}3340 \times 10^{-3}$
44 Penumpang	$7{,}9500 \times 10^{-4}$	0,0136	$5{,}6370 \times 10^{-3}$
66 Penumpang	$7{,}2500 \times 10^{-4}$	0,0140	$3{,}4460 \times 10^{-3}$
88 Penumpang	$8{,}1600 \times 10^{-4}$	0,0140	$5{,}7480 \times 10^{-3}$

Tabel 4.6 Batas Kecepatan, Percepatan dan Input Kontrol Pengontrol PID PSO – *Fuzzy*

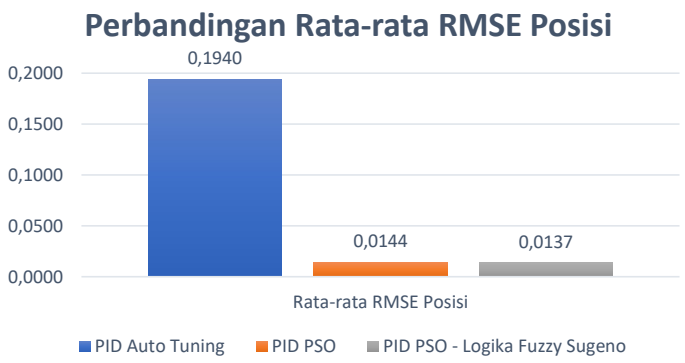
Kondisi	Kecepatan (m/s)		Percepatan (m/s^2)		Input Kontrol (kN)	
	Min	Max	Min(-)	Max	Min(-)	Max
0 Penumpang	0,000	4,450	0,9489	0,9463	59,4175	87,6162
22 Penumpang	0,000	4,450	0,9490	0,9463	61,5719	92,1302
44 Penumpang	0,000	4,450	0,9489	0,9461	63,9629	95,2983
66 Penumpang	0,000	4,450	0,9491	0,9461	66,4350	99,8968
88 Penumpang	0,000	4,450	0,9489	0,9459	68,9301	102,999

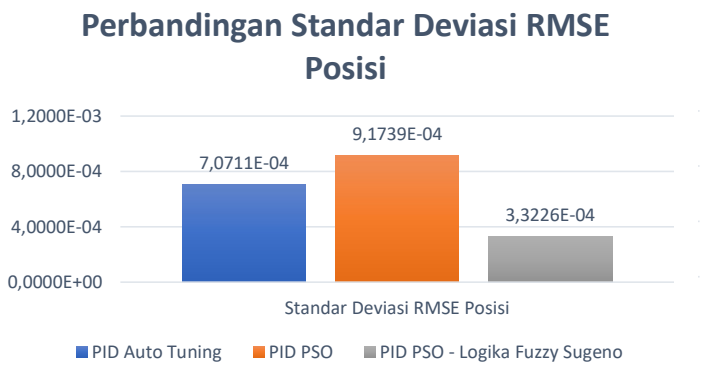
ANALISIS PERBANDINGAN KETIGA PENGONTROL (1)

PENGUJIAN VARIASI JUMLAH PENUMPANG (0, 22, 44, 66, DAN 88 PENUMPANG) DENGAN MASSA PENUMPANG 60 Kg

Tabel 4.7 Hasil Performansi Pengontrol untuk Semua Variasi Jumlah Penumpang

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	0,0433	0,1940	0,5931	$2,1354 \times 10^{-4}$	$7,0710 \times 10^{-4}$	0,0017
PID PSO	$7,9400 \times 10^{-4}$	0,0143	0,0050	$5,1820 \times 10^{-5}$	$9,1738 \times 10^{-4}$	0,0011
PID PSO - Logika Fuzzy Sugeno	$7,6200 \times 10^{-4}$	0,0136	0,0047	$4,2275 \times 10^{-5}$	$3,3226 \times 10^{-4}$	0,0011



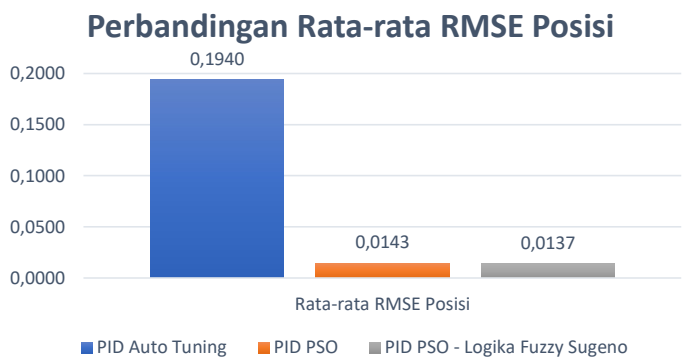


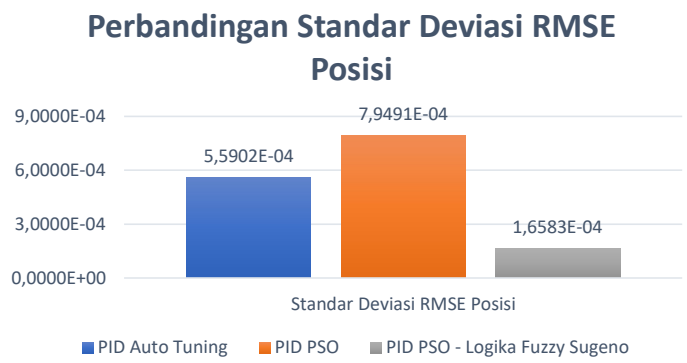
ANALISIS PERBANDINGAN KETIGA PENGONTROL (2)

PENGUJIAN VARIASI JUMLAH PENUMPANG LAINNYA (11, 33, 55, DAN 77 PENUMPANG) DENGAN MASSA PENUMPANG 60 Kg

Tabel 4.8 Hasil Performansi Pengontrol untuk Variasi Jumlah Penumpang Lainnya

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	0,0432	0,1939	0,5930	$1,1200 \times 10^{-4}$	$5,5901 \times 10^{-4}$	0,0013
PID PSO	$7,8300 \times 10^{-4}$	0,0142	0,0047	$5,0000 \times 10^{-5}$	$7,9490 \times 10^{-4}$	0,0009
PID PSO - Logika Fuzzy Sugeno	$7,7500 \times 10^{-4}$	0,0136	0,0050	$4,5300 \times 10^{-5}$	$1,6583 \times 10^{-4}$	0,0010



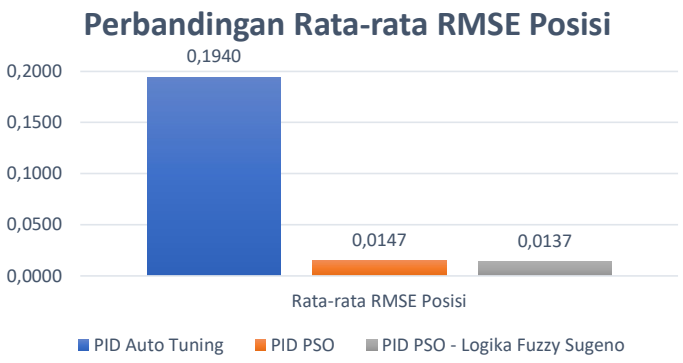


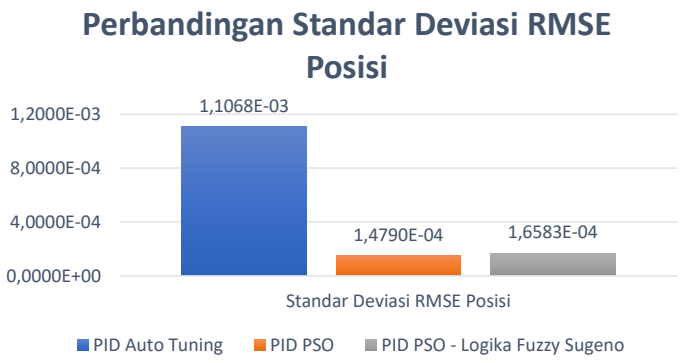
ANALISIS PERBANDINGAN KETIGA PENGONTROL (3)

PENGUJIAN VARIASI MASSA PENUMPANG LAINNYA (90%, 95%, 105%, DAN 110% DARI MASSA AWAL) SAAT KONDISI 44 PENUMPANG

Tabel 4.9 Hasil Performansi Pengontrol untuk Variasi Massa Penumpang Lainnya

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	0,0432	0,1940	0,5931	$2,3848 \times 10^{-4}$	$1,1067 \times 10^{-3}$	0,0036
PID PSO	$7,8100 \times 10^{-4}$	0,0147	0,0042	$3,2457 \times 10^{-5}$	$1,4790 \times 10^{-4}$	0,0009
PID PSO - Logika Fuzzy Sugeno	$7,7475 \times 10^{-4}$	0,0136	0,0050	$3,3551 \times 10^{-5}$	$1,6583 \times 10^{-4}$	0,0009





ANALISIS PERBANDINGAN KETIGA PENGONTROL (4)

Kriteria Penilaian:

Batas percepatan -1 m/s² sampai 1 m/s²

Batas kecepatan 0 m/s sampai 4,5 m/s dan tidak boleh bernilai negatif

Posisi akhir ±10 cm terhadap 325 m

Tabel 4.10 Hasil Perbandingan Kriteria Operasional pada PengujianVariasi Jumlah Penumpang

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

Variasi Jumlah Penumpang Sesuai Perancangan (0P,22P,44P,66P,88P)

Tabel 4.11 Hasil Perbandingan Kriteria Operasional pada Pengujian Variasi Jumlah Penumpang Lainnya

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

Variasi Jumlah Penumpang Lainnya / Diluar Perancangan (11P,33P,55P,77P)

Tabel 4.12 Hasil Perbandingan Kriteria Operasional pada Pengujian Variasi Massa Penumpang Lainnya

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	3/4
Kesesuaian posisi akhir	0/4	4/4	4/4

Variasi Massa Penumpang Lainnya / Diluar Perancangan (90%,95%,105%,110%)

Pengontrol PID PSO dengan logika *fuzzy* Sugeno adalah pengontrol terbaik untuk mengontrol kereta APMS pada tugas akhir ini

5. PENUTUP

KESIMPULAN, SARAN, REFERENSI DAN LAMPIRAN

KESIMPULAN

1. Perancangan **pengontrol PID** menggunakan **algoritma PSO** telah dilakukan. Hasil simulasi pengontrol PID PSO pada model kereta APMS menunjukan bahwa sistem **mampu mengikuti referensi** dengan baik. Pengontrol PID PSO **mampu menangani ketidakpastian jumlah penumpang** dengan rata-rata nilai RMSE kecepatan sebesar $7{,}9400 \times 10^{-4}$ dan standar deviasi nilai RMSE kecepatan sebesar $5{,}1820 \times 10^{-5}$ dengan rata-rata selisih posisi akhir sebesar 0,0050 m dan standar deviasi selisih posisi akhir sebesar 0,0011 m.

2. Perancangan **pengontrol logika *fuzzy*** metode **Sugeno** telah dilakukan dan menghasilkan *surface control* yang adaptif terhadap ketidakpastian jumlah penumpang. Pengontrol logika *fuzzy* Sugeno dikombinasikan dengan parameter PID PSO saat kondisi 0 penumpang. Hasil simulasi pengontrol PID PSO dan logika *fuzzy* Sugeno pada model kereta APMS menunjukan bahwa sistem **mampu mengikuti referensi** dengan lebih baik dari pengontrol PID PSO saja. Pengontrol PID PSO dengan logika *fuzzy* Sugeno **mampu menangani ketidakpastian jumlah penumpang** dengan rata-rata nilai RMSE kecepatan sebesar $7{,}6200 \times 10^{-4}$, standar deviasi nilai RMSE kecepatan sebesar $4{,}2275 \times 10^{-5}$ dengan rata-rata selisih posisi akhir sebesar 0,0047 m dan standar deviasi selisih posisi akhir sebesar 0,0011 m.

SARAN

1. Perancangan profil kecepatan dengan metode optimasi untuk meminimalkan waktu maupun energi yang digunakan sehingga profil akan merepresentasikan referensi kereta ideal yang diharapkan.

2. Penambahan parameter lingkungan yang mempengaruhi ketidakpastian perjalanan kereta seperti gradien ketinggian jalur dan sudut tikungan jalur dalam pemodelan dinamika kereta maupun simulasi.

3. Memastikan kemampuan maksimal kereta yang digunakan seperti gaya traksi maksimal maupun sensitivitas dari sensor kecepatan sehingga mempermudah dalam menentukan batas pencarian parameter jika digunakan sebuah algoritma optimasi seperti PSO.

REFERENSI

[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]	Glikson, A.Y., Directional Thought and Evolution, Springer Cham, 2019.
[19]	Rouse, M., Fuzzy Logic, Programming, 2016.
[20]	Wang, Li-Xin, "A Course in Fuzzy Systems and Control International Edition," 1997.
[21]	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.
[22]	Khalil, H. K., and Grizzle J. W., "Nonlinear Systems," in Prentice Hall Upper Saddle River, NJ., 2002.
[23]	Widaningsih, Sri, "Analisis Perbandingan Metode Fuzzy Tsukamoto, Mamdani dan Sugeno dalam Pengambilan Keputusan Penentuan Jumlah Distribusi Raskin di Bulog Sub. Divisi Regional (Drive) Cianjur," Informatika dan Manajemen STMIK, vol. 11, no. 1, p. 56, Mei 2017.

LAMPIRAN (1)

Hasil batas percepatan, batas kecepatan, dan selisih posisi akhir pada pengujian variasi jumlah penumpang lainnya (diluar perancangan)

Tabel L.1 Hasil Pengontrol PID *Auto Tuning*

Kondisi	Percepatan (m/s^2)		Kecepatan (m/s)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min(-)	Max	Min	Max	
11P	0,9459	0,9863	-0,1351	4,5151	0,5949
33P	0,9459	0,9889	-0,1349	4,5149	0,5937
55P	0,9459	0,9914	-0,1346	4,5148	0,5925
77P	0,9459	0,9938	-0,1343	4,5147	0,5912

Tabel L.2 Hasil Pengontrol PID PSO

Kondisi	Percepatan (m/s^2)		Kecepatan (m/s)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min(-)	Max	Min	Max	
11P	0,9491	0,9463	0	4,4500	0,0033
33P	0,9490	0,9461	0	4,4500	0,0057
55P	0,9490	0,9466	0	4,4500	0,0055
77P	0,9491	0,9465	0	4,4500	0,0042

Tabel L.3 Hasil Pengontrol PID PSO – Logika *Fuzzy* Sugeno

Kondisi	Percepatan (m/s^2)		Kecepatan (m/s)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min(-)	Max	Min	Max	
11P	0,9490	0,9464	0	4,4500	0,0033
33P	0,9489	0,9461	0	4,4500	0,0056
55P	0,9489	0,9460	0	4,4500	0,0056
77P	0,9489	0,9459	0	4,4500	0,0057

LAMPIRAN (2)

Hasil batas percepatan, batas kecepatan, dan selisih posisi akhir pada pengujian variasi massa penumpang lainnya (diluar perancangan)

Tabel L.4 Hasil Pengontrol PID *Auto Tuning*

Kondisi	Kecepatan (m/s)		Percepatan (m/s²)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min	Max	Min(-)	Max	
90%	-0,1344	4,5140	0,9459	0,9902	0,5885
95%	-0,1346	4,5150	0,9459	0,9902	0,5908
105%	-0,1349	4,5150	0,9459	0,9902	0,5954
110%	-0,1351	4,5150	0,9459	0,9902	0,5977

Tabel L.5 Hasil Pengontrol PID PSO

Kondisi	Kecepatan (m/s)		Percepatan (m/s²)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min	Max	Min(-)	Max	
90%	0	4,4500	0,9488	0,9465	0,0059
95%	$-1{,}2 \times 10^{-5}$	4,4500	0,9490	0,9468	0,0036
105%	$-1{,}3 \times 10^{-5}$	4,4500	0,9490	0,9468	0,0036
110%	$-1{,}4 \times 10^{-5}$	4,4500	0,9490	0,9468	0,0036

Tabel L.6 Hasil Pengontrol PID PSO – Logika *Fuzzy* Sugeno

Kondisi	Kecepatan (m/s)		Percepatan (m/s²)		Selisih Posisi Akhir (m)
	Min	Max	Min(-)	Max	
90%	0	4,4500	0,9490	0,9461	0,0056
95%	0	4,4500	0,9490	0,9461	0,0056
105%	-5×10^{-6}	4,4500	0,9490	0,9462	0,0034
110%	0	4,4500	0,9490	0,9461	0,0056

TERIMAKASIH