

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

Muhammad Shafwan Faturrahman, Adi Dwi Yulianto, Ir. Endra Joelianto, Ph.D., dan Augie Widyotriatmo, S.T., M.T., Ph.D.
Program Studi Teknik Fisika – Institut Teknologi Bandung
Januari, 2021

ABSTRAK

Perkembangan teknologi telah memberikan kemajuan terhadap sistem transportasi, salah satunya adalah kereta *Automated People Mover System* (APMS) Bandara Internasional Soekarno-Hatta. APMS dirancang agar dapat bekerja secara otomatis. Namun, saat ini masih dioperasikan secara manual karena pengontrol kecepatan yang digunakan pada subsistem *Automatic Train Operation* (ATO) pada sistem persinyalan *Communication Based Train Control* (CBTC) belum optimal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan 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. Kontrol kecepatan dirancang menggunakan pengontrol *PID Particle Swarm Optimization* dengan fungsi objektif untuk meminimalkan *error* kecepatan dan posisi serta dihubungkan secara paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno untuk menangani ketidakpastian jumlah penumpang.

Simulasi pengontrol terdiri dari *PID auto tuning* sebagai pembanding, *PID PSO* dan *PID PSO* paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno serta dilakukan terhadap lima variasi jumlah penumpang untuk melihat perbandingan performansi pengontrol dalam menangani ketidakpastian jumlah penumpang. Hasil simulasi menunjukkan 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.

1 PENDAHULUAN

Sistem transportasi merupakan salah satu aspek penting dalam kehidupan manusia untuk berpindah dari satu tempat ke tempat lain. Kemajuan sistem dan teknologi transportasi mendorong Indonesia memperbaiki sistem yang ada menjadi lebih pintar dan terintegrasi, salah satunya kereta *Automated People Mover System* (APMS) Bandara Internasional Soekarno-Hatta. Kereta ini menggunakan teknologi persinyalan *Communication Based Train Control* (CBTC). Selain mengatur keamanan perjalanan, CBTC mampu berinteraksi dengan kereta dalam memberi gaya traksi maupun pengereman. Dalam pengoperasiannya, CBTC masuk ke dalam subsistem *Automatic Train Operation* (ATO) untuk mengatur pergerakan kereta secara otomatis. Namun, operasional kereta masih manual karena profil dan kontrol kecepatan kereta belum memberikan kinerja optimal sesuai standar operasional dan adanya ketidakpastian seperti perubahan jumlah penumpang. Akibatnya kereta belum mampu berhenti tepat waktu di pintu terminal dengan selisih posisi akhir kecil sesuai batas toleransi.

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

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

Sasaran perancangan kontrol kecepatan optimal kereta APMS ini adalah sebagai berikut:

1. Kereta mampu mengikuti profil referensi dengan baik.
2. Kereta mampu berhenti tepat di pintu terminal.
3. Pengontrol kereta mampu mengatasi ketidakpastian jumlah penumpang.

2 KONSEP / TEORI DASAR

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 terus-menerus secara pasti. Durasi perjalanan relatif singkat dengan banyak transit. Salah satu transportasi yang cocok dengan sistem APMS ini adalah kereta.

2.2 Profil Kecepatan dan Kontrol Kecepatan pada Subsistem Automatic Train Operation (ATO)

Kontrol kereta secara otomatis dilakukan dengan memberikan profil kecepatan pada subsistem ATO pada sistem persinyalan CBTC sebagai referensi kereta. Perancangan profil kereta menggunakan batas dan kondisi batas parameter operasional kereta. Selanjutnya pengontrol dirancang untuk mengendalikan perjalanan kereta sesuai dengan referensi menggunakan metode PID PSO – Fuzzy.

2.3 PID Particle Swarm Optimization (PSO)

Pengontrol PID adalah suatu jenis pengontrol yang menggunakan sistem umpan balik dalam menghitung nilai *error* berupa selisih nilai yang diinginkan (*set point*) dengan nilai yang dimanipulasi (*manipulated process variable*). Sementara algoritma PSO memanfaatkan setiap agen dalam sebuah koloni (*swarm*) untuk mencari titik minimum berdasarkan fungsi objektif ^[2] yang terdiri dari RMSE kecepatan dan posisi sehingga PSO mampu mencari parameter Kp, Ki, dan Kd terbaik.

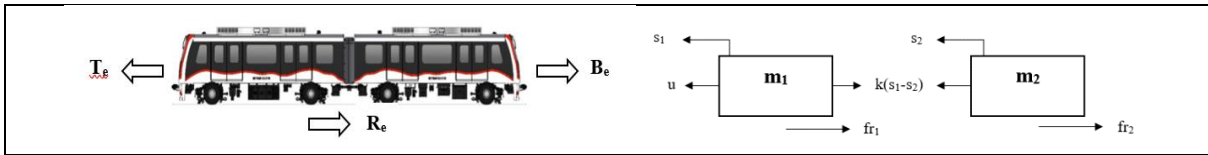
2.4 Logika Fuzzy Sugeno

Logika *fuzzy* adalah sebuah bentuk pendekatan untuk melakukan komputasi berdasarkan derajat kebenaran (*degree of truth*) dengan nilai diantara 1 dan 0. Proses *fuzzy* terdiri dari fuzifikasi, interferensi dan defuzifikasi. *Fuzzy* dirancang dengan metode Sugeno orde nol dengan masukan berupa himpunan *fuzzy* dan keluaran berupa konstanta^[3].

3 RANCANGAN / PERCOBAAN / SIMULASI

3.1 Pemodelan Sistem Dinamika Kereta

Model perjalanan kereta dari dan menuju setiap terminal dan stasiun dapat diturunkan dari persamaan gerak kereta dan *free body diagram* sistem kereta dengan menggunakan analisis Hukum II Newton dan *feedback linearization*.



Gambar 3.1 Diagram Gaya pada Kereta APMS

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

Variabel u adalah input kontrol yang menyatakan selisih gaya traksi dan gaya pengereman, positif menyatakan percepatan dan negatif menyatakan pengereman. Dari Gambar 3.1, persamaan gerak kereta dapat diturunkan menjadi persamaan (3.2) dan (3.3)

$$u - k(s_1 - s_2) - fr_1 = m_1 \frac{dv_1}{dt} \quad (3.2)$$

$$k(s_1 - s_2) - fr_2 = m_2 \frac{dv_2}{dt} \quad (3.3)$$

Variabel fr adalah gaya hambatan kereta berupa *mechanical resistance* dan *aerodynamics drag*:

$$fr_i = \mu m_i g v_i + m_i g (B v_i + C v_i^2) \quad (3.4)$$

Selanjutnya ditentukan variabel keadaan $x_1 = s_1, x_2 = \dot{s}_1 = v_1, x_3 = s_2, x_4 = \dot{s}_2 = v_2$ dan $\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = \frac{dv_1}{dt}, \dot{x}_3 = x_4, \dot{x}_4 = \frac{dv_2}{dt}$ maka diperoleh persamaan ruang keadaan (3.5).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k/m_1 & -\mu g - gB - gCx_2 & k/m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k/m_2 & 0 & -k/m_2 & -\mu g - gB - gCx_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (3.5)$$

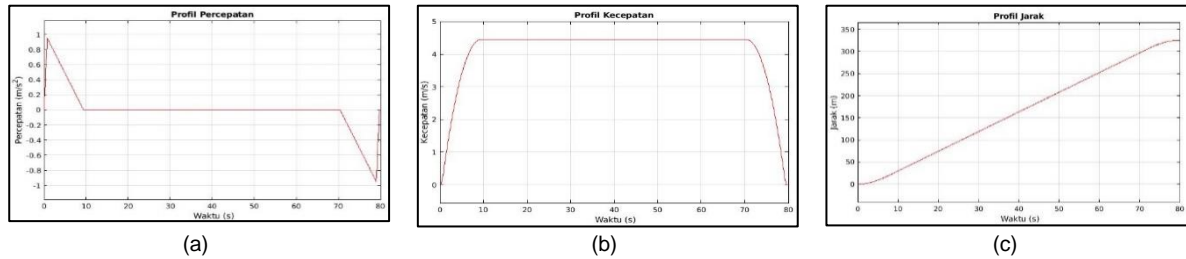
Dengan asumsi model kereta ideal, *input-state feedback linearization*^[1] menggunakan $u=m_1gCx_2^2+m_1U$ dan diperoleh persamaan ruang keadaan dalam bentuk linear (3.6).

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

Variabel x_1 : posisi gerbong 1, x_2 : kecepatan gerbong 1, x_3 : posisi gerbong 2, x_4 : kecepatan gerbong 2.

3.2 Perancangan Profil Kecepatan Kereta

Profil referensi kereta dirancang berdasarkan batas operasional percepatan -1 m/s^2 sampai 1 m/s^2 , batas operasional kecepatan 0 m/s sampai $4,5 \text{ m/s}$ dengan kondisi batas $v(0)=0 \text{ m/s}$, $v(80)=0 \text{ m/s}$, $s(0)=0 \text{ m}$ dan $s(80)=325 \text{ m}$. Pertama, dilakukan pembentukan profil percepatan berdasarkan kondisi batas tersebut. Selanjutnya, profil kecepatan dan profil jarak diperoleh dengan integral.



Gambar 3.2 Profil Kereta APMS (a) Percepatan (b) Kecepatan (c) Jarak

3.3 Perancangan Kontrol Kecepatan Kereta

Pertama, perancangan pengontrol PID dengan algoritma PSO menggunakan jumlah partikel 100, jumlah iterasi maksimal 150, kriteria pemberhentian minimal 30 iterasi, konstanta batas 30000 dengan batas atas $[1, 1, 0, 22, 0, 04]$ dan batas bawah $[0, 0, 0]$ untuk kedua pengontrol, ω sebesar 0,2, c_1 sebesar 1,49, dan c_2 sebesar 1,49. Fungsi objektif terdiri dari RMSE kecepatan dan posisi:

$$J = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [r_{2_i}(t) - x_{2_i}(t)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [r_{1_i}(t) - x_{1_i}(t)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

dengan batasan:

$$0 \leq x_2(t) \leq 4,5 \text{ (m/s)} \quad (3.8)$$

$$x_2(t_f) < 0,0005 \text{ (m/s)} \quad (3.9)$$

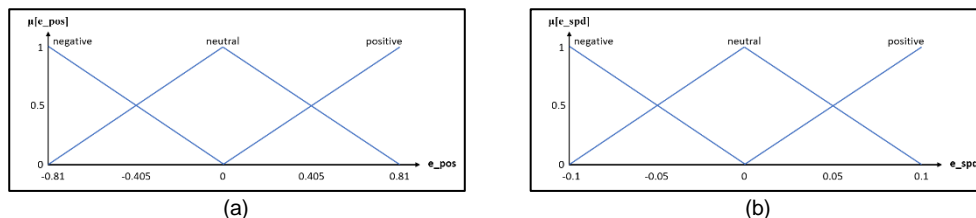
$$324,99 < x_1(t_f) < 325 \text{ (m)} \quad (3.10)$$

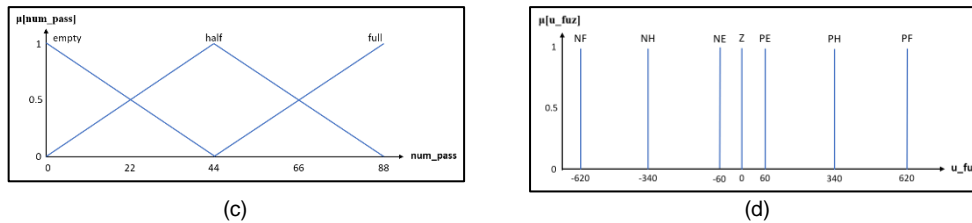
Diperoleh parameter PID PSO untuk pengontrol kecepatan dan posisi pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Parameter PID PSO

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

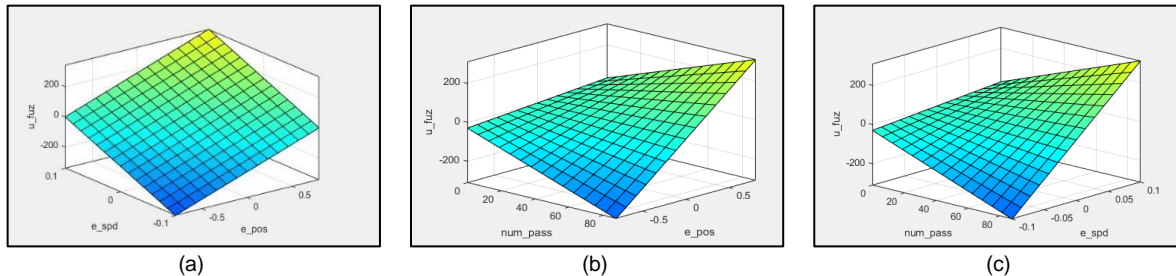
Kedua, logika *fuzzy* Sugeno dirancang dengan variabel masukan *error* kecepatan, *error* posisi dan jumlah penumpang dengan fungsi keanggotaan representasi kurva segitiga serta satu keluaran.





Gambar 3.3 Fungsi Keanggotaan Fuzzy (a) e_pos (b) e_spd (c) num_pass (d) u_fuz

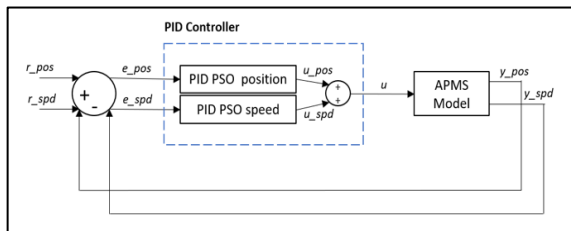
Terdapat dua pengontrol dalam satu fuzzy untuk kecepatan dan posisi. Rancangan aturan fuzzy menggunakan operator logika if-AND-AND-then dimana tiap *error* dihubungkan dengan variasi penumpang dan divariasikan dengan semua kemungkinan *error* yang lain sehingga menghasilkan *surface control* dengan teknik defuzzifikasi *weighted average* pada Gambar 3.4.



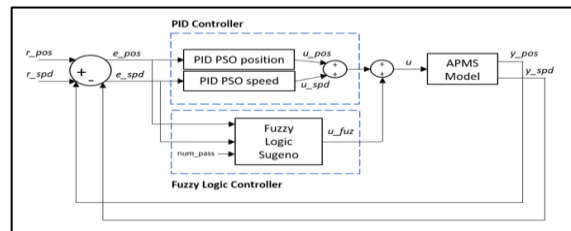
Gambar 3.4 Surface Control Fuzzy (a) e_pos - e_spd - u_fuz (b) e_pos - num_pass - u_fuz (c) e_spd - num_pass - u_fuz

3.4 Rancangan Simulasi Pengontrol

Terdapat tiga pengontrol yaitu PID *auto tuning* dari PID *tuner* perangkat lunak Matlab sebagai pembanding, PID PSO, dan PID PSO ketika jumlah penumpang kosong paralel dengan logika fuzzy Sugeno. Masing-masing pengontrol disimulasikan terhadap tiga pengujian variasi jumlah penumpang sesuai perancangan (0, 22, 44, 66, 88), variasi jumlah penumpang diluar perancangan (11, 33, 55, 77), dan variasi massa penumpang diluar perancangan (90%, 95%, 105%, dan 110% dari 60 Kg).



Gambar 3.5 Simulasi Pengontrol PID PSO



Gambar 3.6 Simulasi Pengontrol PID PSO (0P) – Fuzzy

4 HASIL DAN ANALISIS

4.1 Hasil Pengontrol PID Auto Tuning

Tabel 4.1 Hasil Simulasi Pengontrol PID Auto Tuning

Kondisi	RMSE Kecepatan	RMSE Posisi	Selisih Posisi Akhir (m)	Batas Kecepatan (m/s)		Batas Percepatan (m/s ²)	
				Min	Max	Min	Max
0 Penumpang	$4,340 \times 10^{-2}$	0,1950	0,5956	-0,1350	4,515	-0,9459	0,9850
22 Penumpang	$4,370 \times 10^{-2}$	0,1945	0,5944	-0,1350	4,515	-0,9459	0,9876
44 Penumpang	$4,320 \times 10^{-2}$	0,1940	0,5931	-0,1350	4,515	-0,9459	0,9901
66 Penumpang	$4,320 \times 10^{-2}$	0,1935	0,5919	-0,1350	4,515	-0,9459	0,9926
88 Penumpang	$4,310 \times 10^{-2}$	0,1930	0,5907	-0,1340	4,515	-0,9459	0,9950

Kereta belum mampu mengikuti referensi kecepatan dan posisi dengan baik karena terdapat *overshoot* dan *undershoot*. Kereta belum mampu memenuhi batas kecepatan operasional. Secara keseluruhan, pengontrol PID *auto tuning* belum mampu mengendalikan perjalanan kereta dengan baik karena masih melanggar ketentuan dan batas perancangan. Oleh karena itu, hasil pengontrol PID PSO dan PID PSO paralel dengan logika fuzzy Sugeno diharapkan jauh lebih baik.

4.2 Hasil Pengontrol PID Particle Swarm Optimization

Tabel 4.2 Hasil Simulasi Pengontrol PID PSO

Kondisi	RMSE Kecepatan	RMSE Posisi	Selisih Posisi Akhir (m)	Batas Kecepatan (m/s)		Batas Percepatan (m/s ²)	
				Min	Max	Min	Max
0 Penumpang	$7,780 \times 10^{-4}$	$1,327 \times 10^{-2}$	$5,544 \times 10^{-3}$	0	4,450	-0,9489	0,9463
22 Penumpang	$7,060 \times 10^{-4}$	$1,367 \times 10^{-2}$	$3,370 \times 10^{-3}$	0	4,450	-0,9491	0,9462
44 Penumpang	$8,430 \times 10^{-4}$	$1,458 \times 10^{-2}$	$5,945 \times 10^{-3}$	0	4,450	-0,9488	0,9464
66 Penumpang	$7,950 \times 10^{-4}$	$1,583 \times 10^{-2}$	$4,347 \times 10^{-3}$	0	4,450	-0,9492	0,9468
88 Penumpang	$8,490 \times 10^{-4}$	$1,487 \times 10^{-2}$	$6,215 \times 10^{-3}$	0	4,450	-0,9489	0,9461

Kereta mampu mengikuti referensi kecepatan dan posisi dengan RMSE kecil serta mampu memenuhi batas kecepatan dan percepatan operasional dengan baik.

4.3 Hasil Pengontrol PID *Particle Swarm Optimization* Paralel dengan Logika Fuzzy Sugeno

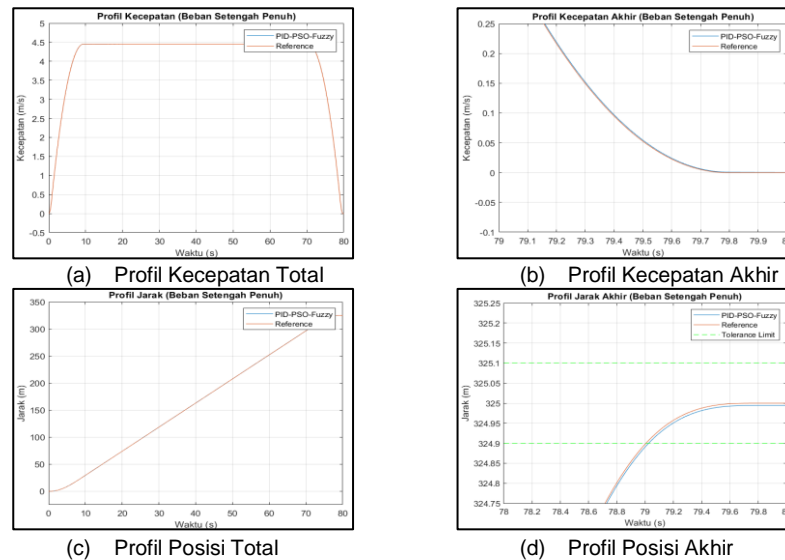
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Pengontrol PID PSO Paralel dengan Logika Fuzzy Sugeno

Kondisi	RMSE Kecepatan	RMSE Posisi	Selisih Posisi Akhir (m)	Batas Kecepatan (m/s)		Batas Percepatan (m/s ²)	
				Min	Max	Min	Max
0 Penumpang	$7,710 \times 10^{-4}$	$1,315 \times 10^{-2}$	$5,522 \times 10^{-3}$	0	4,450	-0,9489	0,9463
22 Penumpang	$7,030 \times 10^{-4}$	$1,360 \times 10^{-2}$	$3,334 \times 10^{-3}$	0	4,450	-0,9490	0,9463
44 Penumpang	$7,950 \times 10^{-4}$	$1,360 \times 10^{-2}$	$5,637 \times 10^{-3}$	0	4,450	-0,9489	0,9461
66 Penumpang	$7,250 \times 10^{-4}$	$1,404 \times 10^{-2}$	$3,446 \times 10^{-3}$	0	4,450	-0,9491	0,9461
88 Penumpang	$8,160 \times 10^{-4}$	$1,402 \times 10^{-2}$	$5,748 \times 10^{-3}$	0	4,450	-0,9489	0,9459

Kereta mampu mengikuti referensi kecepatan dan posisi dengan RMSE lebih kecil dari pengontrol PID PSO saja serta mampu memenuhi batas kecepatan dan percepatan operasional dengan baik.

4.4 Analisis Perbandingan Ketiga Pengontrol

Ilustrasi profil terbaik diperoleh dari hasil simulasi pengontrol PID PSO paralel dengan logika fuzzy Sugeno pada kondisi 44 penumpang seperti pada Gambar 4.1.

**Gambar 4.1 Profil Hasil Pengontrol PID PSO – Fuzzy Kondisi 44 Penumpang**

Dari Gambar 4.1 terlihat bahwa kecepatan dan posisi kereta mampu mengikuti profil referensi dengan baik. Kereta mampu berhenti di detik ke-80 dengan selisih posisi akhir kecil dalam batas toleransi. Selanjutnya, hasil perbandingan performansi untuk setiap pengujian ditampilkan pada Tabel 4.4-4.6. P1: pengontrol PID *auto tuning*, P2: pengontrol PID PSO, P3: pengontrol PID PSO – Fuzzy.

Tabel 4.4 Hasil Performansi Pengujian 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	
P1	$4,332 \times 10^{-2}$	0,1940	0,5931	$2,135 \times 10^{-4}$	$7,071 \times 10^{-4}$	$1,739 \times 10^{-3}$
P2	$7,940 \times 10^{-4}$	$1,438 \times 10^{-2}$	$5,084 \times 10^{-3}$	$5,182 \times 10^{-5}$	$9,174 \times 10^{-4}$	$1,068 \times 10^{-3}$
P3	$7,620 \times 10^{-4}$	$1,366 \times 10^{-2}$	$4,737 \times 10^{-3}$	$4,228 \times 10^{-5}$	$3,323 \times 10^{-4}$	$1,103 \times 10^{-3}$

Tabel 4.5 Hasil Performansi Pengujian 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	
P1	$4,325 \times 10^{-2}$	0,1939	0,5931	$1,118 \times 10^{-4}$	$5,590 \times 10^{-4}$	$1,375 \times 10^{-3}$
P2	$7,830 \times 10^{-4}$	$1,428 \times 10^{-2}$	$4,733 \times 10^{-3}$	$4,995 \times 10^{-5}$	$7,949 \times 10^{-4}$	$9,901 \times 10^{-4}$
P3	$7,750 \times 10^{-4}$	$1,365 \times 10^{-2}$	$5,078 \times 10^{-3}$	$4,530 \times 10^{-5}$	$1,658 \times 10^{-4}$	$1,024 \times 10^{-3}$

Tabel 4.6 Hasil Performansi Pengujian 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	
P1	$4,323 \times 10^{-2}$	0,1940	0,5931	$2,385 \times 10^{-4}$	$1,107 \times 10^{-3}$	$3,637 \times 10^{-3}$
P2	$7,810 \times 10^{-4}$	$1,473 \times 10^{-2}$	$4,239 \times 10^{-3}$	$3,246 \times 10^{-5}$	$1,479 \times 10^{-4}$	$9,698 \times 10^{-4}$
P3	$7,747 \times 10^{-4}$	$1,365 \times 10^{-2}$	$5,076 \times 10^{-3}$	$3,355 \times 10^{-5}$	$1,658 \times 10^{-4}$	$9,664 \times 10^{-4}$

Dari hasil perbandingan pengontrol disetiap pengujian terlihat bahwa P2 dan P3 memberikan performansi jauh lebih baik dari P1. P3 memberikan performansi yang lebih baik dari P2. Selanjutnya, analisis dilakukan terhadap tiga kriteria operasional kereta yaitu batas percepatan (-1 m/s^2 sampai 1 m/s^2), batas kecepatan (0 m/s sampai $4,5 \text{ m/s}$ dan tidak boleh negatif), serta selisih posisi akhir ($\pm 10 \text{ cm}$ terhadap 325 m) untuk masing-masing pengujian dan masing-masing pengontrol seperti ditampilkan pada Tabel 4.7. Angka pada Tabel 4.7 menyatakan jumlah variasi yang memenuhi kriteria per jumlah variasi total dalam masing-masing pengujian.

Tabel 4.6 Hasil Perbandingan Kriteria Operasional Kereta

Kriteria	Pengujian 1			Pengujian 2			Pengujian 3		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Batas percepatan	5/5	5/5	5/5	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4
Batas kecepatan	0/5	5/5	5/5	0/4	4/4	4/4	0/4	1/4	3/4
Selisih posisi akhir	0/5	5/5	5/5	0/4	4/4	4/4	0/4	4/4	4/4

Pengujian 1 menunjukan bahwa P2 dan P3 memenuhi semua kriteria operasional kereta. Sedangkan P1 hanya memenuhi kriteria percepatan operasional kereta. Pengujian 2 menunjukan hasil yang serupa seperti pengujian 1. Pengujian 3 menunjukan hasil yang serupa seperti pengujian 1 tetapi hanya terdapat beberapa variasi P2 dan P3 yang memenuhi kriteria kecepatan operasional kereta (P3 lebih banyak). Dapat disimpulkan bahwa P3 atau pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno adalah pengontrol terbaik untuk mengontrol kereta APMS pada tugas akhir ini.

5 KESIMPULAN

- Hasil simulasi pengontrol PID PSO menunjukan bahwa sistem mampu mengikuti referensi tanpa melanggar batas operasional dan 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 $5,084 \times 10^{-3} \text{ m}$ dan standar deviasi selisih posisi akhir sebesar $1,068 \times 10^{-3} \text{ m}$.
- Hasil simulasi pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy* Sugeno menunjukan bahwa sistem mampu mengikuti referensi tanpa melanggar batas operasional dan 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 $4,737 \times 10^{-3} \text{ m}$ dan standar deviasi selisih posisi akhir sebesar $1,103 \times 10^{-3} \text{ m}$.

6 DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suryana, Lucas Elbert., "Pengontrol PID Robas H^∞ Integral-Backstepping dengan Strategi Kontrol Optimal pada Kereta Automated People Movers," p. 2, Maret 2019.
- [2] Kennedy, Eberhart., "Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, Australia, 1995.
- [3] Sugeno, Takagi., "Fuzzy Identification of System and its Application to Modeling and Control," *IEEE Transactions of System, Man, and Cybernetics*, 1985.