

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 (13316006) dan Adi Dwi Yulianto (13316084)

Ir. Endra Joelianto, Ph.D. dan Augie Widyotriatmo, S.T., M.T., Ph.D.

1. LATAR BELAKANG



Kemajuan sistem dan teknologi transportasi publik berbasis rel seperti pada kereta *Automated People Mover System* (APMS) Bandara Internasional Soekarno-Hatta.

Kereta ini dirancang untuk beroperasi secara otomatis. Namun, saat ini kereta masih dioperasikan secara manual.

Hal ini dikarenakan profil dan kontrol kecepatan kereta belum memberikan kinerja optimal sesuai standar operasional serta adanya ketidakpastian seperti perubahan massa kereta akibat perubahan jumlah penumpang.

Akibatnya, kereta belum mampu berhenti tepat waktu di pintu terminal dengan selisih posisi akhir kecil sesuai batas toleransi.

Tujuan:

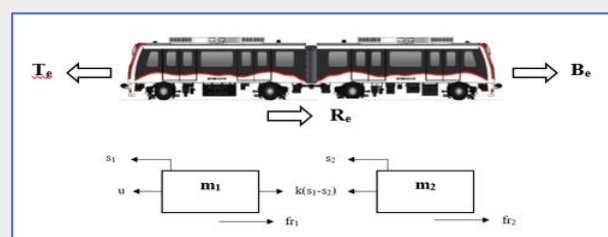
- Merancang kontrol kecepatan optimal kereta APMS menggunakan PID PSO.
- Merancang kontrol kecepatan optimal kereta APMS menggunakan PID PSO paralel dengan logika *fuzzy Sugeno*.

Sasaran:

- Kereta mampu mengikuti profil referensi dengan baik.
- Kereta mampu berhenti tepat di pintu terminal.
- Pengontrol mampu menangani ketidakpastian jumlah penumpang.

2. PEMODELAN SISTEM DINAMIKA KERETA

Analisis Hukum II Newton



Persamaan gerak kereta:

$$u - k(s_1 - s_2) - fr_1 = m_1 \frac{dv_1}{dt}$$
$$k(s_1 - s_2) - fr_2 = m_2 \frac{dv_2}{dt}$$

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

Gambar 1. Diagram Gaya Kereta APMS

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

Feedback Linearization

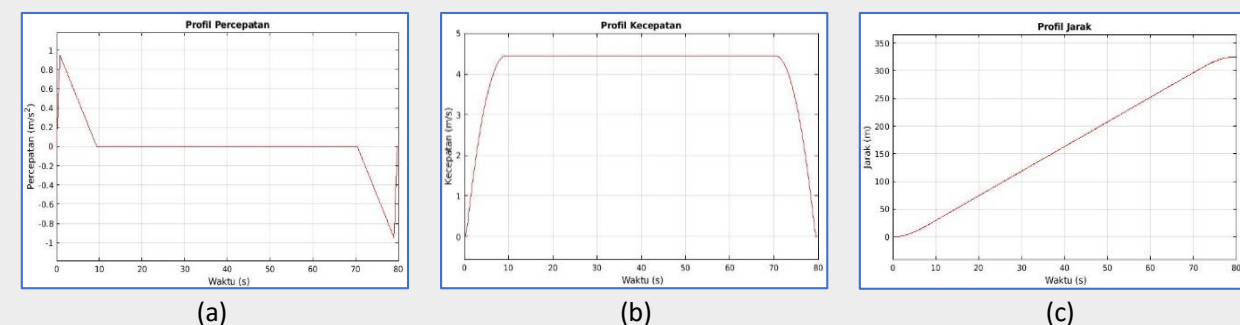
Asumsi model kereta ideal dengan umpan balik $u = m_1 g C x_2^2 + m_1 U$, diperoleh:

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

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

3. 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 $s(80)=325 \text{ m}$.



Gambar 2. Profil Referensi Kereta (a) Percepatan (b) Kecepatan (c) Jarak/Posisi

Profil yang dirancang telah memenuhi batas operasional kereta.

4. PERANCANGAN PENGONTROL PID PSO

Perancangan algoritma PSO menggunakan jumlah partikel 100, jumlah iterasi 150, kriteria pemberhentian minimal 30 iterasi, konstanta batas 30000 dengan batas atas $[1,1 \ 0,22 \ 0,04]$ dan batas bawah $[0 \ 0 \ 0]$, konstanta beban inersia 0,2, konstanta penyesuaian diri 1,49, dan konstanta penyesuaian sosial 1,49. Fungsi objektif terdiri dari RMSE kecepatan dan posisi dengan kendala:

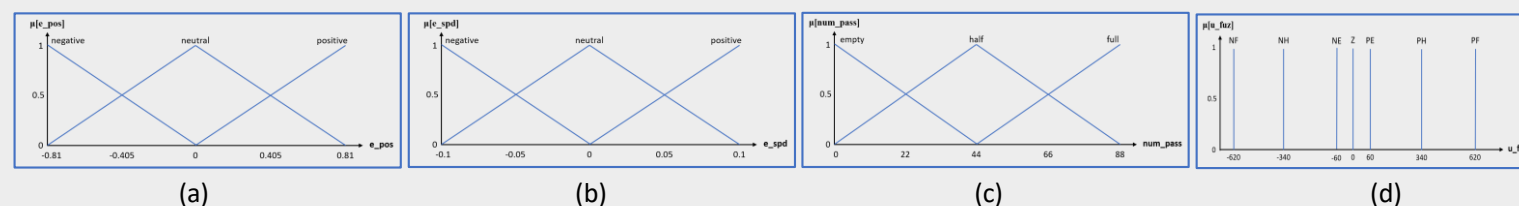
$$J = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [r_{2i}(t) - x_{2i}(t)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [r_{1i}(t) - x_{1i}(t)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad 0 \leq x_2(t) \leq 4,5 \text{ (m/s)}$$
$$x_2(t_f) < 0,0005 \text{ (m/s)} \quad 324,99 < x_1(t_f) < 325 \text{ (m)}$$

Tabel 1. Parameter PID PSO

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

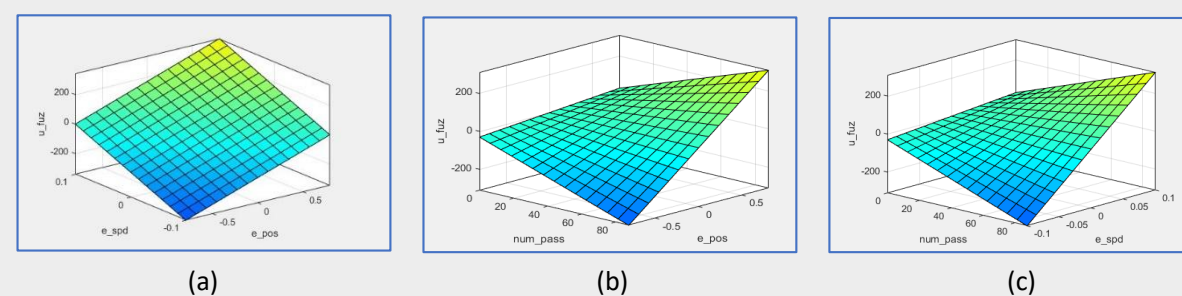
5. PERANCANGAN PENGONTROL LOGIKA FUZZY SUGENO

Logika *fuzzy Sugeno* dirancang dengan variabel masukan *error* kecepatan, *error* posisi/jarak dan jumlah penumpang dengan satu variabel keluaran input kontrol.



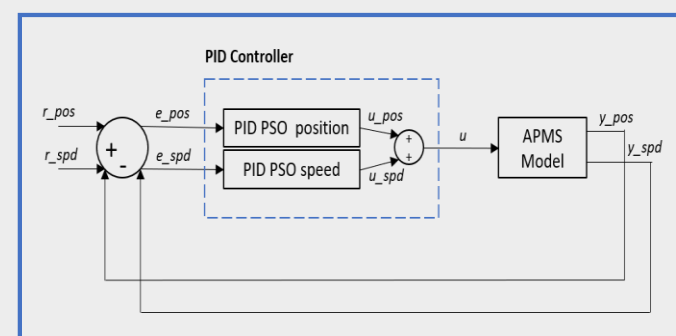
Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Fuzzy (a) Masukan *error* posisi (b) Masukan *error* kecepatan (c) Masukan jumlah penumpang (d) Konstanta Keluaran

Terdapat dua pengontrol dalam satu *fuzzy* yaitu untuk kecepatan dan posisi. Rancangan aturan *fuzzy* menggunakan operator logika if-AND-AND-then dimana tiap *error* dihubungkan dengan variasi penumpang dan diperoleh *surface control* pada Gambar 4.

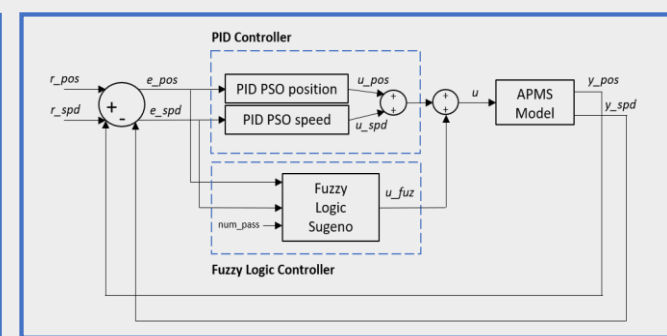


Gambar 4. *Surface Control* (a) $e_pos - e_spd$ (b) $e_pos - num_pass$ (c) $e_spd - num_pass$

6. PERANCANGAN SIMULASI PENGONTROL



Gambar 5. Blok Diagram Pengontrol PID PSO



Gambar 6. Blok Diagram Pengontrol PID PSO (OP) - *Fuzzy*

Terdapat simulasi pengontrol PID *auto tuning* dari PID *tuner* Matlab sebagai pembanding.

7. HASIL DAN ANALISIS

Hasil pengontrol PID *auto tuning* pada Tabel 2, hasil pengontrol PID PSO pada Tabel 3, hasil pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy Sugeno* pada Tabel 4. Ilustrasi hasil profil terbaik pada Gambar 7. Analisis dilakukan terhadap pengujian 1: variasi jumlah penumpang sesuai perancangan (0, 22, 44, 66, dan 88), pengujian 2: variasi jumlah penumpang diluar perancangan (11, 33, 55, dan 77), dan pengujian 3: variasi massa penumpang diluar perancangan (90%, 95%, 105%, dan 110% dari 60 Kg) dengan tiga kriteria operasional kereta.

Tabel 2. Performansi Pengontrol PID *Auto Tuning*

Pengujian	Rata-rata RMSE		Rata-rata Selisih Posisi Akhir (m)	Standar Deviasi RMSE		Standar Deviasi Selisih Posisi Akhir
	Kecepatan	Posisi		Kecepatan	Posisi	
1	$4,332 \times 10^{-2}$	0,1940	0,5931	$2,135 \times 10^{-4}$	$7,071 \times 10^{-4}$	$1,739 \times 10^{-3}$
2	$4,325 \times 10^{-2}$	0,1939	0,5931	$1,118 \times 10^{-4}$	$5,590 \times 10^{-4}$	$1,375 \times 10^{-3}$
3	$4,323 \times 10^{-2}$	0,1940	0,5931	$2,385 \times 10^{-4}$	$1,107 \times 10^{-3}$	$3,637 \times 10^{-3}$

Tabel 3. Performansi Pengontrol PID PSO

Pengujian	Rata-rata RMSE		Rata-rata Selisih Posisi Akhir (m)	Standar Deviasi RMSE		Standar Deviasi Selisih Posisi Akhir
	Kecepatan	Posisi		Kecepatan	Posisi	
1	$7,940 \times 10^{-4}$	$1,438 \times 10^{-2}$	$5,084 \times 10^{-3}$	$5,182 \times 10^{-5}$	$9,174 \times 10^{-4}$	$1,068 \times 10^{-3}$
2	$7,830 \times 10^{-4}$	$1,428 \times 10^{-2}$	$4,733 \times 10^{-3}$	$4,995 \times 10^{-5}$	$7,949 \times 10^{-4}$	$9,901 \times 10^{-4}$
3	$7,810 \times 10^{-4}$	$1,473 \times 10^{-2}$	$4,239 \times 10^{-3}$	$3,246 \times 10^{-5}$	$1,479 \times 10^{-4}$	$9,698 \times 10^{-4}$

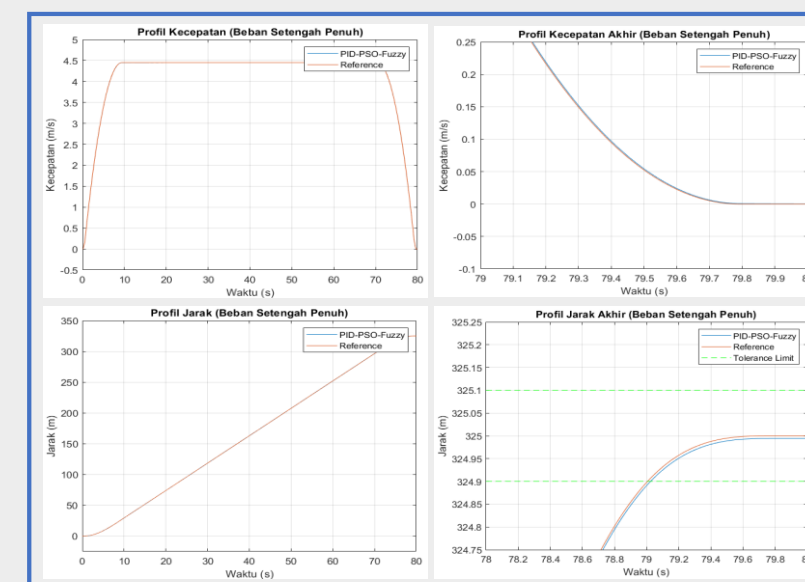
Tabel 4. Performansi Pengontrol PID PSO - *Fuzzy*

Pengujian	Rata-rata RMSE		Rata-rata Selisih Posisi Akhir (m)	Standar Deviasi RMSE		Standar Deviasi Selisih Posisi Akhir
	Kecepatan	Posisi		Kecepatan	Posisi	
1	$7,620 \times 10^{-4}$	$1,366 \times 10^{-2}$	$4,737 \times 10^{-3}$	$4,228 \times 10^{-5}$	$3,323 \times 10^{-4}$	$1,103 \times 10^{-3}$
2	$7,750 \times 10^{-4}$	$1,365 \times 10^{-2}$	$5,078 \times 10^{-3}$	$4,530 \times 10^{-5}$	$1,658 \times 10^{-4}$	$1,024 \times 10^{-3}$
3	$7,747 \times 10^{-4}$	$1,365 \times 10^{-2}$	$5,076 \times 10^{-3}$	$3,355 \times 10^{-5}$	$1,658 \times 10^{-4}$	$9,664 \times 10^{-4}$

Tabel 5. Perbandingan Kriteria Operasional Kereta

Kriteria	Pengujian 1			Pengujian 2			Pengujian 3			Angka pada Tabel 5. menyatakan jumlah variasi yang memenuhi kriteria per jumlah variasi total pada setiap pengujian.
	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	

Ket. P1: pengontrol PID *auto tuning* P2: pengontrol PID PSO P3: pengontrol PID PSO – *Fuzzy*



Gambar 7. Hasil Simulasi PID PSO – *Fuzzy* (44 Penumpang)

Kecepatan dan posisi kereta mampu mengikuti profil referensi dengan baik. Kereta mampu berhenti di detik ke-80 dengan selisih posisi akhir sangat kecil.

Analisis Pengujian

Pengujian 1 : PID PSO dan PID PSO – *Fuzzy* memenuhi kriteria batas percepatan dan kecepatan serta posisi akhir. Sedangkan PID *auto tuning* hanya memenuhi kriteria batas percepatan.

Pengujian 2 : Hasilnya serupa seperti pada pengujian 1.

Pengujian 3 : Hasilnya serupa seperti pada pengujian 1 tetapi hanya terdapat beberapa variasi PID PSO dan PID PSO – *Fuzzy* yang memenuhi kriteria batas kecepatan (PID PSO–*Fuzzy* lebih banyak).

PID PSO – *Fuzzy* adalah pengontrol terbaik untuk mengontrol kereta APMS pada tugas akhir ini.

8. KESIMPULAN

- Hasil simulasi pengontrol PID PSO menunjukkan bahwa sistem mampu mengikuti referensi dan mampu menangani ketidakpastian jumlah penumpang dengan rata-rata nilai RMSE kecepatan sebesar $7,940 \times 10^{-4}$ dan standar deviasi nilai 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.
- Hasil simulasi pengontrol PID PSO paralel dengan logika *fuzzy Sugeno* menunjukkan bahwa sistem mampu mengikuti referensi dan mampu menangani ketidakpastian jumlah penumpang dengan rata-rata nilai RMSE kecepatan sebesar $7,620 \times 10^{-4}$, standar deviasi nilai 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.