

OPTIMASI PENGGUNAAN SISTEM PENEREMAN REGENERATIF DAN *PNEUMATIC* PADA KERETA REL LISTRIK JABODETABEK MENGGUNAKAN METODE *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)

Hanan Hadi Sasmita^{*)}, Agung Nugroho, Tejo Sukmadi

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: hananhadisasmita@gmail.com

Abstrak

Sebagai alat transportasi yang dapat menampung penumpang lebih banyak, Kereta Rel Listrik (KRL) harus memiliki sistem kerja yang baik guna menunjang kebutuhan akan sarana transportasi massal di Indonesia. Salah satu faktor yang dapat menyebabkan kurang baiknya sistem kerja KRL adalah kurang optimal dalam penggunaan sistem pengereman pada KRL. Sistem pengereman pada KRL menggunakan gabungan dari pengereman elektrik (pengereman regeneratif) dan pengereman mekanik (pengereman *pneumatic*). Penggunaan dapat disimpulkan lebih baik jika waktu dan jarak tempuh yang dibutuhkan kereta sesuai standar dan dapat menghemat konsumsi energi karena penggunaan *regenerative braking*. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menentukan kapan penggunaan *regenerative braking* dan *pneumatic braking* yang optimal pada KRL Jabodetabek sehingga kereta dapat bekerja dengan baik dan dapat menghemat konsumsi energi. Metode yang digunakan untuk optimasi penggunaan sistem pengereman ini adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO) dengan bantuan *Software* Matlab R2016a. Hasil penelitian yang diperoleh yaitu bahwa penggunaan sistem pengereman yang optimal adalah dengan melakukan pengereman regeneratif terlebih dahulu saat kecepatan kereta 70 km/jam selama 17,3611 detik sejauh 217,0139 m. Kemudian melakukan pengereman *pneumatic* selama 6,9444 detik sejauh 19,2901 meter. Sehingga akan menghasilkan arus sebesar 372,5637 A dan energi yang dihemat untuk powering KRL sebesar 1,7778 kWh dengan daya sebesar 368,6508 kW.

Kata kunci: KRL, pengereman regeneratif, pengereman pneumatic, PSO

Abstract

As a means of transportation that can accommodate more passengers, Electric Railway (KRL) should have a good working system to support the need for mass transportation in Indonesia. One of the factors that may cause poor KRL work system is less optimal in the use of the KRL braking system. The KRL braking system uses a combination of electrical braking (regenerative braking) and mechanical braking (pneumatic braking). Usage can be better if the time and distance required by the train as standard and can save energy consumption due to the use of regenerative braking. This research was conducted with the aim to determine when the use of regenerative and pneumatic braking optimal on KRL Jabodetabek so that train can work well and can save energy consumption. The method used to optimize the use of this braking system is *Particle Swarm Optimization* (PSO) with the help of *Matlab R2016a Software*. The results obtained that the use of optimal braking system is to perform regenerative braking first when the train speed of 70 km/h for 17.3611 seconds as far as 217,0139 m. Then pneumatic braking for 6.9444 seconds as far as 19.2901 meters. So that will produce a current of 372.5637 A and energy savings for powering KRL of 1.7778 kWh with a power of 368,6508 kW.

Keywords: KRL, regenerative braking, pneumatic braking, PSO

1. Pendahuluan

Transportasi merupakan bidang kegiatan yang sangat penting dalam kehidupan masyarakat, antara lain karena keadaan geografis Indonesia yang terdiri dari ribuan pulau kecil dan besar, perairan yang sebagian besar terdiri dari lautan, sungai dan danau [1]. Hal ini memungkinkan pengangkutan dilakukan melalui jalur darat, perairan, dan

udara dengan menggunakan alat transportasi yang cepat dan nyaman.

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, kereta api telah menjadi salah satu solusi dalam mengatasi permasalahan transportasi perkotaan yang semakin kompleks untuk kota-kota besar di Indonesia.

Salah satu sarana transportasi tersebut adalah Kereta Rel Listrik atau lebih sering dikenal dengan KRL[1].

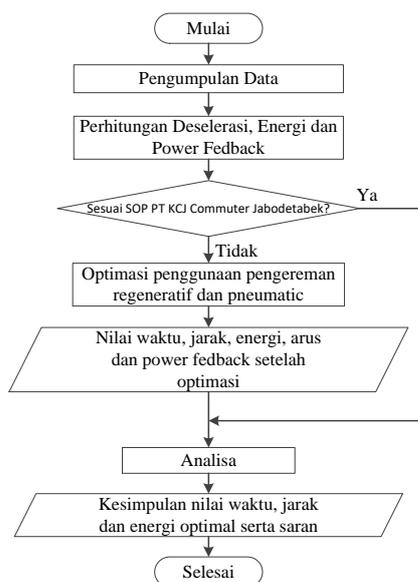
Sebagai alat transportasi yang dapat menampung penumpang lebih banyak, Kereta Rel Listrik (KRL) harus memiliki sistem kerja yang baik dan efisien guna menunjang kebutuhan akan sarana transportasi massal di Indonesia [2]. Salah satu faktor yang dapat menyebabkan kurang baik dan efisiennya sistem kerja KRL adalah kurang optimal dalam penggunaan sistem pengereman pada KRL. Sistem pengereman pada KRL menggunakan gabungan dari pengereman elektrik (pengereman regeneratif) dan pengereman mekanik (pengereman *pneumatic*). Kurang optimal nya penggunaan sistem pengereman pada KRL dapat menyebabkan sistem kerja yang kurang baik dan efisien.

Pada kendaraan listrik, operasi pengereman regeneratif yaitu merubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan generator[3]. Penggunaan *regenerative braking* dapat mengurangi emisi dan menambah efisiensi energi [4][5].

Berdasarkan penelitian diatas, maka untuk optimasi penggunaan pengereman regeneratif dan pengereman *pneumatic* di butuhkan data jarak pengereman, kecepatan, waktu, arus dan tegangan yang dibangkitkan rem regeneratif. Dalam penelitian ini membahas mengenai analisis optimasi penggunaan pengereman regeneratif dan pengereman *pneumatic* pada Kereta Rel Listrik (KRL) Jabodetabek. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *software* matlab. Hasil penelitian ini adalah nilai waktu dan jarak penggunaan pengereman regeneratif dan *pneumatic* serta nilai arus dan energi yang dihemat karena penggunaan pengereman regeneratif.

2. Metode

2.1. Metode Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung optimasi nilai waktu, jarak, energi, *power Feedback* dan arus dari penggunaan pengereman regeneratif dan *pneumatic* menggunakan metode *particle swarm optimization* pada Kereta Rel Listrik (KRL) Jabodetabek guna mendapatkan nilai suatu pengereman yang optimal. Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 1.

2.2. Pengumpulan Data

Data-data yang diperlukan dalam penelitian ini diperoleh dari PT. KCJ Commuter Jabodetabek. Data-data tersebut meliputi data spesifikasi teknik KRL seri JR 205, waktu dan jarak pengereman regeneratif, waktu dan jarak pengereman *pneumatic*, dan arus yang dibangkitkan regeneratif.

2.3. Perancangan Sistem

Pada pembuatan program simulasi Optimasi Penggunaan Sistem Pengereman Regeneratif Dan Pneumatik Pada Kereta Rel Listrik Jabodetabek Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO), perancangan sistem merupakan hal yang sangat penting dalam menentukan hasil output yang dihasilkan dari program simulasi ini. Secara umum fungsi tujuan dari program simulasi ini adalah waktu, jarak dan energi optimal pada sistem pengereman KRL Jabodetabek dengan seri kereta JR 205 dengan mempertimbangkan batasan dari kecepatan akhir dari pengereman regeneratif sebelum mulai pengereman *pneumatic* sehingga dapat menghemat energi untuk powering kereta selanjutnya. Fungsi batasan dari optimisasi penggunaan sistem pengereman ini dinyatakan sebagai berikut:

1. Perlambatan Standar
 $0,8 \leq a \leq 1,36$
 Perlambatan yang digunakan saat *braking* seharusnya tidak melebihi nilai maksimumnya serta tidak boleh dioperasikan dibawah nilai minimumnya sesuai dengan standar dari PT KCJ Commuter Jabodetabek.
2. Waktu kereta untuk berhenti
 $t \leq 26$ detik)
 Waktu yang dibutuhkan agar kereta berhenti seharusnya tidak melebihi atau sama dengan nilai maksimum dari standar yang ditetapkan oleh PT KCJ Commuter Jabodetabek yaitu maksimum sebesar 26 detik.
3. Jarak kereta untuk berhenti
 $s \leq 400$ meter)
 Jarak yang dibutuhkan agar kereta berhenti seharusnya tidak melebihi atau sama dengan nilai maksimum dari standar yang ditetapkan oleh PT KCJ Commuter Jabodetabek yaitu maximum sebesar 400 meter.

2.4. Pemodelan Fungsi Waktu

Pemodelan fungsi waktu yang digunakan dalam Penelitian ini yaitu [6]:

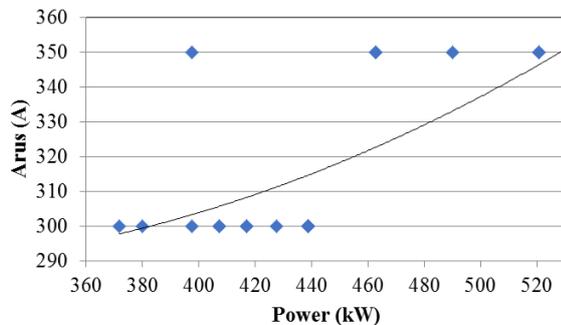
$$t = \frac{V_t - V_0}{-a} \quad (2.1)$$

Dimana :

- t = waktu yang dibutuhkan (sekon)
- V_t = Kecepatan akhir (m/s)
- V₀ = Kecepatan awal (m/s)
- a = perlambatan (m/s²)

2.5. Pemodelan Persamaan Arus yang Dibangkitkan Regeneratif Menggunakan Regresi Polinomial

Grafik fungsi kuadratis karakteristik arus yang dibangkitkan pengereman regeneratif dapat dilihat pada Gambar 2



Gambar 2. Grafik karakteristik *Feedback power* terhadap arus

Persamaan karakteristik arus adalah $Y = 352,59 - 0,4866X + 0,0009X^2$

2.6. Pemodelan Persamaan Jarak

Pemodelan persamaan jarak yang digunakan dalam Penelitian ini yaitu [6]:

$$s = V_0 t - \frac{at^2}{2} \quad (2.2)$$

Dimana :

- s = Jarak (meter)
- t = waktu (sekon)
- V₀ = Kecepatan awal (m/s)
- a = perlambatan (m/s²)

2.7. Pemodelan Persamaan Energi yang Dihemat

Pemodelan persamaan energi yang dapat dihemat karena penggunaan pengereman regeneratif yang digunakan dalam Penelitian ini yaitu [6]:

$$E = [0,01072 W_e (V_0^2 - V_f^2) + 2,725 GDW - 0,2778 r DW] \eta \quad (2.3)$$

Dimana :

- E = Energi yang dikembalikan (kWh)
- W = Berat Kereta (tonne)
- W_e = Berat Efektif Kereta (1,1 x W)
- V₀ = Kecepatan awal (km/h)
- V_t = Kecepatan akhir (km/h)
- r = *tractive resistance* (N/tonne)
- G = *down gradien* (%)
- D = jarak (km)
- η = efisiensi motor (%)

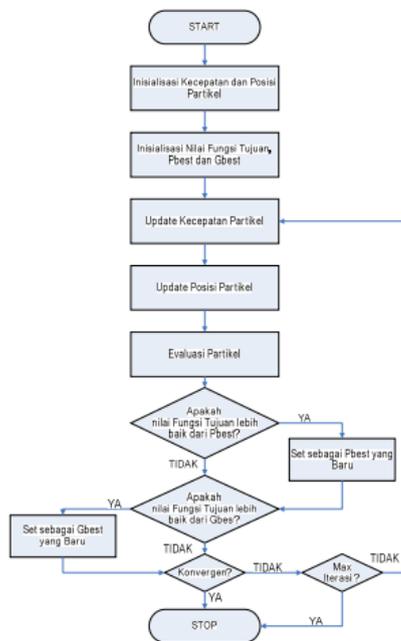
2.8. Perancangan Metode PSO

Metode optimisasi untuk mengetahui penggunaan sistem pengereman pada KRL Jabodetabek seri JR 205 dalam Penelitian ini adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO). PSO diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995, proses algoritmanya terinspirasi oleh tingkah laku sosial pada kawanan burung yang terbang bersama-sama. Perilaku sosial ini terdiri dari tindakan individu dan pengaruh dari individu-individu lain dalam suatu kelompok. Setiap individu atau particle berperilaku secara terdistribusi dengan menggunakan kecerdasan (*intelligence*) sendiri dan juga dipengaruhi kelompok kolektifnya. Dengan demikian, jika satu partikel atau seekor burung menemukan jalan yang tepat (*optimal*) menuju sumber makanan, maka sisa anggota kelompok yang lainnya juga akan mengikuti jalan tersebut meskipun lokasi mereka didalam kelompok tersebut tidak saling berdekatan [7] [8].

Pada Gambar 3 memperlihatkan diagram alir metode optimisasi PSO. Berikut penjelasan dari diagram alir pada Gambar 3.

1. Mengasumsikan bahwa ukuran kelompok atau kawanan (jumlah partikel) adalah N.
2. Membangkitkan populasi awal X dengan rentang X(B) dan X(A) secara ran-dom sehingga didapat X₁, X₂, ..., X_N.
3. Menghitung kecepatan dari semua partikel. Awalnya semua kecepatan dari partikel diasumsikan sama dengan nol. Set iterasi i = 1.
4. Pada iterasi ke-i, temukan 2 parameter penting untuk setiap partikel j yaitu:
 - a. Nilai terbaik sejauh ini dari X_j (i) (koordinat partikel j pada iterasi i) dan nyatakan sebagai Pbest_j, dengan nilai fungsi obyektif paling rendah (kasus minimasi), f[X_j (i)], yang ditemui sebuah partikel j pada semua iterasi sebelumnya. Nilai terbaik untuk semua partikel X_j (i) yang ditemukan sampai iterasi ke-i, Gbest, dengan nilai fungsi tujuan paling kecil/minimum diantara semua partikel untuk semua iterasi sebelumnya, f[X_j(i)].
 - b. Menghitung kecepatan partikel j pada iterasi ke i dengan rumus sebagai $V_j (i) = V_j (i - 1) + c1r1[Pbest_{j} - x_j (i - 1)] + c2r2[Gbest - x_j (i - 1)]$, j = 1, 2, ..., N

- c. Menghitung posisi atau koordinat partikel j pada iterasi ke- i dengan cara $X_j(i) = X_j(i-1) + V_j(i); j = 1, 2, \dots, N$
 - d. Mengevaluasi nilai fungsi tujuan untuk setiap partikel dan nyatakan sebagai $f[X1(i)], f[X2(i)], \dots, f[XN(i)]$
5. Cek apakah solusi yang sekarang sudah konvergen. Jika posisi semua partikel menuju ke satu nilai yang sama, maka ini disebut konvergen. Jika belum konvergen maka langkah 4 diulang dengan memperbarui iterasi $i = i + 1$, dengan cara menghitung nilai baru dari $Pbest_j$ dan $Gbest$. Proses iterasi ini dilanjutkan sampai semua partikel menuju ke satu titik solusi yang sama. Biasanya akan ditentukan dengan kriteria penghentian (stopping criteria), misalnya jumlah selisih solusi sekarang dengan solusi sebelumnya sudah sangat kecil.



Gambar 3. Diagram alir optimisasi metode PSO

3. Hasil dan Analisa

3.1. Kondisi Awal Sistem

Data yang digunakan pada pengujian ini adalah data dari Kereta Rel Listrik seri JR 205 yang menggunakan sistem pengereman regeneratif dan *pneumatic* dengan pengujian pengereman dari stasiun depot sampai stasiun manggarai begitu pula sebaliknya. Seperti yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya.

3.1.1. Perhitungan Deselerasi Pengereman Regeneratif KRL Seri JR 205

Berikut adalah contoh perhitungan *deselerasi* pada KRL seri JR 205 tahun 2017 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 70 \text{ km/jam} = \frac{70 \times 1000}{3600} = 19,44 \text{ m/s} \\
 t &= 15,9 \text{ sekon} \\
 s &= 150 \text{ meter} \\
 a &= \frac{2(V_0 t - s)}{t^2} \\
 a &= \frac{2(19,44 \times 15,9 - 150)}{15,9^2} \\
 a &= 1,26 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

Dengan perhitungan yang sama dengan di atas maka didapat tabel *deselerasi* KRL seri JR 205 pada pengujian tahun 2017 pada tabel 1.

Dari tabel 1 terlihat bahwa nilai *deselerasi* pada KRL seri JR 205 ketika pengereman saat kecepatan 70 km/jam masih memenuhi standar yang diterapkan PT KCJ Commuter Jabodetabek. Namun nilai *deselerasi* KRL seri JR 205 ketika pengereman saat kecepatan 60 km/jam ada 2 kali pengereman yang tidak memenuhi standar yaitu pada tanggal 16 Juni 2017 dan 5 Juli 2016. Standar yang dipakai yaitu SOP.KCJ.QC.1 tahun 2017 yang menyebutkan bahwa standar *deselerasi* pengereman regeneratif adalah 0,8 – 1,36 m/s² saat kecepatan 70 km/jam dan 60 km/jam. Oleh karena itu, perlu dilakukan optimasi penggunaan pengereman guna untuk memperbaiki *deselerasi* pengereman.

3.1.2. Perhitungan Deselerasi Pengereman Pneumatic KRL Seri JR 205

Berikut adalah contoh perhitungan *deselerasi* pada KRL seri JR 205 tahun 2017 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 70 \text{ km/jam} = \frac{70 \times 1000}{3600} = 19,44 \text{ m/s} \\
 t &= 18,3 \text{ sekon} \\
 s &= 190 \text{ meter} \\
 a &= \frac{2(V_0 t - s)}{t^2} \\
 a &= \frac{2(19,44 \times 18,3 - 190)}{18,3^2} \\
 a &= 0,99 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

Dengan perhitungan yang sama dengan di atas maka didapat tabel *deselerasi* KRL seri JR 205 pada pengujian Tahun 2017 pada tabel 2.

Dari tabel 2 terlihat bahwa nilai *deselerasi* pada KRL seri JR 205 ketika pengereman saat kecepatan 70 km/jam ada 3 kali pengereman yang tidak memenuhi standar yaitu pada tanggal 17 Mei 2017, 9 September 2016, dan 5 Juli 2016. Begitu juga nilai *deselerasi* KRL seri JR 205 ketika pengereman saat kecepatan 60 km/jam ada 4 kali pengereman yang tidak memenuhi standar yaitu pada tanggal 15 Mei 2017, 17 Mei 2017, 16 Juni 2017, dan 11 Oktober 2016. Standar yang dipakai PT KCJ Commuter Jabodetabek yaitu SOP.KCJ.QC.1 tahun 2017 yang menyebutkan bahwa standar *deselerasi* pengereman *pneumatic* adalah 0,8 – 1,36 m/s² saat kecepatan 70 km/jam dan 60 km/jam. Oleh karena itu, perlu dilakukan

optimasi penggunaan pengereman guna untuk memperbaiki *deselerasi* pengereman.

Tabel 1. Perhitungan *deselerasi* pengereman regeneratif

No	Tanggal	Waktu (s)		Jarak (m)		Deselerasi (m/s ²)	
		Vo = 70 km/jam	Vo = 60 km/jam	Vo = 70 km/jam	Vo = 60 km/jam	Vo = 70 km/jam	Vo = 60 km/jam
1	15/05/2017	15,9	18,5	150	130	1,26	1,04
		14,1	13	150	130	1,25	1,03
2	15/06/2017	20	18	210	160	0,89	0,86
		18,77	16,77	180	150	1,05	0,92
3	19/07/2017	17,6	17,3	190	150	0,98	0,92
		17	15,1	170	150	1,11	0,89
4	11/08/2017	19,6	16,7	200	140	0,94	0,99
		18,6	13,7	180	140	1,05	0,94
5	17/05/2017	17,12	13,97	170	110	1,11	1,26
		14,3	13,7	140	120	1,35	1,15
6	16/06/2017	20,04	19,08	195	170	0,97	0,81
		15,09	15	180	170	1,00	0,71
7	13/07/2017	16,5	14,4	180	140	1,03	0,96
		15,06	13,1	180	110	0,99	1,26
8	09/09/2016	16,5	14,8	185	140	1,00	0,97
		16,03	13,26	160	110	1,18	1,26
9	11/10/2016	18,12	14,57	190	130	0,99	1,06
		18,7	13,67	195	125	0,96	1,10
10	05/07/2016	23,2	20,3	215	180	0,88	0,77
		19,8	14,8	200	125	0,94	1,11

Tabel 2. Perhitungan *deselerasi* pengereman *pneumatic*

No	Tanggal	Waktu (s)		Jarak (m)		Deselerasi (m/s ²)	
		Vo = 70 km/jam	Vo = 60 km/jam	Vo = 70 km/jam	Vo = 60 km/jam	Vo = 70 km/jam	Vo = 60 km/jam
1	15/05/2017	18,3	14,1	190	140	0,99	0,96
		12,5	12	180	100	0,81	1,39
2	15/06/2017	18,9	16,9	200	150	0,94	0,92
		15,85	15,15	160	140	1,18	0,98
3	19/07/2017	17,8	14,5	180	110	1,05	1,25
		15,7	13,8	170	110	1,10	1,26
4	11/08/2017	18,1	16	200	140	0,93	0,99
		17,3	14,7	180	140	1,05	0,97
5	17/05/2017	14,29	12,57	140	100	1,35	1,39
		12,2	11,1	120	100	1,58	1,38
6	16/06/2017	15,06	14,03	180	170	0,99	0,65
		15,08	13,05	170	170	1,08	0,56
7	13/07/2017	14,2	13,2	150	120	1,25	1,15
		14,08	11,08	140	110	1,35	1,22
8	09/09/2016	17	14,3	180	130	1,04	1,06
		14	12,48	125	110	1,50	1,26
9	11/10/2016	16,19	13,5	180	110	1,03	1,26
		15,68	11,62	190	100	0,93	1,39
10	05/07/2016	21,2	15	210	115	0,90	1,20
		15,3	13,4	120	115	1,52	1,21

3.1.3. Perhitungan Energi yang Dihemat

Perhitungan nilai energi yang dihemat berdasarkan spesifikasi teknis KRL Seri JR 205. Perhitungan energi yang dihemat saat pengereman regeneratif menggunakan persamaan 2.3

Contoh perhitungan pada tanggal 15 Mei 2017 pada saat kecepatan awal 70 km/jam:

$$E = [0,01072 \times 1,1 \times 34,4 (70^2 - 20^2) + 2,725 \times 10 \times 0,150 \times 34,4 - 0,2778 \times 25,78 \times 0,150 \times 34,4] \times 0,9$$

$$E = 1736,152 \text{ Wh}$$

$$E = 1,736152 \text{ kWh}$$

Dengan perhitungan yang sama dengan di atas maka didapat tabel energi yang dihemat KRL seri JR 205 pada pengujian tahun 2017 pada tabel 3.

3.2. Hasil Simulasi PSO

Pengujian ini diawali dengan menentukan nilai dari parameter PSO, parameter fungsi tujuan, dan syarat sistem. Pada setting awal, nilai-nilai yang dibutuhkan pada parameter tersebut sudah ditentukan, namun dapat diubah sesuai keinginan penguji program ini yang tentunya akan mendapatkan hasil yang berbeda setiap dilakukan perubahan nilai parameter.

3.2.1. Pengujian Pengereman Saat Kecepatan 70 km/jam

Nilai parameter yang digunakan untuk optimisasi penggunaan pengereman regeneratif dan *pneumatic* pada KRL Jabodetabek menggunakan metode PSO terdapat pada tabel 4.

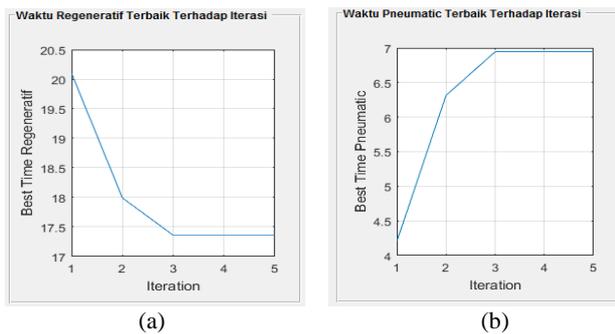
Tabel 3. Perhitungan energi yang dihemat saat kecepatan 70 km/jam

No	Tanggal	Jarak (m)	Berat (tonne)	Tractive Resistance (N/tonne)	Gradien (%)	Efisiensi (%)	Energi (kWh)
1	15/05/2017	150	34,4	25,78	10	90	1,73615
		150	34,4	25,78	10	90	1,73615
2	15/06/2017	210	34,4	25,78	10	90	1,77347
		180	34,4	25,78	10	90	1,75481
3	19/07/2017	190	34,4	25,78	10	90	1,76103
		170	34,4	25,78	10	90	1,74859
4	11/08/2017	200	34,4	25,78	10	90	1,76725
		180	34,4	25,78	10	90	1,75481
5	17/05/2017	170	34,4	25,78	10	90	1,74859
		140	34,4	25,78	10	90	1,72993
6	16/06/2017	195	34,4	25,78	10	90	1,76414
		180	34,4	25,78	10	90	1,75481
7	13/07/2017	180	34,4	25,78	10	90	1,75481
		180	34,4	25,78	10	90	1,75481
8	09/09/2016	185	34,4	25,78	10	90	1,75792
		160	34,4	25,78	10	90	1,74237
9	11/10/2016	190	34,4	25,78	10	90	1,76103
		195	34,4	25,78	10	90	1,76414
10	05/07/2016	215	34,4	25,78	10	90	1,77658
		200	34,4	25,78	10	90	1,76725

Tabel 4. Parameter Optimasi (kecepatan 70 km/jam)

Jenis Parameter	Parameter	Nilai
Parameter PSO	Max iterasi	100
	N	20
	Rho min	0.4
	Rho max	0.9
Input Pengereman	Perlambatan	0,8 m/s ²
	Vo Regeneratif	70 km/jam
	Berat Kereta	34,4 tonne
	Gradien	10 %
	Tractive Resistance	25,78 N/tonne

Selama proses optimisasi berlangsung maka akan muncul grafik nilai fungsi tujuan. Berdasarkan gambar 4 (a) dan gambar 4 (b) dapat dilihat bahwa sistem mencapai konvergen sebelum iterasi maksimum (max iterasi = 100) Besarnya jumlah iterasi yang diperlukan dalam pengujian dapat bervariasi dikarenakan sistem optimisasi menggunakan PSO yang membangkitkan bilangan random. Parameter N yang digunakan 20 karena pada pengujian yang dilakukan selama 20 kali, sehingga pengacakan akan berlangsung baik. Sedangkan parameter Rho min, dan Rho max didapatkan berdasarkan buku referensi [5].



Gambar 4.(a) Grafik fungsi tujuan (waktu regeneratif terhadap iterasi) (b) Grafik fungsi tujuan (waktu pneumatic terhadap iterasi)

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 5 dapat dilihat bahwa pengereman yang optimal saat kecepatan 70 km/jam yaitu dengan melakukan pengereman regeneratif selama 17,3611 detik sejauh 217,0139 m. Kemudian melakukan pengereman pneumatic selama 6,9444 detik sejauh 19,2901 meter. Sehingga akan menghasilkan arus sebesar 295,518 A dan energi yang dapat dihemat sebesar 1,7778 kWh dengan daya sebesar 368,651 kW.

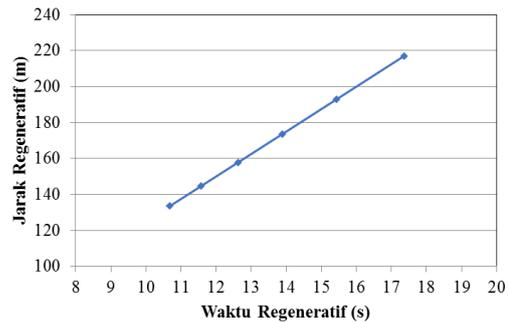
Hal ini telah sesuai dengan standar dimana standar deselerasi pengereman sebesar 0,8-1,36 m/s², waktu total pengereman maksimal 26 detik dan jarak maksimal pengereman 400 meter. Sistem pengereman akan optimal dengan penggunaan pengereman regeneratif dan pneumatic sehingga dapat menghemat konsumsi energi karena dapat menghemat energi sebesar 1,7778 kWh ke.

Tabel 5. Hasil Optimisasi pengereman saat V₀ 70 km/jam

Parameter	a = 1,3 m/s ²	a = 1,2 m/s ²	a = 1,1 m/s ²	a = 1 m/s ²	a = 0,9 m/s ²	a = 0,8 m/s ²
Waktu Regeneratif (s)	10,68	11,57	12,62	13,88	15,43	17,36
Jarak Regeneratif (m)	133,54	144,67	157,82	173,61	192,90	217,01
Waktu Pneumatic (s)	4,27	4,62	5,05	5,55	6,17	6,94
Jarak Pneumatic (m)	11,87	12,86	14,02	15,43	17,14	19,29
Energi (kWh)	1,72	1,73	1,74	1,75	1,76	1,77

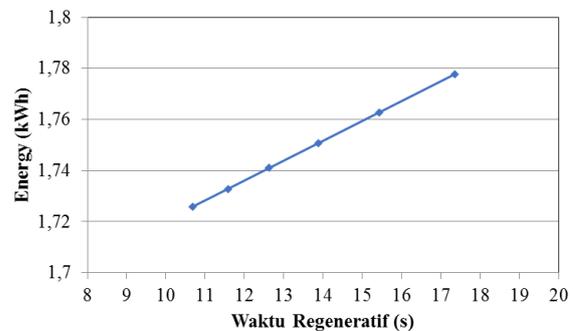
Tabel 5. (lanjutan)

Parameter	a = 1,3 m/s ²	a = 1,2 m/s ²	a = 1,1 m/s ²	a = 1 m/s ²	a = 0,9 m/s ²	a = 0,8 m/s ²
Power (kW)	581,56	538,98	496,4	453,81	411,22	368,65
Arus (A)	373,99	351,77	332,81	317,11	304,68	295,51
Waktu Total (s)	14,95	16,20	17,67	19,44	21,60	24,30
Jarak Total (m)	145,41	157,53	171,85	189,04	210,04	236,30



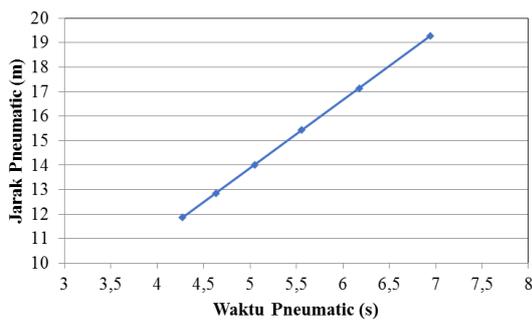
Gambar 5. Grafik hubungan waktu regeneratif terhadap jarak regeneratif

Berdasarkan gambar 5 dapat dilihat bahwa ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 10,6838 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 133,547 m, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 11,5741 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 144,6759 m, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 12,6263 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 157,8283 m, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 13,8889 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 173,6111 m, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 15,4321 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 192,9012 m, dan ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 17,3611 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 217,0139 m. Dari data tersebut didapatkan grafik yang berbanding lurus, hal ini sudah sesuai dengan teori bahwa semakin besar waktu regeneratif yang dibutuhkan maka jarak regeneratif juga akan semakin besar.



Gambar 6. Grafik hubungan waktu regeneratif terhadap energy yang dikembalikan

Berdasarkan gambar 6 dapat dilihat bahwa ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 10,6838 s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,7259 kWh, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 11,5741 s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,7328 kWh, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 12,6263 s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,741 kWh, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 13,8889 s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,7508 kWh, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 15,4321 s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,7628 kWh, dan ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 17,3611 s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,7778 kWh. Dari data tersebut didapatkan grafik yang berbanding lurus, hal ini sudah sesuai dengan teori bahwa semakin besar waktu regeneratif yang dibutuhkan maka energi yang dikembalikan ke saluran juga akan semakin besar.



Gambar 7. Grafik hubungan waktu *pneumatic* terhadap jarak *pneumatic*

Berdasarkan gambar 7 dapat dilihat bahwa ketika waktu *pneumatic* yang dibutuhkan sebesar 4,2735 s maka memiliki nilai jarak *pneumatic* sebesar 11,8708 m, ketika waktu *pneumatic* yang dibutuhkan sebesar 4,6296 s maka memiliki nilai jarak *pneumatic* sebesar 12,8601 m, ketika waktu *pneumatic* yang dibutuhkan sebesar 5,0505 s maka memiliki nilai jarak *pneumatic* sebesar 14,0292 m, ketika waktu *pneumatic* yang dibutuhkan sebesar 5,5556 s maka memiliki nilai jarak *pneumatic* sebesar 15,4321 m, ketika waktu *pneumatic* yang dibutuhkan sebesar 6,1728 s maka memiliki nilai jarak *pneumatic* sebesar 17,1468 m, dan ketika waktu *pneumatic* yang dibutuhkan sebesar 6,9444 s maka memiliki nilai jarak *pneumatic* sebesar 19,2901 m. Dari data tersebut didapatkan grafik yang berbanding lurus, hal ini sudah sesuai dengan teori bahwa semakin besar waktu *pneumatic* yang dibutuhkan maka jarak *pneumatic* juga akan semakin besar.

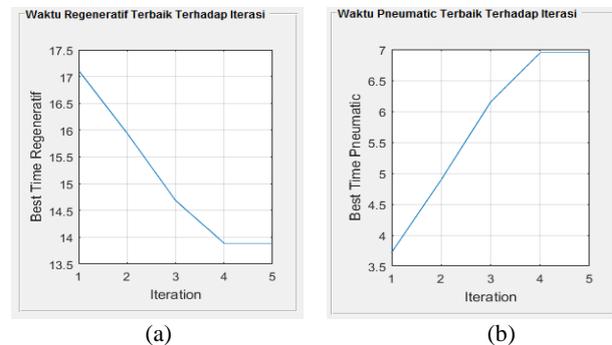
3.3.2. Pengujian Pengereman Saat Kecepatan 60 km/jam

Nilai parameter yang digunakan untuk optimisasi penggunaan pengereman regeneratif dan *pneumatic* pada KRL Jabodetabek menggunakan metode PSO terdapat pada tabel 6.

Tabel 6. Parameter Optimisasi (kecepatan 60 km/jam)

Jenis Parameter	Parameter	Nilai
Parameter PSO	Max iterasi	100
	N	20
	Rho min	0.4
	Rho max	0.9
	Input Pengereman	Perlambatan
	Vo Regeneratif	60 km/jam
	Berat Kereta	34,4 tonne
	Gradien	10 %
	Tractive Resistance	25,78 N/tonne

Selama proses optimisasi berlangsung maka akan muncul grafik nilai fungsi tujuan. Berdasarkan gambar 8 (a) dan gambar 8 (b) dapat dilihat bahwa sistem mencapai konvergen sebelum iterasi maksimum (max iterasi = 100). Besarnya jumlah iterasi yang diperlukan dalam pengujian dapat bervariasi dikarenakan sistem optimisasi menggunakan *particle swarm optimization* yang membangkitkan bilangan random. [5]



Gambar 8. (a) Grafik fungsi tujuan (waktu regeneratif terhadap iterasi), (b) Grafik fungsi tujuan (waktu *pneumatic* terhadap iterasi)

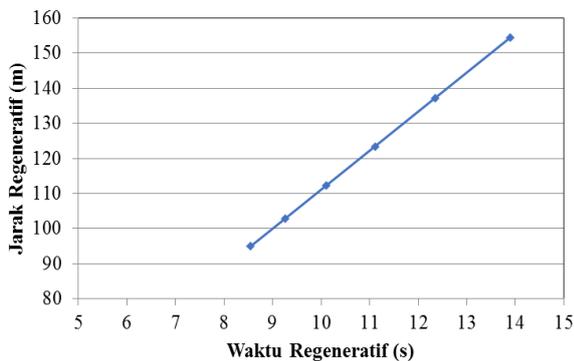
Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 7 dapat dilihat bahwa pengereman yang optimal saat kecepatan 60 km/jam yaitu dengan melakukan pengereman regeneratif selama 13,8889 detik sejauh 154,321 m. Kemudian melakukan pengereman *pneumatic* selama 6,9444 detik sejauh 19,2901 meter. Sehingga akan menghasilkan arus sebesar 289,779 A dan energi yang dapat dihemat sebesar 1,2642 kWh dengan daya sebesar 327,6896 kW.

Hal ini telah sesuai dengan standar dimana standar deselerasi pengereman sebesar 0,8-1,36 m/s², waktu total pengereman maksimal 26 detik dan jarak maksimal pengereman 400 meter. Sistem pengereman akan optimal

dengan penggunaan pengereman regeneratif dan pneumatik sehingga dapat menghemat konsumsi energi karena dapat menghemat energi sebesar 1,2642 kWh.

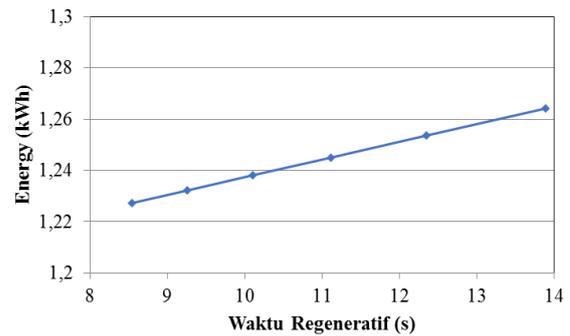
Tabel 7. Hasil Optimisasi pengereman saat kecepatan awal 60 km/jam

Parameter	a = 1,3 m/s ²	a = 1,2 m/s ²	a = 1,1 m/s ²	a = 1 m/s ²	a = 0,9 m/s ²	a = 0,8 m/s ²
Waktu Regeneratif (s)	8,54	9,25	10,10	11,11	12,34	13,88
Jarak Regeneratif (m)	94,96	102,88	112,23	123,45	137,17	154,32
Waktu Pneumatic (s)	4,27	4,62	5,05	5,55	6,17	6,94
Jarak Pneumatic (m)	11,87	12,86	14,02	15,43	17,14	19,29
Energi (kWh)	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26
Power (kW)	516,94	479,09	441,24	403,39	365,54	327,69
Arus (A)	341,55	326,04	313,10	302,75	294,97	289,77
Waktu Total (s)	12,82	13,88	15,15	16,66	18,51	20,83
Jarak Total (m)	106,83	115,74	126,26	138,88	154,32	173,61



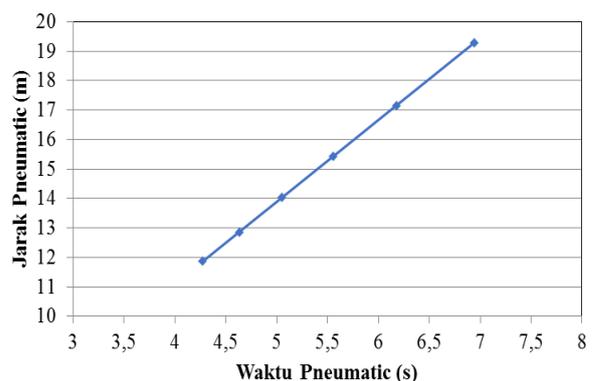
Gambar 9. Hubungan waktu terhadap jarak regeneratif

Berdasarkan gambar 9 dapat dilihat bahwa ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 8,547 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 94,9668 m, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 9,2593 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 102,8807 m, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 10,101 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 112,2334 m, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 11,1111 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 123,4568 m, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 12,3457 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 137,1742 m, dan ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 13,8889 s maka memiliki nilai jarak regeneratif sebesar 154,321 m. Sehingga grafik yang berbanding lurus, hal ini sudah sesuai dengan teori bahwa semakin besar waktu regeneratif yang dibutuhkan maka jarak regeneratif juga akan semakin besar.



Gambar 10. Hubungan waktu regeneratif terhadap energy

Berdasarkan gambar 10 dapat dilihat bahwa ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 8,547 s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,2273 kWh, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 9,2593 s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,2322 kWh, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 10,101 s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,2381 kWh, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 11,1111 s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,245 kWh, ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 12,3457s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,2536 kWh, dan ketika waktu regeneratif yang dibutuhkan sebesar 13,8889 s maka menghasilkan nilai energi yang dikembalikan ke saluran sebesar 1,2642 kWh. Dari data tersebut didapatkan grafik yang berbanding lurus, hal ini sudah sesuai dengan teori bahwa semakin besar waktu regeneratif yang dibutuhkan maka energi yang dikembalikan ke saluran juga akan semakin besar.



Gambar 11. Hubungan waktu terhadap jarak pneumatic

Berdasarkan gambar 11 dapat dilihat bahwa ketika waktu pneumatic yang dibutuhkan sebesar 4,2735 s maka memiliki nilai jarak pneumatic sebesar 11,8708 m, ketika waktu pneumatic yang dibutuhkan sebesar 4,6296 s maka memiliki nilai jarak pneumatic sebesar 12,8601 m, ketika

waktu pneumatic yang dibutuhkan sebesar 5,0505 s maka memiliki nilai jarak *pneumatic* sebesar 14,0292 m, ketika waktu *pneumatic* yang dibutuhkan sebesar 5,5556 s maka memiliki nilai jarak *pneumatic* sebesar 15,4321 m, ketika waktu pneumatic yang dibutuhkan sebesar 6,1728 s maka memiliki nilai jarak *pneumatic* sebesar 17,1468 m, dan ketika waktu *pneumatic* yang dibutuhkan sebesar 6,9444 s maka memiliki nilai jarak *pneumatic* sebesar 19,2901 m. Sehingga didapatkan grafik yang berbanding lurus, hal ini sudah sesuai dengan teori bahwa semakin besar waktu *pneumatic* yang dibutuhkan maka jarak *pneumatic* juga akan semakin besar.

3.3.3. Perbandingan Hasil Optimasi Penggunaan Pengereman pada Saat Kecepatan 70 km/jam dan 60 km/jam

Berikut ini tabel perbandingan hasil optimasi pengereman regeneratif dan *pneumatic* pada saat kecepatan 70 km/jam dan 60 km/jam

Tabel 8. Hasil Optimisasi pengereman saat kecepatan awal 70 km/jam dan 60 km/jam

No	Parameter	Kecepatan awal 70 km/jam	Kecepatan awal 60 km/jam
1	Waktu regeneratif (s)	17,3611	13,8889
2	Jarak regeneratif (m)	217,014	154,321
3	Waktu <i>pneumatic</i> (s)	6,9444	6,9444
4	Jarak <i>pneumatic</i> (m)	19,2901	19,2901
5	Arus (A)	295,518	289,779
6	Feedback Energy (kWh)	1,7778	1,2642
7	Power Feedback (kW)	368,651	327,69

Berdasarkan tabel 8 dapat diketahui bahwa penggunaan sistem pengereman yang optimal dilakukan saat KRL berada pada kecepatan 70 km/jam karena dapat menghemat konsumsi energi sebesar 1,7778 kWh dengan daya sebesar 368,6508 kW dibandingkan dengan kereta dilakukan pengereman saat kecepatan 60 km/jam yang hanya menghemat energi sebesar 1,2642 kWh dengan daya sebesar 327,6896 kW.

4. Kesimpulan

Dari hasil pengujian, metode optimisasi PSO dapat digunakan untuk solusi dari permasalahan optimisasi penggunaan pengereman regeneratif dan *pneumatic* pada KRL Jabodetabek seri JR 205. Optimisasi penggunaan pengereman regeneratif dan *pneumatic* pada KRL Jabodetabek saat kecepatan awal 70 km/jam dengan metode PSO memperlihatkan bahwa penggunaan pengereman yang optimal dengan melakukan pengereman regeneratif terlebih dahulu selama 17,3611 detik sejauh 217,0139 m. Kemudian melakukan pengereman

pneumatic selama 6,9444 detik sejauh 19,2901 meter. Sehingga akan menghasilkan arus sebesar 372,5637 A dan energi yang dapat dihemat sebesar 1,7778 kWh dengan daya sebesar 368,6508 kW. Dari hasil pengujian optimisasi penggunaan pengereman saat kecepatan 70 km/jam dan 60 km/jam dapat diketahui bahwa penggunaan pengereman lebih optimal dilakukan saat kecepatan KRL 70 km/jam dengan perlambatan sebesar 0,8 m/s² karena dapat menghemat konsumsi energi sebesar 1,7778 kWh dengan daya sebesar 368,6508 kW dibandingkan dengan KRL yang dilakukan pengereman saat kecepatan 60 km/jam dengan perlambatan sebesar 0,8 m/s² yang hanya menghemat energi sebesar 1,2642 kWh dengan daya sebesar 327,6896 kW.

Penelitian ini dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan pengaruh-pengaruh alam dan beberapa spesifikasi rem *pneumatic* (pengereman udara) dan dapat menggunakan metode optimisasi yang lain

Referensi

- [1] M. R. Fauzan, Y. Martin, and A. Haris, "Analisa Harmonisa Akibat Pengaruh Penggunaan Converter pada Kereta Rel Listrik 1x25 kV Yogyakarta-Solo," *J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 9, no. 3, 2009.
- [2] I. kasim & H. H. Liem Ek Bien, "SISTEM KENDALI KERETA OTOMATIS PADA KERETA REL LISTRIK VVVF," *JETri*, vol. 5, pp. 41–61, 2006.
- [3] M. Ahmadi, "Optimized Regenerative Brake System Using Genetic Algorithm," no. Ictck, pp. 11–12, 2015.
- [4] S. Kumar, V. Ragavan, M. Shanmugavel, and N. K. Ann, "Design of a Pneumatic Drive Train with Regenerative Braking," no. December, pp. 341–346, 2015.
- [5] C. Science, "Finding Optimal Deceleration with Serial Regenerative Braking of Electric Vehicle using a Multi-objective Genetic Algorithm," 2016.
- [6] Dhanpat Rai dan Sons, *Modern Electric Traction*, Dhelhi, 1973.
- [7] Santosa, Budi dan Paul Willy. 2011. "Metoda Metaheuristik Konsep dan Implementasi". Surabaya : Guna Widya.
- [8] Zerda, Evi Ria. 2009. "Analisa dan Penerapan Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) pada Optimasi Penjadwalan Sumber Daya Proyek". Departmen Teknik Informatika IT TELKOM.