

## DAFTAR ISI

<b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI</b> .....	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>INTISARI</b> .....	<b>xiiiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Tujuan Penelitian</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4 Batasan Penelitian</b> .....	<b>3</b>
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	<b>3</b>
<b>1.6 Keaslian Penelitian</b> .....	<b>3</b>
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1 Tinjauan Pustaka</b> .....	<b>24</b>
<b>2.2 Dasar Teori</b> .....	<b>25</b>
2.2.1 Pengereman Regeneratif.....	25
2.2.2 Mekanisme dan pemodelan pengereman regeneratif.....	26
2.2.3 Penyimpanan Energi Pengereman regeneratif.....	28
2.2.4 Spesifikasi Kereta Listrik KfW i9000.....	29
2.2.5 Spesifikasi Gardu Traksi pada lintas Yogyakarta – Palur.....	32
2.2.6 Karakteristik Jalur Lintas Yogyakarta – Palur.....	35
2.2.7 Karakteristik Operasi KA Yogyakarta – Palur.....	37
2.2.8 Waktu <i>headway</i> .....	37
<b>2.3 Hipotesis</b> .....	<b>37</b>
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1 Lokasi Penelitian</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2 Alat dan Bahan Penelitian</b> .....	<b>38</b>
3.2.1 Alat.....	38
3.2.2 Langkah kerja.....	38
3.2.3 Diagram alir penelitian.....	39
3.2.4 Variabel penelitian.....	40
3.2.5 Model simulasi.....	40
3.2.6 Analisis sensitifitas faktor pengereman regeneratif.....	59



3.2.7	Profil energi dengan penambahan berat baterai .....	59
3.2.8	Sistem Penyimpanan Energi .....	59
3.2.9	Analisis Kelaikan Investasi .....	60
3.2.10	Analisis reduksi CO <sub>2</sub> .....	62
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Karakteristik lintas Yogyakarta – Palur .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulasi profil energi lintas Yogyakarta – Palur PP .....</b>	<b>68</b>
4.2.1	Segmen Yogyakarta (YK) – Maguwo (MGW).....	68
4.2.2	Segmen Maguwo (MGW) ke Brambanan (BBN).....	70
4.2.3	Segmen Brambanan (BBN) ke Srowot (SWT) .....	70
4.2.4	Segmen Srowot (SWT) ke Klaten (KT) .....	70
4.2.5	Segmen Klaten (KT) ke Ceper (CE).....	74
4.2.6	Segmen Ceper (CE) ke Gawok (GWK).....	74
4.2.7	Segmen Gawok (GWK) ke Purwosari (PWS) .....	74
4.2.8	Segmen Purwosari (PWS) ke Solo Jebres (SK) .....	78
4.2.9	Segmen Solo Jebres (SK) ke Palur (PL).....	78
4.2.10	Segmen Palur (PL) ke Solo Jebres (SK).....	78
4.2.11	Segmen Solo Jebres (SK) ke Purwosari (PWS).....	82
4.2.12	Segmen Purwosari (PWS) ke Gawok (GWK) .....	82
4.2.13	Segmen Gawok (GWK) ke Ceper (CE).....	82
4.2.14	Segmen Ceper (CE) ke Klaten (KT).....	86
4.2.15	Segmen Klaten (KT) ke Srowot (SWT) .....	86
4.2.16	Segmen Srowot (SWT) ke Brambanan (BBN) .....	86
4.2.17	Segmen Brambanan (BBN) ke Maguwo (MGW).....	90
4.2.18	Segmen Maguwo (MGW) ke Yogyakarta (YK) .....	90
<b>4.3</b>	<b>Neraca Energi.....</b>	<b>92</b>
<b>4.4</b>	<b>Analisis Sensitivitas .....</b>	<b>93</b>
4.4.1	Varian Kelandaian .....	93
4.4.2	Varian Berat penumpang .....	98
<b>4.5</b>	<b>Pemilihan Sistem penyimpan energi / <i>Energy Storage System (ESS)</i> .....</b>	<b>103</b>
<b>4.6</b>	<b>Analisis pengaruh penambahan berat baterai .....</b>	<b>104</b>
<b>4.7</b>	<b>Analisis manfaat/benefit.....</b>	<b>107</b>
<b>4.8</b>	<b>Analisis Investasi .....</b>	<b>109</b>
4.8.1	<i>Capital Expenditure (CapEx)</i> .....	110
4.8.2	<i>Operational Expenditure (OpEx)</i> .....	111
4.8.3	<i>Cash Flow dan Net Present Value (NPV)</i> .....	112
4.8.4	BC Rasio .....	113
4.8.5	<i>Payback Periode (PP)</i> .....	114



4.8.6	<i>Internal Rate of Return (IRR)</i> .....	114
<b>4.9</b>	<b>Analisis reduksi CO<sub>2</sub></b> .....	<b>114</b>
<b>4.10</b>	<b>Arah pengembangan pemanfaatan energi pengereman regeneratif</b> .....	<b>115</b>
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....		<b>123</b>
<b>5.1</b>	<b>Kesimpulan</b> .....	<b>123</b>
<b>5.2</b>	<b>Saran</b> .....	<b>124</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		<b>125</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1. 1</b>	Daftar penelitian yang telah dilakukan .....	4
<b>Tabel 2. 1</b>	Parameter dalam perhitungan pengereman regeneratif.....	27
<b>Tabel 2. 2</b>	Data karakteristik sarana kereta listrik KfW i9000 .....	29
<b>Tabel 2. 3</b>	Data tempat duduk pada kereta Listrik seri KfW i9000 .....	30
<b>Tabel 2. 4</b>	Spesifikasi traksi motor dan <i>inverter</i> pada kereta listrik KfW i9000 .....	32
<b>Tabel 2. 5</b>	Posisi dan Jarak Gardu listrik di lintas Yogyakarta-Palur .....	33
<b>Tabel 2. 6</b>	Spesifikasi <i>Rectifier Transformer</i> .....	33
<b>Tabel 2. 7</b>	Spesifikasi <i>Rectifier</i> .....	34
<b>Tabel 2. 8</b>	Spesifikasi Penghantar pada <i>Overhead Catenary System</i> .....	35
<b>Tabel 2. 9</b>	Kelas Stasiun dan Jarak antar stasiun pada Lintas Yogyakarta - Palur.....	35
<b>Tabel 2. 10</b>	Data Ketinggian Stasiun dan kelandaian rata-rata per petak jalan pada lintas Yogyakarta – Palur .....	36
<b>Tabel 4. 1</b>	Segmen Gardu listrik lintas Yogyakarta – Palur.....	63
<b>Tabel 4. 2</b>	Perbandingan perjalanan sampling KA dari Palur –Yogyakarta .....	64
<b>Tabel 4. 3</b>	Perbandingan perjalanan sampling KA dari Yogyakarta – Palur .....	65
<b>Tabel 4. 4</b>	Neraca energi hasil simulasi Simulink Pola Perjalanan Yogyakarta – Palur	92
<b>Tabel 4. 5</b>	Neraca energi hasil simulasi Simulink Pola Perjalanan Palur - Yogyakarta	93
<b>Tabel 4. 6</b>	Profil energi terhadap beberapa varian kelandaian .....	95
<b>Tabel 4. 7</b>	Profil energi terhadap beberapa varian jumlah penumpang.....	100
<b>Tabel 4. 8</b>	Perbandingan penggunaan Sistem penyimpanan Energi .....	103
<b>Tabel 4. 9</b>	Profil energi setelah dipasang baterai lintas Yogyakarta-Palur .....	104
<b>Tabel 4. 10</b>	Profil energi setelah dipasang baterai lintas Palur-Yogyakarta .....	105
<b>Tabel 4. 11</b>	Profil energi dengan skenario jumlah penumpang dan berat baterai lintas Yogyakarta-Palur .....	106
<b>Tabel 4. 12</b>	Profil energi dengan skenario jumlah penumpang dan berat baterai lintas Palur - Yogyakarta .....	107
<b>Tabel 4. 13</b>	Kebutuhan daya dan energi listrik untuk peralatan penunjang .....	108
<b>Tabel 4. 14</b>	Konsumsi energi pada kereta listrik tanpa pemanfaatan regeneratif dan dengan pemanfaatan regeneratif .....	109
<b>Tabel 4. 15</b>	Biaya investasi awal pengadaan Sistem penyimpanan energi dengan baterai merek “A” .....	110
<b>Tabel 4. 16</b>	Biaya investasi awal pengadaan Sistem penyimpanan energi dengan baterai merek “B” .....	111
<b>Tabel 4. 17</b>	Komponen biaya Operational Expenditure (OpEx).....	112
<b>Tabel 4. 18</b>	Parameter dalam analisis investasi pengadaan.....	112
<b>Tabel 4. 19</b>	Tabel arus kas (cash flow) proyek pengadaan sistem penyimpan energi .	113
<b>Tabel 4. 22</b>	Perhitungan BC rasio .....	113
<b>Tabel 4. 23</b>	Data Jumlah penumpang KRL – Yogyakarta – Palur PP Periode Waktu Januari 2021 sampai dengan Agustus 2024 .....	116
<b>Tabel 4. 24</b>	Perbandingan Headway KRL di Lokasi pembanding.....	118
<b>Tabel 4. 25</b>	Headway lintas heterogen Yogyakarta – Palur pada waktu pagi.....	120



UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

**Analisis Pemanfaatan Energi Pengereman Regeneratif pada Kereta Listrik seri Kfw i9000 pada lintas operasi Palur - Yogyakarta PP**

Arief Darmawan, Dr Rachmawan Budiarto S.T, M.T; Roni Irnawan S.T, M.Sc, Ph.D, SMIEEE

Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

<b>Tabel 4. 26</b> Headway lintas heterogen Yogyakarta – Palur pada waktu siang dan sore .....	120
<b>Tabel 4. 27</b> Potensi peningkatan energi pengereman regeneratif dengan peningkatan jmlah penumpang dan headway .....	121

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Gaya yang berpengaruh pada pergerakan kereta api.....	25
<b>Gambar 2.2</b>	Mekanisme pergerakan kereta yang terhubung gardu traksi.....	26
<b>Gambar 2. 3</b>	Alur Pemodelan <i>Backward Looking</i> .....	26
<b>Gambar 2. 4</b>	Perbandingan Tiga Jenis ESS.....	28
<b>Gambar 2. 5</b>	Konfigurasi <i>Inverter</i> dan <i>chooper</i> pada KRL KfW i9000 .....	31
<b>Gambar 2. 6</b>	Struktur <i>Overhead Catenary System</i> .....	34
<b>Gambar 3. 1</b>	Diagram Alir Penelitian.....	39
<b>Gambar 3. 2</b>	Model fungsi jaringan .....	42
<b>Gambar 3. 3</b>	Model Dinamika sarana Kereta Listrik .....	44
<b>Gambar 3. 4</b>	Model Fungsi Hambatan Gelinding .....	46
<b>Gambar 3. 5</b>	Model Fungsi Hambatan Aerodinamis.....	48
<b>Gambar 3. 6</b>	Model Fungsi Hambatan Tanjakan .....	50
<b>Gambar 3. 7</b>	Model Fungsi Torsi dan Kecepatan Gerak pada roda .....	52
<b>Gambar 3. 8</b>	Model Fungsi Torsi dan Kecepatan Gerak Motor Traksi.....	54
<b>Gambar 3. 9</b>	Model Fungsi Daya pengereman Regeneratif.....	56
<b>Gambar 3. 10</b>	Model Fungsi Penghitung energi Akselerasi dan Deselerasi .....	58
<b>Gambar 4. 1</b>	Grafik perbandingan waktu tempuh sampling KA dari Palur – Yogyakarta .....	66
<b>Gambar 4. 2</b>	Grafik perbandingan waktu tempuh sampling KA dari Yogyakarta – Palur .....	66
<b>Gambar 4. 3</b>	Deviasi pola perjalanan Yogyakarta-Palur.....	67
<b>Gambar 4. 4</b>	Deviasi pola perjalanan Palur-Yogyakarta.....	67
<b>Gambar 4. 5</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Yogyakarta – Maguwo.....	69
<b>Gambar 4. 6</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Maguwo – Brambanan.....	71
<b>Gambar 4. 7</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Brambanan – Srowot.....	72
<b>Gambar 4. 8</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Srowot – Klaten .....	73
<b>Gambar 4. 9</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Klaten – Ceper .....	75
<b>Gambar 4. 10</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Ceper – Gawok .....	76
<b>Gambar 4. 11</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Gawok – Purwosari.....	77
<b>Gambar 4. 12</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Purwosari – SoloJebres .....	79
<b>Gambar 4. 13</b>	Energi profile hasil simulasi segmen SoloJebres – Palur.....	80
<b>Gambar 4. 14</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Palur- SoloJebres .....	81
<b>Gambar 4. 15</b>	Energi profile hasil simulasi segmen SoloJebres – Purwosari.....	83
<b>Gambar 4. 16</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Purwosari – Gawok.....	84
<b>Gambar 4. 17</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Gawok – Ceper .....	85
<b>Gambar 4. 18</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Ceper – Klaten .....	87
<b>Gambar 4. 19</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Klaten – Srowot .....	88
<b>Gambar 4. 20</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Srowot – Brambanan.....	89
<b>Gambar 4. 21</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Brambanan – Maguwo.....	91
<b>Gambar 4. 22</b>	Energi profile hasil simulasi segmen Maguwo – Yogyakarta.....	91
<b>Gambar 4. 23</b>	Perubahan daya terhadap kelandaian pada segmen Ceper-Gawok .....	96



<b>Gambar 4. 24</b> Perubahan daya terhadap persentase berat pada segmen Purwosari – Solo Jebres .....	97
<b>Gambar 4. 25</b> Kondisi penumpang KRL Yogyakarta – Palur kondisi hari libur.....	98
<b>Gambar 4. 26</b> Perubahan daya terhadap persentase berat pada segmen Ceper - Gawok .....	101
<b>Gambar 4. 27</b> Perubahan daya terhadap persentase berat pada segmen Purwosari – Solo Jebres .....	102
<b>Gambar 4. 28</b> Grafik trend penumpang KRL Yogyakarta – Palur tahun 2021 - 2024	117