

Analisis Pengereman Regeneratif Terhadap Efisiensi Energi Kereta Api Pada Sistem Kereta Api Perkotaan

Fadlur Rahman¹, Imam Muthohar^{1*}, Latif Budi S.¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: imam.muthohar@ugm.ac.id

INTISARI

Sektor perkeretaapian dikenal sebagai bentuk transportasi publik yang sangat telah berkembang lebih baik di seluruh dunia. Aspek penting dalam meningkatkan kualitas sektor perkeretaapian melibatkan optimalisasi konsumsi energi dalam operasi kereta. Optimalisasi memainkan peran penting dalam memastikan kelancaran operasi dan memberikan dampak positif terhadap lingkungan. Sumber konsumsi energi yang paling signifikan dalam operasi perkeretaapian disebabkan oleh traksi kereta. Proses traksi kereta api menyumbang sekitar 80% dari keseluruhan penggunaan energi. Penelitian ini dilakukan untuk memahami dan menganalisis kontribusi pengereman regeneratif sebagai bagian dari operasi pengendalian pergerakan kereta api yang hemat energi. Penelitian ini menggunakan empat studi kasus yang menggunakan input terkontrol yang berbeda, termasuk variabel independen waktu perjalanan, jumlah *collocation point* yang digunakan, dan penyertaan waktu penyangga tambahan untuk setiap waktu transit yang ditentukan. Hasil studi ini menunjukkan bahwa jumlah konsumsi energi dan pembangkitan energi pengereman regeneratif yang optimal dicapai ketika kecepatan operasional ditingkatkan menjadi 100 km/jam. Efisiensi energi yang dicapai mencapai 68% dari total energi, sementara energi yang dihasilkan oleh pengereman regeneratif mencapai 18% dari penggunaan energi yang optimal. Lebih lanjut, dengan penggabungan konsumsi energi dan output energi pengereman regeneratif, dimungkinkan untuk mencapai tingkat efisiensi sebesar 74%. Penerapan pengereman regeneratif dapat menjadi salah satu solusi dalam peningkatan efisiensi konsumsi energi pada transportasi perkeretaapian.

Kata kunci: Pengereman Regeneratif, Efisiensi energi, Sistem kereta api, Kontrol Kereta Api.

1 PENDAHULUAN

Menurut Tian et al. (2019), sistem perkeretaapian secara luas diakui sebagai moda transportasi darat yang sangat efisien. Sistem perkeretaapian memiliki kemampuan untuk memfasilitasi pengangkutan orang dan barang dalam skala yang besar, serta mampu menempuh jarak yang jauh dalam satu kali perjalanan. Namun demikian, atribut operasional layanan kereta api membutuhkan penggunaan energi yang cukup besar (Zhao et al., 2021). Zhao et al. (2021) menyelidiki bahwa operator kereta api menghadapi tantangan yang cukup signifikan dari meningkatnya biaya energi dan meningkatnya perhatian terhadap dampak lingkungan. Pada saat yang sama, mereka harus memastikan tingkat kualitas layanan. Oleh karena itu, menyelidiki efisiensi energi kereta api menjadi sangat penting.

Studi yang dilakukan oleh Keskin and Karamancioglu (2017) menunjukkan bahwa mengoptimalkan strategi operasi kereta api memiliki potensi besar dalam mengurangi konsumsi energi. Tian et al. (2017) menyatakan bahwa sebagian besar dari keseluruhan konsumsi energi operasi kereta api dialokasikan untuk traksi, berkisar antara 60% hingga 80%. Optimalisasi konsumsi energi selama traksi merupakan area yang sangat luas dengan potensi yang signifikan untuk peningkatan efisiensi energi. Menurut Tian et al. (2017), Chang melakukan penelitian di mana ia menyelidiki penggunaan algoritma genetik untuk mengoptimalkan profil kecepatan, khususnya lintasan kecepatan (*speed trajectory*), melalui penerapan pengendalian fase meluncur (*coasting control*).

Salah satu pendekatan untuk meningkatkan efisiensi energi dalam operasi kereta api adalah dengan menggunakan *Energy Efficient Train Control* (EETC). Menurut Scheepmaker et al. (2020), penggunaan EETC dapat menentukan *driving regime* yang paling menguntungkan yang menghasilkan optimalisasi energi. Selain itu, Pachtl (2018) menemukan bahwa konsumsi energi pada operasi kereta api dipengaruhi oleh mode pergerakan kereta api. Metode EETC meningkatkan efisiensi energi melalui pendekatan berurutan dalam menentukan formulasi yang tepat untuk operasi kereta. Fokus utama dari penelitian ini adalah untuk menentukan seberapa besar manfaat pengereman regeneratif dalam proses optimasi energi menggunakan EETC.

Selama periode pengereman, kereta yang dilengkapi dengan sistem pengereman regeneratif, akan mengkonversi energi kinetik menjadi energi listrik Scheepmaker and Goverde (2015). Teknik pengereman yang efisien diperlukan untuk memaksimalkan regenerasi energi selama operasi kereta. Integrasi pengereman regeneratif EETC memiliki

potensi untuk menjadi pendekatan yang layak untuk mencapai daya regenerasi maksimum dan mengoptimalkan pemanfaatan energi.

2 METODOLOGI

2.1 Train control problem

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis perumusan masalah kontrol kereta api yang optimal, secara khusus mempertimbangkan penggabungan operasi pengereman regeneratif. Penggabungan ini sangat penting untuk mengoptimalkan penghematan energi dalam operasi kereta api. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Scheepmaker and Goverde (2020), penelitian ini akan menggunakan pengereman regeneratif sebagai bagian dari rencana *driving regime*, selain pengereman mekanis konvensional. Penelitian ini akan menggunakan model *collocation point* untuk merepresentasikan kereta. Selain itu, analisis akan memasukkan variabel independen. Penelitian ini juga menggunakan model di mana fungsi masalah didefinisikan sebagai berikut:

$$E = \min \int_0^T (f(t) + \eta b_g(t)) v(t) dt \quad (1)$$

Dengan batasan-batasan:

$$s'(t) = v(t) \quad (2)$$

$$v'(t) = f(t) + b_g + b_m(t) - r(v) - g(s) \quad (3)$$

$$f(t)v(t) \leq \eta_f P_{f,max} \quad (4)$$

$$0 \leq v(t) \leq v_{max}(s) \quad (5)$$

$$-b_g(t)v(t) \leq \eta_g P_{g,max} \quad (6)$$

$$0 \leq f(t) \leq f_{max} \quad (7)$$

$$-b_{g,min} \leq b_g(t) \leq 0 \quad (8)$$

$$b_g(t) = 0 \text{ if } v(t) < v_1 \quad (9)$$

$$-b_{m,min} \leq b_m(t) \leq 0 \quad (10)$$

$$b_g + b_m \leq b_{min} \quad (11)$$

$$s(t_0) = 0, s(t_f) = s, v(t_0) = 0, v(t_f) = 0 \quad (12)$$

2.2 Model Optimasi

Untuk menemukan kondisi optimal, penelitian ini menurunkan kondisi optimal dengan mendefinisikan Hamiltonian H (m^2/s^2) terlebih dahulu (Scheepmaker dan Goverde, 2020). Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$H(s, v, \lambda_1, \lambda_2, f, b_m, b_g) = (\lambda_2 - v)f + (\lambda_2 - \eta_g v)b_g + \lambda_2 b_m + \lambda_1 v - \lambda_2 r(v) - \lambda_2 g(s) \quad (13)$$

Konstanta λ_1 dan λ_2 mewakili variabel independen t , di mana $\lambda_1(t)$ adalah percepatan (m/s^2) dan $\lambda_2(t)$ adalah kecepatan (m/s) dalam bentuk variabel t . Hamiltonian tidak bergantung pada waktu, sehingga $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$. Kondisi ini akan menjelaskan bahwa Hamiltonian akan konstan atau mendekati 0 untuk solusi optimal.

Berdasarkan model optimasi tersebut, kemudian metode mengemudi yang optimal dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. **Akselerasi maksimum (MA)** di mana traksi maksimum akan berlaku sebesar f , *driving regime* ini akan terikat oleh $\lambda_2 > v$ ketika f maksimal ($f_{max}(v(t))$).
2. **Cruising dengan traksi (sebagian) (CR1)**, dalam mode ini, $\lambda_2 = v$ dan $f \in [0, f_{max}(v(t))]$, saat $\lambda_2(t) = v$ akan berlaku untuk interval nontrivial. Sekarang, dengan mengikuti langkah pada Scheepmaker dan Goverde (2020).
3. **Coasting (CO)**, Mode ketiga ini adalah mode di mana kereta tidak akan memberikan gaya traksi dan secara bertahap mengurangi kecepatan karena adanya hambatan kereta dan hambatan jalur. Diindikasikan bahwa $\eta_g v < \lambda_2 < v$ dan $f = b_g = b_m = 0$. Kondisi ini menunjukkan bahwa batas kecepatan tidak dapat dipertahankan karena pengaruh hambatan terhadap kecepatan.
4. **Pengereman regeneratif maksimum dan pengereman mekanis parsial selama cruising (CR2)**, gaya mengemudi ini cenderung memberikan energi pengereman regeneratif yang paling besar dengan meningkatkan

kemungkinan pengereman regeneratif yang akan diterapkan. Selain itu, kasus ini akan mengikat $\lambda_2 = 0$ dan $b_m \in [-b_{m,min}, 0]$, $b_g = -\min(b_{g,min}, \frac{\eta_g P_{g,max}}{v})$ dan $f = 0$, kondisi ini membuat $b_m < 0$ dan $b_g < 0$.

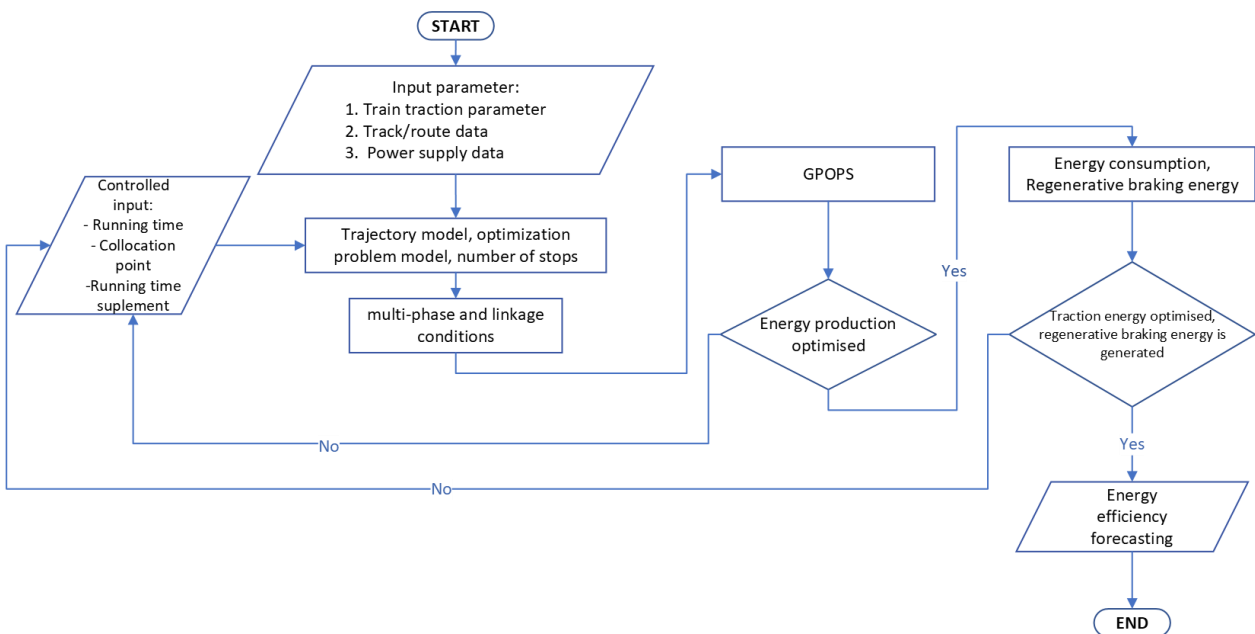
5. **Pengereman maksimum (MB)**, Rezim terakhir adalah dimana kereta akan menerapkan pengereman maksimum, dimana $\lambda_2 < 0$ dengan b_g dan b_m minimum dan $f = 0$ (Scheepmaker and Goverde, 2020). Selain itu, ketika kecepatan kurang dari kecepatan jelajah optimal, rezim ini akan diterapkan, di mana di sisi lain jika v masih dalam v_{max} kontrol penggerak akan menerapkan rezim CR2 namun dengan pengereman total maksimum.

2.3 Metode Pseudospectral

Penelitian ini menggunakan metode pseudospektral Radau. Metode ini menentukan *collocation* pada titik-titik Legendre-Gauss-Radau (LGR), termasuk titik awal. Metode pseudospektral Radau digunakan untuk menentukan *collocation points* untuk mengidentifikasi titik-titik optimasi dalam fase perjalanan kereta (Patterson and Rao, 2014). Pendekatan pseudospektral dijelaskan secara komprehensif dalam karya Rao, (Rao et al. (2011) dan (Patterson and Rao, 2014)). Penentuan titik kolokasi dilakukan dengan menggunakan metode *trial and error*.

2.4 Prosedur Penelitian

Input terkontrol harus digunakan untuk memulai simulasi dan menghitung model. Input terkontrol bertindak sebagai parameter penting yang menentukan variabel independen dan jumlah titik kolokasi yang digunakan dalam simulasi. Titik-titik kolokasi yang mewakili kondisi optimum dicapai melalui metode *trial and error*. Jika konsumsi energi dan energi pengereman regeneratif masih belum mewakili kondisi optimum, maka titik-titik kolokasi harus ditentukan untuk jumlah yang lebih tinggi atau lebih rendah. Langkah selanjutnya setelah mencapai konsumsi energi dan energi pengereman regeneratif yang optimal, hasilnya diterapkan untuk memulai peramalan konsumsi energi untuk operasi. Gambar berikut menjelaskan *flow chart* penelitian.



Gambar 1. Flow chart pengolahan data.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

Penelitian ini mengambil studi kasus di LRT Jabobedek, sebagai area penelitian digunakan 4 stasiun berurutan dengan panjang lintasan 6.35 km. Data lintasan yang digunakan adalah jarak antara setiap stasiun, *gradient* pada lintasan dan batasan kecepatan yang diterapkan, sedangkan nilai *curve* pada tikungan di lintasan tidak dipertimbangkan. Pengujian dilakukan dengan menerapkan 4 skenario yang berbeda, setiap skenario diatur dengan bervariasi kecepatan, nilai titik kolokasi dan penambahan suplemen waktu. Perlu dicatat bahwa waktu perjalanan antara setiap stasiun menggunakan data LRT Jabodebek dan penambahan *delay* yang ditentukan secara manual.

Untuk mensimulasikan dan menghitung energi pengereman regeneratif, asumsi-asumsi berikut ini dibuat untuk input data dan masalah pemodelan.

- a) Konstanta untuk efektivitas pengereman regeneratif adalah 30%.
- b) Tidak ada kurva yang dimasukkan ke dalam model
- c) Sistem persinyalan, ATP (*Automatic Train Protection*), dan ATO (*Automatic Train Operation*) tidak dipertimbangkan.
- d) Hanya seluruh konsumsi energi traksi pada rel ketiga untuk operasi kereta tunggal yang dipertimbangkan, kerugian transmisi energi diabaikan.
- e) Tidak ada kereta lain di sekitarnya yang dipertimbangkan.

Hasil dari pengujian dirangkum pada tabel – tabel berikut:

Tabel 1. Hasil test 1 – Skenario *running time* dengan *normal timetable*.

Kasus	Input Terkontrol				Node /Interval	Kecepatan (km/h)	Suplemen waktu (s)	Konsumsi Energi (kWh)	RBE (kWh)	RBE/Energi (%)
	Waktu tempuh/span (s)									
	S1	S2	S3	S4						
1	<i>Normal timetable</i>									
	92	135	157	75	10	80	0	342.81	95.61	27.89%
					50			154.77	34.18	22.08%
					100			158.36	34.05	21.50%
					10	90		335.98	93.24	27.75%
					50			221.19	49.70	22.47%
					100			244.67	54.07	22.10%
					10	100		342.81	95.61	27.89%
					50			154.77	34.18	22.08%
					100			158.36	34.05	21.50%

Tabel 2. Hasil test 2 – Skenario *running time* dengan *normal timetable* + suplemen waktu.

Kasus	Input Terkontrol				Node /Interval	Kecepatan (km/h)	Suplemen waktu (s)	Konsumsi Energi (kWh)	RBE (kWh)	RBE/Energi (%)
	Waktu tempuh/span (s)									
	S1	S2	S3	S4						
2	<i>Normal timetable with time supplement</i>									
	92	135	157	75	10	80	0.15	152.13	47.46	31.20%
					50			351.82	80.94	23.01%
					100			326.33	73.11	22.40%
					10	90		160.23	50.24	31.35%
					50			213.38	47.89	22.44%
					100			210.74	46.17	21.91%
					10	100		158.64	49.73	31.35%
					50			75.79	15.97	21.07%
					100			74.29	14.78	19.90%

Tabel 3. Hasil test 3 – Skenario *Extended timetable*.

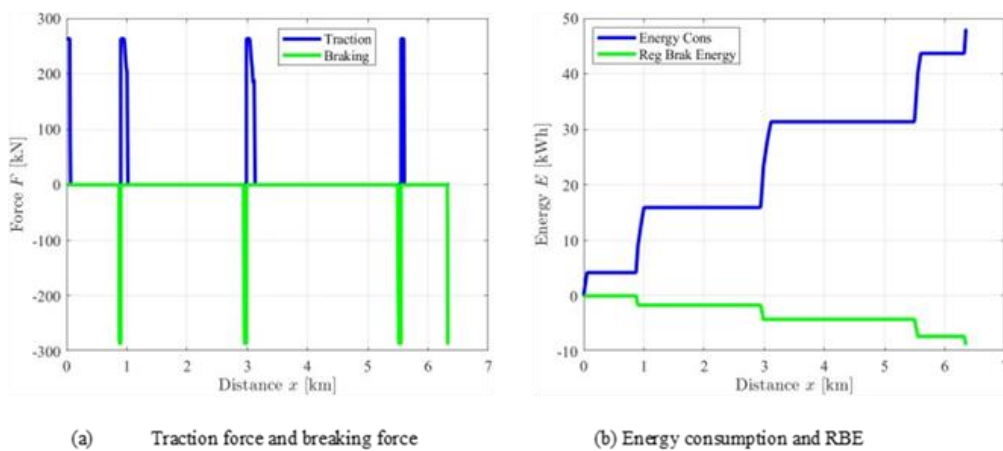
Kasus	Input Terkontrol				Node /Interval	Kecepatan (km/h)	Suplemen waktu (s)	Konsumsi Energi (kWh)	RBE (kWh)	RBE/Energi (%)
	Waktu tempuh/span (s)									
	S1	S2	S3	S4						
3	<i>Extended timetable</i>									
	101	138	212	96	10	80	0	162.88	50.13	30.78%
					50			241.99	55.59	22.97%
					100			217.69	47.96	22.03%
					10	90		171.66	51.85	30.21%
					50			147.81	32.81	22.20%
					100			143.06	30.7	21.46%
					10	100		172.85	53.23	30.80%
					50			76.03	16.08	21.15%
					100			73.63	14.61	19.84%

Tabel 4. Hasil test 4 – Skenario *Extended timetable* + suplemen waktu.

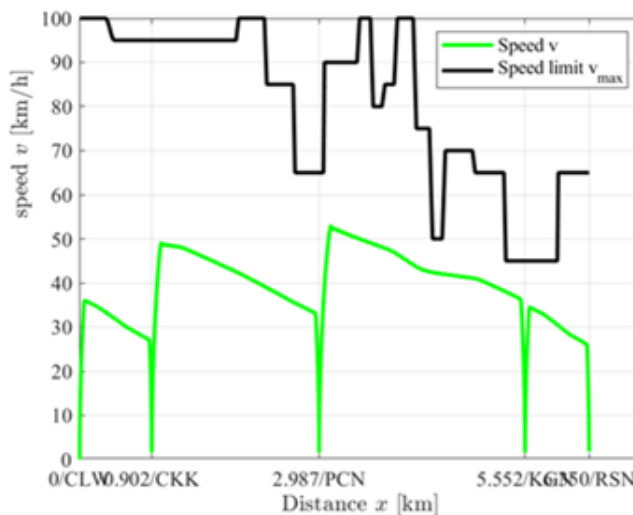
Kasus	Input Terkontrol				Node /Interval	Kecepatan (km/h)	Suplemen waktu (s)	Konsumsi Energi (kWh)	RBE (kWh)	RBE/Energi (%)
	Waktu tempuh/span (s)									
	S1	S2	S3	S4						
4	<i>Extended timetable with time supplement</i>									
	101	138	212	96	10	80	0.15	102.74	35.01	34.08%
				50				241.61	55.48	22.96%

100		256.62	57.29	22.32%
10	90	93.2	32.52	34.89%
50		151.02	33.4	22.12%
100		145.19	31.24	21.52%
10	100	96.55	31.61	32.74%
50		52	11	21.15%
100		48.08	8.85	18.41%

Konsumsi energi yang optimal untuk kereta api dicapai dengan meningkatkan kecepatan maksimum hingga 100 km/jam, dengan pengereman regeneratif yang menghasilkan 8,85 kWh. Proporsi energi pengereman regeneratif adalah 18,41%. Penggunaan energi yang paling efisien dicapai ketika waktu tempuh pada studi kasus 4 dimana waktu tempuh diberikan *delay* sedemikian rupa dan mendapat suplemen waktu. Gambar 2 menunjukkan grafik hasil simulasi. Selanjutnya Gambar 3 menunjukkan bahwa akselerasi dipertahankan hingga kecepatan mencapai 52 km/jam. *Driving regime* yang optimal menunjukkan bahwa kereta menggunakan mode jelajah di mana kereta beroperasi pada kecepatan yang konsisten sebelum bertransisi ke fase meluncur yang disertai dengan pengereman bertahap. Setelah periode meluncur yang diperpanjang, kereta memulai penggunaan pengereman regeneratif dengan menerapkan gaya pengereman maksimum.



Gambar 2. Hasil simulasi gaya traksi dan konsumsi energi.



Gambar 3. Trajektori Kereta.

3.2 Pembahasan

Studi ini mengungkapkan hubungan yang konsisten antara konsumsi energi dan energi pengereman regeneratif, dengan konsumsi energi yang lebih tinggi sesuai dengan peningkatan output energi pengereman regeneratif. Tingkat energi regenerasi paling rendah adalah 18%, sedangkan tingkat maksimumnya adalah 34% dalam kondisi yang tidak dioptimalkan. Energi pengereman regeneratif dapat berkontribusi hingga 30% dari total energi traksi. Studi ini juga

menemukan korelasi positif antara konsumsi energi dan energi hasil pengereman regeneratif, yang memengaruhi potensi energi yang dihasilkan oleh pengereman regeneratif. Penerapan pengereman regeneratif dapat dieksplorasi pada situasi dengan lintasan menurun, yang memungkinkan regenerasi energi selama proses pengereman.

Prosedur pengoptimalan menghasilkan konservasi energi yang signifikan dan pemulihan energi pengereman regeneratif. Hubungan linier antara perilaku pengereman dan konsumsi energi menghasilkan peningkatan efisiensi energi sebesar 74%. Strategi mengemudi yang dioptimalkan menghasilkan penghematan total sebesar 39,23 kWh, dibandingkan dengan mode konvensional seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Efisiensi energi.

Deskripsi	Energi awal (Kwh)	Energi teroptimasi (Kwh)	Rating penghematan energi (%)
Konsumsi Energi	151.08	48.08	68%
RBE	95.61 (dari kasus 1)	8.85	
Konsumsi energi - RBE		39.23	74%

Temuan ini menunjukkan bahwa menambahkan suplemen waktu tambahan (*buffer time*) ke dalam durasi operasi yang diperpanjang menghasilkan lintasan kereta (*train trajectory*) yang paling menguntungkan, menghasilkan konsumsi energi yang optimal dan pembangkitan energi pengereman regeneratif. Metode pseudospectral menggabungkan waktu penyangga dengan mengalokasikannya secara seragam di setiap interval waktu operasional antara dua stasiun yang berurutan. Lintasan kereta telah dioptimalkan secara efektif dengan menggunakan strategi ini.

4 KESIMPULAN

Studi ini secara efektif menunjukkan bahwa penyertaan pengereman regeneratif secara signifikan meningkatkan efisiensi energi dan mendorong penghematan yang lebih besar.

- Studi ini mengevaluasi efisiensi energi pengereman regeneratif melalui studi kasus. Hasilnya menunjukkan hubungan linier antara produksi energi pengereman regeneratif dan konsumsi energi, dengan 34% hingga 18% diregenerasi.
- Studi ini mengungkapkan bahwa inisiasi tahapan operasi pengereman (*braking trajectory*) yang optimal terjadi selama fase meluncur (*coasting mode*) dan pengereman maksimal, yang mengarah pada kontrol lintasan kereta yang dioptimalkan, sehingga menghasilkan konsumsi energi yang optimal dan energi pengereman regeneratif yang tertinggi.
- Studi ini berfokus pada perkiraan energi pengereman regeneratif, yang dapat mengurangi penggunaan energi sebesar 18% per perjalanan kereta. Tingkat optimal berkisar antara 18% hingga 20%. Studi ini juga menunjukkan korelasi linier antara konsumsi energi dan energi pengereman regeneratif, yang menunjukkan bahwa memprediksi prakiraan energi berdasarkan jarak dapat mengoptimalkan penggunaan energi.

REFERENSI

- Keskin, K. and Karamancioglu, A. 2017. Energy-efficient train operation using nature-inspired algorithms. *Journal of Advanced Transportation*. **2017**.
- Pachl, J. 2018. *Railway Operation and Control* 4th ed. Mountlake Terrace: VTD rail publishing.
- Patterson, M.A. and Rao, A. V. 2014. GPOPS - II: A MATLAB software for solving multiple-phase optimal control problems using hp-adaptive gaussian quadrature collocation methods and sparse nonlinear programming. *ACM Transactions on Mathematical Software*. **41**(1).
- Rao, A. V, Benson, D.A., Darby, C., Patterson, M.A., Francolin, C., Sanders, I. and Huntington, G.T. 2011. Algorithm 902: GPOPS, A MATLAB Software for Solving Multiple-Phase Optimal Control Problems Using the Gauss Pseudospectral Method. . **37**(2).
- Scheepmaker, G.M. and Goverde, R.M.P. 2015. Delft University of Technology Effect of regenerative braking on energy-efficient train control.
- Scheepmaker, G.M. and Goverde, R.M.P. 2020. Energy-efficient train control using nonlinear bounded regenerative braking. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. **121**, p.102852.
- Scheepmaker, G.M., Pudney, P.J., Albrecht, A.R., Rob, M., Goverde, P. and Howlett, P.G. 2020. Journal of Rail Transport Planning & Management Optimal running time supplement distribution in train schedules for energy-efficient train control. . **14**(July 2019).
- Tian, Z., Weston, P., Zhao, N., Hillmansen, S., Roberts, C. and Chen, L. 2017. System energy optimisation strategies for metros with regeneration. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. **75**, pp.120–135.
- Tian, Z., Zhao, N., Hillmansen, S., Roberts, C., Dowens, T. and Kerr, C. 2019. SmartDrive: Traction Energy Optimization and Applications in Rail Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. **20**(7), pp.2764–2773.
- Zhao, N., Tian, Z., Chen, L., Roberts, C. and Hillmansen, S. 2021. Driving Strategy Optimization and Field Test on an Urban Rail Transit System. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. **13**(3), pp.34–44.