

Optimisasi *Train Trajectory* dengan Konsumsi Energi untuk Peningkatan Batas Kecepatan Maksimum Operasi

M. Iqbal^{1*}, S. Malkhamah¹, M.R.F. Amrozi¹

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

*Corresponding author: muhammad.iqbal.1714@mail.ugm.ac.id

INTISARI

Dalam era transportasi yang semakin berkembang, optimisasi operasi perkeretaapian menjadi krusial untuk mencapai efisiensi yang tinggi dan berkelanjutan. Salah satu aspek penting dalam pengembangan ini adalah analisis optimisasi *train trajectory*, yang fokus pada pengaturan kecepatan perjalanan kereta api untuk meningkatkan efisiensi konsumsi energi. Dalam konteks operasi perkeretaapian, pengaruh kenaikan batas kecepatan maksimum operasi menjadi elemen kritis yang memerlukan perhatian mendalam. Keputusan untuk meningkatkan batas kecepatan tidak hanya berpengaruh pada aspek waktu perjalanan, tetapi juga memiliki dampak yang signifikan pada efisiensi energi dan keseluruhan keberlanjutan sistem transportasi. Oleh karena itu, melihat secara cermat pengaruh dari peningkatan batas kecepatan operasi menjadi perhatian utama penelitian ini. Metode yang digunakan untuk melakukan optimisasi adalah *Radau-Pseudospectral Method* yang sudah digunakan oleh beberapa peneliti untuk mengoptimisasi *train trajectory*. Dengan mengimplementasikan peningkatan batas kecepatan maksimum operasi dari 80 km/jam ke 100 km/jam, hasil simulasi menunjukkan bahwa terdapat penghematan energi sebesar 5%. Hal ini menunjukkan bahwa adopsi kecepatan operasi yang lebih tinggi dapat memberikan keuntungan signifikan dalam efisiensi energi perjalanan kereta.

Kata kunci: *train trajectory*, optimasi, kecepatan kereta, *radau-pseudospectral method*, konsumsi energi

1 PENDAHULUAN

Dalam konteks sistem LRT Jabodebek, pentingnya optimalisasi *train trajectory* sangatlah penting. Sebagaimana diuraikan oleh Scheepmaker *et al.* (2017), optimalisasi *train trajectory* sangat penting dalam memastikan pengoperasian kereta api yang efisien, mengurangi konsumsi energi, dan menurunkan emisi karbon. Selain itu, strategi operasi kereta yang ditingkatkan berkontribusi pada peningkatan kualitas layanan, peningkatan kenyamanan penumpang, dan peningkatan keandalan. Faktor-faktor ini berperan penting dalam mendorong pemanfaatan transportasi umum dan mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi (Albrecht *et al.*, 2013). Sistem kendali kereta api tradisional sering kali memprioritaskan meminimalkan waktu perjalanan dan mematuhi jadwal tanpa secara eksplisit mempertimbangkan konsumsi energi. Akibatnya, pendekatan ini dapat mengakibatkan operasional kereta api menjadi tidak efisien, sehingga mengakibatkan penggunaan energi yang lebih tinggi dan peningkatan emisi karbon.

Untuk melakukan optimasi, pemahaman yang komprehensif tentang fenomena optimasi *train trajectory* sangat penting. Menurut Scheepmaker *et al.* (2020b), tiga metode yang telah dikembangkan adalah *direct*, *indirect*, dan *heuristic*. Peneliti seperti Bocharnikov *et al.* (2010) dan Zhao *et al.* (2020) telah meneliti *multiple-phase trajectory* di Jalur Metro Guangzhou menggunakan metode *indirect*. Pendekatan *heuristic* telah dilakukan oleh Haahr *et al.* (2017) dan Chevrier *et al.* (2013), menggunakan kecerdasan buatan atau algoritma pencarian untuk optimasi. Wang *et al.* (2013) dan Scheepmaker *et al.* (2017), antara lain, telah menggunakan metode *direct* untuk mendapatkan *trajectory* yang optimal, yang kemudian diterjemahkan ke dalam jadwal/*timetable* kereta api. Terlepas dari berbagai metode yang digunakan, belum ada peneliti yang berupaya melihat peningkatan operasional kereta api dengan meningkatkan kecepatan operasional maksimum pada infrastruktur yang ada. Mengingat kemampuan infrastruktur yang dapat meningkatkan kecepatan operasional dalam studi kasus ini, penulis bertujuan untuk menyelidiki dampak *train trajectory* terhadap konsumsi energi sistem kereta api saat adanya peningkatan kecepatan maksimum operasi. Optimasi akan menggunakan metode langsung yaitu metode *radau pseudospectral* seperti yang telah dikembangkan oleh Scheepmaker *et al.* (2020a).

2 METODOLOGI

Studi ini dimulai dengan pemeriksaan menyeluruh terhadap literatur terkait, yaitu mempelajari metodologi yang telah digunakan. Tinjauan literatur dimulai dengan mengeksplorasi teori-teori yang berkaitan dengan pemodelan *rolling*

stock dan teknik optimasi yang sebelumnya diterapkan dalam penelitian optimasi. Selain itu, analisis retrospektif terhadap upaya penelitian sebelumnya juga dilakukan. Kemudian penelitian dilanjutkan dengan menguraikan masalah optimasi untuk pengembangan *coding* dalam mengoptimalkan *train trajectory*. *Coding script* selanjutnya dirumuskan untuk menyelaraskan dengan kendala-kendala *case study* dan untuk menjawab pertanyaan penelitian.

Metode optimisasi yang digunakan adalah metode langsung dengan menggunakan *Radau Pseudospectral Method (RPM)*. *Radau Pseudospectral Method* menggunakan simpul kuadratur *Legendre-Gauss-Radau* dan memungkinkan optimisasi simultan dari variabel-variabel input *state* dan *control*. Metode ini juga mendiscretisasikan tugas optimisasi *trajectory* kontinu menjadi masalah berdimensi terbatas, memungkinkan eksplorasi strategi *control* dan *constraint* yang rumit, sehingga sangat cocok untuk optimisasi trayektori kereta (Su, 2020). Untuk melakukan optimisasi menggunakan metode ini, digunakan fitur GPOPS (*General Pseudospectral Optimization Software*), yang merupakan aplikasi tambahan dalam perangkat lunak MATLAB. Simulasi dilakukan pada laptop dengan prosesor 2.8 GHz dan RAM 16 GB.

Setelah pengembangan *coding*, dilakukan analisis mengenai studi kasus untuk melakukan simulasi guna mendapatkan optimalisasi *train trajectory*. Studi kasus ini menggunakan input dari LRT Jabodebek untuk keempat stasiun pada lintas 1, yaitu Harjamukti, Ciracas, Kp. Rambutan, dan Taman Mini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Data diperoleh melalui tinjauan kualitatif dokumen dari tempat kerja penulis. Hasil dari simulasi akan digunakan sebagai panduan perbaikan untuk mengevaluasi hasil *output* yang dihasilkan. Sehingga, peningkatan pada *coding* dapat dilakukan jika hasilnya tidak sesuai dengan kondisi aktual. Pada akhir simulasi, analisis akan ditutup dengan diskusi mengenai hasil simulasi yang dibandingkan dengan kondisi terkini LRT Jabodebek.



Gambar 1. Lintas pelayanan LRT Jabodebek (Detiknews, 2023)

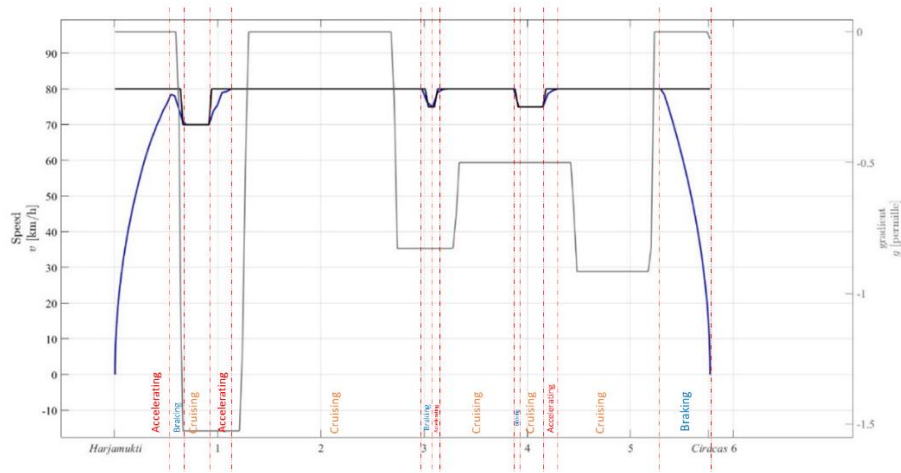
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

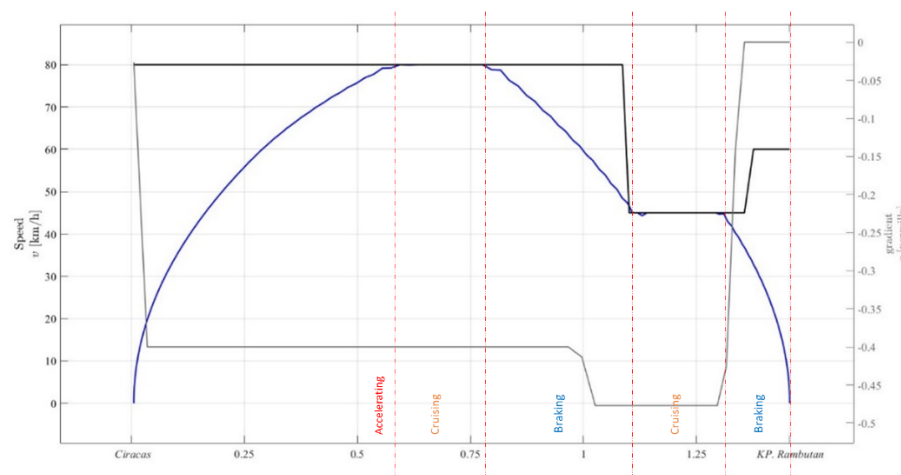
3.1.1 Pengujian kondisi aktual LRT Jabodebek

Berdasarkan data yang diperoleh penulis, dapat disimpulkan bahwa operasional saat ini tidak mengedepankan efisiensi energi, melainkan lebih fokus pada pencapaian waktu tempuh tercepat, atau operasi *Minimum Time Train Control (MTTC)*. Berbeda dengan *Energy-Efficient Train Control (EETC)*, tujuan utama dari *Minimum Time Train Control (MTTC)* adalah meminimalkan total durasi perjalanan kereta, di mana tidak ada mode *coasting* selama beroperasi (Scheepmaker *et al.*, 2020b). Penulis melakukan simulasi berdasarkan kondisi operasional aktual ini untuk

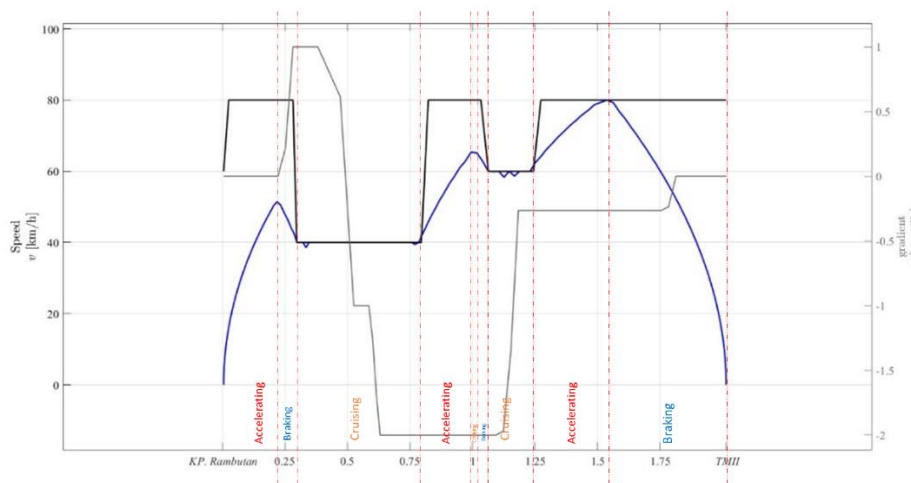
mendapatkan perbandingan yang konsisten dengan hasil optimalisasi, karena menggunakan *coding script* yang dikembangkan oleh penulis sendiri.



Gambar 2. Simulasi *trajectory* aktual untuk stasiun Harjamukti ke Ciracas



Gambar 3. Simulasi *trajectory* aktual untuk stasiun Ciracas ke Kp. Rambutan



Gambar 4. Simulasi *trajectory* aktual untuk stasiun Kp. Rambutan ke Taman Mini

Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4 memperlihatkan aktual *trajectory* yang dihasilkan oleh simulasi *coding*. Garis hitam merupakan batas kecepatan operasi maksimum yang terbatas oleh kemampuan setiap lokasi infrastruktur (*viaduct*, stasiun, atau *curve span*). Garis abu-abu merepresentasikan nilai gradien sepanjang infrastruktur. Garis biru merupakan *train trajectory* yang mengindikasikan bahwa kecepatan maksimum terbatas oleh batas kecepatan di garis hitam. *Train Trajectory* juga mengindikasikan bahwa mode *driving* tidak menggunakan mode *coasting* dimana operasi *driving* yang dilakukan hanya *acceleration*, *coasting*, dan *braking*, mengikuti aktual operasi saat ini.

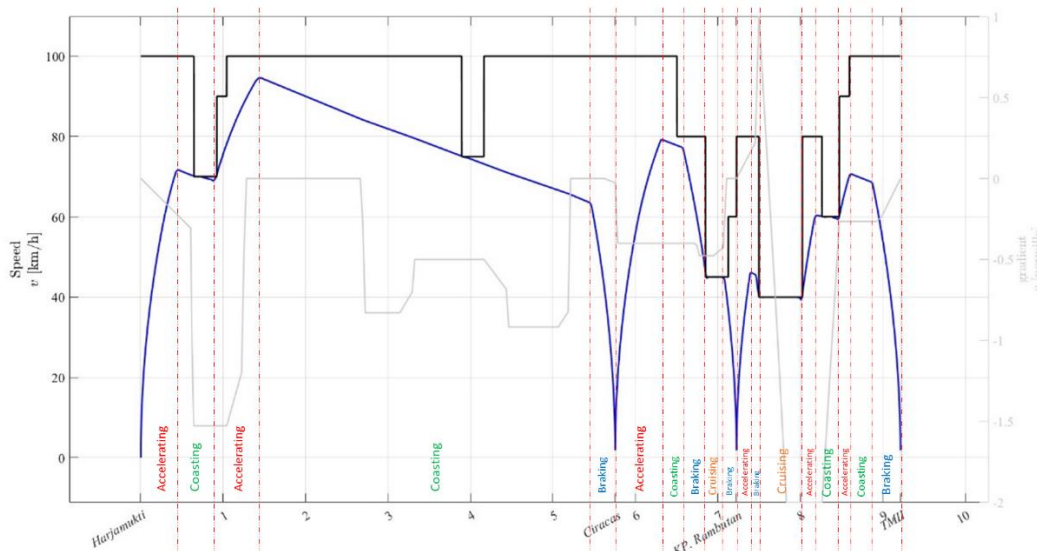
Tabel 1. Nilai konsumsi energi aktual dari Harjamukti ke Taman Mini

Stasiun Asal	Stasiun Tujuan	Waktu Tempuh (s)	Energi (kWH)
Harjamukti	Ciracas	307.0511	43.11956
Ciracas	Kp. Rambutan	116.1675	20.50151
Kp. Rambutan	TMII	165.7688	23.08512
Total		588.9874	86.70619

Dalam Tabel 1, terdapat data waktu tempuh dan konsumsi energi aktual dari simulasi. Nilai konsumsi energi ini akan dijadikan sebagai pembanding dengan hasil simulasi ketika kecepatan operasi maksimum ditingkatkan. Sementara itu, nilai waktu tempuh akan menjadi input untuk simulasi berikutnya, di mana waktu tempuh simulasi tetap konstan meskipun terjadi perubahan pada kecepatan operasi maksimum.

3.1.2 Pengujian kenaikan speed limit

Dalam simulasi ini, dilakukan peningkatan kecepatan operasi maksimum menjadi 100 km/h. Dari batas kecepatan maksimum sebelumnya, yang sebelumnya berada pada 80 km/h, diubah menjadi 100 km/h, sementara kecepatan lainnya tetap konstan. Waktu tempuh yang tercantum di Tabel 1 dijadikan sebagai target untuk hasil simulasi, sehingga dampak dari optimisasi energi pada *train trajectory* hanya terfokus pada efek peningkatan kecepatan operasi maksimum.



Gambar 5. Hasil simulasi *train trajectory* dengan batas kecepatan maksimum operasi 100 kmh

Seperti pada simulasi sebelumnya, garis hitam pada Gambar 5 merupakan batas kecepatan maksimum operasi, garis abu-abu merupakan nilai gradien sepanjang infrastruktur, dan garis biru merupakan *train trajectory*. Hasil simulasi dengan optimisasi energi atau EETC ini, memperlihatkan bahwa operasi saat ini menggunakan mode *driving coasting*. Berbeda dengan hasil simulasi sebelumnya, optimisasi pada simulasi ini mengutamakan energi yang paling efisien.

Untuk kecepatan maksimum operasi berada pada 94.504 km/h yang mengindikasikan bahwa simulasi tidak memerlukan pencapaian kecepatan maksimum 100 km/h untuk mencapai tujuan dengan target waktu tempuh aktual. Khususnya pada stasiun Ciracas ke Kp. Rambutan dan Kp. Rambutan ke TMII, kecepatan maksimum operasi masih berada pada level maksimum 80 km/h untuk mencapai tujuan dengan target waktu tempuh.

Tabel 2. Perbandingan konsumsi energi aktual dan skenario

Stasiun Asal	Stasiun Tujuan	Konsumsi Energi Aktual (kWH)	Konsumsi Energi Skenario (kWH)	Deviasi (%)
Harjamukti	Ciracas	43.11956399	36.06336315	16%
Ciracas	Kp. Rambutan	20.50150776	23.97806625	-17%
Kp. Rambutan	TMI	23.08512003	22.15707466	4%
	Total	86.70619178	82.19850406	5%

Tabel 2 memperlihatkan perbandingan konsumsi energi aktual dengan hasil simulasi dengan kenaikan batas kecepatan maksimum operasi. Secara total, didapatkan bahwa ada penghematan konsumsi energi sebesar 5%.

3.2 Pembahasan

Seperti yang diteliti oleh Scheepmaker *et al.* (2020a), untuk mendapatkan *train trajectory* yang optimal, diperlukan kecepatan operasi maksimum yang memadai agar proses *coasting* dapat dilakukan secara maksimal hingga mencapai stasiun tujuan. Hal ini mengartikan bahwa dengan target waktu tempuh sesuai aktual, apabila dapat beroperasi dengan kecepatan operasi maksimum lebih tinggi, ia dapat mencapai *train trajectory* dengan energi yang optimum pada operasinya.

Simulasi yang melibatkan peningkatan batas kecepatan dari 80 km/jam menjadi 100 km/jam menghasilkan penghematan energi sebesar 5%. Hasil ini sejalan dengan temuan Haahr *et al.* (2017) dan Yang *et al.* (2018), yang menjelaskan bahwa peningkatan batas kecepatan dapat menghasilkan penghematan energi dengan tetap mempertahankan waktu target. Fenomena ini disebabkan oleh kemampuan peningkatan batas kecepatan untuk memfasilitasi penentuan kecepatan maksimum optimal pada kecepatan yang lebih tinggi. Efisiensi *train trajectory* bergantung pada jumlah operasi *coasting*, karena dalam fase ini tidak ada pengeluaran energi selama *coasting*. Upaya untuk mencapai kecepatan operasi maksimum optimal menghasilkan jumlah operasi *coasting* yang minimal, sehingga mengurangi kebutuhan gaya tarik. Pengurangan strategis dalam operasi *coasting* ini muncul dari integrasi operasi *coasting* untuk mencapai waktu target, sehingga membatasi penggunaan *traction force* ke minimum (Scheepmaker *et al.*, 2020a).

Implementasi peningkatan batas kecepatan mungkin tidak berjalan tanpa tantangan. Meningkatkan kecepatan operasional dapat memerlukan perubahan dalam regulasi, kebijakan, dan tata kelola lembaga. Hal ini dapat menimbulkan tantangan terkait koordinasi antara berbagai pemangku kepentingan untuk mendapatkan persetujuan peningkatan kecepatan kereta. Meskipun demikian, perlu dicatat bahwa operasi yang dioptimalkan ini akan mendorong peningkatan keandalan dan operasi kereta yang lebih efisien dari segi biaya (Albrecht *et al.*, 2013).

4 KESIMPULAN

Melalui hasil simulasi didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan batas kecepatan berkontribusi pada peningkatan efisiensi energi jalur kereta. LRT Jabodebek memiliki kemampuan untuk meningkatkan kecepatan operasional, mempertimbangkan kapasitas infrastruktur dan kemampuan *rolling stock*.
- Dengan adanya keleluasaan untuk beroperasi pada kecepatan yang lebih tinggi, dimungkinkan untuk dapat mencapai *train trajectory* dengan kecepatan maksimum operasi yang optimal.
- Akselerasi membantu mencapai kecepatan optimum *cruising* maksimum dan mendorong fase *coasting*, yang tidak memerlukan traksi aktif untuk mencapai tujuan. Hal ini pada menyebabkan adanya pengurangan konsumsi energi secara keseluruhan.

REFERENSI

Albrecht, A.R., Howlett, P.G., Pudney, P.J. & Vu, X., 2013. Energy-efficient train control: From local convexity to global optimization and uniqueness. *Automatica*, 49, 3072-3078.

- Bocharnikov, Y., Tobias, A. & Roberts, C., Year. Reduction of train and net energy consumption using genetic algorithms for trajectory optimisation. *IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010)*IET, 1-5.
- Chevrier, R., Pellegrini, P. & Rodriguez, J., 2013. Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 37, 20-41.
- Detiknews, 2023. *Peta LRT Jabodebek: Info Rute dan Lokasi Stasiunnya* [online]. Detiknews. Available from: <https://news.detik.com/berita/d-6771793/peta-lrt-jabodebek-info-rute-dan-lokasi-stasiunnya> [Accessed Access Date 2023].
- Haahr, J.T., Pisinger, D. & Sabbaghian, M., 2017. A dynamic programming approach for optimizing train speed profiles with speed restrictions and passage points. *Transportation Research Part B: Methodological*, 99, 167-182.
- Scheepmaker, G.M., Goverde, R.M.P. & Kroon, L.G., 2017. Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*, 257, 355-376.
- Scheepmaker, G.M., Pudney, P.J., Albrecht, A.R., Goverde, R.M.P. & Howlett, P.G., 2020a. Optimal running time supplement distribution in train schedules for energy-efficient train control. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 14, 100180.
- Scheepmaker, G.M., Willeboordse, H.Y., Hoogenraad, J.H., Luijt, R.S. & Goverde, R.M.P., 2020b. Comparing train driving strategies on multiple key performance indicators. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 13, 100163.
- Su, Z., Year. Design of a train trajectory optimization method based on pseudo-spectral method. *2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA)*IEEE, 163-167.
- Wang, Y., De Schutter, B., Van Den Boom, T.J. & Ning, B., 2013. Optimal trajectory planning for trains—a pseudospectral method and a mixed integer linear programming approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 29, 97-114.
- Yang, S., Wu, J., Yang, X., Sun, H. & Gao, Z., 2018. Energy-efficient timetable and speed profile optimization with multi-phase speed limits: Theoretical analysis and application. *Applied Mathematical Modelling*, 56, 32-50.
- Zhao, N., Tian, Z., Chen, L., Roberts, C. & Hillmansen, S., 2020. Driving strategy optimization and field test on an urban rail transit system. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 13, 34-44.