

OPTIMALISASI MANAJEMEN ENERGI DAN PENJADWALAN KENDARAAN UNTUK BUS LISTRIK DAN PLUG-IN HYBRID ELECTRIC BUS (PHEB) DALAM TRANSPORTASI PERKOTAAN

Muhamad Zaky Abqary¹, Gunawan Dwi Haryadi², Yusuf Umardani²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

E-mail: muhamadzakyabqary@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini membahas strategi optimalisasi sistem transportasi publik berbasis bus listrik (Battery Electric Buses/BEB) dan plug-in hybrid electric buses (PHEB), dengan fokus pada manajemen energi, penjadwalan kendaraan, serta integrasi teknologi Vehicle-to-Grid (V2G). Melalui kajian terhadap sepuluh publikasi ilmiah terkini, penelitian ini mengevaluasi efektivitas strategi ANN-PMP dalam mengelola ketidakpastian massa kendaraan, penggunaan pendekatan optimisasi integer dan metaheuristik untuk penjadwalan simultan armada dan pengisian daya, serta potensi penerapan V2G sebagai solusi efisiensi dan pendapatan tambahan. Hasil analisis menunjukkan bahwa integrasi pendekatan data-driven dan optimisasi dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar hingga 46,93%, mengurangi jumlah armada yang dibutuhkan, serta memperkuat peran sistem transportasi dalam mendukung stabilitas jaringan listrik. Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan pendekatan terpadu dalam transisi menuju transportasi perkotaan yang lebih berkelanjutan.

Kata kunci: bus listrik; optimisasi sistem transportasi; pengisian daya; *plug-in hybrid electric bus (pheb)*; *vehicle-to-grid (v2g)*

Abstract

This study explores optimization strategies for public transportation systems based on Battery Electric Buses (BEB) and Plug-in Hybrid Electric Buses (PHEB), focusing on energy management, vehicle scheduling, and the integration of Vehicle-to-Grid (V2G) technology. By reviewing ten recent scientific publications, the study evaluates the effectiveness of ANN-PMP strategies in handling vehicle mass uncertainty, the use of integer optimization and metaheuristic approaches for simultaneous fleet and charging scheduling, and the potential of V2G as a solution for operational efficiency and additional revenue. The analysis reveals that integrating data-driven and optimization approaches can improve fuel efficiency by up to 46.93%, reduce fleet size, and enhance the role of transport systems in supporting grid stability. These findings highlight the importance of comprehensive approaches in advancing sustainable urban mobility.

Keywords: *charging infrastructure; electric bus; plug-in hybrid electric bus (pheb); transportation system optimization; vehicle-to-grid (v2g)*

1. Pendahuluan

Transisi menuju sistem transportasi berkelanjutan menjadi perhatian utama dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan peningkatan konsumsi energi. Dalam konteks ini, bus listrik (Battery Electric Buses/BEB) dan plug-in hybrid electric buses (PHEB) menjadi solusi utama untuk menggantikan kendaraan berbahan bakar fosil di sektor transportasi publik [1][3][7]. BEB menawarkan keunggulan berupa nol emisi lokal dan operasi yang tenang, sementara PHEB memberikan fleksibilitas daya dengan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah.

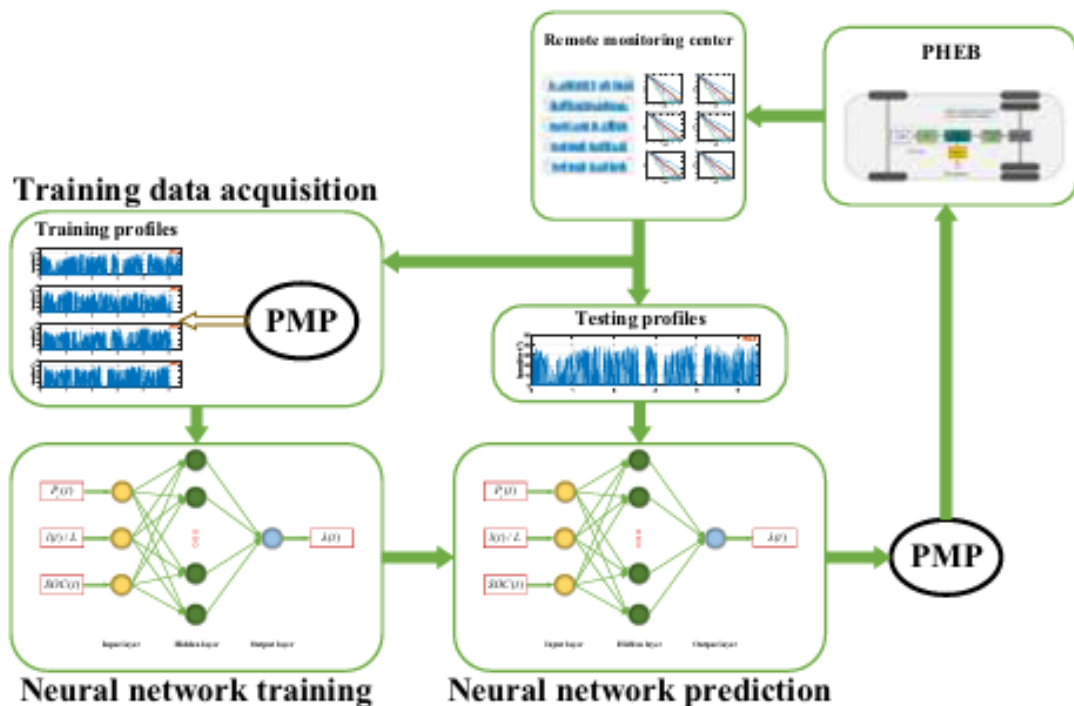
Namun, penerapan skala besar BEB dan PHEB memunculkan tantangan baru, mulai dari ketidakpastian beban kendaraan, efisiensi pengelolaan energi, kompleksitas penjadwalan armada, hingga kebutuhan infrastruktur pengisian daya yang optimal [5][9]. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan komprehensif yang mengintegrasikan strategi manajemen energi berbasis data, optimisasi penjadwalan kendaraan, serta teknologi baru seperti Vehicle-to-Grid (V2G) untuk mendukung operasional dan efisiensi sistem secara keseluruhan [8][10].

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini mengkaji pendekatan dari sepuluh publikasi ilmiah untuk merumuskan strategi optimalisasi sistem transportasi berbasis BEB dan PHEB. Fokus utama terbagi dalam tiga aspek utama, yaitu manajemen energi adaptif, optimisasi penjadwalan dan pengisian daya, serta integrasi Vehicle-to-Grid (V2G). Strategi manajemen energi adaptif dikembangkan dengan menggunakan pendekatan Artificial Neural Network dan prinsip Pontryagin (ANN-PMP), yang dirancang untuk mengatasi ketidakpastian massa kendaraan PHEB dengan mempertimbangkan distribusi probabilistik bobot kendaraan secara dinamis [5]. Untuk optimisasi penjadwalan dan pengisian daya, digunakan model optimisasi integer serta algoritma metaheuristik seperti Variable Neighborhood Search (VNS) untuk menjadwalkan armada bus dan lokasi pengisian daya secara simultan [3][4][9]. Model ini mempertimbangkan rute, headway, jenis kendaraan, dan jam operasi guna mengurangi jumlah kendaraan dan biaya operasional. Sementara itu, integrasi teknologi V2G dilakukan dengan menggabungkan strategi dua tahap (two-stage stochastic optimization) dalam penjadwalan pengisian dan pelepasan daya bus ke grid, dengan mempertimbangkan fluktuasi harga listrik dan ketidakpastian konsumsi energi [10].

3. Hasil dan Pembahasan

Strategi ANN-PMP yang mempertimbangkan distribusi massa kendaraan terbukti meningkatkan efisiensi bahan bakar hingga 46.93% dibandingkan strategi CD-CS konvensional [5]. Hal ini menunjukkan pentingnya integrasi informasi dinamis terhadap performa manajemen energi PHEB. ANN-PMP dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi nyata kendaraan di lapangan, seperti jumlah penumpang atau beban muatan, yang mempengaruhi kebutuhan energi dan strategi pengendalian daya. Penerapan model ini juga menunjukkan kestabilan State-of-Charge (SOC) pada kondisi akhir operasi yang lebih baik, menunjukkan efisiensi manajemen energi secara keseluruhan.



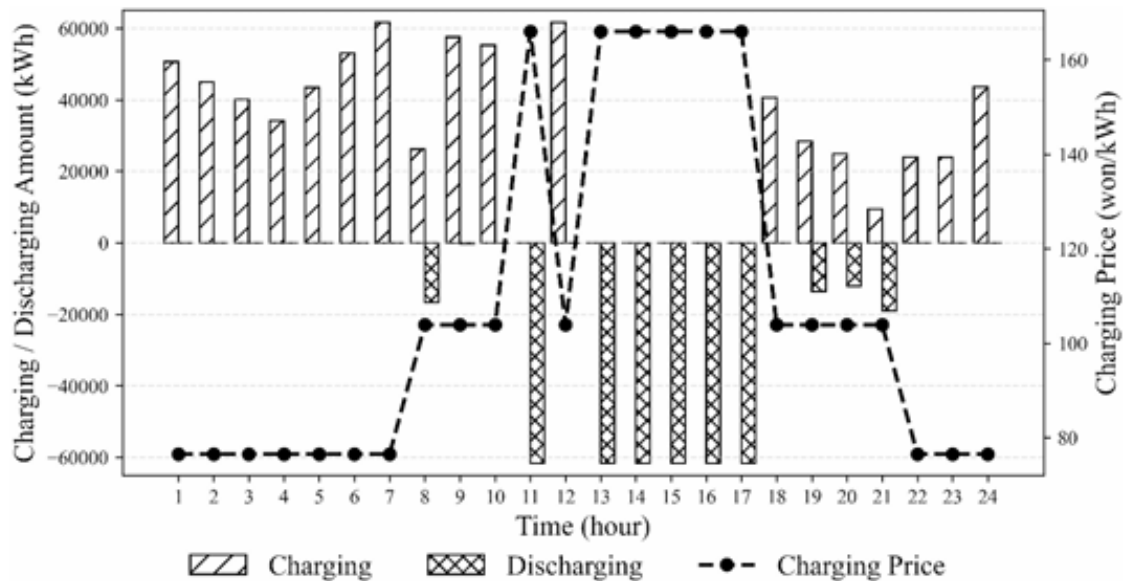
Gambar 1. Framework of ANN-PMP. [5]

Dalam penjadwalan armada, hasil numerik dari beberapa model menunjukkan bahwa integrasi simultan antara timetabling dan vehicle scheduling dapat mengurangi jumlah kendaraan yang dibutuhkan dan meminimalkan waktu tidak aktif (idle time) [4][9]. Model yang mengintegrasikan berbagai jenis kendaraan dan lokasi depo memungkinkan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam pengalokasian armada, meningkatkan efisiensi rute serta kenyamanan penumpang. Penggunaan pendekatan optimisasi multi-obyektif juga dapat menyeimbangkan antara biaya operasional perusahaan dan kepuasan pelanggan, seperti melalui pengurangan waktu tunggu dan tingkat kepadatan bus [9].

Sensitivitas terhadap perubahan parameter seperti daya pengisian, kapasitas baterai, dan konsumsi energi diuji untuk memahami ketahanan model terhadap ketidakpastian. Hasilnya menunjukkan bahwa strategi simultan lebih robust terhadap fluktuasi lingkungan dan parameter teknis [3][7]. Strategi ini memberikan dasar perencanaan yang lebih fleksibel dan adaptif bagi operator dalam menghadapi perubahan kondisi lalu lintas, cuaca, dan permintaan penumpang.

Teknologi V2G yang mengizinkan bus untuk melepas energi kembali ke grid saat permintaan tinggi tidak hanya meningkatkan pendapatan operator namun juga memperkuat stabilitas sistem kelistrikan. Model dua tahap yang mempertimbangkan ketidakpastian harga pelepasan daya dan konsumsi energi aktual terbukti efektif dalam skenario

dunia nyata [10]. Selain mendukung efisiensi biaya energi, V2G berpotensi menjadi sumber pendapatan tambahan dan meningkatkan partisipasi sistem transportasi publik dalam mendukung transisi energi nasional. Namun demikian, tantangan operasional seperti siklus baterai dan regulasi pasar listrik masih perlu dikaji lebih lanjut untuk mendukung penerapan V2G secara luas.



Gambar 2. Jadwal pengisian dan pelepasan daya secara dinamis sesuai fluktuasi harga listrik [10]

4. Kesimpulan

Optimalisasi sistem transportasi publik berbasis bus listrik dan PHEB memerlukan pendekatan komprehensif yang mempertimbangkan integrasi teknologi, efisiensi energi, dan fleksibilitas operasional. Berdasarkan hasil kajian dari sepuluh referensi ilmiah, dapat disimpulkan bahwa strategi ANN-PMP memberikan solusi efektif dalam menghadapi ketidakpastian massa kendaraan, dengan hasil peningkatan efisiensi bahan bakar yang signifikan serta pengelolaan State-of-Charge (SOC) yang lebih stabil. Strategi ini memberikan dasar penting bagi pengembangan sistem manajemen energi yang adaptif dan cerdas.

Selain itu, integrasi simultan antara penjadwalan kendaraan dan pengisian daya terbukti mampu mengurangi jumlah armada yang dibutuhkan dan mengoptimalkan jadwal operasional, serta meningkatkan kenyamanan penumpang melalui pengurangan waktu tunggu dan kepadatan kendaraan. Keunggulan dari pendekatan ini terletak pada kemampuannya menyesuaikan dengan dinamika rute, beban, dan waktu operasional, serta keandalannya terhadap ketidakpastian parameter lingkungan.

Penerapan teknologi Vehicle-to-Grid (V2G) menjadi nilai tambah strategis dalam mendukung stabilitas jaringan listrik dan membuka peluang baru bagi pendapatan operator. Dengan pengembangan model optimisasi dua tahap, sistem transportasi publik tidak hanya menjadi konsumen energi tetapi juga kontributor aktif dalam ekosistem energi cerdas. Meskipun demikian, implementasi penuh teknologi V2G membutuhkan dukungan dari sisi regulasi, infrastruktur pengisian dua arah, serta pengelolaan siklus hidup baterai secara bijaksana.

Secara keseluruhan, kolaborasi antara teknologi optimisasi, data-driven modeling, dan perencanaan sistem transportasi berbasis energi terbarukan menjadi kunci untuk mewujudkan transportasi perkotaan yang berkelanjutan, adaptif, dan berdaya saing tinggi. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi aspek implementasi di lapangan, termasuk integrasi dengan sistem tiket elektronik, pemodelan perilaku penumpang, serta potensi penggabungan dengan kendaraan otonom.

5. Daftar Pustaka

- [1] Czogalla, O., & Jumar, U. (2019). Design and control of electric bus vehicle model for estimation of energy consumption. *IFAC-PapersOnLine*, 52(24), 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.593>
- [2] Gao, W., et al. (2025). Integrated optimization of timetabling and vehicle scheduling for pure electric buses. *Computers & Industrial Engineering*, 201, 110833. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110833>
- [3] Guo, H. et al. (2020). A driving pattern recognition-based energy management for plug-in hybrid electric bus. *Energy*, 198, 117289. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117289>

-
- [4] Lu, Z. et al. (2025). Optimization of electric bus vehicle scheduling and charging strategies under TOU electricity price. *Transportation Research Part E*, 196, 104021. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104021>
 - [5] Ma, Z., et al. (2024). A data-driven energy management strategy for plug-in hybrid electric buses considering vehicle mass uncertainty. *Journal of Energy Storage*, 77, 109963. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109963>
 - [6] Quttineh, N.H., et al. (2023). Integrated solution for electric bus timetabling and vehicle scheduling. *Journal of Public Transportation*, 25, 100055. <https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2023.100055>
 - [7] Son, J., et al. (2025). Urban transit optimization: Efficient electric bus operations and vehicle-to-grid integration. *Computers & Industrial Engineering*, 205, 111169. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111169>
 - [8] Stumpe, M., et al. (2021). Study on sensitivity of electric bus systems under simultaneous optimization. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 10, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2021.100049>
 - [9] Wang, Y., et al. (2024). Optimal battery electric bus system planning considering heterogeneous vehicles. *Renewable Energy*, 237, 121596. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121596>
 - [10] Zafar, K. et al. (2024). Fault analysis for DC Bus-integrated energy storage system, EV supply equipment, and PV systems. *Electric Power Systems Research*, 234, 110837. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2024.110837>