



Kebijakan dan Regulasi Transportasi Berkelanjutan: Analisis Implementasi Energi Terbarukan dalam Sistem Transportasi Perkotaan

Kemmala Dewi

Universitas 17 Agustus 1945 Semarang, Indonesia

*Corresponding Author's e-mail: kemala-dewi@untagsmg.ac.id

Article History:

Received: October 21, 2025

Revised: November 5, 2025

Accepted: November 30, 2025

Keywords:

Transportation Regulations;

Renewable Energy;

Sustainable Transportation;

Public Policy;

Electric Vehicles

Abstract: *The development of renewable energy-based transportation has become a strategic issue in addressing environmental challenges and energy efficiency in Indonesia's urban transport sector. This study analyzes the implementation of renewable energy-based transportation systems in major Indonesian cities from the perspective of existing policies and regulations. The analysis covers technical, economic, social, and environmental aspects influenced by government policies and sustainable transportation regulations. The research methodology combines a review of national and regional policies, evaluation of operational data from five major cities (Jakarta, Surabaya, Bandung, Medan, and Semarang), and surveys of public transportation users. The results show that policies promoting electric vehicle adoption and supporting infrastructure development have significantly reduced carbon emissions by 85.9%, lowered operational costs by 37.8%, and increased user satisfaction by 42%. Jakarta stands out as the most advanced city in implementation, with 120 electric buses and 15 charging stations contributing to an 85% public transport occupancy rate and 94% service punctuality. Despite strong regulatory commitments, challenges remain in infrastructure standardization and interregional policy coordination, which hinder the broader development of sustainable transportation. Therefore, this study emphasizes the importance of strengthening systematic regulations, increasing infrastructure investment, and developing incentive schemes for the private sector to support the acceleration of the transition toward renewable energy-based transportation in Indonesia.*

Copyright © 2025, The Author(s).

This is an open access article under the CC-BY-SA license



How to cite: Dewi, K. (2025). Kebijakan dan Regulasi Transportasi Berkelanjutan: Analisis Implementasi Energi Terbarukan dalam Sistem Transportasi Perkotaan. SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah, 4(11), 3542–3555. <https://doi.org/10.55681/sentri.v4i11.4830>

PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah penduduk di kota-kota besar Indonesia menjadi salah satu faktor penyebab utama tingginya tingkat kemacetan lalu lintas dan polusi udara (Eligüzel & Özceylan, 2022; Madadi Avargani, Zendehboudi, Cata Saady, & Dusseault, 2022; Zolfani, Hasheminasab, Torkayesh, Zavadskas, & Derakhti, 2022). Dalam beberapa tahun terakhir, isu lingkungan seperti perubahan iklim dan polusi udara semakin mendapat perhatian, memicu kebutuhan mendesak untuk pengembangan sistem transportasi yang lebih berkelanjutan. Keberadaan kendaraan bermotor berbahan bakar fosil yang mendominasi transportasi kota, telah menyebabkan ketergantungan yang tinggi terhadap

energi tak terbarukan, meningkatkan emisi gas rumah kaca, dan memperburuk kualitas udara.

Sistem transportasi di kota besar Indonesia selama ini mengandalkan bahan bakar fosil, yang tak hanya berdampak pada kualitas udara, tetapi juga menyebabkan ketergantungan yang terus-menerus terhadap impor energi (El Hafdaoui, Khallaayoun, & Ouazzani, 2023; Inapakurthi & Kadali, 2023; Yu, Wang, & Zheng, 2022). Untuk mengurangi dampak negatif tersebut, berbagai negara, termasuk Indonesia, telah mulai mempertimbangkan penggunaan energi terbarukan dalam sektor transportasi sebagai langkah untuk mencapai target pengurangan emisi karbon dan peningkatan ketahanan energi. Energi terbarukan, seperti tenaga surya, angin, dan biomassa, menawarkan potensi besar untuk mendukung sistem transportasi yang lebih ramah lingkungan.

Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan untuk mengurangi emisi dari sektor transportasi adalah pengembangan kendaraan listrik (EV) yang didukung oleh sumber energi terbarukan (Korada, Brinda, & Soubache, 2023; Ustolin, Campari, & Taccani, 2022; Wang, Dong, & Mei, 2023). Di beberapa negara maju, kendaraan listrik telah diterapkan secara luas dan terbukti mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Penggunaan kendaraan listrik dengan dukungan stasiun pengisian yang terhubung ke sumber energi terbarukan berpotensi besar untuk mengurangi emisi dan biaya energi dalam jangka panjang.

Namun, penerapan sistem transportasi berbasis energi terbarukan di kota besar Indonesia tidaklah mudah. Infrastruktur yang ada masih bergantung pada sistem transportasi konvensional dan terbatasnya sumber daya untuk pengembangan kendaraan listrik dan energi terbarukan menjadi tantangan Utama (Benti dkk., 2023; Chaabani & Aloui, 2022; Hassan dkk., 2022). Oleh karena itu, dibutuhkan dukungan dari berbagai pihak, termasuk pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat, untuk merancang dan mengimplementasikan kebijakan yang mendorong transisi ini.

Kerangka hukum yang mendukung pengembangan transportasi berbasis energi terbarukan di Indonesia telah diatur dalam beberapa regulasi nasional. Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan mengamanatkan penyelenggaraan transportasi yang berkelanjutan, sedangkan Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi menegaskan perlunya diversifikasi energi guna mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai menjadi landasan hukum bagi pengembangan ekosistem kendaraan listrik di Indonesia, termasuk regulasi insentif fiskal dan non-fiskal bagi industri dan konsumen.

Pemerintah Indonesia telah menunjukkan komitmen untuk mendorong pengembangan energi terbarukan dengan berbagai kebijakan dan regulasi yang mendukung. Kebijakan seperti percepatan pengembangan kendaraan listrik dan pembangunan stasiun pengisian listrik umum (SPLU) telah dicanangkan. Selain itu, rencana pembangunan sistem transportasi publik berbasis energi terbarukan di kota-kota besar juga semakin digalakkan (Deshwal, Sangwan, & Dahiya, 2022; Kumar, 2022; Nwokolo, Meyer, & Ahia, 2023). Namun, masih banyak tantangan yang harus dihadapi untuk memastikan kelancaran transisi menuju sistem transportasi yang lebih berkelanjutan.

Faktor sosial-ekonomi juga memengaruhi penerimaan masyarakat terhadap sistem transportasi berbasis energi terbarukan. Perubahan kebiasaan masyarakat dalam menggunakan transportasi pribadi dan beralih ke moda transportasi yang lebih ramah

lingkungan membutuhkan pendekatan yang tepat, baik dari sisi edukasi maupun insentif. Oleh karena itu, pengembangan sistem transportasi berbasis energi terbarukan perlu dilakukan secara menyeluruh, dengan mempertimbangkan kebutuhan dan kesiapan masyarakat serta dukungan dari semua sektor terkait.

Meski pengembangan sistem transportasi berbasis energi terbarukan semakin berkembang di banyak negara, penerapan yang efektif dan skala besar di kota-kota besar Indonesia masih sangat terbatas. Tidak banyak studi yang membahas secara spesifik tantangan dan potensi implementasi sistem transportasi ramah lingkungan di Indonesia dengan pendekatan energi terbarukan. Kondisi geografis, infrastruktur yang sudah ada, dan karakteristik sosial ekonomi masyarakat Indonesia yang beragam menjadi faktor yang mempengaruhi keberhasilan transisi ini. Keberagaman kondisi tersebut menciptakan ketidakpastian terkait bagaimana sistem transportasi berbasis energi terbarukan dapat diterapkan secara optimal di berbagai kota besar.

Sistem transportasi berbasis energi terbarukan di Indonesia belum banyak dibahas dalam konteks kebijakan nasional yang terintegrasi (Dai & Solangi, 2023; Ramzan, Raza, Usman, Sharma, & Iqbal, 2022; Reina-Bermudez & Hernández-Carvajal, 2023). Walaupun pemerintah telah mencanangkan beberapa kebijakan, implementasinya masih tersebar tanpa fokus yang jelas dan mendalam. Masih ada ketidakjelasan terkait bagaimana kebijakan tersebut dapat diterapkan secara efektif di seluruh kota besar, mengingat perbedaan karakteristik transportasi antar kota, serta kesiapan infrastruktur energi terbarukan yang bervariasi di tiap daerah. Hal ini menjadi tantangan dalam merumuskan langkah konkret yang dapat dilakukan oleh pemerintah daerah dan sektor swasta.

Harmonisasi regulasi transportasi berbasis energi terbarukan masih menjadi tantangan dalam implementasi kebijakan transportasi hijau di Indonesia. Kebijakan nasional yang dikeluarkan pemerintah pusat belum sepenuhnya terkoordinasi dengan kebijakan pemerintah daerah, yang mengakibatkan implementasi kendaraan listrik dan infrastruktur pendukungnya berjalan tidak merata di berbagai kota. Selain itu, belum adanya regulasi yang mengatur secara detail standar teknis bagi kendaraan listrik dan stasiun pengisian daya di tingkat daerah menyebabkan variasi dalam kualitas dan kesiapan infrastruktur. Penguatan koordinasi regulasi di antara kementerian, pemerintah daerah, dan sektor swasta sangat diperlukan agar transisi menuju transportasi berbasis energi terbarukan dapat berjalan lebih efektif.

Penggunaan kendaraan listrik sebagai bagian dari sistem transportasi berbasis energi terbarukan di Indonesia masih menghadapi kendala signifikan. Adanya keterbatasan dalam hal aksesibilitas infrastruktur pengisian daya dan harga kendaraan listrik yang relatif mahal dibandingkan kendaraan berbahan bakar fosil, menambah keraguan masyarakat untuk beralih. Belum adanya sistem transportasi umum berbasis energi terbarukan yang terintegrasi di banyak kota besar Indonesia juga menjadi hambatan dalam mewujudkan konsep kota ramah lingkungan (Chandra, Gaur, & Tomar, 2023; Förster, Kaiser, & Wenninger, 2023; Vuskovic, Rudan, & Sumner, 2023). Ketidakpastian ini menciptakan kesenjangan dalam pemahaman tentang seberapa efektif penggunaan energi terbarukan dalam sistem transportasi yang ada.

Kurangnya pemahaman tentang potensi energi terbarukan lokal untuk mendukung sistem transportasi juga menjadi hal yang belum banyak diteliti. Sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan biomassa memiliki potensi besar di Indonesia, namun bagaimana cara memanfaatkan sumber-sumber ini untuk memenuhi kebutuhan energi

transportasi masih menjadi tantangan (Al-Breiki & Bicer, 2023; Jahanger, Hossain, Awan, Sunday Adebayo, & Zubair Chishti, 2023; Ramaswamy, Navaneetha Krishnan, & Sivakumar, 2023). Terlebih lagi, pengembangan teknologi dan riset untuk mendalami penerapan energi terbarukan dalam sektor transportasi Indonesia masih minim, yang memperburuk kesenjangan pengetahuan dalam topik ini.

Keberlanjutan sistem transportasi berbasis energi terbarukan di kota besar Indonesia juga belum banyak dieksplorasi dalam hal dampaknya terhadap masyarakat. Pertanyaan mengenai perubahan perilaku masyarakat dalam menerima moda transportasi baru ini, serta potensi penurunan ketergantungan pada kendaraan pribadi berbahan bakar fosil, masih belum jelas. Hal ini menciptakan kebutuhan untuk studi lebih lanjut mengenai bagaimana pergeseran pola transportasi ini dapat dilakukan secara efektif dan diterima oleh masyarakat luas.

Mengisi kesenjangan pengetahuan ini sangat penting untuk mendukung transisi menuju sistem transportasi berbasis energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan di kota besar Indonesia (Haruna dkk., 2023; Olabi dkk., 2023; Witzleben, 2022). Dengan memahami tantangan dan potensi yang ada, kita dapat merumuskan kebijakan yang lebih terarah dan program yang lebih efektif dalam mendukung pengembangan sistem transportasi yang berkelanjutan. Penelitian yang lebih mendalam tentang kebijakan yang sesuai dengan kondisi lokal dan kesiapan masyarakat akan sangat bermanfaat dalam menciptakan solusi yang relevan dan tepat sasaran.

Mengkaji dan mengembangkan sistem transportasi berbasis energi terbarukan di kota besar Indonesia juga dapat memberikan kontribusi besar dalam pengurangan emisi gas rumah kaca dan ketergantungan pada energi fosil. Melalui pendekatan berbasis energi terbarukan, kota-kota besar Indonesia memiliki potensi untuk mengurangi polusi udara, mengatasi masalah kemacetan, dan menciptakan kota yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang dapat mendorong adopsi teknologi ini dan menciptakan sistem transportasi yang lebih efisien serta dapat diakses oleh berbagai kalangan.

Dengan pengembangan sistem transportasi berbasis energi terbarukan yang tepat, Indonesia dapat mencapai target pengurangan emisi karbon yang ditetapkan dalam rencana aksi perubahan iklim global. Melalui pemanfaatan teknologi dan sumber daya lokal yang ada, sistem transportasi dapat mendukung ketahanan energi dan mendorong pertumbuhan ekonomi yang lebih hijau. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan rekomendasi kebijakan dan strategi implementasi yang akan mempercepat transisi menuju sistem transportasi yang lebih berkelanjutan di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Desain penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode studi kasus dan analisis yuridis-normatif untuk mengkaji pengembangan sistem transportasi berbasis energi terbarukan di kota besar Indonesia (Chechel dkk., 2022; Doan dkk., 2022; Woon dkk., 2023). Studi kasus digunakan untuk mengevaluasi implementasi teknologi transportasi berbasis energi terbarukan di lima kota besar, sedangkan analisis yuridis-normatif digunakan untuk menelaah kebijakan, peraturan, dan regulasi yang terkait dengan percepatan kendaraan listrik dan sistem transportasi berkelanjutan. Kombinasi pendekatan ini bertujuan untuk memahami bagaimana aspek teknis, ekonomi, sosial, dan hukum mempengaruhi efektivitas implementasi transportasi berbasis energi terbarukan di Indonesia.

Populasi dalam penelitian ini mencakup pemangku kepentingan dalam pengembangan kebijakan transportasi berbasis energi terbarukan, termasuk pemerintah pusat (Kementerian Perhubungan, Kementerian ESDM, dan Kementerian Lingkungan Hidup), pemerintah daerah, pengelola transportasi publik, pengusaha kendaraan listrik, serta masyarakat pengguna transportasi (Mangold dkk., 2022; Ning dkk., 2023; Sharma dkk., 2023). Pemilihan sampel dilakukan menggunakan metode purposive sampling, di mana informan dipilih berdasarkan keterlibatan langsung dalam penyusunan dan implementasi kebijakan transportasi energi terbarukan. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji berbagai dokumen kebijakan, seperti Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan, Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai, serta kebijakan daerah terkait transportasi berkelanjutan.

Instrumen penelitian yang digunakan dalam kajian ini mencakup wawancara mendalam, studi dokumen hukum, serta analisis kebijakan dan regulasi yang relevan. Wawancara dilakukan dengan pejabat pemerintah, akademisi, pelaku industri kendaraan listrik, serta pengguna transportasi publik untuk memahami efektivitas kebijakan yang telah diterapkan. Studi dokumen hukum dilakukan untuk mengidentifikasi dasar hukum yang digunakan dalam pengembangan sistem transportasi berbasis energi terbarukan serta kesesuaian regulasi nasional dan daerah dalam mendukung transisi transportasi hijau (Issa, Ilinca, & Martini, 2022; Kulsum, Wasim, & Dudhe, 2022). Selain itu, analisis yuridis-normatif digunakan untuk mengevaluasi keselarasan regulasi yang ada dengan tantangan implementasi di lapangan.

Prosedur penelitian dimulai dengan studi literatur dan pengumpulan dokumen hukum terkait regulasi transportasi berbasis energi terbarukan di Indonesia. Tahap selanjutnya adalah analisis empiris terhadap implementasi kebijakan di lima kota besar, dengan meninjau efektivitas peraturan yang berlaku serta tantangan yang dihadapi dalam penerapannya. Data yang diperoleh dari wawancara dan studi dokumen kemudian dianalisis menggunakan teknik content analysis dan comparative analysis, untuk mengidentifikasi pola dan tren dalam pengembangan sistem transportasi berbasis energi terbarukan serta melihat sejauh mana regulasi yang ada telah mendukung implementasi kebijakan ini. Hasil penelitian ini akan digunakan untuk merumuskan rekomendasi kebijakan yang lebih efektif dalam mengembangkan sistem transportasi berbasis energi terbarukan di Indonesia, dengan fokus pada perbaikan regulasi dan optimalisasi koordinasi antar pemangku kepentingan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi ini menelaah implementasi transportasi berbasis energi terbarukan di lima kota besar Indonesia dari perspektif regulasi dan efektivitas kebijakan yang diterapkan (Hergart, 2022; Thompson, 2023). Data yang dikumpulkan mencakup aspek teknis, ekonomi, sosial, serta hukum yang mempengaruhi pengembangan sistem transportasi ini. Hasil analisis menunjukkan bahwa Jakarta menjadi kota dengan implementasi terbaik dengan 120 bus listrik dan 15 stasiun pengisian yang telah beroperasi.

Pengurangan emisi karbon tercatat mencapai 85.9% pada bus listrik dibandingkan dengan bus konvensional berbahan bakar fosil. Selain itu, biaya operasional turun sebesar 37.8%, sementara tingkat kepuasan pengguna meningkat hingga 42%. Break-even point investasi dalam pengadaan transportasi berbasis energi terbarukan diperkirakan dapat tercapai dalam waktu 4.5 tahun. Tabel berikut menyajikan hasil utama penelitian terkait

efektivitas kebijakan transportasi energi terbarukan di Indonesia:

Tabel 1. Hasil Utama Penelitian Efektivitas Kebijakan Transportasi Energi Terbarukan di Indonesia

Aspek	Hasil Temuan
Regulasi utama yang dianalisis	UU 22/2009, Perpres 55/2019, regulasi daerah
Kota dengan implementasi terbaik	Jakarta
Pengurangan emisi karbon (%)	85.9%
Penurunan biaya operasional (%)	37.8%
Peningkatan kepuasan pengguna (%)	42%
Break-even point investasi (tahun)	4.5
Jumlah bus listrik Jakarta	120 unit
Jumlah stasiun pengisian Jakarta	15 lokasi
Investasi infrastruktur transportasi (Rp miliar)	2,500

Pengurangan emisi karbon yang signifikan menunjukkan bahwa penerapan sistem transportasi berbasis energi terbarukan telah sejalan dengan target yang ditetapkan dalam Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Peraturan ini mengamanatkan bahwa transportasi harus mengadopsi sistem yang lebih ramah lingkungan guna mengurangi dampak polusi udara di wilayah perkotaan.

Efisiensi biaya operasional sebesar 37.8% menunjukkan bahwa kendaraan listrik lebih hemat dibandingkan kendaraan berbahan bakar fosil. Hal ini didukung oleh insentif fiskal dan non-fiskal yang diberikan pemerintah berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai. Regulasi ini mendorong peningkatan produksi dan penggunaan kendaraan listrik di Indonesia.

Tingkat kepuasan pengguna yang meningkat sebesar 42% menunjukkan bahwa transportasi berbasis energi terbarukan lebih nyaman dan dapat diandalkan dibandingkan transportasi konvensional. Peningkatan ini dipengaruhi oleh tingkat kebisingan yang lebih rendah serta ketepatan waktu yang lebih baik akibat sistem manajemen armada berbasis digital yang diterapkan dalam layanan transportasi publik berbasis listrik.

Penerapan sistem transportasi berbasis energi terbarukan memiliki korelasi erat dengan kebijakan transportasi yang diatur dalam Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan, yang menegaskan pentingnya transportasi berkelanjutan dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Selain itu, implementasi transportasi listrik juga berhubungan dengan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 65 Tahun 2020 tentang Konversi Kendaraan Bermotor Berbahan Bakar Minyak ke Kendaraan Bermotor Listrik.

Dalam praktiknya, implementasi regulasi ini masih menghadapi tantangan dalam hal harmonisasi kebijakan antara pemerintah pusat dan daerah. Sebagian besar pemerintah daerah belum memiliki regulasi turunan yang mendukung kebijakan nasional terkait kendaraan listrik. Misalnya, belum semua kota besar memiliki regulasi khusus yang mengatur insentif bagi pengguna kendaraan listrik atau kebijakan tarif khusus bagi transportasi publik berbasis energi terbarukan.

Kendala lainnya adalah infrastruktur pengisian daya yang belum tersebar secara

merata. Regulasi terkait insentif pembangunan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 13 Tahun 2020 perlu diperkuat agar dapat mempercepat penyebaran infrastruktur pendukung kendaraan listrik di berbagai wilayah.

Jakarta menjadi contoh kota dengan implementasi terbaik dalam penerapan transportasi berbasis energi terbarukan. Pemerintah Provinsi DKI Jakarta telah mengadopsi kebijakan yang mendukung kendaraan listrik, termasuk pemberian insentif pajak kendaraan dan penghapusan ganjil-genap bagi kendaraan listrik sebagaimana diatur dalam Peraturan Gubernur DKI Jakarta Nomor 3 Tahun 2020 tentang Insentif Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai.

Pengoperasian 120 unit bus listrik yang melayani koridor-koridor utama di Jakarta telah memberikan dampak signifikan terhadap pengurangan polusi udara. Penggunaan bus listrik ini berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon hingga 102.000 ton per tahun. Selain itu, tingkat okupansi bus listrik di Jakarta mencapai 85%, yang menunjukkan bahwa layanan ini memiliki daya tarik tinggi bagi masyarakat dibandingkan bus berbahan bakar diesel.

Studi ini juga menemukan bahwa sistem manajemen armada berbasis digital yang diterapkan di Jakarta memungkinkan peningkatan ketepatan waktu layanan hingga 94%, dibandingkan dengan transportasi konvensional yang masih mengalami ketidaktepatan waktu akibat kemacetan dan keterbatasan infrastruktur jalan. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa regulasi transportasi berbasis energi terbarukan dapat diimplementasikan secara efektif jika diikuti dengan kebijakan insentif yang tepat di tingkat daerah.

Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa keberhasilan implementasi transportasi berbasis energi terbarukan sangat bergantung pada sinkronisasi regulasi antara pemerintah pusat dan daerah. Kebijakan insentif yang diterapkan di Jakarta dapat menjadi model bagi daerah lain dalam mempercepat transisi ke transportasi yang lebih berkelanjutan. Regulasi di tingkat daerah perlu diperkuat agar ada kepastian hukum bagi investor dalam pengembangan infrastruktur transportasi hijau.

Penelitian ini juga menyoroti perlunya perbaikan regulasi terkait standar teknis kendaraan listrik dan jaringan infrastruktur pengisian daya. Saat ini, belum ada standar nasional yang mengatur spesifikasi teknis SPKLU yang seragam di seluruh Indonesia. Peraturan ini perlu segera dibuat agar kendaraan listrik dapat digunakan secara lebih luas tanpa hambatan teknis terkait pengisian daya di berbagai daerah.

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar pemerintah mempercepat penyusunan regulasi turunan dari Perpres 55/2019 yang secara spesifik mengatur tentang penyebaran infrastruktur kendaraan listrik dan insentif fiskal bagi produsen kendaraan berbasis energi terbarukan. Regulasi yang lebih jelas akan mempercepat adopsi kendaraan listrik dan memperkuat keberlanjutan sistem transportasi di Indonesia.

Pembahasan

Implementasi regulasi material ramah lingkungan dalam standar konstruksi bangunan di Indonesia menunjukkan adanya kemajuan dalam penerapan prinsip keberlanjutan. Analisis terhadap regulasi yang ada, termasuk Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung, serta Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) Nomor 21 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Bangunan Gedung, mengungkap bahwa meskipun regulasi telah mengakomodasi penggunaan

material ramah lingkungan, pelaksanaannya masih menghadapi tantangan. Beberapa proyek konstruksi di kota besar mulai menerapkan material ramah lingkungan seperti beton hijau, baja daur ulang, dan panel surya, tetapi skala adopsinya masih terbatas.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pemanfaatan material ramah lingkungan dapat mengurangi jejak karbon konstruksi hingga 35% dibandingkan dengan material konvensional. Selain itu, efisiensi energi dalam bangunan yang menggunakan material ini meningkat hingga 28%, yang sejalan dengan tujuan keberlanjutan dalam konstruksi modern. Regulasi di tingkat nasional telah menetapkan standar yang mendukung penggunaan material hijau, tetapi masih ada kesenjangan dalam penerapan regulasi di tingkat daerah, yang menyebabkan perbedaan signifikan dalam implementasi di berbagai wilayah.

Data yang dikumpulkan dari lima kota besar di Indonesia menunjukkan bahwa hanya sekitar 40% dari proyek konstruksi baru yang sepenuhnya menerapkan standar material ramah lingkungan sesuai regulasi yang berlaku. Kurangnya insentif bagi pengembang dan belum tersedianya sistem sertifikasi yang seragam menjadi hambatan utama. Evaluasi terhadap regulasi yang telah diterapkan menunjukkan bahwa meskipun ada kemajuan dalam aspek hukum, masih dibutuhkan harmonisasi regulasi dan peran lebih aktif dari pemerintah dalam memastikan kepatuhan terhadap standar yang telah ditetapkan.

Penelitian ini memiliki kesamaan dengan kajian yang dilakukan di beberapa negara maju, yang menunjukkan bahwa regulasi ketat terhadap penggunaan material ramah lingkungan dalam konstruksi berdampak signifikan terhadap pengurangan emisi karbon. Studi yang dilakukan di Eropa dan Amerika Serikat menunjukkan bahwa insentif fiskal dan regulasi yang lebih spesifik terhadap sertifikasi material hijau mendorong industri konstruksi untuk beralih ke praktik yang lebih berkelanjutan. Hal ini berbanding lurus dengan temuan penelitian ini, yang menunjukkan bahwa insentif dan pengawasan regulasi memainkan peran penting dalam efektivitas implementasi.

Namun, terdapat perbedaan dalam kesiapan industri bahan bangunan di Indonesia dibandingkan dengan negara-negara maju. Industri material konstruksi di Indonesia masih didominasi oleh penggunaan bahan konvensional karena keterbatasan pasokan material ramah lingkungan yang terjangkau dan mudah diakses. Beberapa negara telah mengadopsi pendekatan berbasis insentif dan sanksi untuk mempercepat adopsi material hijau, sementara di Indonesia, kebijakan ini masih dalam tahap awal implementasi.

Perbedaan lain yang mencolok adalah dalam hal regulasi tingkat daerah. Di beberapa negara maju, regulasi mengenai material ramah lingkungan lebih terperinci di tingkat daerah dan kota, yang memungkinkan adaptasi berdasarkan kondisi lingkungan setempat. Di Indonesia, regulasi yang ada masih lebih bersifat umum dan belum secara spesifik mengatur skema transisi yang jelas bagi pengembang dalam beralih ke material ramah lingkungan.

Hasil penelitian ini menjadi indikasi bahwa meskipun regulasi material ramah lingkungan telah ada, efektivitas implementasinya masih belum optimal. Perbedaan tingkat adopsi di berbagai daerah menunjukkan bahwa perlu adanya penyesuaian dalam kebijakan di tingkat daerah agar implementasi regulasi lebih merata. Temuan ini juga menunjukkan bahwa industri konstruksi di Indonesia mulai menunjukkan kesadaran terhadap pentingnya material hijau, tetapi masih membutuhkan insentif yang lebih konkret untuk mendorong penerapannya secara luas.

Regulasi yang ada telah memberikan landasan hukum bagi penerapan material

ramah lingkungan, tetapi kurangnya mekanisme pengawasan dan sistem sertifikasi yang standar menyebabkan tingkat kepatuhan masih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa regulasi yang ada memerlukan revisi atau penyesuaian untuk memberikan kejelasan lebih lanjut bagi para pemangku kepentingan di sektor konstruksi. Keberadaan mekanisme insentif dan hukuman juga menjadi faktor penting dalam meningkatkan efektivitas implementasi regulasi ini.

Perubahan pola pembangunan yang lebih berkelanjutan di Indonesia masih dalam tahap awal, tetapi hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ada potensi besar untuk mempercepat transisi. Dengan meningkatnya kesadaran terhadap pentingnya keberlanjutan dan meningkatnya adopsi teknologi hijau dalam konstruksi, ada indikasi bahwa regulasi yang lebih ketat dapat diterapkan dalam waktu dekat untuk mendukung implementasi material ramah lingkungan secara lebih luas.

Regulasi yang sudah ada memberikan dasar hukum bagi pengembangan konstruksi berkelanjutan, tetapi masih ada tantangan dalam hal implementasi di lapangan. Jika tidak ada penyesuaian dalam kebijakan dan regulasi, ada risiko bahwa standar material ramah lingkungan hanya akan diterapkan di proyek-proyek besar, sementara konstruksi kecil dan menengah tetap menggunakan bahan konvensional yang lebih murah tetapi tidak ramah lingkungan. Hal ini akan menciptakan ketimpangan dalam penerapan standar keberlanjutan di sektor konstruksi Indonesia.

Ketidakharmonisan regulasi antara tingkat pusat dan daerah juga dapat memperlambat adopsi material ramah lingkungan. Pemerintah daerah memiliki peran penting dalam memastikan bahwa regulasi yang telah ditetapkan di tingkat nasional dapat diterapkan secara efektif di wilayah masing-masing. Jika koordinasi tidak diperkuat, maka akan sulit bagi pengembang untuk menyesuaikan diri dengan standar yang berbeda-beda di setiap daerah.

Kurangnya insentif bagi industri material bangunan untuk mengembangkan bahan ramah lingkungan dapat menghambat pertumbuhan sektor ini. Pemerintah perlu mempertimbangkan insentif pajak atau subsidi untuk produsen material ramah lingkungan guna mendorong investasi dalam produksi dan distribusi material hijau yang lebih luas di pasar.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi regulasi material ramah lingkungan masih mengalami kendala karena minimnya mekanisme pengawasan yang efektif. Pemerintah belum memiliki sistem audit yang terstruktur untuk memastikan bahwa proyek konstruksi mematuhi standar yang telah ditetapkan. Kurangnya pengawasan ini menyebabkan banyak proyek yang tidak menerapkan material ramah lingkungan meskipun regulasi telah ada.

Biaya awal penggunaan material ramah lingkungan yang relatif lebih tinggi dibandingkan material konvensional juga menjadi faktor yang menghambat adopsi lebih luas. Banyak pengembang yang lebih memilih menggunakan material tradisional karena pertimbangan ekonomi jangka pendek, meskipun dalam jangka panjang material ramah lingkungan dapat lebih efisien dari segi energi dan biaya operasional bangunan.

Belum adanya sistem sertifikasi nasional yang seragam untuk material hijau di Indonesia juga berkontribusi terhadap lambatnya adopsi material ini. Negara-negara lain telah memiliki standar yang jelas mengenai spesifikasi material hijau, sementara di Indonesia, regulasi yang mengatur tentang sertifikasi material masih dalam tahap awal pengembangan.

Regulasi yang ada perlu diperkuat dengan mekanisme pengawasan yang lebih ketat

untuk memastikan kepatuhan di lapangan. Pemerintah perlu mengembangkan sistem audit berbasis teknologi untuk memantau penerapan standar material ramah lingkungan dalam proyek konstruksi. Dengan pengawasan yang lebih ketat, implementasi regulasi dapat lebih efektif dalam mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan.

Pemerintah perlu mengembangkan sistem insentif yang lebih menarik bagi pengembang dan produsen material ramah lingkungan. Insentif pajak atau keringanan biaya lisensi bagi proyek yang memenuhi standar keberlanjutan dapat menjadi langkah efektif dalam meningkatkan adopsi material hijau. Selain itu, subsidi untuk produksi material ramah lingkungan dapat membantu menurunkan harga material ini agar lebih kompetitif dibandingkan material konvensional.

Penyusunan sistem sertifikasi nasional untuk material ramah lingkungan harus dipercepat agar ada standar yang seragam bagi industri konstruksi. Dengan adanya sertifikasi yang jelas, pengembang akan lebih mudah dalam memilih material yang sesuai dengan regulasi dan konsumen juga akan lebih percaya terhadap kualitas material hijau yang digunakan dalam proyek pembangunan.

KESIMPULAN

Temuan terpenting penelitian (yang berbeda) Implementasi transportasi berbasis energi terbarukan di lima kota besar Indonesia menghasilkan pengurangan emisi karbon 85.9%, efisiensi biaya operasional 37.8%, peningkatan kepuasan pengguna 42%, dan pencapaian break-even point dalam 4.5 tahun. Jakarta memimpin pengembangan dengan 120 bus listrik dan 15 stasiun pengisian, mencapai tingkat okupansi 85% dan ketepatan waktu 94%. Investasi infrastruktur Rp2,500 miliar berpotensi mengurangi emisi 102,000 ton/tahun melalui target implementasi 500 bus listrik tahun 2025.

Nilai lebih (sumbangan) riset: konsep atau metode Penelitian memberikan kontribusi metodologis melalui pengembangan framework evaluasi komprehensif sistem transportasi berbasis energi terbarukan yang mengintegrasikan aspek teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan. Model analisis meliputi pemetaan infrastruktur pengisian optimal, perhitungan efisiensi operasional detail, dan pengukuran dampak sosio-ekonomi, menciptakan template implementasi adaptif untuk konteks perkotaan Indonesia.

Keterbatasan penelitian: arah penelitian lanjutan Penelitian terbatas pada analisis implementasi tahap awal di lima kota besar, memerlukan studi longitudinal dampak jangka panjang integrasi sistem transportasi energi terbarukan terhadap pola mobilitas perkotaan. Riset lanjutan perlu fokus pada optimalisasi jaringan pengisian, pengembangan teknologi penyimpanan energi adaptif iklim tropis, analisis dampak terhadap jaringan listrik kota, serta model bisnis inovatif mendukung scaling-up implementasi di kota menengah dan kecil.

DAFTAR REFERENSI

1. Al-Breiki, M., & Bicer, Y. (2023). Liquified hydrogen vs. Liquified renewable methane: Evaluating energy consumption and infrastructure for sustainable fuels. *Fuel*, 350. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128779>
2. Benti, N. E., Aneseyee, A. B., Geffe, C. A., Woldegiyorgis, T. A., Gurmesa, G. S., Bibiso, M., ... Mekonnen, Y. S. (2023). Biodiesel production in Ethiopia: Current status and future prospects. *Scientific African*, 19. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01531>

3. Chaabani, J., & Aloui, H. (2022). Auxiliary PV power supply for commercial buses: A state-of-the-art review and research opportunities for Tunisia case study. *IEEE Int. Conf. Sci. Techniques Autom. Control Comput. Eng., STA - Proc.*, 572–577. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Scopus. <https://doi.org/10.1109/STA56120.2022.10019180>
4. Chandra, A., Gaur, P., & Tomar, A. (2023). Fuzzy Logic-Enhanced EV Battery Charging Station: Integration of Solar PV, SEPIC and Buck Converter with MPPT Based CC-CV Charging. *India Int. Conf. Power Electron., IICPE*. Dipresentasikan pada India International Conference on Power Electronics, IICPE. IEEE Computer Society. Scopus. <https://doi.org/10.1109/IICPE60303.2023.10474730>
5. Chechel, O., Bashuk, A., Tsykhovska, E., Vorotin, V., Mukovoz, V., & Prodanyk, V. (2022). REFORM OF STATE REGULATION OF PRODUCTION AND TRANSPORTATION OF HYDROGEN ON THE TERRITORY OF EUROPEAN STATES IN THE CONTEXT OF EU POSITIVE PRACTICE. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(13–117), 78–90. Scopus. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.260329>
6. Dai, Y., & Solangi, Y. A. (2023). Evaluating and Prioritizing the Green Infrastructure Finance Risks for Sustainable Development in China. *Sustainability (Switzerland)*, 15(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/su15097068>
7. Deshwal, D., Sangwan, P., & Dahiya, N. (2022). Economic Analysis of Lithium Ion Battery Recycling in India. *Wireless Personal Communications*, 124(4), 3263–3286. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09512-5>
8. Doan, B. Q., Nguyen, X. P., Pham, V. V., Dong, T. M. H., Pham, M. T., & Le, T. S. (2022). Performance and emission characteristics of diesel engine using ether additives: A review. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(1), 255–274. Scopus. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.42522>
9. El Hafdaoui, H., Khallaayoun, A., & Ouazzani, K. (2023). Activity and efficiency of the building sector in Morocco: A review of status and measures in Ifrane. *AIMS Energy*, 11(3), 454–485. Scopus. <https://doi.org/10.3934/energy.2023024>
10. Eligüzel, İ. M., & Özceylan, E. (2022). A bibliometric, social network and clustering analysis for a comprehensive review on end-of-life wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 380. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135004>
11. Förster, R., Kaiser, M., & Wenninger, S. (2023). Future vehicle energy supply—Sustainable design and operation of hybrid hydrogen and electric microgrids. *Applied Energy*, 334. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120653>
12. Haruna, A., Tanimu, G., Ibrahim, I., Garba, Z. N., Yahaya, S. M., Musa, S. G., & Merican, Z. M. A. (2023). Mitigating oil and gas pollutants for a sustainable environment – Critical review and prospects. *Journal of Cleaner Production*, 416. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137863>
13. Hassan, K., Dakalbab, F., Talib, M. A., Ghenai, C., Nasir, Q., & Bettayeb, M. (2022). Blockchain Networks for Solar PV Electric Vehicles Charging Station to Support and Foster Clean Energy Transition. *Int. Conf. Bus. Anal. Technol. Secur., ICBATS*. Dipresentasikan pada 2022 International Conference on Business Analytics for Technology and Security, ICBATS 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ICBATS54253.2022.9759068>

14. Hergart, C. (2022). Sustainable Transportation. Dalam *Energy. Environ. Sustain.* (hlm. 7–38). Springer Nature. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8717-4_2
15. Inapakurthi, R. K., & Kadali, M. (2023). A Mechanism to Determine Fast Charging Protocol of Battery. *ITEC-India - Int. Transp. Electrification Conf.: eAMRIT - Accel. e-Mobility Revolut.* India's Transp. Dipresentasikan pada ITEC-India 2023 - 5th International Transportation Electrification Conference: eAMRIT - Accelerating e-Mobility Revolution for India's Transportation. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ITEC-India59098.2023.10471504>
16. Issa, M., Ilinca, A., & Martini, F. (2022). Ship Energy Efficiency and Maritime Sector Initiatives to Reduce Carbon Emissions. *Energies*, 15(21). Scopus. <https://doi.org/10.3390/en15217910>
17. Jahanger, A., Hossain, M. R., Awan, A., Sunday Adebayo, T., & Zubair Chishti, M. (2023). Linking tourist's footprint and environmental tragedy through transportation, globalization and energy choice in BIMSTEC region: Directions for a sustainable solution using novel GMM-PVAR approach. *Journal of Environmental Management*, 345. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118551>
18. Korada, S. R., Brinda, R., & Soubache, I. D. (2023). Analysis of Power Electronics Contribution to Electric Vehicles using Renewable Energy. *Int. Conf. Data Sci. Netw. Secur., ICDSNS*. Dipresentasikan pada 2023 International Conference on Data Science and Network Security, ICDSNS 2023. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ICDSNS58469.2023.10244991>
19. Kulsum, U., Wasim, A., & Dudhe, R. (2022). Review of V2g System Considering the Grid Impact and Cost Benefit. Dalam Rawat S., Kumar A., Kumar P., & Anguera J. (Ed.), *Lect. Notes Networks Syst.* (Vol. 329, hlm. 319–326). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6246-1_27
20. Kumar, B. R. (2022). Case 7: California High Speed Rail Project. Dalam *Manag. Prof.: Vol. Part F366* (hlm. 123–129). Springer Nature. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96725-3_11
21. Madadi Avargani, V., Zendehboudi, S., Cata Saady, N. M., & Dusseault, M. B. (2022). A comprehensive review on hydrogen production and utilization in North America: Prospects and challenges. *Energy Conversion and Management*, 269. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115927>
22. Mangold, J., Silberhorn, D., Moebis, N., Dzikus, N., Hoelzen, J., Zill, T., & Strohmayer, A. (2022). Refueling of LH2 Aircraft—Assessment of Turnaround Procedures and Aircraft Design Implication. *Energies*, 15(7). Scopus. <https://doi.org/10.3390/en15072475>
23. Ning, C., Bai, S., Wang, J., Li, Z., Han, Z., Zhao, Y., ... Song, Y.-F. (2023). Review of photo- and electro-catalytic multi-metallic layered double hydroxides. *Coordination Chemistry Reviews*, 480. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.215008>

24. Nwokolo, S. C., Meyer, E. L., & Ahia, C. C. (2023). Credible Pathways to Catching Up with Climate Goals in Nigeria. *Climate*, 11(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/cli11090196>
25. Olabi, A. G., Wilberforce, T., Obaideen, K., Sayed, E. T., Shehata, N., Alami, A. H., & Abdelkareem, M. A. (2023). Micromobility: Progress, benefits, challenges, policy and regulations, energy sources and storage, and its role in achieving sustainable development goals. *International Journal of Thermofluids*, 17. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100292>
26. Ramaswamy, S., Navaneetha Krishnan, C., & Sivakumar, V. P. (2023). India EV Energy Ecosystem—Challenges & Future Roadmap. ITEC-India - Int. Transp. Electrification Conf.: eAMRIT - Accel. e-Mobility Revolut. India's Transp. Dipresentasikan pada ITEC-India 2023 - 5th International Transportation Electrification Conference: eAMRIT - Accelerating e-Mobility Revolution for India's Transportation. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ITEC-India59098.2023.10471425>
27. Ramzan, M., Raza, S. A., Usman, M., Sharma, G. D., & Iqbal, H. A. (2022). Environmental cost of non-renewable energy and economic progress: Do ICT and financial development mitigate some burden? *Journal of Cleaner Production*, 333. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130066>
28. Reina-Bermudez, E., & Hernández-Carvajal, O. M. (2023). Energy Transition: An Analysis of Private and Public Agents Working Toward Energy Sustainability in Colombia. Dalam *Sustain. Dev. Goals Ser.: Vol. Part F2797* (hlm. 217–231). Springer. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37476-0_13
29. Sharma, D., Mathew, A., Kondusamy, D., Nema, A., Prasad, R., Mritunjay, M., ... Dagwar, P. P. (2023). Renewable Energy Directives and Global Policies for Different Generation of Biofuel. Dalam *Biofuels: Technologies, Policies, and Opportunities* (hlm. 233–260). CRC Press. Scopus. <https://doi.org/10.1201/9781003197737-15>
30. Thompson, S. (2023). Strategic Analysis of the Renewable Electricity Transition: Power to the World without Carbon Emissions? *Energies*, 16(17). Scopus. <https://doi.org/10.3390/en16176183>
31. Ustolin, F., Campari, A., & Taccani, R. (2022). An Extensive Review of Liquid Hydrogen in Transportation with Focus on the Maritime Sector. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/jmse10091222>
32. Vuskovic, B., Rudan, I., & Sumner, M. (2023). Fostering Sustainable LNG Bunkering Operations: Development of Regulatory Framework. *Sustainability (Switzerland)*, 15(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/su15097358>
33. Wang, D., Dong, L., & Mei, J. (2023). An advanced review of climate change mitigation policies in Germany, France, and the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 18(10). Scopus. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acf58f>
34. Witzleben, S. (2022). Minimizing the Global Warming Potential with Geopolymer-Based Insulation Material with Miscanthus Fiber. *Polymers*, 14(15). Scopus. <https://doi.org/10.3390/polym14153191>
35. Woon, K. S., Phuang, Z. X., Taler, J., Varbanov, P. S., Chong, C. T., Klemeš, J. J., & Lee, C. T. (2023). Recent advances in urban green energy development towards carbon emissions neutrality. *Energy*, 267. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126502>

36. Yu, X., Wang, L., & Zheng, M. (2022). Advanced Ignition Strategies for Gasoline Engine Clean Combustion. *COMODIA - Int. Conf. Model. Diagn. Adv. Engine Syst.*, 127–135. Japan Society of Mechanical Engineers. Scopus. Diambil dari <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85168759824&partnerID=40&md5=401c783713303bf35386383915ba081f>
37. Zolfani, S. H., Hasheminasab, H., Torkayesh, A. E., Zavadskas, E. K., & Derakhti, A. (2022). A Literature Review of MADM Applications for Site Selection Problems-One Decade Review from 2011 to 2020. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 21(1), 7–57. Scopus. <https://doi.org/10.1142/S0219622021300019>