

Konversi Motor Bahan Bakar Minyak Menjadi Motor Listrik: Analisis Teknis, Regulatif, Keselamatan, dan Dampaknya terhadap Transisi Energi Indonesia

Nanang Yulian¹

Ahmad Zulfikar Priyatna²

^{1,2} Program Pascasarjana Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan RI

¹ nanang.yulian12@gmail.com

² priyatnazulfikar@gmail.com

ABSTRAK

Program konversi kendaraan berbahan bakar fosil menjadi kendaraan listrik (retrofit EV) merupakan salah satu strategi penting untuk mendukung pencapaian target Net Zero Emission (NZE) 2060 di Indonesia. Namun implementasinya belum berkembang optimal karena menghadapi berbagai hambatan teknis, ekonomis, serta regulatif. Studi ini menganalisis aspek inti dari retrofit EV, meliputi karakteristik teknis komponen utama (motor listrik, baterai, controller, dan sistem manajemen baterai), kesiapan infrastruktur bengkel dan SDM, tantangan biaya awal, serta kebutuhan standarisasi. Selain itu, penelitian menyoroti hambatan regulatif berupa proses sertifikasi bengkel konversi oleh Kementerian ESDM, uji tipe dan SRUT oleh Kementerian Perhubungan, keterbatasan fasilitas laboratorium uji, serta ketidaksinkronan standar antara PUIL, SNI otomotif, dan regulasi transportasi. Temuan menunjukkan bahwa tantangan-tantangan tersebut berdampak signifikan terhadap kecepatan adopsi, keamanan sistem, dan tingkat kepercayaan publik. Oleh karena itu, diperlukan langkah terintegrasi berupa harmonisasi regulasi lintas sektor, peningkatan kapasitas laboratorium uji, penyederhanaan proses sertifikasi, serta penyediaan insentif finansial untuk menekan biaya konversi. Penelitian ini memberikan landasan awal bagi penguatan ekosistem retrofit EV di Indonesia, baik untuk perumusan kebijakan maupun pengembangan standar teknis nasional.

Kata kunci: retrofit kendaraan listrik, sertifikasi konversi, uji tipe, regulasi transportasi, baterai EV.

Abstract

The conversion of fossil-fueled vehicles into electric vehicles (EV retrofitting) is a key strategy to support Indonesia's Net Zero Emission (NZE) 2060 target. However, its implementation has not progressed optimally due to technical, economic, and regulatory barriers. This study analyzes the core aspects of EV retrofitting, including the technical characteristics of electric motors, batteries, controllers, and battery management systems, as well as the readiness of workshops and skilled labor. Economic constraints—particularly high initial investment—remain a major barrier, along with the absence of comprehensive standards for retrofit components. Regulation is identified as another critical challenge, particularly related to the certification process for conversion workshops by the Ministry of Energy and Mineral Resources, vehicle type testing and SRUT issuance by the Ministry of Transportation, limited laboratory capacity, and inconsistencies between PUIL, automotive SNI, and transport regulations. These barriers significantly influence adoption rates, system safety, and public confidence. Therefore, integrated policy measures are required, including regulatory harmonization, improved testing facilities, streamlined certification procedures, and financial incentives to reduce conversion costs. This research provides foundational insights for strengthening Indonesia's EV retrofit ecosystem, supporting policymaking and the development of national technical standards.

Keywords: electric vehicle retrofit, conversion certification, type approval, transport regulation, EV battery.

1. PENDAHULUAN

Sektor transportasi merupakan salah satu penyumbang emisi terbesar di Indonesia,

terutama dari kendaraan bermotor berbahan bakar minyak (BBM) yang mendominasi penggunaan harian masyarakat. Ketergantungan tinggi terhadap BBM

menyebabkan meningkatnya konsumsi energi fosil, tingginya polusi udara, serta kontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca (GRK) nasional (Nasution et al., 2020). Dalam konteks transisi energi global, elektrifikasi transportasi menjadi strategi kunci untuk mencapai target Net Zero Emissions (NZE) pada tahun 2060, sebagaimana ditekankan dalam berbagai kajian energi terbarukan dan mobilitas berkelanjutan (IEA, 2022; Purwanto et al., 2023).

Salah satu pendekatan yang semakin relevan adalah konversi motor BBM menjadi motor listrik, yang menawarkan alternatif transisi lebih cepat dan ekonomis dibanding membeli kendaraan listrik baru. Konversi (retrofit) memungkinkan pemanfaatan rangka kendaraan eksisting, sehingga mempercepat penetrasi kendaraan listrik, mengurangi limbah kendaraan, dan memperluas akses masyarakat terhadap transportasi rendah emisi (Setiawan & Park, 2021). Beberapa studi juga menegaskan bahwa penggunaan motor listrik efisiensi tinggi dapat menurunkan konsumsi energi hingga lebih dari 60% dibandingkan mesin pembakaran internal (ICE) (Milanés et al., 2020).

Pemerintah Indonesia telah menerbitkan Permen ESDM No. 3 Tahun 2020 tentang konversi sepeda motor BBM menjadi motor listrik sebagai payung kebijakan nasional. Regulasi ini mengatur aspek teknis kendaraan, bengkel konversi, hingga mekanisme sertifikasi laik jalan. Meskipun demikian, implementasi konversi masih menghadapi tantangan teknis dan regulatif, seperti standar baterai, keamanan instalasi motor dan controller, serta keandalan sistem kelistrikan kendaraan (Suryanto et al., 2022). Selain itu, belum terdapat kajian akademik yang secara komprehensif menilai aspek teknis, keselamatan, regulasi, dan kontribusi emisi dalam satu kerangka terpadu.

Dengan demikian, penelitian ini penting untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang kesiapan teknologi

dan kebijakan konversi motor listrik di Indonesia, sehingga dapat mendukung tujuan jangka panjang dekarbonisasi sektor transportasi.

Rumusan masalah dalam penelitian ini dinyatakan secara positif:

1. Proses teknis konversi motor BBM ke motor listrik perlu dijelaskan secara sistematis.
2. Kendala teknis utama pada baterai, motor listrik, controller, serta integrasi rangka kendaraan perlu dianalisis secara mendalam.
3. Efektivitas regulasi dan mekanisme sertifikasi perlu dievaluasi dalam menjamin keselamatan kendaraan hasil konversi.
4. Dampak program konversi terhadap pengurangan emisi dan percepatan elektrifikasi transportasi perlu dikaji berdasarkan data empiris.

Tujuan Penelitian

1. Mendeskripsikan proses konversi motor BBM menjadi motor listrik secara teknis dan struktural.
2. Menganalisis aspek keselamatan dan standarisasi komponen utama, termasuk baterai, motor, sistem kontrol, dan struktur kendaraan.
3. Mengevaluasi kesiapan regulasi nasional serta efektivitas implementasinya di lapangan.
4. Menilai kontribusi konversi kendaraan terhadap target penurunan emisi dan transisi energi nasional.

Manfaat Penelitian:

1. Menjadi literatur akademik yang memperkuat kajian retrofit kendaraan listrik di Indonesia.
2. Memberikan rekomendasi kebijakan bagi pemerintah, lembaga sertifikasi, dan regulator sektor transportasi.
3. Menjadi referensi teknis bagi bengkel konversi, pelaku industri kendaraan listrik, dan konsumen mengenai standarisasi dan keselamatan konversi.

4. Mendukung percepatan program elektrifikasi kendaraan melalui temuan empiris terkait hambatan teknis dan regulatif.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kendaraan Listrik (EV) dan Komponennya

Kendaraan listrik (Electric Vehicle/EV) bekerja dengan memanfaatkan energi listrik yang tersimpan dalam baterai untuk menggerakkan motor listrik melalui sistem kendali elektronik. Pada kasus konversi (retrofit), komponen utama yang perlu dipahami adalah motor listrik, baterai, controller (motor controller), dan Battery Management System (BMS). Pemahaman karakteristik teknis masing-masing komponen menjadi sangat penting untuk memastikan performa dan keselamatan kendaraan hasil konversi.

Motor listrik pada kendaraan listrik umumnya menggunakan tipe Brushless DC (BLDC) atau Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) karena efisiensinya tinggi dan perawatan rendah. Motor bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi energi mekanik melalui interaksi medan magnet stator dan rotor. Pada retrofit motor BBM ke listrik, motor tipe BLDC lebih sering digunakan karena integrasinya lebih sederhana dan kompatibel dengan banyak konfigurasi rangka motor konvensional (Patel et al., 2021).

Baterai sebagai sumber energi utama biasanya menggunakan Lithium-ion (Li-ion) tipe NMC atau LFP. Baterai menentukan kapasitas jangkauan, daya maksimum yang dapat diberikan, dan umur pakai kendaraan. Pemilihan baterai pada retrofit mempertimbangkan bentuk pack, densitas energi, kemampuan discharge, serta keamanan termal (Khalid et al., 2020). Tantangan utama pada retrofit adalah keterbatasan ruang pada rangka motor konvensional sehingga

diperlukan desain baterai yang modular dan aman.

Controller, atau Motor Controller, mengatur aliran arus ke motor dan menentukan torsi serta kecepatan kendaraan. Controller juga berfungsi sebagai penghubung antara throttle dan motor, menerjemahkan input pengemudi menjadi sinyal listrik. Parameter seperti current limit, regen braking, dan ramp control sangat penting untuk performa yang halus dan aman. Pada retrofit, controller harus dikalibrasi ulang untuk menghindari arus berlebih yang dapat merusak motor atau sistem kelistrikan (Rahman & Hasan, 2019).

Battery Management System (BMS) adalah komponen kritis yang memantau kondisi sel baterai, melakukan balancing, serta mencegah kondisi berbahaya seperti over-voltage, over-current, dan overheating. BMS mempengaruhi keselamatan dan umur baterai secara langsung. Dalam retrofit, integrasi BMS harus mempertimbangkan karakteristik sel, kapasitas total, dan kemampuan sistem proteksi agar sesuai dengan standar keselamatan kendaraan listrik (Zhang et al., 2022). Dengan memahami keempat komponen utama ini, proses konversi motor BBM ke motor listrik dapat dirancang lebih aman, efisien, dan sesuai dengan standar teknis yang berlaku. Pengetahuan teknis ini juga menjadi fondasi penting bagi regulator maupun bengkel konversi dalam menyusun praktik terbaik (best practices) dan panduan implementasi.

2.2 Teknik Pengumpulan Data

Konversi (retrofitting) kendaraan dari mesin pembakaran dalam (ICE) menjadi kendaraan listrik sangat menarik karena dapat memperpanjang umur kendaraan lama sekaligus mengurangi jejak karbon (Watts, 2021). Teknologi ini melibatkan penggantian mesin ICE, tangki bahan bakar, dan sistem knalpot dengan motor listrik, inverter, baterai, dan sistem manajemen baterai (BMS) (Watts, 2021).

2.2.1 Praktik Global Retrofitting

Eropa: Di Jerman dan negara Eropa lainnya, retrofitting telah menjadi solusi untuk mempercepat transisi ke kendaraan nol emisi dengan memanfaatkan kendaraan bekas alih-alih memproduksi EV baru (Hoeft, 2021). Evaluasi siklus hidup retrofitted EV di Eropa menunjukkan pengurangan emisi gas rumah kaca signifikan dibandingkan ICE tradisional (Life cycle GHG, 2024).

India: Di India, retrofitting semakin populer untuk kendaraan roda dua dan roda tiga karena biaya EV baru yang masih mahal. Konversi ICE ke EV dianggap lebih efisien secara ekonomi dan ramah lingkungan, meskipun masih ada tantangan terkait sertifikasi dan keselamatan (Vibhute & Phadke, 2022; CSE, 2024).

Amerika Serikat: Meski skala retrofit di AS belum sebesar di Eropa, laporan menunjukkan potensi retrofit pada armada komersial sebagai jalur cepat mendekarbonisasi kendaraan yang sudah beroperasi (GGGI, 2023).

2.2.2 Kelebihan Retrofitting dibanding EV Pabrik

1. Efisiensi Biaya. Karena menggunakan kerangka kendaraan lama, biaya konversi retrofitting bisa lebih rendah dibanding membeli EV baru (Vibhute & Phadke, 2022).
2. Pengurangan Limbah. Retrofitting memperpanjang umur kendaraan yang ada sehingga mengurangi limbah karena kendaraan lama tidak dibuang (GGGI, 2023).
3. Dampak Lingkungan Lebih Rendah. Studi LCA menunjukkan bahwa retrofitted EV bisa menghasilkan emisi GHG seumur hidup lebih rendah dibanding ICE dan bahkan EV baru, terutama bila produksi baterai lokal dilakukan dengan listrik rendah karbon (Life cycle GHG, 2024; GGGI, 2023).

4. Peningkatan Adopsi Cepas. Proses retrofit cenderung lebih cepat dibanding produksi EV baru, sehingga bisa mempercepat dekarbonisasi transportasi (Watts, 2021).
5. Model Bisnis Fleksibel. Retrofitting cocok untuk kendaraan klasik, armada lama, atau segmen tertentu yang sulit digantikan dengan EV pabrikan (GGGI, 2023).

2.2.3 Kekurangan Retrofitting

1. Regulasi & Keamanan. Standar retrofit di banyak negara belum konsisten, dan ada risiko keselamatan jika conversion tidak dilakukan dengan benar (Watts, 2021).
2. Tantangan Teknis. Penempatan baterai, modifikasi rangka, pemilihan motor dan inverter yang sesuai bisa sangat kompleks tergantung jenis kendaraan (Setiawan, 2024).
3. Infrastruktur Pengisian. Di banyak negara, kurangnya fasilitas pengisian daya menjadi hambatan besar untuk adopsi retrofit EV (Evaluation challenges, 2025).
4. Performa & Jarak Tempuh. Tidak semua konversi dapat menyamai performa EV pabrikan; kelemahan bisa muncul pada range, akselerasi, atau efisiensi jika baterai atau motor tidak optimal (Evaluation challenges, 2025).
5. Skalabilitas Terbatas. Untuk menjadi solusi besar-besaran, retrofit membutuhkan dukungan kebijakan, pelatihan bengkel, dan ekosistem servis yang belum merata (GGGI, 2023).

2.3 Regulasi Konversi di Indonesia

Di Indonesia, regulasi konversi motor BBM menjadi listrik telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir sebagai bagian dari inisiatif transisi energi dan dekarbonisasi transportasi. Salah satu regulasi kunci adalah

Peraturan Menteri ESDM Nomor 3 Tahun 2023, yang memberi pedoman umum terkait bantuan pemerintah untuk konversi sepeda motor dari penggerak motor bakar ke motor listrik berbasis baterai (ESDM, 2023). Dalam regulasi ini, ditetapkan bahwa bengkel konversi harus bersertifikat dari Kementerian Perhubungan serta lembaga verifikasi independen akan mengevaluasi kelayakan penerima bantuan dan kualitas konversi (ESDM, 2023).

Sebagai bagian dari kontrol mutu, uji laik jalan dan SRUT (Sertifikat Registrasi Uji Tipe) menjadi prasyarat. Kementerian Perhubungan mengatur tipe dan konversi kendaraan melalui peraturan “Peraturan Menhub Nomor 65 Tahun 2020” untuk sepeda motor. Regulasi semacam ini memastikan bahwa kendaraan hasil konversi melewati pengujian keselamatan dan teknis sebelum dapat digunakan (Kemenhub, 2022).

Terkait bengkel yang melakukan konversi, regulasi juga mengharuskan sertifikasi bengkel konversi. Bengkel harus mendapatkan izin resmi dari Kemenhub agar memenuhi standar teknis dan keselamatan. Ini penting untuk menjamin bahwa proses retrofit tidak asal jadi dan benar-benar aman.

Dari sisi kelistrikan, standar PUIL (Persyaratan Umum Instalasi Listrik) menjadi dasar regulasi instalasi listrik pada sistem konversi. PUIL versi terbaru (SNI 0225-1/-..., PUIL 2020) mengatur proteksi dasar seperti jarak bebas (“clearance”), proteksi hubung singkat, grounding, dan elemen proteksi lain pada instalasi listrik (PUIL, 2020). Selain itu, BSN telah menetapkan puluhan SNI kendaraan listrik, termasuk SNI untuk sel baterai kendaraan listrik (BSN, 2022), guna memastikan keamanan dan kinerja baterai listrik (BSN, 2023).

Regulator Indonesia juga menekankan integrasi dan harmonisasi antarlembaga: Kementerian ESDM menginisiasi program konversi, Kemenhub mengatur aspek uji tipe dan sertifikasi bengkel, dan BSN menetapkan

standar teknis nasional. Namun, meskipun sudah ada fondasi regulasi, beberapa studi menunjukkan bahwa masih terdapat gap regulasi terutama terkait pengujian baterai (misalnya uji termal dan keselamatan sel) serta manajemen risiko konversi di skala besar (Legal Regulation, 2025).

2.4 Standar Keselamatan Kendaraan Listrik.

Aspek keselamatan menjadi sangat penting dalam konversi kendaraan listrik, terutama karena risiko kelistrikan dan baterai. Dalam sistem konversi, ada potensi risiko seperti hubung singkat, kegagalan isolasi, dan kegagalan wiring, yang semuanya harus diantisipasi dengan proteksi kelistrikan yang memadai. Standar nasional seperti PUIL (SNI 0225:2020) menjelaskan persyaratan proteksi terhadap kejut listrik, proteksi arus lebih, dan sistem grounding agar instalasi listrik aman.

Baterai kendaraan listrik juga menghadapi risiko kritis, salah satunya adalah thermal runaway — kondisi di mana suhu sel baterai meningkat tak terkendali yang dapat menyebabkan kebakaran atau ledakan (Putera, 2025). Untuk itu, manajemen termal baterai melalui sistem BMS (Battery Management System) yang baik sangat penting untuk memastikan keamanan jangka panjang.

Secara internasional, ada beberapa standar keselamatan baterai dan EV yang relevan: misalnya UNECE Regulation No. 100 (R100 Rev.3) yang menetapkan persyaratan keamanan untuk Rechargeable Energy Storage System (RESS) di kendaraan listrik (UNECE, 2022). Regulasi ini mencakup persyaratan konstruksi, pengujian keamanan, dan proteksi fungsi baterai. Selain itu, UNECE R136 (khusus kendaraan roda dua listrik) juga menjadi acuan di banyak negara ASEAN. Standar lain yang relevan adalah ISO 6469-1, yang mengatur keselamatan sistem energi penyimpanan (RESS) dari kendaraan listrik, termasuk getaran, proteksi overheat, dan

isolasi (ISO, ...). Dokumentasi ISO 6469-1 menjelaskan prosedur uji untuk integritas mekanik RESS dan proteksi terhadap getaran dan kondisi ekstrem (ISO, sesuai UNECE wiki).

Secara nasional, standar Indonesia telah mencoba mengikuti praktik internasional melalui penetapan banyak SNI khusus EV dan baterai. BSN telah menetapkan 38 SNI kendaraan listrik, termasuk standar untuk baterai, sel, dan komponen pengisian (BSN, 2023). Namun, analisis akademik menunjukkan bahwa regulasi dan pengujian baterai di Indonesia masih perlu harmonisasi lebih lanjut dengan standar global seperti R100 atau UL-2580 agar perlindungan risiko termal dan mekanik benar-benar memadai (Rudijanto, 2024).

2.5 Konversi dan Transisi Energi

Program konversi motor BBM ke motor listrik berpotensi menjadi salah satu pilar penting dalam transisi energi Indonesia, terutama pada segmen kendaraan roda dua. Pemerintah menargetkan jutaan sepeda motor dikonversi pada tahun depan sebagai bagian dari strategi dekarbonisasi dan pengurangan konsumsi BBM (ESDM, 2022). Konversi ini tidak hanya mengurangi konsumsi bahan bakar fosil, tetapi juga secara signifikan dapat menurunkan emisi CO₂ per kendaraan.

Dari sisi efisiensi, motor listrik jauh lebih efisien dibanding mesin pembakaran internal (ICE). Efisiensi energi motor listrik (rasio energi tersalurkan ke roda dibanding energi input) bisa sangat tinggi, sehingga konsumsi energi per kilometer lebih rendah dibanding ICE, apalagi jika listrik yang digunakan bersumber dari energi terbarukan. Ini mendukung target emisi nasional dan pengurangan impor BBM.

Dalam perspektif lingkungan, analisis potensi pengurangan emisi menunjukkan bahwa konversi sepeda motor bisa memberikan dampak signifikan. Sebagaimana dilaporkan oleh Kementerian ESDM, program

konversi sepeda motor dinilai dapat menurunkan emisi GRK dan biaya BBM negara jika di-scale up (ESDM, 2022). Selain itu, transisi konversi ini membuka kesempatan ekonomi baru: bengkel konversi bersertifikat, verifikator independen, dan rantai pasok komponen elektronika lokal. Hal ini tidak hanya mendorong dekarbonisasi, tetapi juga pengembangan industri lokal dan peningkatan kapasitas tenaga kerja teknis.

Namun, untuk mewujudkan potensi ini, beberapa tantangan harus diatasi: pengembangan infrastruktur pengisian, standar konversi yang aman, metode pendanaan (insentif konversi), dan edukasi publik. Jika dilakukan dengan tepat, konversi bisa menjadi jembatan transisi — bukan hanya mengganti motor lama, tetapi juga mendorong adopsi EV secara lebih luas dan inklusif.

3. PEMBAHASAN

3.1 Aspek Teknis Konversi Motor BBM ke Motor Listrik

Konversi motor berbahan bakar minyak (BBM) menjadi motor listrik merupakan proses penggantian sistem propulsi berbasis pembakaran internal dengan sistem penggerak listrik yang lebih efisien, bersih, dan memiliki lebih sedikit komponen bergerak. Secara umum, proses ini terdiri dari tahapan pelepasan komponen lama, integrasi motor listrik, instalasi baterai, pemasangan sistem kendali, serta penyesuaian mekanik dan kelistrikan agar kendaraan aman dan layak jalan.

Pada tahap awal, sejumlah komponen utama motor BBM dilepas, antara lain mesin pembakaran internal, sistem knalpot, radiator, karburator atau injektor, tangki BBM, hingga sebagian sistem transmisi. Komponen yang dipertahankan umumnya meliputi rangka (chassis), roda, sistem suspensi, rem, dan beberapa elemen bodi. Pelepasan komponen ini bertujuan untuk menyediakan ruang bagi

motor listrik dan baterai sekaligus mengurangi massa keseluruhan kendaraan.

Integrasi motor listrik menjadi aspek teknis krusial karena motor harus mampu menghasilkan torsi yang sesuai dengan karakteristik kendaraan roda dua. Motor tipe Brushless DC (BLDC) banyak digunakan pada retrofit karena konstruksinya sederhana, biaya relatif rendah, dan efisiensi yang baik. Alternatifnya, Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) menawarkan efisiensi lebih tinggi dan performa yang lebih stabil pada kecepatan tinggi, namun dengan harga yang lebih tinggi. Pemasangan motor harus mempertimbangkan desain mounting bracket, kekuatan rangka, posisi gir atau output shaft, serta alignment terhadap roda belakang agar tidak menimbulkan getaran berlebih.

Penempatan baterai merupakan tantangan terbesar dalam proses konversi. Baterai umumnya diletakkan di area tangki BBM, bawah jok, atau kompartemen tengah. Posisi baterai sangat memengaruhi distribusi massa, stabilitas kendaraan, dan handling. Baterai yang terlalu tinggi dapat meningkatkan pusat gravitasi sehingga mengurangi kestabilan saat menikung, sementara posisi terlalu rendah dapat mengganggu ground clearance. Selain itu, baterai membutuhkan sistem proteksi fisik berupa boks logam (battery casing) untuk mengurangi risiko benturan dan memastikan keamanan struktural.

Selain motor dan baterai, sistem kelistrikan pada kendaraan listrik mencakup beberapa komponen utama. Motor controller berfungsi mengatur kecepatan, torsi, dan arah putaran motor dengan mengolah sinyal throttle. Controller harus memiliki kapasitas arus dan tegangan yang sesuai dengan spesifikasi motor untuk menghindari overheating. Battery Management System (BMS) memastikan baterai beroperasi pada batas aman, termasuk pemantauan tegangan sel, temperatur, arus, dan keseimbangan antar sel (cell balancing). DC-DC converter

digunakan untuk menurunkan tegangan baterai (misalnya 48–72 V) ke tegangan rendah (12 V) untuk mengoperasikan beban aksesoris seperti lampu, klakson, dan panel indikator. Keseluruhan sistem harus terintegrasi menggunakan wiring harness yang aman dan sesuai standar isolasi.

Tantangan teknis utama dalam retrofit meliputi manajemen panas pada controller, karena arus besar dapat menyebabkan peningkatan temperatur yang signifikan. Diperlukan heatsink atau sistem pendinginan pasif yang memadai. Pada sisi mekanik, desain mounting motor dan kompartemen baterai harus mempertahankan kekuatan struktural rangka. Keamanan wiring menjadi aspek penting karena risiko korsleting, arcing, dan kebocoran isolasi dapat mengakibatkan kecelakaan serius. Oleh karena itu, penggunaan kabel berstandar otomotif, proteksi sekering (fuse), serta jalur kabel yang tidak terkena panas mesin atau gesekan sangat diperlukan.

Secara global, beberapa studi kasus retrofit menunjukkan hasil performa yang positif. Di India, konversi motor BBM 110–150 cc menjadi motor listrik mampu mencapai efisiensi energi lebih tinggi hingga 60% dibandingkan kondisi awal. Di Eropa, proyek retrofit pada skuter dan moped menunjukkan peningkatan torsi awal yang signifikan, meskipun terjadi penurunan jarak tempuh akibat keterbatasan kapasitas baterai. Di Amerika Serikat, retrofit digunakan sebagai alternatif edukatif dan penelitian, di mana hasil uji jalan menunjukkan kemampuan akselerasi yang kompetitif untuk kelas urban mobility. Studi-studi tersebut menegaskan bahwa retrofit dapat menghasilkan performa teknis yang memadai apabila perancangan komponen dilakukan secara presisi dan sesuai standar keselamatan.

3.2 Aspek Keselamatan dalam Konversi

Keselamatan merupakan aspek yang sangat krusial dalam proses konversi motor

berbahan bakar minyak (BBM) menjadi motor listrik. Sistem propulsi listrik memiliki karakteristik teknis dan risiko yang berbeda dibandingkan mesin pembakaran internal, sehingga proses retrofit harus memperhatikan standar kelistrikan, proteksi termal, integritas struktural, serta kompetensi teknisi yang melakukan instalasi.

Tabel 1. Perbandingan Standar Keselamatan Retrofit di India, Eropa, dan Indonesia

Aspek	India	Eropa	Indonesia
Regulasi Utama Retrofit	Mengacu pada AIS-123 Part 3 untuk kendaraan roda dua dan tiga; mengatur instalasi motor, baterai, proteksi hubung singkat, dan uji keselamatan kelistrikan (Sharma, 2021).	Mengacu pada regulasi internasional UNECE R100 (keselamatan sistem tegangan tinggi) dan UNECE R136 (khusus L-category motorcycles) (Müller, 2020).	Permen ESDM No. 3/2020; SRUT oleh Kemenhub; mengacu pada PUIL 2011 dan SNI untuk standar kelistrikan (Widodo, 2022).
Persyaratan Baterai	Baterai wajib memenuhi BIS 16046 dan UN38.3, melakukan uji vibrasi, termal, drop test, dan proteksi BMS (Patel, 2022).	Mengikuti UNECE R100 Annex 8, uji penetrasi, vibrasi, overcharge, thermal shock, mechanical integrity (Kowalski, 2019).	Belum memiliki standar baterai khusus; mengacu pada UN38.3 dan pedoman Kemenhub (Widodo, 2022).
Proteksi Kelistrikan	Fuse wajib pada jalur utama, isolasi minimal 1000 V, enclosure IP67 (Sharma, 2021).	Proteksi lengkap: electric shock protection, isolation monitoring device, short circuit protection (Müller, 2020).	Proteksi mengacu pada PUIL: MCB, fuse, isolasi kabel; belum setara dengan standar Eropa.
Uji Jalan dan Kelaikan	Termasuk uji akselerasi, pengereman, dan integritas struktur mounting (Patel, 2022).	Termasuk uji pasca-tabrakan (post-crash), battery enclosure survivability (Kowalski, 2019).	Uji Laik Jalan oleh Kemenhub terutama terkait aspek non-tegangan tinggi (Widodo, 2022).
Sertifikasi Bengkel	Wajib sertifikasi Retrofitting Approval Agency (RAA), teknisi wajib bersertifikat (Sharma, 2021).	Mengacu standar industri ECE/ISO dan audit keselamatan manufaktur (Müller, 2020).	Bengkel wajib tersertifikasi ESDM; teknisi melalui LSP (Widodo, 2022).
Standar Wiring	Kabel otomotif IS 2465, konektor IP67, standar HV bus (Patel, 2022).	Mengikuti ISO 6469-3 dan ISO 26262 untuk functional safety (Kowalski, 2019).	Mengacu SNI dan PUIL; belum ada standar wiring kendaraan listrik retrofit.
Kesiapan Industri	Ekosistem retrofit matang, banyak motor ICE beredar luas (Sharma, 2021).	Industri EV kuat; retrofit dibatasi karena standar keselamatan sangat ketat (Müller, 2020).	Ekosistem masih berkembang; jumlah bengkel retrofit terbatas (Widodo, 2022).

Salah satu risiko utama adalah korsleting (short circuit) yang dapat terjadi akibat kesalahan pemasangan kabel, isolasi yang tidak sesuai standar, konektor longgar,

atau paparan air pada area bertegangan tinggi. Korsleting dapat menghasilkan arcing, memicu kerusakan komponen, hingga menyebabkan kebakaran. Selain itu, risiko kegagalan baterai seperti thermal runaway merupakan ancaman nyata pada sistem kendaraan listrik. Thermal runaway terjadi ketika suhu sel baterai meningkat tidak terkendali akibat overcharging, kerusakan internal, atau benturan keras, yang dapat menyebabkan pelepasan gas bertekanan, api, bahkan ledakan. Oleh karena itu, pemasangan sistem proteksi seperti sensor suhu, sistem pemutus arus, serta Battery Management System (BMS) yang andal menjadi keharusan.

Dari sisi instalasi kelistrikan, isolasi kabel, pemilihan penampang kabel, serta proteksi proteksi arus lebih seperti fuse dan MCB menjadi bagian penting dari mitigasi risiko. Fuse harus ditempatkan pada jalur utama baterai untuk mencegah arus berlebih, sedangkan MCB digunakan sebagai perlindungan tambahan pada jalur aksesoris atau charging circuit. Penempatan kabel harus memperhatikan jarak aman dari komponen panas, area bergerak, serta penggunaan sleeve pelindung yang tahan terhadap gesekan dan kelembaban.

Tantangan keselamatan lain muncul pada aspek struktural. Rangka motor BBM tidak dirancang untuk menopang baterai yang relatif berat dan memiliki distribusi massa berbeda dari mesin konvensional. Penempatan baterai yang tidak tepat dapat menimbulkan perubahan pusat gravitasi kendaraan, menurunkan stabilitas berkendara, serta menimbulkan risiko retakan pada rangka. Penguatan (reinforcement) pada titik beban, pembuatan boks baterai berbahan logam, dan desain mounting yang sesuai prinsip mekanika teknik menjadi komponen penting untuk memastikan integritas struktural kendaraan.

Selain itu, aspek kompetensi teknisi dan kesiapan bengkel konversi masih menjadi tantangan besar, khususnya di Indonesia. Teknisi harus memahami prosedur high

voltage safety, cara menangani baterai lithium, teknik pemasangan kabel standar otomotif, serta prosedur emergency shut-off. Negara dengan ekosistem retrofit yang maju seperti India dan beberapa negara Eropa telah memiliki sertifikasi teknisi yang wajib diikuti, sedangkan Indonesia masih dalam tahap pengembangan ekosistem tersebut.

Untuk memahami konteks global, tabel berikut merangkum perbandingan standar keselamatan retrofit di India, Eropa, dan Indonesia.

3.3 Tantangan Regulatif dan Sertifikasi

Konversi motor berbahan bakar minyak (BBM) menjadi motor listrik di Indonesia menghadapi sejumlah tantangan regulatif yang berpengaruh langsung terhadap kualitas hasil konversi, kepastian hukum, serta keselamatan pengguna. Regulasi utama yang menjadi payung hukum adalah Peraturan Menteri ESDM Nomor 3 Tahun 2020 tentang Penyediaan Infrastruktur Pengisian Listrik Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai dan Ketentuan Konversi. Regulasi ini menetapkan bahwa bengkel konversi wajib memiliki sertifikasi dari Kementerian ESDM serta memenuhi standar keselamatan teknis yang telah ditentukan (ESDM, 2020). Namun implementasinya di lapangan masih terbatas karena jumlah bengkel tersertifikasi masih sedikit dan distribusinya belum merata.

Selain sertifikasi bengkel, setiap kendaraan yang telah dikonversi harus melalui proses uji tipe dan penerbitan Surat Registrasi Uji Tipe (SRUT) oleh Kementerian Perhubungan. Prosedur ini mencakup pengujian sistem motor listrik, baterai, struktur kendaraan, serta sistem proteksi terhadap risiko kebakaran atau hubungan singkat (Kemenhub, 2021). Tantangan yang muncul adalah kapasitas laboratorium uji yang terbatas sehingga terjadi antrean panjang, terutama untuk jenis kendaraan roda dua yang memiliki permintaan konversi cukup tinggi.

Di sisi teknis, sejumlah standar yang relevan seperti PUIL 2020, SNI 6191 untuk baterai lithium-ion, serta standar sistem kelistrikan otomotif lainnya sering kali tidak selaras dengan persyaratan teknis kementerian sektor transportasi. Ketidaksinkronan standar ini menyebabkan kebingungan bagi bengkel konversi dalam menentukan acuan yang harus dipatuhi. Misalnya, spesifikasi kabel dan proteksi arus lebih dalam PUIL 2020 tidak selalu cocok untuk lingkungan getaran tinggi pada kendaraan bermotor, sehingga memerlukan interpretasi tambahan di level teknis (BSN, 2020).

Dari sisi supply chain, banyak komponen utama seperti motor listrik, controller, dan baterai masih berasal dari impor. Beberapa komponen belum memiliki sertifikasi SNI atau standar kesesuaian lainnya, sehingga proses uji tipe menjadi lebih panjang karena membutuhkan pembuktian tambahan terkait keselamatan dan keandalan (Ghosh, 2020). Ketergantungan impor ini juga menyebabkan variasi kualitas antar komponen sehingga mempersulit penyusunan standar teknis yang konsisten pada level nasional.

Kendala regulatif tersebut memiliki implikasi langsung terhadap perkembangan ekosistem konversi kendaraan di Indonesia. Proses administrasi yang panjang dapat menurunkan minat masyarakat, sementara perbedaan standar antar kementerian dapat mengurangi konsistensi mutu hasil konversi. Di sisi lain, penyelarasan regulasi dan peningkatan kapasitas laboratorium uji akan meningkatkan kepercayaan publik terhadap program konversi sebagai bagian dari strategi transisi energi menuju kendaraan rendah emisi.

3.4 Dampak terhadap Keselamatan Publik dan Kesiapan Infrastruktur

Penerapan konversi kendaraan bermotor BBM ke listrik dalam skala besar

membawa implikasi penting bagi keselamatan publik. Apabila konversi dilakukan tanpa pengawasan mutu yang memadai, risiko kegagalan sistem meningkat, termasuk konsleting, kerusakan baterai, dan potensi kebakaran yang dapat membahayakan pengendara maupun lingkungan sekitarnya. Studi oleh Sun et al. (2020) menunjukkan bahwa 60% insiden kegagalan pada kendaraan listrik berasal dari sistem penyimpanan energi, terutama baterai lithium-ion yang tidak dikelola dengan sistem proteksi memadai.

Kesiapan infrastruktur pengisian juga menjadi poin krusial terutama karena banyak motor listrik hasil retrofit menggunakan sistem charging yang bervariasi. Ketidakterstandarisasian charger menyebabkan risiko overcurrent atau mismatch tegangan, terutama jika menggunakan charger tidak bersertifikasi (Liu et al., 2021). Penggunaan charger yang tidak sesuai spesifikasi dapat mempercepat degradasi baterai atau menyebabkan overheating yang berpotensi menimbulkan thermal runaway.

Di tingkat bengkel, sebagian besar bengkel motor konvensional belum memiliki kompetensi maupun peralatan untuk menangani sistem tegangan tinggi kendaraan listrik. Padahal standar internasional seperti IEC 61851 dan ISO 6469 menekankan pentingnya pelatihan teknisi dan ketersediaan alat protektif. Ketidakmampuan bengkel umum menangani perawatan motor retrofit berpotensi menurunkan keselamatan jangka panjang kendaraan, mengingat komponen seperti Battery Management System (BMS) atau controller memerlukan metode diagnosis khusus (Tran et al., 2020).

Tabel berikut menggambarkan risiko keselamatan publik apabila konversi dilakukan tanpa standar teknis yang kuat:

Tabel 2. Risiko Keselamatan Publik pada Konversi Motor BBM ke Listrik

Aspek	Risiko	Dampak
Sistem baterai	Overheating, short circuit	Kebakaran kendaraan
Charging tidak tersertifikasi	Overvoltage, arus tidak stabil	Kerusakan baterai, risiko kebakaran
Kualitas instalasi kabel	Penurunan isolasi	Korsleting di jalan
Kompetensi teknisi rendah	Kesalahan perakitan	Kegagalan komponen saat berkendara

3.5 Kontribusi terhadap Transisi Energi dan Lingkungan

Konversi motor konvensional ke motor listrik memberikan potensi besar dalam mendukung transisi energi nasional. Motor listrik memiliki efisiensi energi 3–5 kali lebih tinggi dibandingkan mesin pembakaran internal, dengan efisiensi sistem mencapai 80–90% (Hawkins et al., 2013). Pada motor bensin kecil, efisiensi pembakaran hanya sekitar 20–30%. Hal ini membuat energi yang dibutuhkan per kilometer jauh lebih rendah.

Dari perspektif lingkungan, satu motor bensin rata-rata menghasilkan 0,7–1 ton CO₂ per tahun untuk jarak tempuh 10.000 km (IEA, 2021). Dengan mengganti motor BBM menjadi motor listrik berbasis grid nasional,

emisi dapat berkurang hingga 50–70% bergantung bauran energi listrik. Apabila dikombinasikan dengan penggunaan energi terbarukan, potensi penurunan emisi bisa mencapai lebih dari 90%.

Konversi juga merupakan langkah strategis untuk elektrifikasi cepat sektor mobilitas perkotaan, terutama ojek online, kurir, dan motor komuter. Bagi operator seperti ojek online yang menempuh rata-rata 70–100 km per hari, penghematan operasional dapat mencapai 60–80% karena biaya listrik jauh lebih rendah daripada bahan bakar minyak (IEA, 2022). Dengan populasi lebih dari 125 juta motor, Indonesia memiliki peluang besar untuk mencapai target NZE melalui elektrifikasi roda dua.

Tabel 3. Perbandingan Emisi dan Efisiensi Motor BBM vs Motor Listrik

Parameter	Motor BBM	Motor Listrik	Sumber
Efisiensi energi	20–30%	80–90%	Hawkins et al. (2013)
Emisi CO ₂ tahunan (10.000 km)	700–1000 kg	200–400 kg	IEA (2021)
Biaya energi per km	Rp 350–450	Rp 50–100	IEA (2022)
Kebisingan	Tinggi	Rendah	Campello et al. (2021)

3.6 Perbandingan Internasional sebagai Pembelajaran

Beberapa negara sudah menerapkan regulasi dan ekosistem retrofit yang lebih matang, sehingga dapat menjadi pembelajaran bagi Indonesia.

India menerapkan kebijakan FAME (Faster Adoption and Manufacturing of Hybrid and Electric Vehicles), yang menyediakan subsidi retrofitting untuk kendaraan roda dua dan roda tiga. Pemerintah India menetapkan standar homologasi yang sangat rinci, mencakup pengujian baterai, motor, struktur

rangka, proteksi kelistrikan, serta efisiensi energi (Ghosh, 2020).

Di Eropa, retrofit mengikuti aturan homologasi UNECE R100 dan R136 yang mewajibkan uji keselamatan baterai, sistem tegangan tinggi, vibrasi, hingga uji kebakaran. Standar ini dianggap paling ketat dan menekankan risiko thermal runaway (UNECE, 2021).

Tabel 4. Perbandingan Standar Retrofit Antar Negara

Aspek	India (FAME)	Eropa (UNECE)	Thailand
Standar pengujian	Homologasi AIS-123	UNECE R100/R136	Regulasi domestik adaptif
Fokus keselamatan	Baterai & struktur	Thermal safety & HV safety	Integrasi cepat
Infrastruktur uji	Banyak	Sangat lengkap	Terpusat & berkembang
Dukungan pemerintah	Subsidi kuat	Regulasi ketat	Insentif industri

3.7 Tantangan Adopsi Konsumen

Kendala terbesar dalam adopsi konversi adalah persepsi risiko keselamatan baterai. Insiden kebakaran kendaraan listrik yang dilaporkan di beberapa negara meningkatkan kecemasan masyarakat, terutama yang berkaitan dengan kualitas baterai aftermarket (Saeed et al., 2020). Selain itu, kepercayaan terhadap bengkel konversi masih rendah karena jumlah bengkel tersertifikasi terbatas dan variasi kualitas pengerjaan cukup besar.

Komponen aftermarket yang belum distandarkan menimbulkan kekhawatiran terkait keandalan jangka panjang, termasuk degradasi baterai, performa controller, dan keamanan instalasi sistem tegangan tinggi. Di sisi lain, ketersediaan layanan purna jual seperti servis baterai atau penggantian komponen belum merata sehingga membuat konsumen ragu untuk mengadopsi kendaraan hasil konversi (Mullan et al., 2018).

Studi adopsi kendaraan listrik menunjukkan bahwa persepsi risiko, biaya awal, dan kekhawatiran terkait purna jual merupakan faktor terbesar yang menahan

Thailand berkembang pesat dengan munculnya bengkel retrofit berkapasitas besar yang mampu mengkonversi ribuan motor per tahun. Pemerintah Thailand mendukung melalui regulasi fleksibel dan laboratorium uji terpusat yang memfasilitasi startup otomotif (Wattanapong et al., 2021).

masyarakat dalam transisi ke kendaraan listrik (Rezvani et al., 2015). Tanpa edukasi publik dan standarisasi komponen, adopsi konversi akan berjalan lambat.

4. KESIMPULAN

Program konversi motor berbahan bakar minyak (BBM) menjadi motor listrik memiliki potensi besar dalam mendukung percepatan transisi energi dan pengurangan emisi di Indonesia. Namun, implementasinya masih menghadapi berbagai tantangan teknis, regulatif, keselamatan, dan adopsi konsumen. Berdasarkan analisis pada bab-bab sebelumnya, beberapa kesimpulan utama dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Konversi motor BBM ke motor listrik merupakan strategi transisi energi yang efektif, karena dapat memanfaatkan kembali kendaraan yang sudah ada, mengurangi konsumsi BBM, dan meningkatkan efisiensi energi dibandingkan mesin pembakaran internal.

2. Aspek teknis konversi membutuhkan standar dan kompetensi tinggi, khususnya dalam integrasi motor listrik, baterai, BMS, wiring tegangan tinggi, dan perlindungan terhadap risiko korsleting maupun thermal runaway agar keselamatan tetap terjaga.
3. Keselamatan publik sangat dipengaruhi oleh kualitas bengkel konversi, di mana banyak bengkel umum belum memiliki kemampuan menangani instalasi listrik bertegangan tinggi, sehingga diperlukan sertifikasi teknisi dan fasilitas yang memadai.
4. Regulasi konversi masih menghadapi tantangan harmonisasi, terutama antara PUIL, SNI otomotif, dan regulasi Kemenhub terkait uji tipe dan SRUT, serta keterbatasan laboratorium uji yang memperpanjang proses sertifikasi kendaraan hasil konversi.
5. Konversi motor BBM dapat memberikan kontribusi lingkungan yang signifikan, termasuk potensi pengurangan emisi CO₂ hingga 50–90% per kendaraan per tahun serta efisiensi energi yang jauh lebih baik sehingga mendukung penurunan emisi sektor transportasi.
6. Keberhasilan ekosistem konversi sangat bergantung pada kepercayaan konsumen, yang dipengaruhi oleh kualitas komponen, jaminan keselamatan, layanan purna jual, serta konsistensi kebijakan pemerintah dalam mendukung industri retrofit nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, S., Wijaya, T., & Prabowo, A. (2022). Market barriers of electric motorcycles in Indonesia. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104141.
- Ariffin, M., Rahman, M. M., & Hassan, M. K. (2021). Technical challenges of electric motorcycle conversion. *Energy Reports*, 7, 558–568.
- BSN. (2020). Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2020). Badan Standardisasi Nasional.
- Campello, L., et al. (2021). Noise Comparison Between Electric and Conventional Motorcycles. *Applied Acoustics*.
- CSE. (2024). Policy Factsheet: E-Retrofitting Internal Combustion Engines. Centre for Science and Environment.
- ESDM. (2020). Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2020. Kementerian ESDM.
- Evaluation challenges. (2025). Evaluation of Electric Vehicle Retrofitting Challenges Through a Design, Operation, and Charging Infrastructure Assessment Framework. ResearchGate.
- GGGI. (2023). Electric Vehicle Retrofitting: A Guide to Accelerating the Transition. Global Green Growth Institute.
- Ghodrati, B. (2024). Retrofitting Fossil Fuel Passenger Vehicles to El-Hybrid: A Lifecycle Assessment. Vinnova.
- Ghosh, A. (2020). Possibilities and Challenges for the Inclusion of Electric Vehicles in India. *Energy Policy*.
- Hawkins, T. R., et al. (2013). Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*.
- Hidayat, A., & Sari, R. (2021). Public acceptance of electric vehicle conversion programs. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128564.
- Hoeft, F. (2021). Internal combustion engine to electric vehicle retrofitting: A case study in Germany. *ScienceDirect*.
- IEA. (2021). Global EV Outlook 2021. International Energy Agency.
- IEA. (2022). Global EV Outlook 2022. International Energy Agency.

- Kemenhub. (2021). Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Darat tentang Pengujian Tipe Kendaraan Bermotor Listrik. Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.
- Khalid, A., Rehman, A., & Khan, M. (2020). Battery technology review for electric vehicles: Performance, safety, and challenges. *Journal of Energy Storage*, 32, 101756.
- Kowalski, T. (2019). Safety standards for electric motorcycles: Review of UNECE R100 and R136 compliance requirements. *Journal of Transportation Safety Engineering*.
- Kusuma, H., & Nugroho, A. (2021). Analysis of lithium battery safety for electric vehicle retrofit. *Journal of Energy Storage*, 39, 102624.
- Life cycle GHG. (2024). Life cycle greenhouse gas emissions of retrofit electrification: Assessment for a real case study. ScienceDirect.
- Liu, H., Zhang, P., & Wang, D. (2020). Battery management challenges for retrofit EVs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109948.
- Liu, K., et al. (2021). Charging Safety Issues of Lithium-ion Batteries. *Journal of Energy Storage*.
- Milanés, V., Pérez, J., & Godoy, J. (2020). Performance comparison between electric motors and combustion engines. *Applied Energy*, 275, 115327.
- Mullan, J., Harries, D., Bräunl, T., & Whitely, S. (2018). The Technical, Economic and Commercial Viability of the Electric Vehicle. *Energy Policy*.
- Müller, J. (2020). European regulatory framework for electric vehicle safety. *International Journal of Electric Mobility*.
- Nasution, A., Huda, N., & Septiani, N. (2020). Transport emission analysis in developing countries. *Environmental Systems Research*, 9(2), 1–10.
- Patel, R., Sharma, V., & Banerjee, S. (2021). Performance characteristics of BLDC motors for electric vehicle applications. *Energy Reports*, 7, 1234–1245.
- Patel, R. (2022). Battery safety compliance for two-wheel electric vehicle retrofitting in India. *SAE Technical Paper*.
- Piller, S., Perrin, M., & Jossen, A. (2019). Methods for Battery Safety Assessment. *Journal of Power Sources*.
- Purwanto, W., Hartono, B., & Widodo, R. (2023). Pathways toward net-zero transportation in Indonesia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102967.
- Rahardian, F., & Santoso, B. (2021). Structural implications of battery retrofit on motorcycle frames. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5015–5021.
- Rahman, M., & Hasan, S. (2019). Motor controller optimization for electric mobility applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(3), 812–820.
- Rezvani, Z., Jansson, J., & Bodin, J. (2015). Advances in Consumer Electric Vehicle Adoption Research. *Transportation Research Part D*.
- Setiawan, D., & Park, J. (2021). Feasibility study of motorcycle electrification in Southeast Asia. *Energy Policy*, 156, 112429.
- Setiawan, Y. (2024). Integration of Electric Drive Systems in ICE to EV conversion via GT-Suite simulation. *Cylinder Journal*.
- Sharma, A. (2021). Regulatory compliance and safety assessment of retrofitted electric two-wheelers in India. *Journal of Vehicle Engineering*.
- Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A Review of Battery Safety Concerns in Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, 482, 228814.
- Suryanto, H., Prakoso, T., & Laksana, M. (2022). Safety assessment of electric

- motorcycle conversion in Indonesia. *Journal of Transportation Technologies*, 12(3), 415–430.
- Tran, M. K., et al. (2020). Diagnostics of Electric Vehicle Powertrains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- UNECE. (2021). Regulation No. 100: Electric Power-Train Vehicles. United Nations Economic Commission for Europe.
- Vibhute, A. M., & Phadke, N. L. (2022). ICE to Electric Vehicle Retrofitting. *International Engineering Journal for Research & Development*.
- Wang, X., Li, S., & Chen, Y. (2020). Reliability issues in electric vehicle drive systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 6(4), 1548–1560.
- Wang, J., & Xu, K. (2021). Integration challenges of EV powertrains in motorcycle conversion projects. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128837.
- Watts, R. (2021). Exploring the potential for electric retrofit regulations and practices. *MDPI Electronics*.
- Wattanapong, et al. (2021). EV Conversion in Thailand: Status and Opportunities. *Energy Reports*.
- Widodo, S. (2022). Analisis kebijakan konversi kendaraan BBM ke listrik di Indonesia berdasarkan Permen ESDM 3/2020. *Jurnal Energi dan Transportasi Indonesia*.
- Yusoff, R., Zainal, A., & Hamzah, A. (2021). Safety and compliance issues in retrofitted electric two-wheelers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 95, 102869.
- Zhang, Y., Li, X., & Deng, F. (2022). Safety analysis and management strategies for lithium-ion battery systems in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112135.
- Zhao, Q., & Tan, S. (2022). Retrofit EV safety certification frameworks in Asia. *Energy for Sustainable Development*, 69, 82–93.