

SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW (SLR) SISTEM POWERTRAIN PADA KENDARAAN RINGAN DENGAN FOKUS PADA PENGURANGAN BOBOT DAN BIAYA

Najwan Rafi Fauzan¹, Ahmad Rafiq Ramadhan², Sandi Ardiyan Saputra³ Galih Suprayudha⁴,
Kurniawan Hendra Satya Saputra⁵

^{1,2,3,4,5}Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta
najwanfauzan16@gmail.com, ahmadraff888@gmail.com,
sandiardiyanaputra321@gmail.com, galihsuprayudha@gmail.com,
18kurniawanhendra@gmail.com

Abstrack

This study aims to analyze weight and cost reduction strategies in light-duty vehicle powertrain systems through a Systematic Literature Review (SLR). Literature was obtained from the Scopus and Google Scholar databases using the keywords “lightweight vehicles,” “powertrain,” “weight reduction,” and “cost reduction,” combined with Boolean operators AND and OR. The inclusion criteria focused on studies discussing lightweight materials, cost efficiency, and technological innovations in powertrain systems published between 2013 and 2024, while irrelevant and non-peer-reviewed articles were excluded. From an initial 85 articles, 15 were selected to ensure analytical depth and direct relevance to the research focus. The findings reveal that using lightweight materials such as aluminum alloys, carbon fiber composites, and high-performance polymers reduces component weight by 30–45% while lowering production costs. Modular design optimization and the integration of hybrid and electric technologies further enhance energy efficiency. This SLR contributes to the powertrain research field by mapping recent trends, identifying research gaps, and providing strategic insights for developing lighter, more economical, and sustainable vehicle systems.

Keywords: *lightweight vehicles, powertrain, weight reduction, cost reduction, lightweight materials, and Electrification technology*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis strategi pengurangan bobot dan biaya pada sistem pemindah tenaga kendaraan ringan melalui metode *Systematic Literature Review* (SLR). Literatur diperoleh dari basis data *Scopus* dan *Google Scholar* dengan menggunakan kata kunci “kendaraan ringan,” “powertrain,” “pengurangan bobot,” dan “pengurangan biaya” yang dikombinasikan dengan operator Boolean *AND* dan *OR*. Kriteria inklusi difokuskan pada penelitian yang membahas material ringan, efisiensi biaya, serta inovasi teknologi pada sistem pemindah tenaga yang diterbitkan antara tahun 2013 hingga 2024, sedangkan artikel yang tidak relevan dan tidak terbit di jurnal bereputasi dikecualikan. Dari 85 artikel awal yang diidentifikasi, 15 artikel dipilih untuk menjaga kedalaman analisis dan memastikan relevansi langsung dengan fokus penelitian. Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan material ringan seperti paduan aluminium, komposit serat karbon, dan polimer berkinerja tinggi dapat mengurangi bobot komponen sebesar 30 – 45% sekaligus menekan biaya produksi. Optimalisasi desain modular serta integrasi teknologi hibrida dan listrik juga meningkatkan efisiensi energi. SLR ini memberikan kontribusi terhadap bidang powertrain dengan memetakan tren riset terkini, mengidentifikasi kesenjangan penelitian, dan memberikan wawasan strategis bagi pengembangan sistem kendaraan yang lebih ringan, ekonomis, dan berkelanjutan.

Kata kunci: kendaraan ringan, pemindah tenaga, pengurangan bobot, pengurangan biaya, Material ringan, dan Teknologi elektrifikasi

PENDAHULUAN

Sistem *powertrain* (pemindah tenaga) merupakan rangkaian komponen vital yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga (daya) dari mesin menuju roda penggerak suatu kendaraan (Arbintarso dkk., 2022). Secara umum, komponen *powertrain* terdiri dari *output* poros mesin, kopling, transmisi, poros *propeller*, gardan, poros penggerak, hingga roda penggerak (Sunggono, 2017). Sebagai sistem inti pada kendaraan, desain *powertrain* memegang peran krusial dalam menentukan performa keseluruhan, mulai dari efisiensi kerja, konsumsi energi, hingga daya tahan kendaraan.

Di era industri otomotif modern, tuntutan terhadap kendaraan yang lebih ramah lingkungan dan hemat biaya semakin meningkat. Tantangan utama yang dihadapi adalah bobot komponen *powertrain* konvensional, seperti transmisi dan poros *propeller* yang cukup berat. Bobot berlebih ini secara langsung meningkatkan beban kerja mesin, yang berakibat pada borosnya konsumsi bahan bakar dan tingginya emisi gas buang. Selain masalah bobot, kompleksitas komponen-komponen tersebut juga berkontribusi pada tingginya biaya produksi dan perawatan. Oleh karena itu, urgensi untuk menurunkan bobot dan biaya tanpa mengorbankan aspek keamanan dan durabilitas menjadi prioritas utama industri saat ini

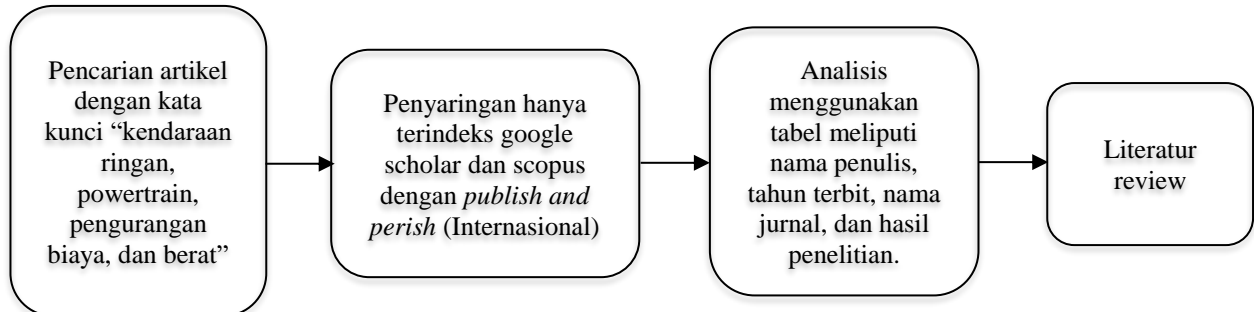
Sebagai respon terhadap tantangan tersebut, berbagai pendekatan inovatif terus dikembangkan. Fokus utama dalam penelitian dan pengembangan *powertrain* saat ini adalah strategi pengurangan bobot (*lightweighting*) melalui penggunaan material yang lebih terbaru, seperti paduan aluminium, komposit serat karbon, dan baja berkekuatan tinggi. Selain material, solusi teknologi seperti elektrifikasi parsial (*mild hybrid*), pengintegrasian *gearbox* berperforma tinggi, serta optimalisasi desain struktur yang lebih modular dan ringkas juga diterapkan. Pendekatan-pendekatan ini ditujukan untuk meningkatkan efisiensi termal dan mekanis, yang pada akhirnya bermuara pada penurunan emisi karbon dan biaya produksi.

Berdasarkan urgensi tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis metode optimalisasi sistem *powertrain* untuk kendaraan ringan. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi strategi pengurangan bobot dan biaya produksi yang paling efektif pada komponen *powertrain*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan bagi pengembangan teknologi kendaraan masa depan yang lebih efisien, hemat biaya, dan berkelanjutan.

METODE

Metodologi dalam penelitian ini menggunakan *Systematic Literature Review* (SLR). Metode SLR merupakan metode dengan mengidentifikasi, mengkaji, mengevaluasi serta menafsirkan semua penelitian yang telah ada. Dengan menggunakan Metode SLR, peneliti dapat melakukan review dan identifikasi jurnal secara sistematis, yang pada setiap prosesnya mengikuti langkah-langkah atau protokol yang telah ditetapkan (Triandini, Jayanatha, Indrawan, Putra, & Iswara, 2019).

Tahap identifikasi dilakukan dengan merumuskan pertanyaan penelitian (Research Questions) yang berfokus pada: (1) Bagaimana strategi dan pendekatan desain *powertrain* pada kendaraan ringan yang berkontribusi terhadap pengurangan bobot secara signifikan? (2) Jenis material ringan apa yang paling efektif digunakan dalam sistem *powertrain* untuk mencapai efisiensi bobot dan biaya?, serta (3) Sejauh mana penerapan teknologi elektrifikasi (hibrida dan listrik) dapat memengaruhi efisiensi energi dan biaya sistem *powertrain* kendaraan ringan?. Literatur dicari melalui beberapa basis data akademik seperti *scopus*, dan *google scholar* dengan bantuan aplikasi *publish and perish*.. Kata kunci yang digunakan meliputi: “*lightweight vehicles*”, “*Powertrain*”, “*weight reduction*”, “*cost reduction*”, dan kombinasi Boolean AND serta OR. Adapun penyaringan dan diagram alir penelitian dalam pengumpulan data yaitu sebagai berikut.



Pengumpulan data dilakukan dengan mendokumentasikan seluruh artikel yang diperoleh dari hasil pencarian literatur. Penelitian ini menggunakan 15 jurnal terindeks yang diperoleh melalui basis data *google scholar* dan *scopus* dengan kata kunci kendaraan ringan, *powertrain*, pengurangan bobot, dan pengurangan biaya. Jumlah artikel yang direview dibatasi 15 dikarenakan untuk menjaga kedalaman analisis serta memastikan seluruh literatur yang dikaji memiliki relevansi langsung dengan fokus penelitian, yaitu pengurangan bobot dan biaya pada sistem *powertrain* kendaraan ringan.

Data dari setiap artikel disajikan dalam tabel yang memuat nama penulis, tahun publikasi, nama jurnal, dan hasil penelitian utama. Artikel yang telah lolos tahap identifikasi

dan analisis kemudian dipilih dan disintesis untuk membentuk satu pembahasan yang utuh dan komprehensif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Sistem *Powertrain* pada kendaraan dalam dunia otomotif saat ini mengedepankan efisiensi bobot dan biaya dalam produksi. Perkembangan teknologi *powertrain* yang baik memberikan keuntungan kepada pabrikan dan konsumen dalam hal harga jual mobil yang dapat semakin ditekan, karena *cost* produksi menurun. Ditambah dengan pengurangan bobot kendaraan menyebabkan kendaraan lebih efisien dalam hal transfer energi,

Adapun hasil penelitian yang dimasukkan dalam artikel ini adalah analisis dan rangkuman dari artikel yang sudah terbit di jurnal terindeks terkait dengan *powertrain* pada kendaraan ringan untuk mengurangi bobot dan biaya.

Tabel Hasil Penelitian Terhadap Sistem *Powertrain* Pada Kendaraan Ringan Untuk Mengurangi Bobot dan Biaya

Peneliti, Tahun dan Jurnal	Hasil Penelitian
(Redelbach, Klötzke & Friedrich. 2012). EEVC European Electric Vehicle Congress	<p>Artikel ini secara komprehensif meneliti pengaruh desain ringan (<i>lightweight design</i>) terhadap konsumsi energi dan efektivitas biaya pada berbagai konsep sistem penggerak kendaraan, meliputi mesin pembakaran internal (ICE), <i>hybrid electric vehicles</i> (HEV), <i>plug-in hybrid electric vehicles</i> (PHEV), <i>extended range electric vehicles</i> (EREV), dan <i>battery electric vehicles</i> (BEV). Melalui simulasi kendaraan menggunakan <i>DLR Modelica library</i> serta model biaya kepemilikan total (<i>Total Cost of Ownership / TCO</i>), penelitian ini menganalisis sejauh mana pengurangan bobot kendaraan memengaruhi efisiensi energi dan biaya operasional dari perspektif pengguna.</p> <p>Hasil penelitian menunjukkan bahwa manfaat penghematan energi akibat pengurangan massa kendaraan cenderung menurun seiring meningkatnya tingkat elektrifikasi.</p>

	<p>Kendaraan konvensional berbasis mesin pembakaran internal memperoleh efisiensi tertinggi dari pengurangan bobot, sedangkan pada kendaraan listrik, dampaknya relatif terbatas karena kontribusi sistem regeneratif dan tingginya efisiensi motor listrik. Meskipun demikian, penelitian ini menekankan bahwa efek tidak langsung dari penerapan desain ringan seperti penurunan kapasitas dan biaya baterai tanpa mengorbankan jarak tempuh dapat menghasilkan keuntungan ekonomi yang signifikan. Temuan ini menggarisbawahi bahwa strategi desain ringan tetap memiliki relevansi penting dalam pengembangan kendaraan listrik, terutama ketika mempertimbangkan dampak sistemik terhadap biaya produksi dan performa kendaraan.</p>
<p>(Wilhelm, Hofer, Schenler & Guzzella. 2012). Transport, 27(3), 237–249</p>	<p>Artikel ini mengkaji secara komprehensif keterkaitan antara pengurangan berat kendaraan (<i>lightweighting</i>) dan peningkatan efisiensi sistem penggerak (<i>powertrain efficiency</i>) dalam upaya menurunkan konsumsi energi, emisi karbon, serta biaya kepemilikan kendaraan. Penulis mengembangkan metodologi berbasis model ekonomi-teknis untuk menentukan kombinasi optimal antara kedua strategi tersebut, dengan mempertimbangkan biaya marginal, efisiensi bahan bakar, serta umur pakai kendaraan.</p> <p>Melalui simulasi matematis dan pendekatan optimasi numerik menggunakan <i>MATLAB Sequential Quadratic Programming</i>, penelitian ini menemukan bahwa peningkatan efisiensi <i>powertrain</i> sebesar 20 – 30% dan pengurangan bobot kendaraan antara 200 – 600 kg memberikan hasil paling optimal dalam menekan biaya kepemilikan seumur hidup hingga 42%. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa kenaikan harga bahan bakar mendorong penerapan teknologi dengan tingkat efisiensi yang lebih tinggi, sementara biaya implementasi teknologi ringan sangat bergantung pada karakteristik material serta bentuk kurva biaya marjinalnya.</p>

	<p>Studi ini merekomendasikan strategi desain “<i>all or nothing</i>” dalam penerapan <i>lightweighting</i>, yakni penerapan secara penuh atau tidak sama sekali, bergantung pada batas efisiensi biaya yang ditetapkan.</p>
<p>(Kromer. 2007). Massachusetts Institute of Technology</p>	<p>Artikel ini secara komprehensif membahas peluang dan tantangan dalam pengembangan sistem penggerak listrik (<i>electric powertrains</i>) pada kendaraan ringan di Amerika Serikat. DeCicco menyoroti bahwa elektrifikasi kendaraan merupakan strategi utama untuk mengurangi emisi karbon dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, sejalan dengan arah kebijakan energi dan lingkungan nasional. Penulis menguraikan berbagai bentuk elektrifikasi mulai dari <i>hybrid electric vehicles</i> (HEV), <i>plug-in hybrid electric vehicles</i> (PHEV), hingga <i>battery electric vehicles</i> (BEV) serta meninjau dampaknya terhadap industri otomotif maupun konsumen.</p> <p>Melalui analisis berbasis data dan kajian kebijakan, artikel ini menegaskan bahwa meskipun kendaraan listrik menawarkan peningkatan efisiensi energi dan pengurangan emisi yang signifikan, keberhasilannya sangat bergantung pada kemajuan teknologi baterai, efisiensi biaya produksi, dan ketersediaan infrastruktur pengisian daya. DeCicco juga menekankan pentingnya penerapan pendekatan sistemik yang mengintegrasikan inovasi teknologi, kebijakan publik, dan perubahan perilaku konsumen agar transisi menuju kendaraan listrik dapat berlangsung secara efektif dan berkelanjutan.</p>
<p>(Mascarin, Hannibal, Raghunathan, Ivanic, & Francfort. 2015). Idaho National Laboratory (INL), Idaho Falls, ID (United States)</p>	<p>Penelitian ini menganalisis potensi reduksi massa kendaraan secara agresif melalui pemanfaatan material ringan seperti aluminium, <i>Ultra High Strength Steel</i> (UHSS), magnesium, dan serat karbon dengan dukungan model biaya teknis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa target pengurangan berat</p>

	<p>sebesar 40 – 45% dapat meningkatkan efisiensi energi sekaligus menurunkan emisi, meskipun disertai dengan peningkatan biaya manufaktur yang signifikan. Meskipun masih terbatas pada skenario kendaraan dengan mesin pembakaran internal (<i>Internal Combustion Engine / ICE</i>) dan belum mempertimbangkan secara komprehensif implikasi lingkungannya maupun tren elektrifikasi, penelitian ini memberikan kontribusi strategis dalam merumuskan pendekatan <i>lightweighting</i> yang berkelanjutan dan ekonomis bagi masa depan industri otomotif.</p>
<p>(Reitschuster, Illenberger, Tobie, & Stahl. 2022). Forschung Im Ingenieurwesen,</p>	<p>Penelitian ini mengkaji penerapan roda gigi polimer berkinerja tinggi VESTAKEEP® 5000G (PEEK) pada sistem transmisi kendaraan listrik ringan sebagai alternatif pengganti baja konvensional. Dengan menggunakan pendekatan berbasis standar VDI 2736 dan simulasi RIKOR, penelitian ini menunjukkan bahwa modifikasi geometri gigi serta penerapan <i>profile modification</i> sebesar 50 µm dapat menurunkan tekanan kontak hingga di bawah 100 N/mm². Hasil tersebut menunjukkan bahwa transmisi hibrida polimer–baja berpotensi mencapai umur pakai hingga 60.000 km dengan tingkat kerusakan sekitar 93%. Temuan ini menegaskan potensi besar material polimer dalam meningkatkan efisiensi energi, mengurangi bobot, dan mencegah korosi pada kendaraan listrik. Namun, penelitian ini masih berada pada tahap uji demonstratif dan belum mencakup analisis ekonomi maupun pengujian lapangan jangka panjang. Secara keseluruhan, studi ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan teknologi transmisi berkelanjutan serta memperkuat arah inovasi menuju sistem kendaraan listrik yang lebih efisien dan ramah lingkungan.</p>
<p>(Brooker, Ward & Wang. 2013). SAE Technical Paper</p>	<p>Artikel ini menunjukkan bahwa <i>lightweighting</i> dapat meningkatkan efisiensi energi sekaligus menurunkan biaya komponen pada kendaraan konvensional, <i>Hybrid Electric</i></p>

	<p><i>Vehicle</i> (HEV), <i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> (PHEV), dan <i>Electric Vehicle</i> (EV) melalui simulasi FASTSim. Pengurangan massa terbukti mampu menurunkan <i>rolling resistance</i>, mengurangi kehilangan energi saat pengereman, serta memungkinkan <i>downsizing</i> mesin atau baterai tanpa mengorbankan performa kendaraan. Meskipun manfaat ekonomi dari <i>lightweighting</i> paling optimal ketika biaya pengurangan massa berada di bawah USD 6/kg, potensi keuntungan yang lebih besar dapat dicapai apabila biaya baterai EV turun hingga mencapai target USD 125/kWh. Kajian ini memiliki kekuatan analitis yang tinggi, namun masih memerlukan validasi empiris dan kajian struktural lebih lanjut terkait aspek keselamatan serta ketahanan material untuk mendukung penerapan pada skala industri.</p>
<p>(Łebkowsk. 2017). Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska</p>	<p>Penelitian ini menganalisis kinerja <i>powertrain</i> kendaraan listrik ringan melalui studi kasus pada <i>Mia Electric</i> dan menemukan bahwa konsumsi energi sebesar 90–96 Wh/km menjadikannya solusi efisien untuk kebutuhan mobilitas perkotaan. Permasalahan utama teridentifikasi pada sistem manajemen baterai yang belum optimal pada suhu rendah, sehingga diperlukan pengembangan sistem termal yang lebih adaptif untuk menjaga keandalan kendaraan. Meskipun penelitian ini masih terbatas pada satu model kendaraan dan belum mencakup analisis keberlanjutan secara menyeluruh, studi ini memberikan landasan empiris yang penting dalam pengembangan <i>Light Electric Vehicle</i> (LEV) yang efisien, tangguh terhadap kondisi lingkungan, dan berkontribusi terhadap pengurangan emisi transportasi.</p>
<p>(Gao, Mi & Emadi. 2007). Proceedings of the IEEE</p>	<p>Artikel ini secara mendalam membahas peran penting pemodelan dan simulasi dalam pengembangan kendaraan listrik (<i>Electric Vehicle</i> / EV) dan kendaraan hibrida (<i>Hybrid Electric Vehicle</i> / HEV). Gao, Mi, dan Emadi menegaskan bahwa kompleksitas sistem <i>powertrain</i> modern menuntut</p>

	<p>pendekatan multidisiplin yang mampu memodelkan interaksi dinamis antar komponen, seperti motor listrik, sistem transmisi, kontrol elektronik, dan penyimpanan energi. Tujuan utama penelitian ini adalah mengidentifikasi serta mengembangkan metode dan perangkat lunak simulasi yang dapat mendukung proses desain kendaraan elektrifikasi secara efisien, cepat, dan akurat.</p> <p>Penulis memaparkan berbagai pendekatan pemodelan, mulai dari model <i>steady-state</i>, <i>quasi-steady</i>, hingga <i>physics-based dynamic model</i> dengan menggunakan pendekatan <i>Resistive Companion Form</i> (RCF) dan <i>Bond Graph</i>. Artikel ini juga meninjau sejumlah perangkat simulasi seperti ADVISOR, PSAT, PSIM, VTB, dan Simplorer, beserta kelebihan dan keterbatasannya dalam mendukung analisis performa serta optimasi desain sistem <i>powertrain</i>. Melalui integrasi antara pendekatan berbasis fisika dan data empiris, penulis menegaskan bahwa pemodelan dan simulasi merupakan fondasi utama dalam pengembangan kendaraan yang efisien, aman, dan ramah lingkungan.</p>
<p>(Kopp, Beeh, Schöll, Kobilke, Stra & Krieschera. 2012). Procedia-Social and Behavioral Sciences</p>	<p>Artikel ini membahas pengembangan struktur kendaraan ringan (<i>lightweight vehicle structures</i>) sebagai respons terhadap tuntutan efisiensi energi, pengurangan emisi, dan peningkatan keselamatan dalam industri otomotif modern. Penulis menyoroti bahwa pengurangan bobot kendaraan tidak hanya memengaruhi konsumsi energi, tetapi juga berdampak signifikan terhadap dinamika berkendara dan kinerja keselamatan. Untuk mencapai tujuan tersebut, artikel ini mengusulkan konsep <i>modular safe structure</i>, yaitu desain rangka kendaraan berbasis kombinasi <i>multi-material</i> seperti baja berkekuatan tinggi, aluminium, dan material komposit yang dioptimalkan melalui prinsip <i>load-path optimization</i> agar energi benturan dapat diserap secara efektif.</p>

	<p>Melalui analisis desain rekayasa dan evaluasi performa struktural, penulis menunjukkan bahwa pendekatan <i>multi-material</i> dan modular mampu meningkatkan efisiensi produksi, fleksibilitas desain, serta kemampuan adaptasi terhadap berbagai tipe kendaraan. Teknologi ini juga memungkinkan penggantian dan pengembangan komponen dilakukan dengan lebih efisien, sehingga mempercepat proses inovasi kendaraan masa depan. Namun, penulis menekankan bahwa keberhasilan penerapannya memerlukan koordinasi erat antara proses desain, manufaktur, dan penerapan standar keselamatan global. Dengan demikian, artikel ini memberikan kontribusi penting dalam mengarahkan strategi pengembangan kendaraan ringan yang aman, efisien, dan berkelanjutan di era elektrifikasi transportasi.</p>
<p>(Luján, Guardiola, Pla & Reig. 2016). <i>Journal of Automobile Engineering</i></p>	<p>Penelitian yang dilakukan oleh Luján dan rekan-rekannya menawarkan pendekatan sistematis untuk menentukan ukuran optimal komponen powertrain pada kendaraan hibrida listrik (HEV) melalui pemodelan <i>Dynamic Programming</i> yang mempertimbangkan efisiensi biaya kepemilikan serta variasi siklus mengemudi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi mesin berukuran kecil dengan motor listrik dan baterai berkapasitas tepat dapat memberikan keseimbangan optimal antara efisiensi bahan bakar dan biaya jangka panjang, khususnya dalam konteks penggunaan di lingkungan perkotaan. Meskipun model simulasi yang digunakan memiliki landasan teoretis yang kuat, penelitian ini masih terbatas pada tahap konseptual dan belum divalidasi melalui uji empiris di lapangan. Kendati demikian, karya ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan strategi desain HEV yang lebih ekonomis, efisien, dan selaras dengan kebutuhan pengguna modern.</p>

<p>(Ball. 2017). Proceedings of the 17th Annual Automotive Conference & Exhibition</p>	<p>Artikel ini menegaskan bahwa phenolic-based engineering thermoset molding compounds merupakan solusi metal replacement yang efektif pada aplikasi powertrain bersuhu tinggi karena menawarkan keseimbangan antara kekuatan mekanik, stabilitas termal, reduksi berat, serta efisiensi biaya produksi. Dengan menunjukkan keberhasilan implementasi pada water pump housing, pulleys, cam carrier, dan komponen exhaust, penelitian ini memperkuat peran ETS dalam mendukung strategi lightweighting industri otomotif. Meski demikian, studi ini masih terbatas pada sudut pandang performa material dan belum mengevaluasi dampak lingkungan penuh maupun kesiapan penerapannya dalam teknologi elektrifikasi, sehingga diperlukan penelitian lanjutan berbasis prototipe dan analisis siklus hidup untuk mengukuhkan posisinya dalam desain powertrain masa depan.</p>
<p>(Meddour, Rizoug, Leserf, Vagg, Burke & Larouci. 2023). MDPI Energies</p>	<p>Artikel ini mengkaji secara mendalam optimasi umur pakai dan biaya sistem <i>powertrain</i> kendaraan listrik melalui pendekatan <i>multiphysics</i> yang memadukan aspek performa elektromagnetik, perilaku termal, serta degradasi komponen—khususnya pada motor <i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i> (PMSM) dan baterai <i>Nickel Manganese Cobalt</i> (NMC). Studi ini mengembangkan model terpadu untuk mengevaluasi bagaimana variasi geometri motor, tegangan <i>bus</i>, dan ukuran baterai (<i>battery sizing</i>) saling memengaruhi efisiensi sistem serta biaya siklus hidup kendaraan.</p> <p>Dengan menggunakan siklus <i>Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure</i> (WLTP) sebagai acuan beban operasi nyata dan algoritme optimasi genetika, penelitian ini menemukan bahwa tegangan <i>bus</i> sebesar 468 V memberikan keseimbangan terbaik antara umur baterai yang lebih panjang dan biaya total yang lebih rendah dibandingkan opsi tegangan</p>

	<p>600 V, tanpa mengorbankan performa daya secara signifikan. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa pemilihan desain <i>powertrain</i> tidak hanya bergantung pada performa motor, tetapi juga harus mempertimbangkan implikasi ekonomi dan umur pakai keseluruhan komponen.</p>
<p>(Jneid, Harth & Ficzero. 2020). International Journal for Traffic and Transport Engineering</p>	<p>Artikel ini membahas secara mendalam perkembangan teknologi <i>In-Wheel Motor</i> (IWM) sebagai sistem penggerak inovatif pada kendaraan listrik (<i>Electric Vehicle / EV</i>) dan kendaraan hibrida (<i>Hybrid Electric Vehicle / HEV</i>). Penulis menyoroti bahwa elektrifikasi kendaraan telah mendorong perubahan mendasar dalam desain <i>drivetrain</i>, terutama melalui penerapan sistem IWM yang memungkinkan motor listrik ditempatkan langsung pada roda kendaraan. Teknologi ini menghilangkan kebutuhan akan transmisi, poros penggerak, dan diferensial, sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi, mengurangi bobot, serta memperluas ruang interior kendaraan.</p> <p>Berdasarkan tinjauan literatur yang komprehensif, artikel ini menguraikan berbagai keunggulan sistem IWM, seperti efisiensi tinggi, fleksibilitas desain, kemampuan pengendalian roda secara individual, serta potensi penerapan sistem penggerak empat roda (<i>all-wheel drive</i>) tanpa memerlukan komponen mekanis tambahan. Penulis juga menyoroti integrasi IWM dengan teknologi <i>x-by-wire</i> termasuk <i>steer-by-wire</i>, <i>brake-by-wire</i>, dan <i>accelerate-by-wire</i> yang memungkinkan kontrol kendaraan secara elektronik penuh untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan kenyamanan berkendara. Di sisi lain, penelitian ini mengidentifikasi sejumlah tantangan yang masih perlu diatasi, seperti peningkatan <i>unsprung mass</i>, kompleksitas sistem kontrol, kebutuhan pendinginan yang optimal, serta ketahanan material terhadap kondisi operasional ekstrem.</p>

	<p>Melalui analisis SWOT, artikel ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai potensi strategis sekaligus hambatan implementasi teknologi IWM dalam industri otomotif masa depan.</p>
<p>(Polletta & Frederiksen. 2002). Conference Paper</p>	<p>Artikel ini menjelaskan bahwa sistem <i>Hyperdrive</i> mampu meningkatkan efisiensi bahan bakar dan kinerja kendaraan dengan mengoperasikan mesin pembakaran internal hanya pada area efisiensi optimal, sambil memanfaatkan motor listrik dan baterai sebagai sumber tenaga tambahan. Studi perbandingan menunjukkan bahwa sistem dengan baterai bertegangan 600 V memiliki keunggulan dibandingkan sistem 300 V, karena memberikan penghematan bahan bakar yang lebih besar, akselerasi yang lebih baik, serta biaya sistem yang lebih rendah akibat berkurangnya rugi inverter dan kebutuhan kapasitas baterai yang lebih kecil. Meskipun analisis ini menawarkan landasan teknis yang kuat, penelitian masih berbasis simulasi sehingga diperlukan uji lapangan dan evaluasi siklus hidup komponen untuk memastikan keandalan serta kesiapan implementasinya dalam skala industri.</p>
<p>(Domingues, Reinap & Alaküla. 2016). IEEE</p>	<p>Penelitian yang dilakukan oleh Domingues, Reinap, dan Alaküla mengembangkan suatu metodologi untuk mengoptimalkan biaya dan desain powertrain kendaraan listrik dengan memadukan analisis teknis dan ekonomi melalui pemodelan yang dikalibrasi menggunakan data industri. Studi kasus pada kendaraan SUV listrik kelas atas menunjukkan bahwa sistem transmisi dua percepatan mampu memberikan keseimbangan optimal antara efisiensi energi dan biaya produksi. Meskipun penelitian ini masih berada pada tahap simulasi dan belum diuji secara empiris, pendekatan yang diusulkan memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan desain powertrain yang tidak hanya efisien dan realistis, tetapi juga relevan bagi arah pengembangan kendaraan listrik di masa depan.</p>

PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil analisis dari lima belas jurnal terindeks yang meneliti berbagai strategi dalam mengurangi bobot dan biaya pada sistem powertrain kendaraan ringan. Dari hasil analisis yang dilakukan, dapat dipahami bahwa efisiensi sistem powertrain tidak hanya bergantung pada satu faktor, melainkan merupakan hasil dari kombinasi beberapa inovasi yang saling melengkapi. Secara umum, ada empat aspek utama yang berperan besar, yaitu penggunaan material ringan, optimalisasi desain dan konfigurasi, penerapan teknologi elektrifikasi, serta pengelolaan trade-off antara bobot, biaya, dan performa. Keempat aspek ini saling terhubung dan bersama-sama menentukan bagaimana sistem powertrain dapat menjadi lebih ringan, efisien, dan hemat biaya

1. Inovasi Material Ringan

Dari hasil kajian terhadap berbagai penelitian, ditemukan bahwa inovasi material menjadi langkah paling mendasar dalam upaya membuat kendaraan lebih ringan dan ekonomis. Banyak peneliti sepakat bahwa penggantian material konvensional seperti baja dengan bahan yang lebih ringan seperti paduan aluminium, komposit serat karbon, dan polimer termoplastik mampu menurunkan bobot komponen hingga 30 – 45% tanpa menurunkan kekuatan struktur kendaraan. Reitschuster dan rekan (2022) menunjukkan bahwa penggunaan gear berbahan polimer berperforma tinggi tidak hanya lebih ringan, tetapi juga lebih murah untuk diproduksi. Begitu pula penelitian Ball (2017), yang menemukan bahwa penggantian komponen berbahan aluminium dengan senyawa fenolik bisa menurunkan berat hingga 30% dan memangkas biaya produksi karena proses injection molding yang lebih efisien. Dari sini, dapat dinilai bahwa penggunaan material ringan tidak hanya memperbaiki performa kendaraan, tetapi juga membawa keuntungan ekonomi karena mengurangi biaya produksi dan perawatan. Dengan kata lain, inovasi material menjadi pondasi utama dalam menciptakan efisiensi teknis dan finansial secara bersamaan.

2. Optimalisasi Desain dan Konfigurasi Sistem Powertrain

Selain dari sisi material, desain dan tata letak sistem powertrain juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi bobot dan biaya kendaraan. Berdasarkan hasil analisis literatur, saya menemukan bahwa strategi desain modular, pengaturan ulang dimensi komponen, dan integrasi tata letak yang lebih kompak mampu menurunkan berat kendaraan secara signifikan. Mascarin et al. (2015) menjelaskan bahwa melalui peninjauan ulang desain dan metode produksi, bobot kendaraan bisa dikurangi hingga 40 – 45%. Domingues et al. (2016) memperkuat temuan ini dengan hasil bahwa penataan ulang komponen pada kendaraan listrik dapat menekan biaya dan

konsumsi energi secara bersamaan. Menurut saya, hal ini menunjukkan bahwa desain yang baik bukan hanya soal bentuk atau ukuran, tetapi juga bagaimana seluruh komponen powertrain saling terhubung dan bekerja efisien. Luján et al. (2016) juga menggunakan analisis Pareto untuk mencari kombinasi ideal antara ukuran mesin, daya motor, dan kapasitas baterai agar efisiensi tetap seimbang dengan biaya produksi. Dari berbagai temuan tersebut, saya menyimpulkan bahwa desain dan konfigurasi yang cerdas menjadi kunci untuk mencapai keseimbangan antara performa kendaraan, efisiensi energi, dan biaya produksi.

3. Integrasi Teknologi Elektrifikasi

Perkembangan teknologi elektrifikasi menjadi arah baru dalam pengembangan sistem powertrain masa kini. Berdasarkan penelitian Lebkowski (2017), dapat dilihat bahwa penggunaan powertrain listrik mampu menurunkan konsumsi energi kendaraan hingga 100 Wh/km, jauh lebih hemat dibandingkan kendaraan konvensional yang menghabiskan 350 – 400 Wh/km. Hal ini membuktikan bahwa sistem elektrifikasi memberikan peningkatan efisiensi yang sangat signifikan. Namun, beberapa peneliti seperti Wilhelm et al. (2012) dan Kromer (2007) juga menyoroti adanya tantangan pada biaya awal produksi yang cukup tinggi. Hal tersebut merupakan konsekuensi alami dari penerapan teknologi baru. Walaupun investasi awalnya besar, dalam jangka panjang biaya operasional yang lebih rendah akan mampu menutupi pengeluaran tersebut. Karena itu, saya memandang teknologi elektrifikasi bukan sekadar tren, tetapi merupakan investasi masa depan yang berpotensi menciptakan kendaraan yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Selain itu, sistem elektrifikasi juga membuka ruang inovasi dalam desain powertrain, seperti integrasi baterai, motor listrik, dan sistem pendingin yang lebih efisien. Artinya, elektrifikasi tidak hanya menggantikan mesin pembakaran, tetapi juga mengubah cara kita mendesain dan memproduksi kendaraan agar lebih hemat energi dan adaptif terhadap kebutuhan masa depan.

4. Analisis *Trade-off* antara Teknologi, Bobot, dan Biaya

Hasil sintesis dari berbagai literatur menunjukkan bahwa setiap inovasi selalu memiliki konsekuensi. Ada *trade-off* yang harus diterima antara peningkatan efisiensi, penurunan bobot, dan biaya produksi. Misalnya, penerapan teknologi hybrid atau mesin turbo memang meningkatkan efisiensi bahan bakar, tetapi juga membuat biaya produksi meningkat (Wilhelm et al., 2012; Kromer, 2007). Dari hasil analisis, peningkatan biaya tersebut dapat dianggap sebagai investasi yang sepadan karena diimbangi oleh penghematan energi dan perawatan dalam jangka panjang. Kondisi ini menggambarkan bahwa pengembangan powertrain tidak bisa dilakukan secara parsial, melainkan harus melalui pendekatan sistem yang menyeluruh. Setiap aspek, baik teknis, ekonomi, maupun lingkungan, perlu dipertimbangkan secara

seimbang agar hasil yang diperoleh tidak hanya efisien di atas kertas, tetapi juga realistis saat diterapkan di dunia industri.

Dari keseluruhan hasil analisis, upaya pengurangan bobot dan biaya pada sistem powertrain kendaraan ringan harus dilakukan melalui pendekatan yang menyeluruh dan saling mendukung. Inovasi material memberikan dasar efisiensi melalui pengurangan massa, optimalisasi desain memastikan setiap komponen bekerja secara sinergis, dan elektrifikasi membuka jalan bagi sistem kendaraan yang lebih hemat energi serta ramah lingkungan. Meski demikian, setiap inovasi memiliki konsekuensi yang perlu dikelola, terutama terkait biaya awal dan kompleksitas produksi. Oleh karena itu, pengembangan powertrain masa depan sebaiknya dilakukan dengan pendekatan multidisiplin yaitu menggabungkan rekayasa material, desain berbasis simulasi, dan efisiensi ekonomi. Dengan keseimbangan antara ketiga aspek tersebut, kendaraan ringan dimasa depan dapat mencapai efisiensi maksimal, berbiaya rendah, dan berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan.

KESIMPULAN

Berdasarkan peninjauan terhadap 15 studi yang terindeks di *Scopus* dan *Google Scholar*, hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk mengurangi berat dan biaya sistem powertrain pada kendaraan ringan, ada tiga pendekatan utama. Pertama, menggunakan bahan ringan seperti paduan aluminium, komposit serat karbon, dan polimer teknologi tinggi. Kedua, merancang dan mengatur komponen powertrain secara modular agar lebih optimal. Ketiga, menerapkan teknologi elektrifikasi, baik hybrid maupun listrik, yang bisa meningkatkan efisiensi energi hingga 60 – 70%. Dari berbagai studi, berat rata-rata bisa dikurangi antara 30 – 45%, sedangkan biaya produksi bisa ditekan hingga 20 – 40%, tergantung pada jenis bahan dan teknologi yang dipakai.

Namun, ada beberapa keterbatasan dalam kajian ini. Pertama, sebagian besar literatur yang dianalisis masih bersifat simulasi dan belum diuji secara langsung di industri. Kedua, hanya artikel berbahasa Inggris dan berindeks tertentu yang ditinjau, sehingga belum mencakup konteks lokal atau penelitian terapan di negara berkembang. Selain itu, variabel lingkungan dan siklus hidup produk belum banyak dibahas secara kuantitatif dalam literatur yang dianalisis.

Dari hasil dan keterbatasan tersebut, penelitian ini memiliki dampak baik secara praktis maupun akademis. Bagi industri otomotif, temuan ini bisa menjadi dasar untuk merancang sistem powertrain yang lebih ringan, murah, dan ramah lingkungan, terutama dengan menggabungkan bahan baru dan teknologi elektrifikasi. Bagi peneliti, dianjurkan untuk

melakukan studi eksperimental serta analisis biaya siklus hidup (*Life Cycle Costing*) agar hasil simulasi bisa diverifikasi dan memperluas pemahaman tentang dampak lingkungan dari strategi pengurangan berat. Dengan langkah tersebut, pengembangan powertrain di masa depan diharapkan tidak hanya fokus pada efisiensi teknis, tetapi juga keberlanjutan ekonomi dan lingkungan secara menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

- Arbintarso, E. S., Pranoto, A., Sidharta, B. W., & Taqorub, I. (2022). Perakitan Chassis dan Powertrain Kendaraan Urban Concept Hemat Energi Untuk Kontes Mobil Hemat Energi di SMK N 1 Sambu. *Jurnal PkM Pemberdayaan Masyarakat*, 3(2), 39–47.
- Ball, C. (2017). Phenolic molding compounds in automotive powertrain applications. In *Proceedings of the 17th Annual Automotive Conference & Exhibition*, Novi, MI, USA (pp. 6–8).
- Brooker, A. D., Ward, J., & Wang, L. (2013). *Lightweighting impacts on fuel economy, cost, and component losses* (No. 2013-01-0381). SAE Technical Paper.
- Domingues, G., Reinap, A., & Alaküla, M. (2016, November). Design and cost optimization of electrified automotive powertrain. In *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)* (pp. 1–6). IEEE.
- Gao, D. W., Mi, C., & Emadi, A. (2007). Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 729–745.
- Jneid, M. S., Harth, P., & Ficzero, P. (2020). In-wheel-motor electric vehicles and their associated drivetrains. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 10(4), 415–431.
- Kopp, G., Beeh, E., Schöll, R., Kobilke, A., Stra, P., & Krieschera, M. (2012). New lightweight structures for advanced automotive vehicles—safe and modular. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 48, 350–362.
- Kromer, M. A. (2007). *Electric powertrains: Opportunities and challenges in the US light-duty vehicle fleet* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Łebkowski, A. (2017). Light electric vehicle powertrain analysis. *Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska*.
- Luján, J. M., Guardiola, C., Pla, B., & Reig, A. (2016). Cost of ownership-efficient hybrid electric vehicle powertrain sizing for multi-scenario driving cycles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 230(3), 382–394.
- Mascarin, A., Hannibal, T., Raghunathan, A., Ivanic, Z., & Francfort, J. (2015). *Vehicle lightweighting: 40% and 45% weight savings analysis: Technical cost modeling for*

- Meddour, A. R., Rizoug, N., Leserf, P., Vagg, C., Burke, R., & Larouci, C. (2023). Optimization of the lifetime and cost of a PMSM in an electric vehicle drive train. *Energies*, *16*(13), 5200.
- Polletta, D., & Frederiksen, F. (2002). Effects of lower battery voltage on performance and economics of the Hyperdrive Powertrain. *Conference Paper*.
- Redelbach, M., Klötzke, M., & Friedrich, H. E. (2012). Impact of lightweight design on energy consumption and cost effectiveness of alternative powertrain concepts.
- Reitschuster, S., Illenberger, C. M., Tobie, T., & Stahl, K. (2022). Application of high performance polymer gears in light urban electric vehicle powertrains. *Forschung Im Ingenieurwesen*, *86*(4), 683–691.
- Sunggono, M. S. W. (2017). Perancangan dan analisa karakteristik traksi sistem powertrain mobil multiguna pedesaan. *Teknik Mesin ITS Surabaya*, 113.
- Triandini, E., Jayanatha, S., Indrawan, A., Putra, G. W., & Iswara, B. (2019). Metode systematic literature review untuk identifikasi platform dan metode pengembangan sistem informasi di Indonesia. *Indonesian Journal of Information Systems*, *1*(2), 63–77.
- Wilhelm, E., Hofer, J., Schenler, W., & Guzzella, L. (2012). Optimal implementation of lightweighting and powertrain efficiency technology in passengers' vehicles. *Transport*, *27*(3), 237–249.