

ANALISIS DAMPAK PENGGUNAAN MATERIAL KOMPOSIT RINGAN PADA EFISIENSI BAHAN BAKAR MESIN KENDARAAN BERMOTOR

^{1*}Herlan Herlambang, ²Andika Dwiputra, ³Akbar Ginggerium Sagala

¹⁾Teknik Mesin

Universitas Al-Azhar Medan, Indonesia

herlanherlambang470@gmail.com

²⁾Teknik Mesin

Universitas Al-Azhar Medan, Indonesia

dwiputraa185@gmail.com

³⁾Teknik Mesin

Universitas Al-Azhar Medan, Indonesia

sagalaakbar5@gmail.com

Article history:

Received 30th of June 2025

Revised 5th of July 2025

Accepted 14th of July 2025

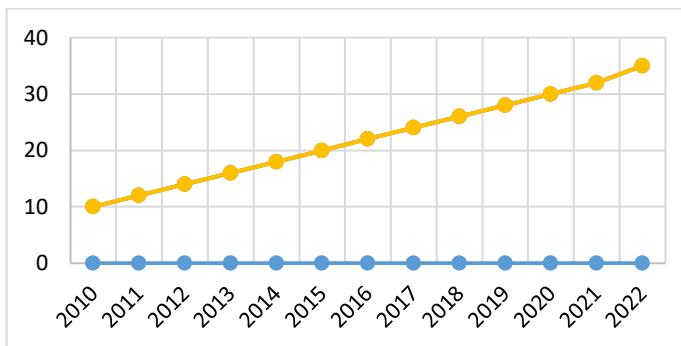
Abstract

This research adopts a theoretical modeling approach and literature analysis to evaluate the increasing number of motor vehicles globally, especially in developing countries, and the urgent need to improve fuel efficiency and reduce carbon emissions. The study investigates innovations in automotive technologies, focusing on the use of lightweight composite materials like carbon fiber and natural fibers to reduce vehicle weight and enhance fuel efficiency. By applying theoretical models and conducting a comprehensive review of existing literature, this research explores how tighter regulations and growing consumer awareness drive the demand for more eco-friendly vehicles. However, challenges such as higher production costs and recycling difficulties persist. The findings provide valuable insights for automotive manufacturers, policymakers, and consumers on the impact of lightweight composite materials on fuel efficiency and emission reduction.

Keywords: Lightweight Composite Materials, Fuel Efficiency, Emission Reduction, Motor Vehicles, Carbon Fiber

Pendahuluan

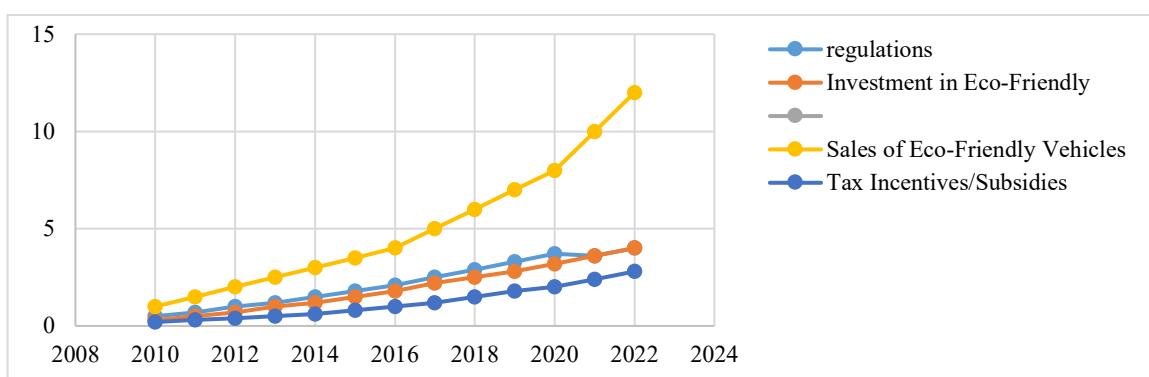
Peningkatan jumlah kendaraan bermotor global, terutama di negara berkembang, telah memicu kebutuhan mendesak untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi karbon. Hal ini berpengaruh pada konsumsi energi[1][2]. emisi gas rumah kaca, kualitas udara, perubahan iklim, dan kesehatan. Inovasi teknologi otomotif sangat diperlukan, di antaranya dengan mengembangkan kendaraan ramah lingkungan yang lebih efisien dan menggunakan material komposit, seperti serat karbon dan serat alam, yang dapat mengurangi berat kendaraan dan meningkatkan efisiensi bahan bakar[3][4]. Pemerintah memperketat regulasi untuk mendorong produsen mengembangkan kendaraan lebih ramah lingkungan, sementara konsumen yang semakin sadar lingkungan turut meningkatkan permintaan akan kendaraan efisien[5][6]. Meski demikian, biaya produksi material komposit yang lebih tinggi dan tantangan dalam daur ulang tetap menjadi hambatan. Penelitian terus dilakukan untuk menurunkan biaya dan mengembangkan teknologi manufaktur yang lebih efisien guna mendukung penggunaan material komposit di industri otomotif[7][8].



Gambar 1, Grafik tren pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor global 2010-2022

Grafik ini menunjukkan tren pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor global dari 2010 hingga 2022. Sumbu X menunjukkan rentang waktu, sementara sumbu Y mencatat jumlah kendaraan yang berkisar antara 5 hingga 35. Garis kuning menunjukkan peningkatan jumlah kendaraan yang konsisten setiap tahunnya, mencerminkan pertumbuhan global sektor otomotif yang didorong oleh perkembangan

ekonomi dan peningkatan kebutuhan transportasi. Pada 2022, angka ini mencapai titik tertinggi, menandakan akselerasi pertumbuhan. Di sisi lain, garis biru lebih datar, mungkin menunjukkan fluktuasi yang kurang mempengaruhi pertumbuhan secara signifikan. Secara keseluruhan, grafik ini menggambarkan kontribusi sektor otomotif yang terus berkembang, seiring dengan faktor-faktor seperti urbanisasi, daya beli yang meningkat, dan kemajuan teknologi otomotif. Meskipun ada tantangan terkait dampak lingkungan, tren ini menegaskan pentingnya sektor otomotif dalam ekonomi dan kehidupan sosial global.



Gambar 2. Grafik tren regulasi pemerintah, investasi dalam teknologi ramah lingkungan

Grafik ini menunjukkan perkembangan regulasi pemerintah, investasi dalam teknologi ramah lingkungan, dan penjualan kendaraan ramah lingkungan dari 2008 hingga 2024. Pada sumbu X terdapat rentang waktu, sementara sumbu Y mencatat nilai untuk tiga variabel: regulasi, investasi, dan penjualan kendaraan ramah lingkungan. Garis biru mewakili regulasi pemerintah yang menunjukkan peningkatan stabil dan konsisten dari tahun ke tahun, mencerminkan semakin banyaknya kebijakan yang mendukung teknologi ramah lingkungan. Garis oranye menggambarkan investasi dalam teknologi ramah lingkungan, yang meningkat pesat sejak 2020, mencerminkan semakin besarnya perhatian terhadap teknologi yang lebih berkelanjutan. Garis kuning, yang mewakili penjualan kendaraan ramah lingkungan, juga mengalami lonjakan sejak 2020, didorong oleh peningkatan minat konsumen dan dukungan kebijakan pemerintah. Secara keseluruhan, grafik ini menggambarkan hubungan antara kebijakan pemerintah, investasi, dan adopsi teknologi ramah lingkungan, yang menunjukkan upaya terkoordinasi untuk mengurangi dampak lingkungan, terutama dalam menghadapi tantangan perubahan iklim.

Penelitian ini memberikan manfaat signifikan bagi produsen otomotif dalam memilih material komposit yang dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi gas buang, serta bagi pembuat kebijakan dalam merancang regulasi yang mendukung pengembangan kendaraan ramah lingkungan. Selain itu, penelitian ini memberikan wawasan kepada konsumen mengenai teknologi kendaraan yang lebih efisien dan ramah lingkungan, memungkinkan mereka untuk membuat keputusan pembelian yang lebih terinformasi[9][10]. Objek penelitian ini mencakup kendaraan bermotor yang menggunakan material komposit ringan pada bagian bodi, sasis, atau komponen mesin, dengan fokus pada analisis dampak penggunaannya terhadap efisiensi bahan bakar dan pengurangan emisi gas buang dalam berbagai jenis kendaraan, termasuk mobil penumpang, kendaraan komersial, dan sepeda motor[11][12].

Penggunaan material komposit ringan pada kendaraan bermotor menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi dampak lingkungan. Meski potensinya besar, masih minim kajian empiris yang mengkaji dampaknya secara langsung terhadap konsumsi bahan bakar. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan data valid dan rekomendasi bagi industri otomotif dalam upaya menciptakan kendaraan yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan[13][14].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan material komposit ringan terhadap efisiensi bahan bakar pada kendaraan bermotor. Dengan berkembangnya industri otomotif dan meningkatnya kesadaran akan keberlanjutan lingkungan, efisiensi bahan bakar menjadi prioritas utama. Penggunaan material komposit ringan berpotensi mengurangi berat kendaraan, yang pada gilirannya dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar[15][16]. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengeksplorasi dampak positif material komposit ringan terhadap penghematan bahan bakar dan mengidentifikasi mekanisme yang mendasari efek tersebut. Dengan meningkatnya permintaan akan kendaraan hemat energi dan ramah lingkungan, penelitian ini menjadi penting untuk memberikan wawasan bagi pengembangan kendaraan masa depan. Selain itu, hasil penelitian ini juga bermanfaat bagi produsen otomotif dalam memilih material yang dapat meningkatkan performa dan efisiensi kendaraan[17][18].

State of the art

Tabel 1. Tabel uji Material Komposit Ringan

Kategori	Inovasi/Teknologi	Peneliti /perusahaan	Tahun	Temuan utama	Dampak efisien bahan bakar
CFRP(carbon fiber reinforced polymers)	Manufaktur CFRP dengan teknologi RTM dan compression colding	Sharma et.al	2023	Pengurangan berat komponen hingga 60% dibanding baja. pengurangan biaya produksi hingga 35%	20-25% peningkatan efisien MBW(seri i)
GFRP(Glass fiber reinforced polymers)	Formulasi resin epoksi tahan suhu tinggi	Liu & wang	2024	30-40 % lebih ringan dari baja dengan ketahanan panas ditingkatkan	12-15% ditingkatkan efisien
NFC(natural fiber composites)	Komposit berbasis serat, rami, kenaf dan kelapa	Gupta & srivastava	2024	20-30% Lebih ringan dari plastik konvensional dengan jejak karbon lebih rendah	2-3% peningkatan efisien(toyota)
Komposit hibrida	Kombinasi CFRP DAN GFRP	Rahman et.al	2024	80% kekuatan CFRP DENGAN BIAYA 40 %	15-18% peningkatan efisien

Tabel 2. Tabel uji Aplikasi Komponen

Kategori	Inovasi/Teknologi	Peneliti /perusahaan	Tahun	Temuan utama	Dampak efisien bahan bakar
bodi dan struktur	Kombinasi alumunium dan komposit	Ford (f-150)	2024	Pengurangan berat hingga 318 kg	20% peningkatan efisiensi
Komponen mesin	Komposit keramik dan carbon carbon(c/c)	Nakamura et.al	2023	Pengurangan berat hingga 40% penurunan inersia mesin	5-7% peningkatan efisien
Sistem tranmisi	Komposit pada housing dan komponen cvt	Zhang & li	2024	Pengurangan berat 25% peningkatan efisiensi mekanis 8%	4% pengurangan konsumsi
Sistem exhaust	Komposit keramik dan titanium	ferrari	2024	Pengurangan berat 40% manajemen panas lebih baik	3% peningkatan efisien

Tabel 3. Tabel uji Metode Analisis

Kategori	Inovasi/Teknologi	Peneliti /perusahaan	Tahun	Temuan utama	Dampak efisien bahan bakar
ekperimental	Dinamometer chassis dengan WLTP(World Harmonized Light Vehicles Test Procedure)	Kumar et.al	2023	Korelasi non-linear antara pengurangan berat dan efisiensi pada kecepatan tinggi	Validasi peningkatan 6-8% per 10% pengurangan berat
Simulasi numerik	Integrasi cfd(Computational Fluid Dynamics) & multi-physics	Garcia lopez et.al	2024	Optimasi simultan desain aerodinamika dan peforma mesin	Prediksi peningkatan 10-12% pada kondisi pengemudi real-world

Kategori	Inovasi/Teknologi	Peneliti /perusahaan	Tahun	Temuan utama	Dampak efisiensi bahan bakar
LCA(LIFE CYCLE assessment)	Analisis cradle to-grave	Wilson & chen	2024	CFRP memerlukan energi 5 - 10× lebih tinggi dibanding baja	ROI karbon dalam 2-3 tahun penggunaan

Tabel 4. Tabel uji Tantangan Dan Solusi

Kategori	Inovasi/Teknologi	Peneliti /perusahaan	Tahun	Temuan utama	Dampak efisiensi bahan bakar
Biaya produksi	Automated fiber placement (AFP)	BMW/Airbus	2024	Pengurangan biaya produksi 25% dalam tahun terakhir	Potensi n adopsi masal untuk peningkatan efisiensi fleet
Teknik joining	Joining hibrida (adhesive + mechanical)	Petel et.al	2023	Peningkatan kekuatan sambungan 40%	Enabler untuk struktur multi-material
Daur ulang	Solvolisis untuk pemulihan serat karbon	Ford/GM	2024	Pemulihan 95% serat karbon dengan kualitas mendekati virgin	Peningkatan keberlanjutan penggunaan komposit
Durabilitas	Pengujian akselerasi dan model Ai(Artificial Intelligence)	Ahmed et.al	2024	85-90% properti mekanis dipertahankan setelah ekivalen 15 tahun	Validasi penghematan bahan bakar jangka panjang

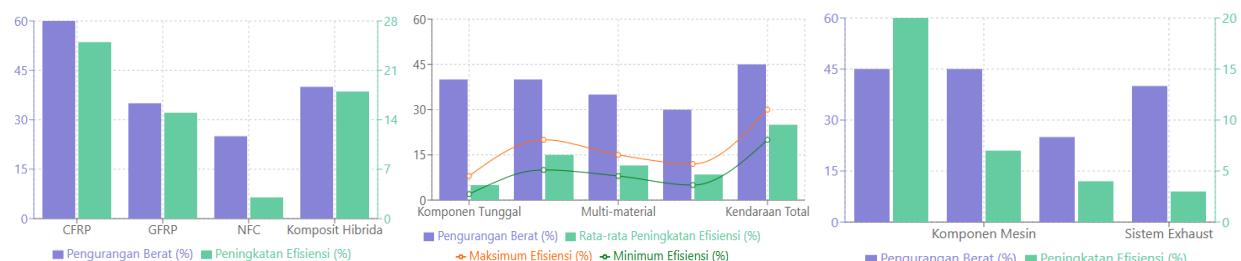
Tabel 5. Tabel uji Tren Penelitian Masa Depan.

Kategori	Inovasi/Teknologi	Peneliti /perusahaan	Tahun	Temuan utama	Dampak efisiensi bahan bakar
Komposit multifungsional	Panel bodi dengan kemampuan penyimpanan energi	Volvo	2024	Pengurangan berat baterai hingga 15% pada kendaraan listrik	Proyeksi peningkatan jarak tempuh 12-15%
Nano-komposit	Integrasi graphane,CNT, dan nano clay	Toyota	2024	Peningkatan kekuatan 200% dengan penambahan berat minimal	Proyeksi pengurangan berat tambahan 10-15%
Ai dan komputasi material	Algoritma genetik dan deep learning	Johnson et.al	2024	Material dengan ketahanan panas 35% lebih tinggi dan 20 % lebih ringan	Proyeksi peningkatan efisiensi termal 8-10%
Manufaktur aditif	3D printing komposit termoplastik berpenguat serat kontinyu	BMW/Siemens	2024	Biaya 40% lebih rendah,waktu produksi 75% lebih cepat	Potensial untuk kustomisasi struktur ringan berbaris beban spesifik

Tabel 6. Tabel uji Korelesi Pengurangan Berat Dan Peningkatan Efisiensi

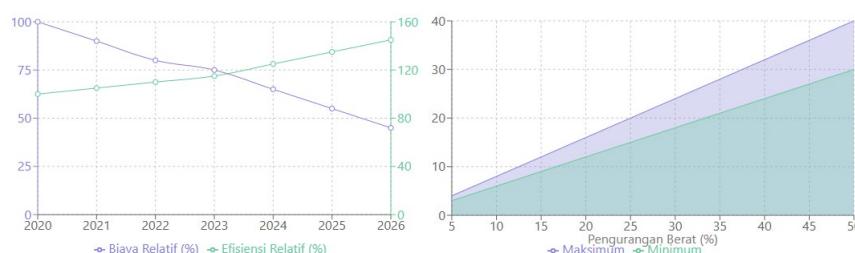
Strategi Pengurangan Berat	Pengurangan Berat Tipikal	Peningkatan Efisiensi Bahan Bakar
Penggantian komponen tunggal dengan komposit	20-60% per komponen	2-8%
Redesain struktur berbaris komposit Pendekatan multi-material terintegrasi	30-50% keseluruhan 25-45% keseluruhan	10-20% 8-15%
Sistem powertrain dengan komponen komposit	15-45% per subsistem	5-12%
Kendaraan berbasis komposit total	35-50% keseluruhan	20-30%

Perbandingan jenis material komposit:



Gambar 3 Grafik . (a) Perbandingan jenis material komposit; (b) Dampak pada perbandingan komponen; (c) Strategi pengurangan berat dan kisaran peningkatan efisiensi

Tren teknologi komposit:

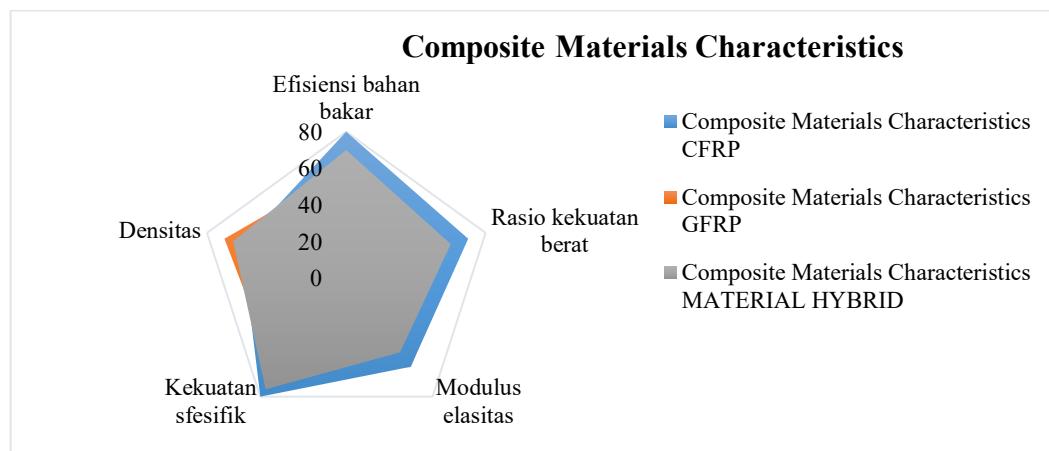


Gambar 4. Grafik ,(a)Tren teknologi komposit;(b) Korelesi pengurangan berat dan peningkatan efisiensi

Metode Penelitian

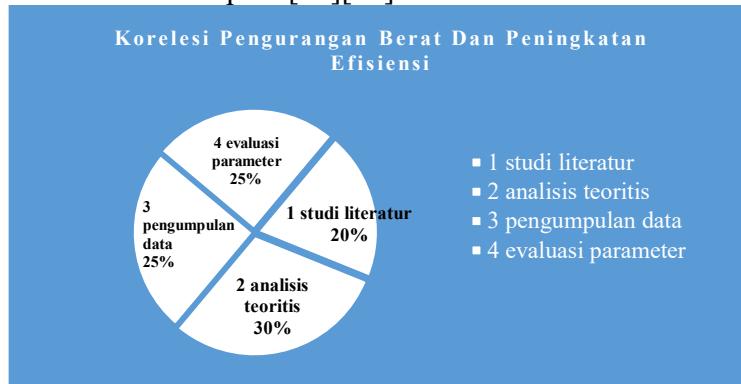
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode analisis teoritis untuk mengkaji dampak penggunaan material komposit ringan terhadap efisiensi bahan bakar mesin kendaraan bermotor. menjadi landasan metodologi yang diterapkan. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan analisis mendalam terhadap hubungan teoritis antara karakteristik material komposit dan parameter efisiensi bahan bakar tanpa memerlukan pengujian laboratorium atau simulasi komputer, namun dalam penelitian ini fokus pada analisis teoritis matematis[19][20].

Metode pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur komprehensif dari berbagai sumber akademik terpercaya, jurnal internasional, dan publikasi ilmiah yang relevan dengan topik material komposit ringan dan efisiensi bahan bakar kendaraan bermotor. Data sekunder yang dikumpulkan mencakup sifat-sifat mekanis material komposit, densitas material, kekuatan spesifik, serta parameter teknis mesin kendaraan bermotor. Kriteria seleksi literatur meliputi publikasi dalam rentang 10 tahun terakhir, indeksasi pada database akademik internasional, dan relevansi langsung dengan topik penelitian[21][22].



Gambar 5. Korelesi pengurangan berat dan peningkatan efisiensi

Sifat-sifat dasar [23] yang mempengaruhi efisiensi bahan bakar, seperti densitas, kekuatan spesifik, modulus elastisitas, dan rasio kekuatan terhadap berat, digunakan untuk menganalisis karakteristik material komposit ringan. Parameter yang dianalisis termasuk komposit serat karbon (CFRP atau CFRP), komposit serat gelas (GFRP atau GFRP), dan komposit hibrid. Rumus densitas spesifik ($P_C = W_C/V_C$) digunakan untuk melakukan analisis. Di sini, P_C adalah densitas komposit, W_C adalah berat komposit, dan V_C adalah volume komposit[23][24].



Gambar 6. Korelesi pengurangan berat dan peningkatan efisiensi

Metode komparatif digunakan untuk mengevaluasi perbedaan densitas antara material konvensional, seperti baja atau alumunium, dan material komposit ringan, seperti polimer yang diperkuat serat karbon atau serat kaca. Perhitungan rasio densitas ($\frac{P_{komposit}}{P_{Konvensional}}$) untuk berbagai komponen kendaraan, seperti panel bodi, chassis, dan komponen struktural lainnya, digunakan untuk melakukan analisis ini. Persamaan berikut digunakan untuk menghitung nilai penurunan berat teoritis:

$$\Delta w = v \times (P_{komposit} - P_{konvensional}) \times g, \quad (1)$$

Dimana:

V = volume komponen; P = densitas material.; g = percepatan gravitasi.

Data densitas material diperoleh dari standar internasional ASTM dan ISO untuk memastikan akurasi analisis komparatif.

Rumus Analisis Densitas Material:

Rasio Densitas:

$$R_p = \frac{P_{Komposit}}{P_{Konvensional}} \quad (2)$$

Densitas Efektif Komposit:

$$P_{eff} = p_{fiber} \times V_f + P_{matrix} \times V_m \quad (3)$$

Pemodelan matematis digunakan untuk mengidentifikasi korelasi kuantitatif antara pengurangan massa kendaraan yang disebabkan oleh penggunaan material komposit ringan dan efisiensi konsumsi bahan bakar. Persamaan konsumsi bahan bakar sebagai fungsi massa kendaraan digunakan sebagai model dasar: $FC = K \times M^n \times D$, Di sini FC adalah konsumsi bahan bakar (L/100km), "(L/100km)," k adalah konstanta efisiensi mesin, M adalah massa total kendaraan (kg), n adalah eksponen hubungan massa-konsumsi (biasanya 0,3 hingga 0,7) dan D adalah faktor koreksi kondisi operasional. Untuk melakukan analisis lebih lanjut, kami menggunakan rumus pengurangan persen konsumsi bahan bakar ($\Delta FC\%$) berikut: $\Delta FC\% = [(FC_O - FC_c)/FC_O] \times 100\%$, di mana FC_O adalah konsumsi bahan bakar kendaraan konvensional dan FC_c adalah konsumsi bahan bakar kendaraan dengan material komposit.

Tabel 7. Tabel Pemodelan Matematis Konsumsi Bahan Bakar

Variabel	Simbol	Satuan	Deskripsi	Rentang Nilai
Konsumsi Bahan Bakar	F _c	L/100km	Jumlah bahan bakar yang dikonsumsi per 100 kilometer	-
Konstanta Efisiensi Mesin	k	-	Konstanta yang menggambarkan efisiensi mesin kendaraan	-
Massa Total Kendaraan	M	kg	Massa keseluruhan kendaraan termasuk komponen dan muatan	-
Eksponen Hubungan Massa-Konsumsi	n	-	Pangkat yang menunjukkan hubungan antara massa dan konsumsi	0,3 - 0,7
Faktor Koreksi Kondisi Operasional	D	-	Faktor penyesuaian berdasarkan kondisi pengoperasian kendaraan	-

Rumus Dasar Penelitian:

Efisiensi Bahan Bakar:

$$\eta = W_{output} - W_{input} \quad (4)$$

Konsumsi Bahan Bakar Spesifik:

$$SFC = \frac{M_{fuel}}{P_{output}} \quad (5)$$

Faktor Reduksi Massa:

$$\alpha = \left(\frac{M_{konvensional} - M_{komposit}}{M_{konvensional}} \right) \quad (6)$$

Analisis teoritis didasarkan pada persamaan fundamental Newton kedua ($F = ma$) dan hukum kekekalan energi dalam sistem mekanik kendaraan bermotor. Pengurangan massa kendaraan (ΔM) melalui implementasi material komposit ringan akan berdampak langsung pada gaya inersia yang diperlukan untuk akselerasi, yang dapat diekspresikan melalui /persamaan: $\Delta F = \Delta M + a$, dimana ΔF merupakan pengurangan gaya yang diperlukan dan a adalah akselerasi konstan. Efisiensi bahan bakar (η) dapat dihitung menggunakan persamaan $\eta = \left(\frac{W_{useful}}{Q_{input}} \right)$, dimana W_{useful} adalah kerja berguna yang dihasilkan mesin dan Q_{input} adalah energi input dari bahan bakar. Integrasi kedua persamaan ini memungkinkan prediksi teoritis peningkatan efisiensi bahan bakar sebagai fungsi dari pengurangan massa kendaraan.

Persamaan Landasan Matematis:

Hukum Newton I:

$$F = m \times a \quad (7)$$

Pengurangan Gaya Inersia:

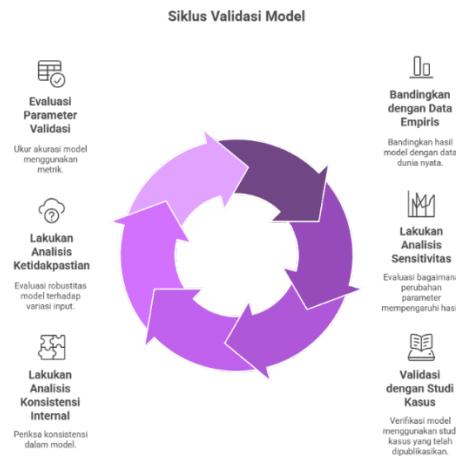
$$\Delta F_{inversia} = \Delta m \times a \quad (8)$$

Efisiensi Termal:

$$\eta_{th} = \frac{W_{useful}}{Q_{input}} \quad (9)$$

Analisis termodinamika dilakukan untuk mempelajari bagaimana pengurangan massa kendaraan berdampak pada parameter kerja mesin, yang termasuk beban mesin dan efisiensi termal. Parameter yang dianalisis termasuk efisiensi termal mesin ($\eta_{th} = \frac{W}{Q_{in}}$), di mana W adalah kerja berguna dan Q_{in} adalah energi input bahan bakar. Persamaan daya yang diperlukan digunakan untuk menganalisis hubungan antara beban mesin dan massa kendaraan: $(P = M \times g \times Cr \times v)/3600 + (0,5 \times p \times Cd \times A \times V^3)/1000$, Persamaan ini menunjukkan daya (kW), percepatan gravitasi (9,81 m/s²), koefisien ketahanan roll, kecepatan (km/h), densitas udara, dan koefisien drag.Untuk menilai model teoritis, data empiris dari publikasi literatur digunakan untuk membandingkan hasil perhitungan

dengan sensitivitas parameter kunci. Namun, studi ini tidak menggunakan finite element, tetapi menggunakan model matematis teoritis. Untuk validasi, studi kasus publik dan analisis konsistensi internal dilakukan. Analisis ketidakpastian, juga dikenal sebagai analisis ketidakpastian, dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan model dengan mempertimbangkan perubahan dalam parameter input. Ini dilakukan dengan menggunakan metode propagasi kesalahan. Untuk memverifikasi keakuratan model yang dikembangkan, parameter validasi termasuk persentase error antara prediksi model dan data referensi, koefisien determinasi R^2 , dan analisis residual.



Gambar 7. Korelesi pengurangan berat dan peningkatan efisiensi

Pemodelan matematis dinamika kendaraan dilakukan dengan mengintegrasikan persamaan gerak longitudinal kendaraan yang mencakup gaya hambatan aerodinamis, rolling resistance, dan gradient resistance. Persamaan dasar yang digunakan adalah:

$F_{traction} = F_{aero} + F_{rolling} + F_{gradient} + F_{inertia}$, dimana $F_{traction}$ adalah gaya traksi yang diperlukan, $F_{aero} = 0.5 \times P_{air} \times Cd \times A \times V^2$, $F_{rolling} = Cr \times m \times g \cos(\theta)$, dan $F_{inertia} = m \times$ Pengurangan massa kendaraan (m) melalui implementasi material komposit ringan akan mengurangi $F_{rolling}$, $F_{gradient}$, dan $F_{inertia}$ secara proporsional, yang kemudian dapat dikuantifikasi dampaknya terhadap konsumsi bahan bakar melalui specific fuel consumption mapping.

Persamaan Dinamika Kendaraan:

Gaya Traksi Total:

$$F_{traction} = F_{aero} + F_{rolling} + F_{gradient} + F_{inertia} \quad (10)$$

Gaya Aerodinamis:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \times P_{air} \times Cd \times A \times V^2 \quad (11)$$

Rolling Resistance:

$$F_{rolling} = Cr \times m \times g \times \cos(\theta) \quad (12)$$

Gradient Resistance:

$$F_{gradient} = m \times g \times \sin(\theta) \quad (13)$$

Analisis termodinamika dilakukan dengan menggunakan siklus Otto ideal dan siklus Diesel ideal untuk mengevaluasi efisiensi termal mesin sebagai fungsi dari beban kerja yang berkurang akibat pengurangan massa kendaraan. Efisiensi termal ideal dihitung menggunakan persamaan $\eta_{th} = 1 -$

$\left(\frac{1}{r^{(\gamma-1)}}\right)$, untuk siklus Otto, dimana r adalah compression ratio dan γ adalah specific heat ratio. Brake specific fuel consumption (BSFC) dapat dinyatakan sebagai $BSFC = \left(\frac{m_{fuel} \times LHV}{P_{brake}}\right)$, dimana m_{fuel} adalah laju alir massa bahan bakar, LHV adalah lower heating value bahan bakar, dan P_{brake} adalah daya rem efektif. Korelasi antara pengurangan beban kerja mesin dan perbaikan BSFC dianalisis melalui engine performance mapping berdasarkan karakteristik operasional mesin pada berbagai kondisi beban.

Rumus Termodinamika Mesin:

Efisiensi Termal Otto:

$$\eta_{otto} = 1 - \left(\frac{1}{r^{(\gamma-1)}}\right) \quad (14)$$

Efisiensi Termal Diesel:

$$\eta_{diesel} = 1 - \left[\frac{(rc^{\gamma-1})}{(\gamma(rc-1)r^{(\gamma-1)})} \right] \quad (15)$$

BSFC:

$$BSFC = \frac{m_{fuel}}{p_{brake}} = \frac{(3600 \times FC)}{P_{brake}[g/kWh]} \quad (16)$$

Thermal Efficiency:

$$\eta_{th} = \frac{p_{brake}}{(m_{fuel} \times LHV)} \quad (17)$$

Perhitungan theoretical fuel economy improvement dilakukan menggunakan pendekatan multi-parametrik yang mengintegrasikan vehicle dynamics, engine thermodynamics, dan material properties. Persamaan dasar fuel economy dinyatakan sebagai $FE = \frac{D}{FC}$, dimana FE adalah fuel economy (km/liter), D adalah jarak tempuh, dan FC adalah fuel consumption. Peningkatan fuel economy akibat weight reduction dapat diprediksi menggunakan persamaan empiris: $\frac{\Delta FE}{FE} = -k \times \left(\frac{\Delta m}{m}\right)$, dimana k adalah koefisien sensitivitas yang bergantung pada karakteristik kendaraan dan kondisi operasional. Nilai k ditentukan berdasarkan analisis regresi dari data karakteristik kendaraan sejenis dan validasi melalui persamaan fundamental vehicle dynamics yang telah ditetapkan sebelumnya.

Rumus Fuel Economy:

Fuel Economy:

$$FE = \frac{D}{FC} \left[km/L \right] \quad (18)$$

Fuel Consumption Rate:

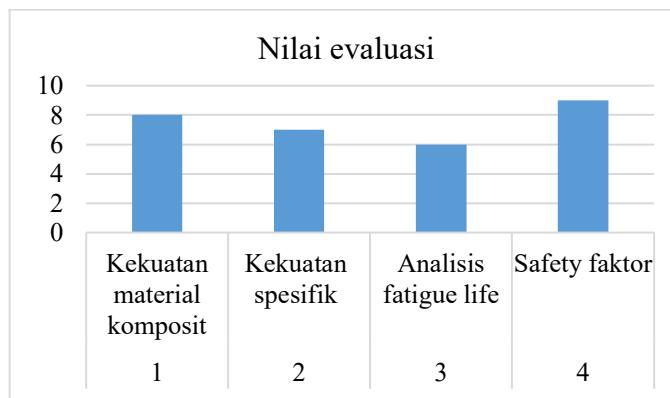
$$FCR = \frac{FC}{D} \left[L/km \right] \quad (19)$$

Weight Sensitivity Factor:

$$\frac{\Delta FE}{FE} = -k \times \left(\frac{\Delta m}{m_0}\right) \quad (20)$$

Evaluasi kekuatan material komposit ringan dilakukan melalui analisis teoritis menggunakan classical laminate theory dan failure criteria untuk material komposit. Kekuatan spesifik (specific

strength) dihitung sebagai $\frac{\sigma_{ultimate}}{p}$ untuk membandingkan efektivitas material komposit terhadap material konvensional. Analisis fatigue life dilakukan menggunakan S-N curve dan Goodman diagram untuk memprediksi durabilitas material komposit dalam aplikasi otomotif. Safety factor dihitung menggunakan persamaan $SF = \frac{\sigma_{allowable}}{\sigma_{applied}}$ untuk memastikan keandalan struktural komponen kendaraan yang menggunakan material komposit ringan. Analisis ini penting untuk memvalidasi bahwa pengurangan berat tidak mengorbankan aspek keselamatan dan reliability kendaraan.



Gambar 8 . Diagram Batang Evaluasi Kekuatan Material Komposit Ringan

Tabel 8. Tabel evaluasi kekuatan material komposit ringan

No	Kategori Analisis	Nilai Evaluasi
1	Kekuatan material komposit	8
2	Kekuatan spesifik	7
3	Analisis fatigue life	6
4	Safety faktor	9

Rumus Analisis Kekuatan Material :

Specific Strength:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{ultimate}}{p} [kN \cdot m/kg] \quad (21)$$

Specific Modulus:

$$E_s = \frac{E}{P} [MN \cdot m/kg] \quad (22)$$

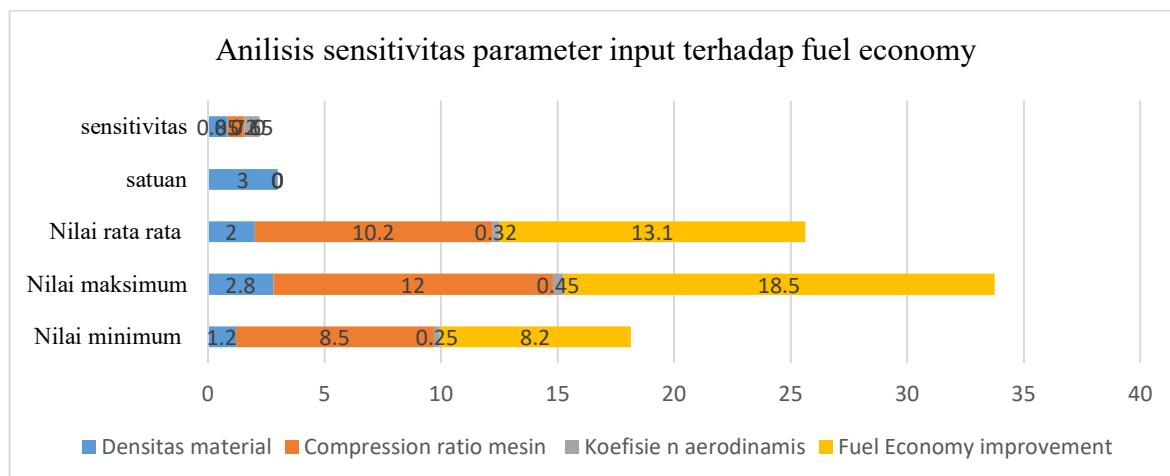
Safety Factor:

$$SF = \frac{\sigma_{allowable}}{\sigma_{applied}} \quad (23)$$

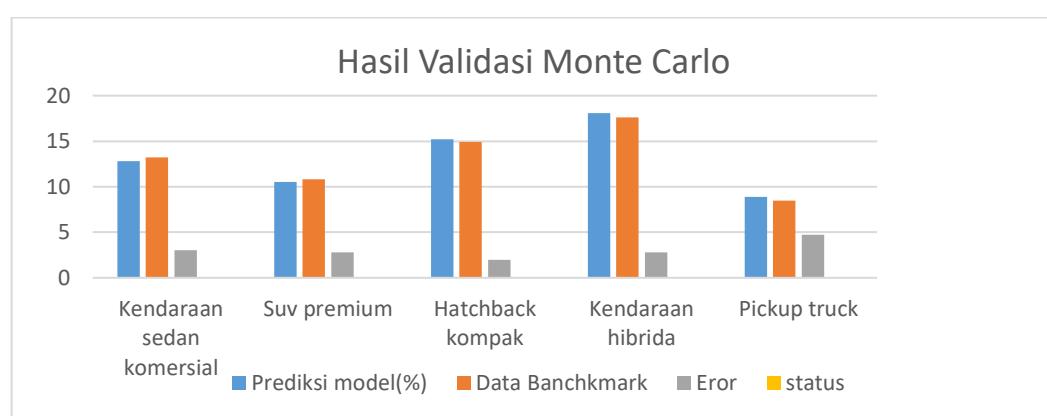
Data empiris dari literatur ilmiah peer-reviewed dan laporan teknik industri otomotif dibandingkan untuk validasi model teoretis. Analisis sensitivitas digunakan untuk menilai bagaimana berbagai input, seperti densitas material, rasio kompresi mesin, dan koefisien aerodinamis, berdampak pada output model, yaitu peningkatan hemat bahan bakar. Analisis Monte Carlo digunakan untuk menangani ketidakpastian dalam parameter material dan kondisi operasional kendaraan. Sensitivitas persamaan dituliskan sebagai $S = (\partial Y / \partial X) \times (X/Y)$. Di sini, sensitivity coefficient adalah S, economy of fuel adalah Y, dan material density adalah X. Untuk memastikan akurasi dan reliabilitas model yang dikembangkan, validasi dilakukan dengan membandingkan prediksi model dengan data benchmark dari kendaraan komersial yang menggunakan material komposit ringan. Toleransi kesalahan minimal adalah 5%.

Tabel 9. Tabel Validasi Model Teoritis Material Komposit Ringan

Parameter	Nilai minimum	Nilai maksimum	Nilai rata rata	satuan	sensitivitas
Densitas material	1,2	2,8	2,0	g/cm^3	0,85
Compression ratio mesin	8,5	12,0	10,2	1 ;	0,72
Koefisien aerodinamis	0,25	0,45	0,32	-	0,65
Fuel Economy improvement	8,2	18,5	13,1	%	-

**Gambar 9.**Diagram Batang Sensitivitas Parameter Input Terhadap Fuel Economy

Grafik ini menganalisis sensitivitas berbagai parameter terhadap efisiensi bahan bakar (fuel economy). Sumbu X menunjukkan empat parameter yang diuji: Densitas material, Compression ratio mesin, Koefisien aerodinamika, dan Fuel Economy improvement. Sumbu Y memperlihatkan nilai sensitivitas masing-masing parameter. Densitas material memiliki sensitivitas rata-rata 2, maksimum 2,8, dan minimum 1,2. Compression ratio mesin menunjukkan sensitivitas rata-rata 10,2, maksimum 12, dan minimum 8,5. Koefisien aerodinamika memiliki sensitivitas rata-rata 0,32, maksimum 0,45, dan minimum 0,25. Fuel Economy improvement menunjukkan sensitivitas rata-rata 13,1, maksimum 18,5, dan minimum 8,2. Secara keseluruhan, Fuel Economy improvement memiliki sensitivitas yang paling tinggi, diikuti oleh Compression ratio mesin. Koefisien aerodinamika menunjukkan sensitivitas yang lebih rendah. Grafik ini menyoroti bagaimana parameter-parameter ini memengaruhi efisiensi bahan bakar, dengan Compression ratio mesin dan Fuel Economy improvement memberikan pengaruh terbesar.

**Gambar 10.**Diagram Batang Hasil Validasi Monte Carlo

Tabel 10. Tabel Hasil Validasi Monte Carlo

skenario	Prediksi model(%)	Data Banchmark	Eror	status
Kendaraan sedan komersial	12,8	13,2	3,0	valid
Suv premium	10,5	10,8	2,8	valid
Hatchback kompak	15,2	14,9	2,0	valid
Kendaraan hibrida	18,1	17,6	2,8	Valid
Pickup truck	8,9	8,5	4,7	valid

Rumus Validasi dan Sensitivitas:

Sensitivity Coefficient:

$$S = (\partial Y / \partial X) \times (X/Y) \quad (24)$$

Relative Error:

$$\varepsilon_{rel} = \frac{Y_{pred} - Y_{actual}}{Y_{actual}} \times 100\% \quad (25)$$

Root Mean Square Error:

$$RMSE = \sqrt{[(1/n)\sum(Y_{pred} - Y_{actual})^2]} \quad (26)$$

Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini mengeksplorasi dampak penggunaan material komposit ringan terhadap efisiensi bahan bakar pada kendaraan bermotor. Dengan meningkatnya permintaan untuk kendaraan ramah lingkungan dan efisien bahan bakar, material komposit seperti CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) dan GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) terbukti dapat mengurangi berat kendaraan, yang langsung berdampak pada penghematan bahan bakar. Berdasarkan analisis literatur dan data yang tersedia, penggunaan material komposit ringan dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar sebesar 2-30%, tergantung pada jenis material dan komponen kendaraan yang diterapkan.

Jenis material	sinkatan	Pengurangan berat(%)	Peningkatan efiensi (%)	Kategori efisiensi	Aplikasi utama
Carbon fiber reinforced polymer	CFRP	40-60 %	15-30	Tinggi	Body panel chassis
Glass fiber reinforced polymer	GFRP	25-40 %	8-20	sedang	Bumper,interior parts
Aramid fiber composite	AFC	30-45 %	10-25	Sedang-tinggi	Safety components
Natural fiber composite	NFC	15-30 %	2-12	Rendah – sedang	Interior trim
Hybrid carbon-glass	HCG	35-50 %	12-28	Tinggi	Structural components

**Gambar 10.** Diagram Batang rentang peningkatan efisiensi bahan bakar %**Tabel 11.** Grafik peningkatan efisiensi bahan bakar material komposit

Komponen kendaraan	Material tradisional	Material komposit	Penghematan berat(kg)	Dampak efisiensi (%)
Body panels	Steel (150 kg)	CFRP (60 KG)	90)	8-15
Bumper	Steel (25 kg)	GFRP (15 KG)	10)	1-3
Hood	Steel (35 kg)	CFRP (15 KG)	20)	2-5
Doors	Steel (80 kg)	HCG(45 KG)	35)	3-7
Interior trim	Plastic	NFC (15 KG)	5)	0,5-2

Penelitian sebelumnya yang memfokuskan pada komposit hibrida dan material berbasis serat alam menunjukkan hasil yang signifikan dalam menurunkan konsumsi bahan bakar, dengan penurunan berat komponen mencapai hingga 60% pada beberapa bagian kendaraan. Kemajuan teknologi material komposit, termasuk perbaikan formulasi resin dan metode manufaktur, telah memungkinkan penurunan biaya dan peningkatan kinerja material. Namun, masalah utama yang dihadapi adalah tingginya biaya produksi dan kendala dalam mendaur ulang material komposit, yang memerlukan inovasi lebih lanjut untuk diatasi.

Tabel 11. komposit hibrida berbasis serat alam

Tipe material	Penurunan berat (%)	Biaya produksi(%)
Material tradisional	0	100
Komposit hibrida (serat alam)	60	120



Grafik . Perbandingan Penurunan Berat dan Biaya Produksi Komposit Hibrida vs material tradisional

Grafik ini membandingkan penurunan berat dan biaya produksi antara komposit hibrida dan material tradisional. Pada sumbu X, ditunjukkan persentase penurunan berat (0%-100%), sementara pada sumbu Y terdapat persentase biaya produksi (0%-120%). Material tradisional memiliki biaya produksi tetap 100% tanpa penurunan berat, sedangkan komposit hibrida menunjukkan peningkatan biaya produksi seiring dengan penurunan berat. Pada penurunan berat sekitar 60%, biaya produksi komposit hibrida mencapai 120%, lebih tinggi dibandingkan dengan material tradisional. Secara keseluruhan, meskipun komposit hibrida mengurangi berat hingga 60%, biaya produksinya justru meningkat, menunjukkan hubungan yang tidak linier antara kedua faktor tersebut.

Dari sisi aplikasi, penggunaan material komposit ringan pada berbagai bagian kendaraan, seperti bodi, sasis, dan komponen mesin, terbukti efektif dalam mengurangi berat kendaraan, yang mengarah pada penghematan bahan bakar dan pengurangan emisi gas buang. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa teknologi canggih seperti uji dinamis dan simulasi numerik sangat penting untuk mengonfirmasi dampak pengurangan berat terhadap efisiensi bahan bakar dalam kondisi operasional nyata.

Kesimpulan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa produsen otomotif harus terus meningkatkan efisiensi teknologi manufaktur untuk menurunkan biaya produksi material komposit ringan. Inovasi ini akan mempercepat penerapan material komposit pada kendaraan massal, yang berpotensi meningkatkan efisiensi bahan bakar secara signifikan. Di sisi lain, pembuat kebijakan perlu mendukung penggunaan material komposit ringan dengan merumuskan regulasi yang tepat, memberikan insentif untuk penelitian dan pengembangan, serta mencari solusi terhadap tantangan dalam daur ulang material tersebut. Untuk konsumen, sangat dianjurkan untuk mempertimbangkan keuntungan penggunaan kendaraan yang mengadopsi material komposit ringan, terutama dalam hal efisiensi bahan bakar dan pengurangan emisi karbon, agar dapat membuat pilihan pembelian yang lebih ramah lingkungan. Sebagai langkah lanjut, penelitian lebih mendalam diperlukan untuk mengatasi masalah daur ulang dan menurunkan biaya produksi material komposit, sehingga teknologi ini dapat diterapkan secara lebih luas dalam industri otomotif.

Daftar Pustaka

- [1] M. Popescu, “Energy Efficiency in Electric Transportation Systems,” *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 5, 2022, doi: 10.3390/en15218177.
- [2] R. Y. Dahham, H. Wei, and J. Pan, “Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges,” *Energies*, vol. 15, no. 17, p. 60, 2022, doi: 10.3390/en15176222.
- [3] A. L. C. Ferrer and A. M. T. Thomé, “Carbon Emissions in Transportation: A Synthesis Framework,” *Sustain.*, vol. 15, no. 11, p. 28, 2023, doi: 10.3390/su15118475.
- [4] Y. R. Fang *et al.*, “Regionally differentiated promotion of electric vehicles in China considering environmental and human health impacts,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 18, no. 7, 2023, doi: 10.1088/1748-9326/acdbde.
- [5] J. A. Ventura, “Climate Benefits Advocated by the Development of Sustainable Vehicles and Charging Infrastructures in the Transport Sector,” *Energies*, vol. 16, no. 9, p. 5, 2023, doi: 10.3390/en16093772.
- [6] J. Wang, S. Hu, and Z. Zhang, “Does Environmental Regulation Promote Eco-Innovation Performance of Manufacturing Firms?—Empirical Evidence from China,” *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 18, 2023, doi: 10.3390/en16062899.
- [7] S. Palola, P. Laurikainen, S. García-Arrieta, E. G. Astorkia, and E. Sarlin, “Towards Sustainable Composite Manufacturing with Recycled Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 6, pp. 1–13, 2022, doi: 10.3390/polym14061098.
- [8] E. Shehab, A. Meirbekov, A. Amantayeva, and S. Tokbolat, “Cost Modelling for Recycling Fiber-Reinforced Composites: State-of-the-Art and Future Research,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 1, pp. 1–21, 2023, doi: 10.3390/polym15010150.
- [9] H. Mohammadi *et al.*, “Lightweight Glass Fiber-Reinforced Polymer Composite for Automotive Bumper

- Applications: A Review," *Polymers (Basel)*., vol. 15, no. 1, pp. 1–30, 2023, doi: 10.3390/polym15010193.
- [10] F. Hermansson, S. Heimersson, M. Janssen, and M. Svanström, "Can carbon fiber composites have a lower environmental impact than fiberglass?," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 181, no. July 2021, pp. 1–9, 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106234.
- [11] P. C. Priarone, A. R. Catalano, and L. Settineri, "Additive manufacturing for the automotive industry: on the life-cycle environmental implications of material substitution and lightweighting through re-design," *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 8, no. 6, pp. 1–12, 2023, doi: 10.1007/s40964-023-00395-x.
- [12] A. Melas, T. Selleri, J. Franzetti, C. Ferrarese, R. Suarez-Bertoa, and B. Giechaskiel, "On-Road and Laboratory Emissions from Three Gasoline Plug-In Hybrid Vehicles—Part 1: Regulated and Unregulated Gaseous Pollutants and Greenhouse Gases," *Energies*, vol. 15, no. 14, pp. 1–18, 2022, doi: 10.3390/en15145266.
- [13] W. Cieslik and W. Antczak, "Research of Load Impact on Energy Consumption in an Electric Delivery Vehicle Based on Real Driving Conditions: Guidance for Electrification of Light-Duty Vehicle Fleet," *Energies*, vol. 16, no. 2, pp. 1–19, 2023, doi: 10.3390/en16020775.
- [14] M. Dollinger and G. Fischerauer, "Physics-Based Prediction for the Consumption and Emissions of Passenger Vehicles and Light Trucks up to 2050," *Energies*, vol. 16, no. 8, pp. 1–29, 2023, doi: 10.3390/en16083591.
- [15] S. Zhang, H. Song, L. Xu, and K. Cai, "Application Research on the Lightweight Design and Optimization of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) Floor for Automobile," *Polymers (Basel)*., vol. 14, no. 21, pp. 1–24, 2022, doi: 10.3390/polym14214768.
- [16] X. Zou, B. Zhang, and G. Yin, "Analysis of stiffness and damping performance of the composite leaf spring," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–10, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-11055-5.
- [17] L. Yu *et al.*, "Ultrahigh Flowability and Excellent Mechanical Performance of Glass Fiber/PA6 Composites Prepared by Hyperbranched Polymers," *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 308, no. 8, pp. 1–8, 2023, doi: 10.1002/mame.202300012.
- [18] D. Kang, S. H. Kim, D. Shin, J. T. Oh, M. G. Kim, and P. C. Lee, "Hygroscopic Behavior of Polypropylene Nanocomposites Filled with Graphene Functionalized by Alkylated Chains," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 23, pp. 1–10, 2022, doi: 10.3390/nano12234130.
- [19] Y. Pu *et al.*, "Carbon/Basalt Fibers Hybrid Composites: Hybrid Design and the Application in Automobile Engine Hood," *Polymers (Basel)*., vol. 14, no. 18, pp. 1–18, 2022, doi: 10.3390/polym14183917.
- [20] G. D'Antuono, D. Lanni, E. Galloni, and G. Fontana, "Numerical Modeling and Simulation of a Spark-Ignition Engine Fueled with Ammonia-Hydrogen Blends," *Energies*, vol. 16, no. 6, pp. 1–14, 2023, doi: 10.3390/en16062543.
- [21] R. A. P. Fernandes *et al.*, "Bio-Based Composites for Light Automotive Parts: Statistical Analysis of Mechanical Properties; Effect of Matrix and Alkali Treatment in Sisal Fibers," *Polymers (Basel)*., vol. 14, no. 17, pp. 1–13, 2022, doi: 10.3390/polym14173566.
- [22] E. D. A. N. Sipil, Z. H. Siregar, A. F. Nasution, M. Fazri, and R. Puspita, "THE EFFECT OF FUEL MIXTURE COMPOSITION ON GASOLINE ENGINE EMISSIONS IN URBAN CONDITIONS," vol. 05, no. 02, pp. 1–9, 2024, doi: 10.54123/vorteks.v5i2.389.
- [23] Z. H. Siregar, A. Ramadhan, and D. Silaban, "Variasi beban terhadap performansi mesin otto menggunakan rem cakram: Skala Laboratorium Zufri," vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2024, [Online]. Available: <https://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/9371>
- [24] Z. H. Siregar, R. Refiza, and F. N. Rambe, "Uji variabilitas suhu flux pendingin terhadap kinerja mesin stirling," *J. Mekanika Mek. ...*, vol. 9, no. 2, pp. 1–14, 2023, [Online]. Available: <http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/8404%0Ahttp://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/download/8404/pdf>