

Penerapan AHP-Topsis Untuk Memilih Kendaraan Ramah Lingkungan Berdasarkan Kriteria

Davina Azalia Tara^{1*}, Yahya Nur Ifriza²

^{1,2} Program Studi S1 Teknik Informatika, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

*Email: vinatara27@students.unnes.ac.id

Info Artikel

Kata Kunci :

AHP, TOPSIS, MCDA, kendaraan ramah lingkungan, sistem pendukung keputusan

Keywords :

AHP, TOPSIS, MCDA, environmentally friendly vehicles, decision support systems

Tanggal Artikel

Dikirim : 21 April 2026

Direvisi : 12 Juni 2026

Diterima : 21 Oktober 2026

Abstrak

Kendaraan bermotor berbahan bakar fosil merupakan salah satu kontributor utama emisi CO₂ global yang berdampak pada perubahan iklim dan penurunan kualitas udara. Emisi CO₂ sektor energi mencapai sekitar 34 miliar ton pada tahun 2023, meningkat 49% dibanding tahun 2000, dengan sektor transportasi menyumbang sekitar 23,3% dari total emisi tersebut. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan sistematis untuk mengevaluasi dan memilih kendaraan ramah lingkungan berdasarkan berbagai kriteria yang relevan. Penelitian ini bertujuan menerapkan metode *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) dengan kombinasi *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dan *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) untuk menentukan kendaraan paling ramah lingkungan. Dataset yang digunakan adalah *CO₂ Emissions* dari Kaggle yang terdiri dari 7.385 kendaraan, dengan 1.000 sampel dipilih secara acak untuk analisis. Enam kriteria digunakan, yaitu *Engine Size*, *Cylinders*, *Fuel Consumption City*, *Fuel Consumption Highway*, *Fuel Consumption Comb (mpg)*, dan *CO₂ Emissions*. AHP digunakan untuk menentukan bobot kriteria, sedangkan TOPSIS digunakan untuk perankingan alternatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kriteria *CO₂ Emissions* memiliki bobot tertinggi sebesar 0,427, sehingga menjadi faktor paling dominan dalam evaluasi. Hasil TOPSIS menunjukkan bahwa kendaraan *hybrid*, seperti Toyota Prius dan Toyota Corolla Hybrid, menempati peringkat teratas karena memiliki kombinasi emisi rendah dan efisiensi bahan bakar tinggi. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat kestabilan yang baik terhadap perubahan bobot sebesar 10%. Dengan demikian, metode AHP-TOPSIS terbukti efektif dan robust sebagai sistem pendukung keputusan dalam pemilihan kendaraan ramah lingkungan berbasis multi-kriteria.

Abstract

Fossil fuel-powered motor vehicles are a major contributor to global CO₂ emissions, contributing to climate change and air quality degradation. Energy sector CO₂ emissions will reach approximately 34 billion tons in 2023, a 49% increase compared to 2000, with the transportation sector contributing approximately 23.3% of these emissions. Therefore, a systematic approach is needed to evaluate and select environmentally friendly vehicles based on various relevant criteria. This study aims to apply the Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) method with a combination of Analytical Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) to determine the most environmentally friendly vehicles. The dataset used is CO₂ Emissions from Kaggle, consisting of 7,385 vehicles, with 1,000 samples randomly selected for analysis. Six criteria are used: Engine Size, Cylinders, Fuel Consumption City, Fuel Consumption Highway, Fuel Consumption Comb (mpg), and CO₂ Emissions. AHP was used to determine the criteria weights, while TOPSIS was used to rank alternatives. The results showed that the CO₂ Emissions criterion had the highest weight of 0.427, making it the most dominant factor in the evaluation. TOPSIS results showed that hybrid vehicles, such as the Toyota Prius and Toyota Corolla Hybrid, were ranked top due to their combination of low emissions and high fuel efficiency. Sensitivity analysis showed that the system had a good level of stability against a 10% weight change. Thus, the AHP-TOPSIS method proved effective and robust as a decision support system in selecting environmentally friendly vehicles based on multi-criteria.

1. PENDAHULUAN

Kendaraan bermotor konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil merupakan salah satu kontributor utama emisi CO₂ global, yang mendorong perubahan iklim dan penurunan kualitas udara [1]. Global energy-related CO₂ emissions mencapai sekitar 34 miliar ton pada 2023, meningkat sebesar 49% dibanding tahun 2000 [2]. Dari total emisi energi ini, sektor transportasi menyumbang sekitar 23,3%, menjadikannya penyumbang kedua terbesar setelah pembangkit listrik dan panas [3]. Oleh karena itu, transisi menuju kendaraan ramah lingkungan, termasuk kendaraan listrik (EVs) dan hybrid, menjadi sangat penting dalam upaya mitigasi emisi CO₂ [4]. Peralihan ini mendukung pengembangan transportasi hijau dan bersih, sekaligus menjadi bagian dari strategi pembangunan rendah karbon yang mendapat perhatian pemerintah dan pembuat kebijakan secara global [5]. Dengan meningkatnya urbanisasi dan pertumbuhan kendaraan bermotor di berbagai negara, termasuk Indonesia, pendekatan berbasis data dan metode multi-kriteria menjadi sangat relevan, khususnya untuk mengevaluasi alternatif kendaraan berdasarkan berbagai kriteria, seperti emisi CO₂, efisiensi energi, harga, dan kapasitas.

Metode *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) telah banyak digunakan untuk pengambilan keputusan yang kompleks [6]. Salah satu metode MCDA yang populer adalah TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) [7]. TOPSIS mengevaluasi alternatif berdasarkan jarak dari solusi ideal positif (yang paling diinginkan) dan solusi ideal negatif (yang paling tidak diinginkan) [8]. Langkah utama TOPSIS meliputi normalisasi matriks kriteria, pembobotan kriteria, menentukan solusi ideal positif dan negatif, menghitung jarak *Euclidean* setiap alternatif ke kedua solusi, dan menghitung skor preferensi untuk ranking. Kelebihan TOPSIS adalah kemampuannya menghasilkan ranking yang jelas dan mempertimbangkan semua kriteria sekaligus, serta fleksibilitas dalam menangani kriteria kuantitatif dan kualitatif [9]. Kelemahannya, ranking TOPSIS sangat dipengaruhi oleh bobot kriteria, sehingga pemilihan bobot yang tepat menjadi sangat penting.

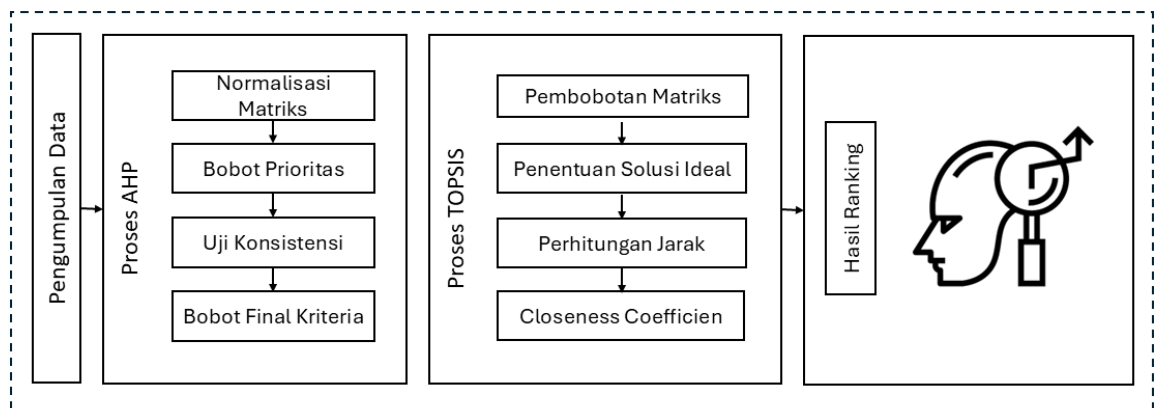
Untuk itu, AHP sering digunakan untuk menetapkan bobot kriteria secara sistematis. AHP memecah masalah menjadi hirarki (tujuan–kriteria–subkriteria–alternatif), membandingkan kriteria secara berpasangan, dan menghitung bobot numerik yang mencerminkan prioritas relatif masing-masing kriteria [10]. AHP unggul karena transparan, memungkinkan integrasi preferensi *stakeholder*, dan dapat menangani kriteria yang sulit diukur secara langsung. Namun, jika kriteria terlalu banyak, perbandingan berpasangan menjadi banyak dan rentan subjektivitas, sehingga perlu penanganan yang tepat.

Penelitian terdahulu memperkenalkan FN-TOPSIS, yang menggabungkan *fuzzy normalization* dengan lima metode pembobotan RANCOM, AHP, LBWA, FUCOM, dan BWM untuk menilai 7.385 alternatif kendaraan berdasarkan enam kriteria utama [11]. Hasil penelitian menunjukkan ranking yang stabil dan konsisten, sekaligus menyoroti pengaruh signifikan metode pembobotan terhadap prioritas alternatif beberapa menekankan kriteria dominan, beberapa lebih seimbang, dan beberapa menunjukkan variabilitas sedang. Kelebihan *framework* ini adalah kemampuan mengintegrasikan kriteria multidimensi untuk penilaian keberlanjutan secara sistematis, namun kompleksitas perhitungan dan kebutuhan dataset besar menjadi keterbatasannya, sehingga sulit diaplikasikan secara praktis di konteks lokal. Sementara itu, penelitian lain menekankan peran AHP untuk menentukan bobot kriteria dalam evaluasi keberlanjutan mobilitas urban berbasis sistem terpadu (STEOP), mempertimbangkan kepentingan *stakeholder* dan skenario perencanaan masa depan [12]. Pendekatan ini unggul dalam memberikan prioritas kriteria yang sistematis dan mempertimbangkan aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan, namun fokusnya terbatas pada mobilitas multi-modal.

Berdasarkan penelitian terdahulu, masih terdapat kebutuhan akan suatu pendekatan yang mampu menggabungkan pembobotan kriteria yang konsisten dengan mekanisme perankingan alternatif yang sederhana, transparan, dan mudah direplikasi. Sebagian penelitian berfokus pada pengembangan metode pembobotan yang kompleks, sementara penelitian lainnya menitikberatkan pada evaluasi keberlanjutan tanpa mengintegrasikan proses perankingan alternatif secara langsung. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan integrasi AHP dan TOPSIS untuk menghasilkan proses evaluasi kendaraan ramah lingkungan yang lebih sistematis dan mudah diterapkan [13]. Dataset nyata dari *Kaggle CO2 Emissions* digunakan agar hasil penelitian dapat diterapkan langsung untuk evaluasi kendaraan ramah lingkungan. *Framework* ini diharapkan menyederhanakan proses evaluasi, tetap menjaga akurasi, dan memberikan kontribusi praktis serta ilmiah, sekaligus menjadi dasar penelitian selanjutnya, seperti penambahan kriteria baru atau perbandingan dengan metode MCDA lain.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan MCDA dengan kombinasi metode AHP untuk menentukan bobot kriteria dan TOPSIS untuk menentukan peringkat kendaraan ramah lingkungan yang dapat dilihat pada Gambar 1. Gambar 1 menunjukkan alur penelitian yang terdiri atas beberapa tahapan utama. Tahap pertama adalah pengumpulan dan persiapan data dari dataset CO₂ Emissions. Penelitian ini menggunakan dataset CO₂ Emissions yang diperoleh melalui *KaggleHub* dengan nama dataset “co2-emissions”. Dataset tersebut berisi informasi teknis dan lingkungan dari 7.385 kendaraan. Selanjutnya dilakukan pemilihan kriteria yang relevan untuk evaluasi kendaraan ramah lingkungan. Tahap berikutnya adalah penentuan bobot kriteria menggunakan metode AHP yang dilanjutkan dengan pengujian konsistensi matriks perbandingan berpasangan. Bobot yang diperoleh kemudian digunakan dalam metode TOPSIS untuk membentuk matriks keputusan berbobot, menentukan solusi ideal positif dan negatif, menghitung jarak setiap alternatif terhadap solusi ideal, serta memperoleh nilai Closeness Coefficient sebagai dasar perankingan kendaraan. Tahap terakhir adalah analisis sensitivitas untuk mengevaluasi kestabilan hasil perankingan terhadap perubahan bobot kriteria. Seluruh proses analisis dilakukan menggunakan Python 3.12. *Library Pandas* digunakan untuk pengolahan data, *NumPy* untuk komputasi numerik, *Scikit-learn* untuk *random sampling*, dan *Matplotlib* untuk visualisasi hasil.



Gambar 1. Tahapan Proses AHP-TOPSIS dalam Memilih Kendaraan Ramah Lingkungan

2.1 Dataset dan Persiapan Data

Dari 7.385 kendaraan, penelitian ini menggunakan 1.000 sampel yang dipilih secara acak untuk mengurangi kompleksitas komputasi dan memudahkan proses eksplorasi hasil tanpa menghilangkan keberagaman karakteristik kendaraan. Jumlah sampel tersebut merepresentasikan sekitar 13,5% dari total populasi dan dianggap memadai untuk menunjukkan pola perankingan dalam pendekatan MCDA. Kriteria yang digunakan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Data

Kode	Kriteria	Tipe	Satuan
C1	Engine Size	Cost	Liter
C2	Cylinders	Cost	Unit
C3	Fuel Consumption City	Cost	L/100km
C4	Fuel Consumption Highway	Cost	L/100km
C5	Fuel Consumption Comb (mpg)	Benefit	mpg
C6	CO2 Emissions	Cost	g/km

C1 (*Engine Size*) dikategorikan sebagai *cost* karena kapasitas mesin yang lebih besar umumnya meningkatkan konsumsi bahan bakar dan emisi [14]. C2 (*Cylinders*) termasuk *cost* karena jumlah silinder yang lebih banyak cenderung menghasilkan konsumsi bahan bakar dan emisi yang lebih tinggi [15]. C3 (*Fuel Consumption City*) dan C4 (*Fuel Consumption Highway*) merupakan *cost* karena nilai dalam satuan L/100 km harus diminimalkan agar kendaraan lebih efisien. C5 (*Fuel Consumption Comb – mpg*) dikategorikan sebagai *benefit* karena semakin

besar nilai mpg menunjukkan efisiensi bahan bakar yang lebih baik [16]. C6 (*CO₂ Emissions*) termasuk *cost* karena semakin kecil emisi yang dihasilkan, semakin ramah lingkungan kendaraan tersebut.

2.2 Penentuan Kriteria Evaluasi

Berbeda dengan formulasi TOPSIS klasik yang menggunakan normalisasi vektor, penelitian ini menerapkan normalisasi berbasis rasio cost-benefit untuk mengubah seluruh kriteria ke rentang 0-1. Pendekatan ini dipilih karena memberikan interpretasi yang lebih sederhana pada data kendaraan yang memiliki satuan pengukuran berbeda, sekaligus mempertahankan arah preferensi setiap kriteria sebelum proses pembobotan dan perankingan dilakukan. Setelah proses normalisasi, tahapan selanjutnya mengikuti prosedur TOPSIS melalui pembentukan matriks berbobot, penentuan solusi ideal, perhitungan jarak Euclidean, dan perhitungan Closeness Coefficient [17]. Untuk kriteria *cost*, normalisasi dilakukan dengan rumus 1.

$$r_{ij} = \frac{\min(x_j)}{x_{ij}} \quad (1)$$

Rumus ini digunakan karena nilai yang lebih kecil lebih diutamakan. Semakin kecil nilai asli suatu alternatif, maka hasil normalisasinya akan semakin mendekati 1 [18]. Untuk kriteria *benefit*, normalisasi dilakukan dengan rumus 2.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_j)} \quad (2)$$

Rumus ini digunakan karena nilai yang lebih besar lebih diutamakan. Semakin besar nilai asli suatu alternatif, maka hasil normalisasinya akan semakin mendekati 1 [19]. Hasil normalisasi menghasilkan matriks $R = [r_{ij}]$ yang seluruh nilainya berada pada rentang 0-1. Contoh hasil normalisasi lima alternatif pertama ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Normalisasi Matriks Keputusan (5 Alternatif Pertama)

Engine Size(L)	Cylinders	Fuel Consumption City (L/100 km)	Fuel Consumption Hwy (L/100 km)	CO2 Emissions(g/km)	Fuel Consumption Comb (mpg)
0.333333	0.500	0.354839	0.500000	0.415020	0.406250
0.227273	0.375	0.254335	0.387931	0.305233	0.296875
0.161290	0.375	0.273292	0.394737	0.326087	0.312500
0.188679	0.375	0.301370	0.436893	0.353535	0.343750
0.250000	0.500	0.307692	0.378151	0.340909	0.328125

Tabel 2 menunjukkan hasil normalisasi matriks keputusan menggunakan metode normalisasi cost dan benefit. Seluruh nilai telah berada pada rentang 0–1 sehingga dapat digunakan pada tahap pembobotan dan perhitungan solusi ideal dalam metode TOPSIS.

2.3 Penentuan Bobot Kriteria dengan AHP

Matriks perbandingan berpasangan disusun berdasarkan kajian literatur terkait faktor-faktor yang memengaruhi keberlanjutan kendaraan, khususnya yang berkaitan dengan emisi karbon, karakteristik mesin, dan efisiensi bahan bakar [20]. Berdasarkan kajian literatur, kriteria *CO₂ Emissions* ditempatkan sebagai kriteria paling penting karena secara langsung merepresentasikan dampak lingkungan kendaraan. Selanjutnya, *Fuel Consumption Comb* (mpg) diberikan prioritas tinggi karena menggambarkan efisiensi bahan bakar secara keseluruhan. Kriteria *Fuel Consumption City* dan *Fuel Consumption Highway* juga memiliki pengaruh penting karena berkaitan langsung dengan konsumsi energi kendaraan pada kondisi operasional yang berbeda. Sementara itu, *Engine Size* dan *Cylinders* diposisikan sebagai kriteria pendukung karena pengaruhnya terhadap keberlanjutan kendaraan bersifat tidak langsung melalui konsumsi bahan bakar dan emisi yang dihasilkan. Berdasarkan urutan tersebut, diperoleh matriks perbandingan berpasangan yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Matriks Perbandingan

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.000000	3.0	0.200000	0.200000	0.142857	0.142857
C2	0.333333	1.0	0.142857	0.142857	0.111111	0.111111
C3	5.000000	7.0	1.000000	3.000000	0.333333	0.200000
C4	5.000000	7.0	0.333333	1.000000	0.333333	0.200000
C5	7.000000	9.0	3.000000	3.000000	1.000000	0.333333
C6	7.000000	9.0	5.000000	5.000000	3.000000	1.000000

2.4 Perhitungan Consistency Index (CI) dan Consistency Ration (CR)

Perhitungan ini digunakan untuk menentukan CI dan CR guna menguji tingkat konsistensi matriks perbandingan berpasangan pada metode AHP [21]. Nilai λ_{max} diperoleh dari hasil perkalian matriks perbandingan dengan vektor bobot prioritas, kemudian digunakan untuk menghitung CI dengan persamaan 3.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

Selanjutnya, nilai CR diperoleh dengan membagi CI dengan *Random Index* (RI). Untuk matriks berukuran $n = 6$ digunakan nilai RI sebesar 1,24 [22]. Hasil perhitungan menunjukkan nilai CR sebesar 0,0964. Karena nilai $CR < 0,1$, maka matriks perbandingan berpasangan dinyatakan konsisten, sehingga bobot kriteria yang diperoleh dapat digunakan pada tahap selanjutnya, yaitu metode TOPSIS.

2.5 Penyusunan Matriks Keputusan (X)

Setelah bobot kriteria diperoleh dari metode AHP dan dinyatakan konsisten ($CR < 0,1$), eputus selanjutnya eputu penerapan metode TOPSIS untuk menentukan peringkat alternatif kendaraan [23]. Matriks eputusan dibentuk dari 1.000 alternatif kendaraan dan enam kriteria evaluasi. Setiap elemen x_{ij} merepresentasikan nilai kriteria ke- j untuk alternatif ke- i yang dapat dilihat pada persamaan 4.

$$X = [x_{ij}] \quad (4)$$

Tahap ini penting karena menjadi dasar seluruh proses evaluasi. Data yang digunakan telah melalui proses seleksi atribut sehingga hanya kriteria yang relevan terhadap aspek keberlanjutan yang dipertahankan. Karena setiap kriteria memiliki satuan dan skala berbeda (liter, unit, L/100km, mpg, g/km), maka diperlukan proses normalisasi agar seluruh nilai berada dalam skala yang sebanding [24]. Untuk kriteria *cost* (semakin kecil semakin baik) dapat dituliskan seperti persamaan 5.

$$r_{ij} = \frac{\min(x_j)}{x_{ij}} \quad (5)$$

Untuk kriteria *benefit* (semakin besar semakin baik) yang dapat dilihat pada persamaan 6.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_j)} \quad (6)$$

Normalisasi ini memastikan bahwa seluruh nilai berada pada rentang 0–1, sehingga tidak ada kriteria yang mendominasi hanya karena perbedaan skala numerik. Tahap ini merupakan inti kombinasi AHP–TOPSIS dengan rumus yang dapat digambarkan pada persamaan 7.

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (7)$$

Tahap ini mengintegrasikan preferensi subjektif (hasil AHP) dengan evaluasi kuantitatif (TOPSIS) [25]. Tanpa tahap ini, bobot AHP tidak akan berpengaruh pada ranking akhir.

2.6 Menentukan Solusi Ideal (A^+) dan (A^-)

Solusi ideal positif adalah kondisi terbaik yang mungkin dicapai dengan nilai maksimum untuk kriteria *benefit* dan nilai minimum untuk kriteria *cost* yang dapat dilihat pada persamaan 8 [25].

$$A^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+) \quad (8)$$

Solusi ini merepresentasikan kendaraan “paling ideal” secara teoritis. Selain itu, untuk menentukan solusi ideal negatif adalah kondisi terburuk adalah dengan nilai minimum untuk benefit dan nilai maksimum untuk *cost* dapat dilihat pada persamaan 9. Ini menjadi pembanding ekstrem terhadap solusi ideal positif.

$$A^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-) \quad (9)$$

2.7 Menghitung Jarak Euclidean

Pada tahap ini dilakukan perhitungan jarak setiap alternatif terhadap solusi ideal positif (A^+) dan solusi ideal negatif (A^-). Perhitungan jarak menggunakan metode *Euclidean Distance* karena mampu mengukur kedekatan setiap alternatif terhadap titik referensi dalam ruang multi-kriteria. Secara matematis, jarak terhadap solusi ideal positif dihitung menggunakan persamaan 10, sedangkan jarak terhadap solusi ideal negatif dihitung dengan 11.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad (10)$$

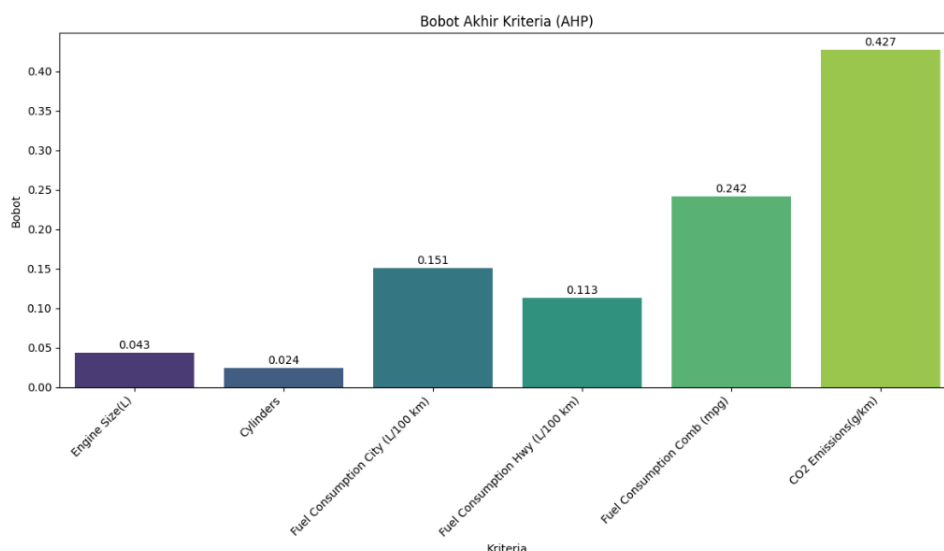
$$D_i^- = \sqrt{\sum (v_{ij} - A_j^-)^2} \quad (11)$$

2.8 Menghitung Closeness Coefficient (CC)

Nilai CC berada pada rentang 0–1. Alternatif dengan nilai CC tertinggi dinyatakan sebagai kendaraan paling ramah lingkungan. Secara praktis, framework AHP–TOPSIS yang digunakan lebih feasible untuk diimplementasikan dalam bentuk aplikasi sistem pendukung keputusan berbasis web atau dashboard analitik, karena struktur perhitungannya jelas, terukur, dan tidak memerlukan pendekatan fuzzy yang kompleks.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap ini ditampilkan bobot akhir setiap kriteria yang diperoleh dari metode AHP. Bobot tersebut menunjukkan tingkat kepentingan relatif masing-masing kriteria dalam proses pengambilan keputusan. Bobot terbesar menunjukkan kriteria yang paling berpengaruh terhadap hasil akhir perankingan alternatif [26]. Sebaliknya, bobot yang kecil menunjukkan kontribusi yang lebih rendah dalam menentukan keputusan [27]. Hasil bobot divisualisasikan dalam bentuk diagram batang (*bar chart*) untuk memperjelas perbandingan antar kriteria yang dapat dilihat pada Gambar 2. Visualisasi ini membantu mengidentifikasi kriteria dominan dalam sistem pendukung keputusan.



Gambar 2. Bobot Akhir Kriteria (AHP)

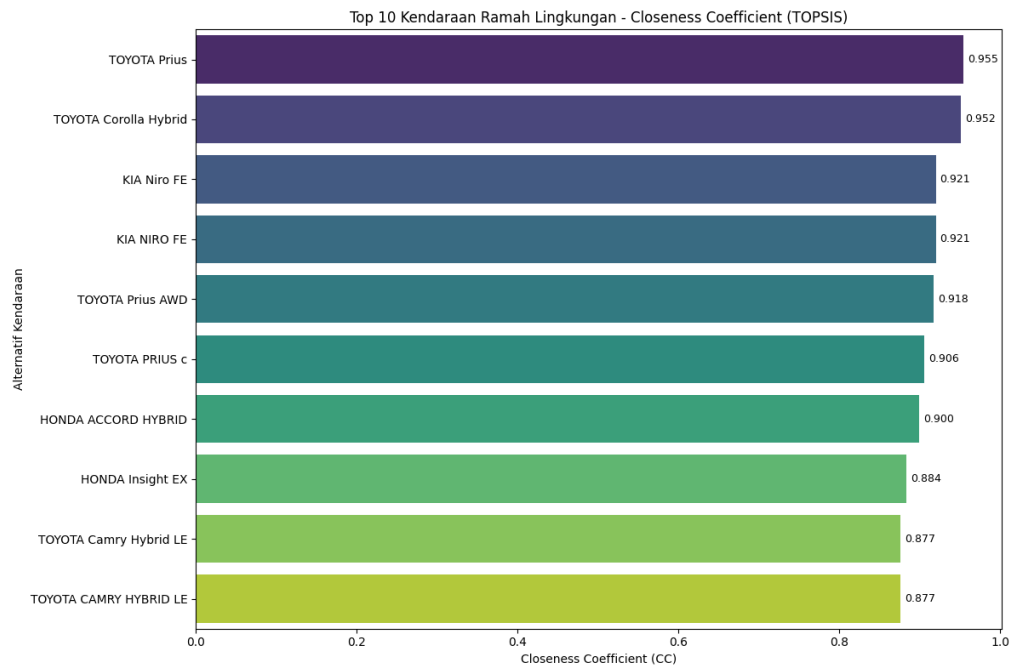
Gambar 2 Bobot Akhir Kriteria (AHP) menunjukkan bahwa kriteria *CO₂ Emissions* memiliki bobot tertinggi sebesar 0,427. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat emisi karbon menjadi faktor utama dalam menentukan kendaraan ramah lingkungan. Sebaliknya, kriteria *Cylinders* (0,024) dan *Engine Size* (0,043) memiliki bobot paling kecil, sehingga kontribusinya terhadap keputusan akhir relatif rendah dibandingkan kriteria efisiensi bahan bakar dan emisi.

Dominasi bobot pada *CO₂ Emissions* dan *Fuel Consumption Comb* (mpg) mengindikasikan bahwa sistem pengambilan keputusan lebih memprioritaskan aspek lingkungan dan efisiensi bahan bakar dibandingkan karakteristik teknis mesin. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa tingkat emisi karbon merupakan indikator utama dalam evaluasi kendaraan ramah lingkungan [28]. Beberapa studi juga menunjukkan bahwa kendaraan hybrid cenderung memperoleh nilai evaluasi lebih tinggi karena memiliki kombinasi efisiensi bahan bakar dan emisi yang rendah [29]. Dengan demikian, temuan dalam penelitian ini memperkuat hasil penelitian terdahulu terkait dominasi kriteria lingkungan dalam pengambilan keputusan kendaraan ramah lingkungan. Setelah bobot kriteria diperoleh, metode TOPSIS digunakan untuk menghitung nilai preferensi setiap alternatif berdasarkan jaraknya terhadap solusi ideal positif dan solusi ideal negatif. Nilai preferensi yang lebih tinggi menunjukkan bahwa alternatif tersebut semakin mendekati kondisi ideal. Berdasarkan Tabel 4, sepuluh kendaraan dengan nilai preferensi tertinggi didominasi oleh kendaraan jenis hybrid. Toyota Prius (0,9546) menempati peringkat pertama, diikuti oleh Toyota Corolla Hybrid (0,9518) dan KIA Niro FE (0,9205). Dominasi kendaraan hybrid menunjukkan bahwa kombinasi teknologi elektrifikasi dan mesin konvensional mampu memberikan keseimbangan antara efisiensi bahan bakar dan pengurangan emisi karbon. Dalam penelitian ini, kriteria *CO₂ Emissions* memiliki bobot tertinggi sebesar 0,427, diikuti oleh *Fuel Consumption Comb* (mpg) sebesar 0,242. Kedua kriteria tersebut secara bersama-sama menyumbang lebih dari 66% dari total bobot keputusan. Oleh karena itu, kendaraan yang mampu mempertahankan emisi rendah sekaligus efisiensi bahan bakar tinggi memperoleh keuntungan yang signifikan dalam proses perankingan. Temuan ini menunjukkan bahwa aspek lingkungan memiliki pengaruh yang lebih besar dibandingkan karakteristik teknis kendaraan seperti *Engine Size* dan *Cylinders*.

Tabel 4. 10 Ranking Pertama Dari Make Dan Model Kendaraan Ramah Lingkungan

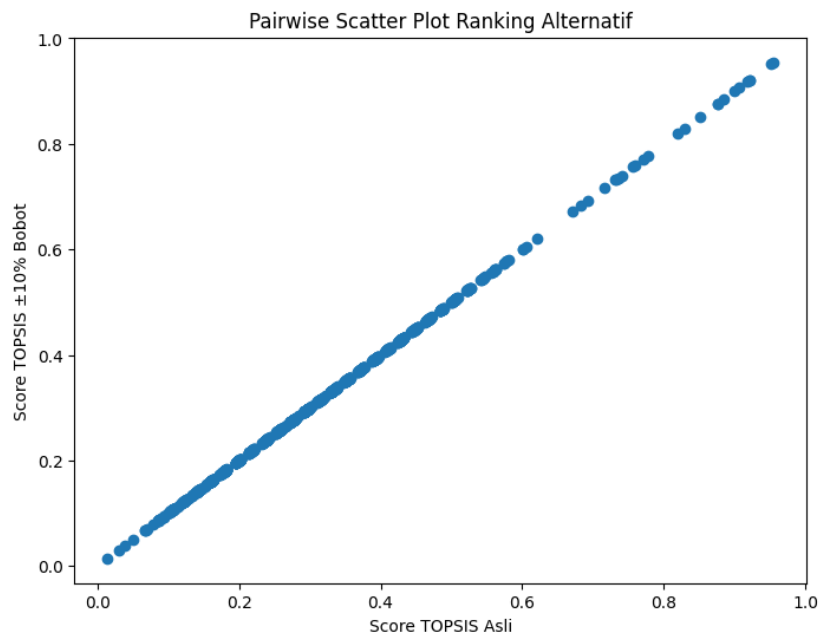
	Make	Model	Score
945	TOYOTA	Prius	0.954623
592	TOYOTA	Corolla Hybrid	0.951768
521	KIA	Niro FE	0.920506
948	TOYOTA	Prius AWD	0.917576
721	TOYOTA	PRIUS c	0.906087
841	HONDA	ACCORD HYBRID	0.899555
34	HONDA	Insight EX	0.883653
963	TOYOTA	CAMRY HYBRID LE	0.876686

Untuk memperjelas perbandingan antar alternatif, ditampilkan grafik 10 alternatif terbaik dalam bentuk diagram batang. Gambar 3 Top 10 Kendaraan Ramah Lingkungan memperlihatkan distribusi nilai preferensi pada sepuluh alternatif terbaik. Dominasi kendaraan *hybrid* pada peringkat teratas menunjukkan konsistensi antara hasil AHP dan TOPSIS, di mana kriteria emisi dan efisiensi bahan bakar memiliki pengaruh terbesar. Kendaraan *hybrid* memiliki emisi lebih rendah serta konsumsi bahan bakar yang lebih efisien, sehingga memperoleh nilai preferensi yang lebih tinggi dibandingkan kendaraan konvensional. Hasil penelitian juga menunjukkan adanya trade-off antar kriteria. Kendaraan dengan kapasitas mesin yang lebih besar umumnya memiliki performa yang lebih tinggi, namun cenderung menghasilkan konsumsi bahan bakar dan emisi yang lebih besar. Sebaliknya, kendaraan hybrid mampu mengurangi dampak negatif tersebut melalui optimalisasi penggunaan energi sehingga tetap mempertahankan efisiensi bahan bakar yang tinggi. Hal ini menjelaskan mengapa beberapa kendaraan dengan spesifikasi mesin yang lebih besar tidak menempati posisi teratas meskipun memiliki performa teknis yang baik. Hasil perhitungan menunjukkan koefisien korelasi Spearman sebesar 0,998. Nilai yang mendekati 1 menunjukkan bahwa perubahan bobot sebesar 10% tidak mengubah urutan peringkat secara signifikan. Dengan demikian, hasil perankingan yang dihasilkan oleh metode AHP–TOPSIS dapat dianggap stabil terhadap perubahan kecil pada bobot kriteria.



Gambar 3. Top 10 Kendaraan Ramah Lingkungan

Selanjutnya dilakukan analisis sensitivitas untuk menguji kestabilan hasil perankingan terhadap perubahan bobot kriteria. Analisis sensitivitas dilakukan dengan meningkatkan bobot kriteria CO₂ Emissions sebesar 10%, kemudian bobot kriteria lainnya disesuaikan secara proporsional agar total bobot tetap bernilai satu. Hasil perankingan setelah perubahan bobot dibandingkan dengan hasil awal menggunakan koefisien korelasi Spearman Rank untuk mengukur tingkat kestabilan peringkat alternatif.



Gambar 4. Visualisasi Scatter Plot

Berdasarkan Gambar 4 Visualisasi *Scatter Plot*, terlihat bahwa titik-titik data membentuk pola linear yang sangat kuat dan mendekati garis diagonal. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan bobot tidak menyebabkan perubahan signifikan terhadap nilai preferensi maupun urutan peringkat alternatif. Berdasarkan Gambar 4, titik-titik data membentuk pola linear yang sangat kuat dan mendekati garis diagonal. Dengan demikian, metode AHP–TOPSIS

menunjukkan tingkat kestabilan yang baik terhadap perubahan bobot pada skenario pengujian yang dilakukan [11] menggunakan pendekatan Fuzzy Number–TOPSIS (FN–TOPSIS) dengan lima metode pembobotan berbeda, yaitu RANCOM, LBWA, FUCOM, BWM, dan AHP. Fokus penelitian tersebut adalah membandingkan stabilitas hasil perankingan antar metode pembobotan serta menganalisis sensitivitas dalam kondisi fuzzy. Meskipun memberikan analisis komprehensif, pendekatan tersebut memiliki kompleksitas perhitungan yang relatif tinggi sehingga kurang praktis untuk implementasi sistem pendukung keputusan yang sederhana. Sementara itu, penelitian [12] menggunakan metode AHP untuk menentukan prioritas kebijakan mobilitas urban berbasis pendekatan STEEP. Penelitian tersebut berfokus pada penentuan kebijakan makro dan tidak melakukan perankingan kendaraan secara individual, serta tidak mengintegrasikan metode pemeringkatan seperti TOPSIS. Berbeda dengan kedua penelitian tersebut, penelitian ini mengintegrasikan AHP sebagai metode pembobot tunggal yang konsisten dengan TOPSIS sebagai metode perankingan, sehingga menghasilkan sistem yang lebih sistematis, sederhana, dan mudah direplikasi [30]. Beberapa penelitian sebelumnya telah memanfaatkan dataset serupa dalam konteks analisis keberlanjutan dan pengambilan keputusan berbasis multi-kriteria. Misalnya, penelitian pertama mengintegrasikan pendekatan *Predictive Life Cycle Assessment* (LCA) berbasis *Gaussian Process Regression* (GPR), *Stochastic Forest* untuk pembobotan dinamis dalam MCDA, serta optimasi multi-objektif menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Fokus penelitian tersebut adalah peningkatan efisiensi dan keberlanjutan dalam proses *Additive Manufacturing* melalui pendekatan *machine learning* dan optimasi *bio-inspired*. Penelitian ini memiliki beberapa kontribusi utama. Pertama, penggunaan satu metode pembobotan yang konsisten (AHP) membuat proses evaluasi lebih sederhana dan aplikatif. Kedua, bobot kriteria telah melalui uji konsistensi ($CR < 0,1$), sehingga menjamin validitas logika penilaian sebelum diterapkan dalam TOPSIS. Ketiga, analisis sensitivitas menghasilkan koefisien korelasi Spearman sebesar 0,998, yang menunjukkan bahwa hasil perankingan tetap stabil terhadap perubahan bobot sebesar 10%. Secara praktis, framework AHP–TOPSIS yang digunakan lebih feasible untuk dikembangkan menjadi aplikasi sistem pendukung keputusan berbasis web atau *dashboard* analitik karena struktur perhitungannya jelas dan tidak memerlukan pendekatan fuzzy yang kompleks. Penelitian ini tidak melakukan perbandingan kuantitatif dengan metode MCDA lainnya seperti SAW, VIKOR, MOORA, maupun PROMETHEE. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat mengevaluasi perbedaan hasil perankingan antar metode untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai performa AHP–TOPSIS dalam pemilihan kendaraan ramah lingkungan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengintegrasikan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) dan Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) untuk mendukung proses pemilihan kendaraan ramah lingkungan berdasarkan berbagai kriteria teknis dan lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kriteria CO₂ Emissions merupakan faktor yang paling berpengaruh dalam proses evaluasi, diikuti oleh Fuel Consumption Comb (mpg), sehingga aspek lingkungan dan efisiensi bahan bakar menjadi pertimbangan utama dalam menentukan kendaraan yang lebih berkelanjutan. Berdasarkan hasil perankingan, kendaraan hybrid seperti Toyota Prius dan Toyota Corolla Hybrid memperoleh nilai preferensi tertinggi karena mampu memberikan keseimbangan antara efisiensi bahan bakar dan rendahnya emisi karbon.

Secara teoretis, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi AHP dan TOPSIS berpotensi menjadi pendekatan multi-kriteria yang sistematis untuk mengevaluasi kendaraan ramah lingkungan melalui integrasi proses pembobotan kriteria dan perankingan alternatif. Secara praktis, framework yang dihasilkan berpotensi mendukung pengembangan sistem pendukung keputusan pada bidang transportasi berkelanjutan karena memiliki struktur perhitungan yang relatif sederhana, transparan, dan mudah direplikasi.

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Dataset yang digunakan berasal dari sumber global sehingga belum secara khusus merepresentasikan karakteristik kendaraan yang beredar di Indonesia. Selain itu, evaluasi hanya mempertimbangkan parameter teknis kendaraan dan belum memasukkan faktor ekonomi seperti harga kendaraan, biaya operasional, maupun lifecycle emissions yang mencakup proses produksi hingga daur ulang kendaraan. Analisis sensitivitas juga masih terbatas pada skenario perubahan bobot sebesar 10%.

Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat mengintegrasikan kriteria tambahan seperti harga kendaraan, biaya kepemilikan, dan ketersediaan infrastruktur pengisian daya. Penelitian berikutnya juga dapat menggunakan data yang lebih relevan dengan kondisi Indonesia, melibatkan expert judgment dalam penyusunan matriks AHP, serta membandingkan performa AHP–TOPSIS dengan metode MCDA lainnya seperti SAW, VIKOR, MOORA, dan PROMETHEE untuk memperoleh evaluasi yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. A. R. Kiribou *et al.*, "Road Transport and Urban Mobility Greenhouse Gas Emissions Factor for Air Pollution Modeling in Burkina Faso," *Journal of Urban Mobility*, vol. 7, p. 100106, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.urbmob.2025.100106.
- [2] B. Yengil Bülbül and M. B. Baydar, "Decarbonizing Transportation: Cross-Country Evidence on Electric Vehicle Sales and Carbon Dioxide Emissions," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 12, p. 660, Dec. 2025, doi: 10.3390/wevj16120660.
- [3] IEA, "Total CO₂ Emissions," 2025. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.iea.org/world/emissions>
- [4] D. Rimpas, D. E. Barkas, V. A. Orfanos, and I. Christakis, "Decarbonizing the Transportation Sector: A Review on the Role of Electric Vehicles Towards the European Green Deal for the New Emission Standards," *Air*, vol. 3, no. 2, p. 10, Apr. 2025, doi: 10.3390/air3020010.
- [5] H. Ahmad, M. Yaqub, and S. H. Lee, "Global trends in carbon neutrality: a scientometric review on energy transition challenges, practices, policies, and opportunities," *Environ. Dev. Sustain.*, Aug. 2025, doi: 10.1007/s10668-025-06507-7.
- [6] M. Madanchian and H. Taherdoost, "Applications of Multi-Criteria Decision Making in Information Systems for Strategic and Operational Decisions," *Computers*, vol. 14, no. 6, p. 208, May 2025, doi: 10.3390/computers14060208.
- [7] S. Muruganandan and A. M. Sharma, "Does the technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) help to find winners in mutual funds?," *OPSEARCH*, vol. 62, no. 4, pp. 2314–2337, Dec. 2025, doi: 10.1007/s12597-024-00881-y.
- [8] F. Han, R. N. Alkhawaji, and M. M. Shafieezadeh, "Evaluating sustainable water management strategies using TOPSIS and fuzzy TOPSIS methods," *Appl. Water Sci.*, vol. 15, no. 1, p. 4, Jan. 2025, doi: 10.1007/s13201-024-02336-7.
- [9] C. Kampalasiri, K. Pitiruek, and P. Sureeyatanapas, "An enhanced TOPSIS method for resilient supplier selection under data uncertainty," *International Journal of Management Science and Engineering Management*, vol. 21, no. 1, pp. 36–51, Jan. 2026, doi: 10.1080/17509653.2025.2544569.
- [10] B. Srđević and Z. Srđević, "Incomplete Judgments in AHP: Transition-Based Approaches, Aggregation Strategies, and Their Impact on Decision Outcomes," *Algorithms*, vol. 19, no. 1, p. 2, Dec. 2025, doi: 10.3390/a19010002.
- [11] B. Kizielewicz, R. Pawlak, M. Gandor, and W. Sałabun, "A robust framework for sustainable vehicle assessment: Integrating FN-TOPSIS with subjective weighting methods," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 270, pp. 5764–5775, 2025, doi: 10.1016/j.procs.2025.10.045.
- [12] M. Muller, G. H. de A. Correia, S. Park, Y. Zhang, B. Fusco, and R. Lee, "Strategic sustainability assessment of rideshare and automated vehicles using the analytical hierarchy process (AHP)," *Research in Transportation Business & Management*, vol. 60, p. 101336, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.rtbm.2025.101336.
- [13] S. Li, R. Zhou, and H. Huang, "Multidimensional Evaluation of Autonomous Driving Test Scenarios Based on AHP-EWN-TOPSIS Models," *Automotive Innovation*, vol. 8, no. 2, pp. 237–251, May 2025, doi: 10.1007/s42154-024-00344-6.
- [14] T. Žvirblis, K. Čižiūnienė, and J. Matijošius, "Application of Machine Learning for Fuel Consumption and Emission Prediction in a Marine Diesel Engine Using Diesel and Waste Cooking Oil," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 7, p. 1328, Jul. 2025, doi: 10.3390/jmse13071328.
- [15] H. V *et al.*, "Enhanced combustion and emission characteristics of diesel-algae biodiesel-hydrogen blends in a single-cylinder diesel engine," *Results in Engineering*, vol. 26, p. 104676, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104676.
- [16] S. Yoo, J. Shin, and S.-H. Choi, "Machine learning vehicle fuel efficiency prediction," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 14815, Apr. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-96999-0.
- [17] S. Malefaki, D. Markatos, A. Filippatos, and S. Pantelakis, "A Comparative Analysis of Multi-Criteria Decision-Making Methods and Normalization Techniques in Holistic Sustainability Assessment for Engineering Applications," *Aerospace*, vol. 12, no. 2, p. 100, Jan. 2025, doi: 10.3390/aerospace12020100.

- [18] G. Patel, S. Das, and R. Das, "Evaluation of optimal normalization techniques in multi-criteria decision-making to rank CMIP6 climate models," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 156, no. 7, p. 385, Jul. 2025, doi: 10.1007/s00704-025-05617-6.
- [19] J. K. Runtuk, S. Christanto, and P. K. Ng, "Optimizing Supplier Selection: A Comparative Study of Fuzzy VIKOR and Fuzzy Moora for Performance-Based Decision Making," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 8456–8468, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3525362.
- [20] T. Hawkins and J. Rawal, "Improving Consistency in the Analytic Hierarchy Process: A Comparative Study of Pairwise Comparisons and Simultaneous Comparison Scales," 2025, pp. 325–340. doi: 10.1007/978-3-031-93429-2_22.
- [21] S. Frish, I. Talmor, O. Hadar, M. Shoshany, and A. Shapira, "Enhancing consistency of AHP-based expert judgements: A new approach and its implementation in an interactive tool," *MethodsX*, vol. 14, p. 103341, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.mex.2025.103341.
- [22] C. Uboh, F. E. Ukrakpor, and B. O. Neville, "Analysis of Supplier Selection For Diesel Generators Using Analytic Hierarchy Process (AHP)," Nov. 17, 2025. doi: 10.21203/rs.3.rs-8112994/v1.
- [23] N. Komatina, "A Novel BWM-RADAR Approach for Multi-Attribute Selection of Equipment in the Automotive Industry," *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*, vol. 2, no. 1, pp. 104–120, Feb. 2025, doi: 10.31181/smeor21202531.
- [24] M. H. Abidi, M. K. Mohammed, and H. Alkhalefah, "Predictive Maintenance Planning for Industry 4.0 Using Machine Learning for Sustainable Manufacturing," *Sustainability*, vol. 14, no. 6, p. 3387, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14063387.
- [25] M. Madanchian and H. Taherdoost, "A comprehensive guide to the TOPSIS method for multi-criteria decision making," *Sustainable Social Development*, vol. 1, no. 1, Aug. 2023, doi: 10.54517/ssd.v1i1.2220.
- [26] S. Zakeri, P. Chatterjee, D. Konstantas, and F. Ecer, "A decision analysis model for material selection using simple ranking process," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 8631, May 2023, doi: 10.1038/s41598-023-35405-z.
- [27] M. Awad and S. Fraihat, "Recursive Feature Elimination with Cross-Validation with Decision Tree: Feature Selection Method for Machine Learning-Based Intrusion Detection Systems," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 12, no. 5, p. 67, Sep. 2023, doi: 10.3390/jsan12050067.
- [28] F. Ashraf *et al.*, "Assessment and ranking of different vehicles carbon footprint: A comparative study utilizing entropy and TOPSIS methodologies," *Green Technologies and Sustainability*, vol. 3, no. 1, p. 100128, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.grets.2024.100128.
- [29] A. Hebala, M. I. Abdelkader, and R. A. Ibrahim, "Comparative Analysis of Energy Consumption and Performance Metrics in Fuel Cell, Battery, and Hybrid Electric Vehicles Under Varying Wind and Road Conditions," *Technologies (Basel)*, vol. 13, no. 4, p. 150, Apr. 2025, doi: 10.3390/technologies13040150.
- [30] J. M. Raut *et al.*, "Life cycle assessment and multicriteria decision making analysis of additive manufacturing processes towards optimal performance and sustainability," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 25167, Jul. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-92025-5.