

## STRATEGI ADAPTASI DAN MITIGASI PENURUNAN EMISI GAS RUMAH KACA (GRK) MELALUI SEKTOR TRANSPORTASI DI KOTA BOGOR

Rendy Prihartono<sup>1\*</sup>, A Faroby Falatehan<sup>1</sup>, Widyastutik<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department Regional Development Management Faculty of Economics and Management, IPB University, Bogor 16680, Indonesia

\*Email: [masrendy@apps.ipb.ac.id](mailto:masrendy@apps.ipb.ac.id)

### ABSTRAK

Sektor transportasi merupakan salah satu penyumbang utama emisi gas rumah kaca (GRK) di Kota Bogor, yang berdampak pada penurunan kualitas udara dan perubahan iklim. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi strategi mitigasi dan adaptasi yang paling relevan untuk menurunkan emisi GRK dari sektor transportasi di Kota Bogor. Berdasarkan analisis, peremajaan armada angkutan umum muncul sebagai strategi mitigasi paling efektif, dengan bobot prioritas tertinggi. Kebijakan ini melibatkan penggantian kendaraan lama dengan teknologi ramah lingkungan, seperti bus listrik atau berbahan bakar gas. Selain itu, reformasi sistem transit dan penerapan manajemen parkir mendukung pengurangan emisi melalui peningkatan aksesibilitas transportasi umum dan pengendalian penggunaan kendaraan pribadi. Di sisi lain, strategi adaptasi seperti pembatasan jumlah kendaraan dan peningkatan ruang terbuka hijau juga dinilai penting untuk mengurangi kepadatan lalu lintas dan meningkatkan kualitas lingkungan. Rekomendasi kebijakan mencakup integrasi berbagai strategi ini melalui insentif finansial, pembaruan regulasi, dan edukasi publik untuk menciptakan sistem transportasi yang berkelanjutan dan rendah emisi. Penelitian ini memberikan panduan strategis bagi pemerintah daerah dalam merumuskan kebijakan transportasi ramah lingkungan yang efektif di Kota Bogor.

**Kata kunci:** adaptasi dan mitigasi, emisi gas rumah kaca, transportasi

### ***ADAPTATION AND MITIGATION STRATEGIES FOR REDUCING GREENHOUSE GAS (GHG) EMISSIONS THROUGH THE TRANSPORTATION SECTOR IN BOGOR CITY***

#### ***ABSTRACT***

*The transportation sector is one of the main contributors to greenhouse gas (GHG) emissions in Bogor City, which has an impact on declining air quality and climate change. This study aims to identify the most relevant mitigation and adaptation strategies to reduce GHG emissions from the transportation sector in Bogor City. Based on the analysis, the rejuvenation of the public transportation fleet emerged as the most effective mitigation strategy, with the highest priority weight. This policy involves replacing old vehicles with environmentally friendly technology, such as electric or gas-fueled buses. In addition, transit system reforms and the implementation of parking management support emission reductions through improved public transportation accessibility and control of the use of private vehicles. On the other hand, adaptation strategies such as limiting the number of vehicles and increasing green open spaces are also considered important to reduce traffic density and improve environmental quality. Policy recommendations include the integration of these strategies through financial incentives, regulatory updates, and public education to create a sustainable and low-emission transportation system. This study provides strategic guidance for local governments in formulating effective environmentally friendly transportation policies in Bogor City.*

**Keywords:** *adaptation and mitigation, greenhouse gas emissions, transportation.*

## PERNYATAAN KUNCI

- Perluasan rute dan subsidi tarif transportasi umum menjadi strategi utama untuk meningkatkan jumlah pengguna, sekaligus mengurangi emisi dari kendaraan pribadi.
- Pemberian insentif pajak dan pembangunan infrastruktur pengisian daya mendukung percepatan penggunaan kendaraan listrik di Kota Bogor.
- Jalur sepeda yang aman dan trotoar yang nyaman mendorong masyarakat beralih ke moda transportasi non-motor, yang lebih ramah lingkungan.
- Implementasi sistem manajemen lalu lintas pintar mampu mengurangi kemacetan dan meningkatkan efisiensi konsumsi bahan bakar kendaraan bermotor.
- Pemanfaatan energi surya pada transportasi umum menjadi langkah strategis dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.
- Edukasi masyarakat tentang pentingnya transportasi ramah lingkungan melalui kampanye dan promosi kebiasaan berjalan kaki atau bersepeda.
- Monitoring berkala melalui indikator kinerja utama (KPI) memastikan kebijakan tetap relevan dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan serta hambatan di lapangan.
- Sinergi antara pemerintah, swasta, dan masyarakat dalam perencanaan dan pelaksanaan kebijakan menjadi kunci keberhasilan penurunan emisi GRK.

## REKOMENDASI KEBIJAKAN

Untuk menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) dari sektor transportasi di Kota Bogor, kebijakan yang paling relevan adalah peremajaan armada angkutan umum. Strategi ini melibatkan penggantian kendaraan umum yang sudah usang dengan armada yang menggunakan teknologi ramah lingkungan, seperti bus listrik atau berbahan bakar gas. Langkah ini dapat mengurangi emisi secara signifikan sekaligus meningkatkan efisiensi operasional transportasi umum. Pemerintah daerah perlu memberikan insentif, seperti pembebasan pajak atau subsidi, untuk mendorong operator transportasi mempercepat peremajaan armada. Selain itu, reformasi sistem transit juga harus menjadi prioritas dengan meningkatkan aksesibilitas dan

kenyamanan transportasi umum, sehingga mampu mengurangi ketergantungan masyarakat pada kendaraan pribadi. Kebijakan ini perlu didukung dengan penerapan manajemen parkir yang efisien, guna mengurangi kemacetan dan mendorong penggunaan transportasi publik. Secara keseluruhan, kombinasi kebijakan peremajaan armada, reformasi transit, dan pengelolaan parkir yang efektif dapat menciptakan transportasi yang lebih ramah lingkungan dan berkontribusi signifikan dalam penurunan emisi GRK di Kota Bogor.

## PENDAHULUAN

Perubahan iklim menjadi permasalahan yang menarik bagi masyarakat global, termasuk Indonesia, karena meningkatnya suhu global yang menyebabkan terjadinya perubahan iklim di berbagai belahan dunia. Menurut Laporan Risiko Global 2020 dari Forum Ekonomi Dunia, perubahan iklim terjadi lebih cepat dari perkiraan orang. Suhu global diperkirakan akan meningkat setidaknya 3 °C pada akhir tahun 2020. Bahkan perubahan iklim memberikan dampak nyata bagi bumi dan penghuninya. Suhu rata-rata global telah meningkat sebesar satu °C dan berdampak pada peningkatan bencana alam (Jong 2022).

Dampak langsung dari perubahan iklim adalah hal ini dapat menambah keadaan darurat seperti hilangnya nyawa, ketegangan sosial dan geopolitik, serta dampak negatif terhadap perekonomian. Salah satu penyebab utama perubahan iklim adalah emisi karbon (Al Ayyubi *et al.* 2024). Emisi karbon adalah pelepasan gas rumah kaca yang dihasilkan dari aktivitas individu atau kelompok dalam periode tertentu, diukur dalam satuan ton atau kilogram setara CO<sub>2</sub> (tCO<sub>2</sub> e atau kg CO<sub>2</sub> e) untuk menunjukkan dampaknya terhadap pemanasan global (Lestari 2019). Secara sederhana, emisi karbon adalah pelepasan karbon ke atmosfer. Emisi karbon merupakan salah satu penyebab perubahan iklim di seluruh dunia (Dasanto *et al.* 2022). Proses perubahan ini secara tidak langsung akan berdampak pada lingkungan dan kesehatan manusia serta menciptakan ketidakstabilan ekonomi. Beberapa kajian penelitian mengenai emisi karbon telah menarik perhatian para peneliti akibat perubahan iklim global yang begitu cepat. Para peneliti telah menemukan bahwa emisi karbon antropogenik sebesar satu triliun ton kemungkinan besar akan menyebabkan

Strategi Adaptasi dan Mitigasi Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (Grk) Melalui Sektor Transportasi di Kota Bogor peningkatan suhu global sebesar dua derajat Celcius (World Economic Forum 2023).

Terdapat dua cara yang dapat dilakukan untuk mengetahui penurunan emisi yang telah dicapai. Pertama, dengan mencari selisih antara baseline emisi GRK pada kondisi *Business as Usual* (BaU) dan hasil inventarisasi emisi pada kondisi sebenarnya. Selisih ini dianggap sebagai penurunan emisi dan dapat dihitung secara historis. Kedua, dengan menghitung penurunan emisi dari setiap aksi mitigasi yang telah dilakukan

(Kementerian ESDM 2023). Sehingga tujuan dari penelitian ini adalah menyusun strategi adaptasi dan mitigasi yang tepat untuk menurunkan emisi GRK dari sektor transportasi di Kota Bogor.

### SITUASI TERKINI

Menurut data Pemerintah Provinsi Jawa Barat, jumlah kendaraan di Kota Bogor meningkat sejak tahun 2013 hingga tahun 2022. Adapun data jumlah kendaraan di Kota Bogor ditunjukkan pada tabel sebagai berikut.

Tabel 1. Jumlah Kendaraan di Kota Bogor Tahun 2018-2023

No	Tahun	Jumlah Kendaraan (Unit)	Growth (%)
1	2018	1.608.455	-
2	2019	1.668.060	3,71
3	2020	1.625.895	-2,53
4	2021	1.641.604	0,97
5	2022	1 666 860	1,54
6	2023	1.666.859	0,00

Sumber: BPS Provinsi Jawa Barat (2024)

Pertumbuhan kendaraan bermotor di Kota Bogor menunjukkan fluktuasi yang menarik dalam beberapa tahun terakhir. Pada tahun 2018, jumlah kendaraan tercatat sebanyak 1.608.455 unit. Pada tahun berikutnya, yaitu 2019, jumlah kendaraan meningkat sebesar 3,71%, mencapai 1.668.060 unit. Namun, pada tahun 2020, terjadi penurunan jumlah kendaraan sebesar 2,53%, dengan total kendaraan menjadi 1.625.895 unit, kemungkinan akibat dampak pandemi COVID-19 yang mempengaruhi mobilitas masyarakat. Meski demikian, pada tahun 2021, pertumbuhan kendaraan kembali positif dengan angka 0,97%, mencapai 1.641.604 unit. Pada tahun 2022, pertumbuhannya sedikit lebih tinggi lagi, sebesar 1,54%, dengan total kendaraan mencapai 1.666.860 unit. Di tahun 2023, jumlah kendaraan tetap stabil dengan pertumbuhan yang hampir tidak berubah, yaitu 0,00%, dengan total 1.666.859 unit. Secara keseluruhan, meskipun terjadi fluktuasi, tren pertumbuhan kendaraan bermotor di Kota Bogor menunjukkan kecenderungan stabil dalam lima tahun terakhir (BPS 2024).

Indonesia telah menetapkan target ambisius untuk penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 31,89% pada tahun 2030 tanpa bantuan internasional, dan 43,2% dengan bantuan internasional. Target ini dituangkan dalam Enhanced Nationally Determined Contribution (E-NDC) Indonesia tahun 2022, sebuah dokumen yang mencerminkan komitmen negara

untuk mengurangi emisi GRK sesuai dengan kesepakatan global. Komitmen ini bermula dari penyampaian NDC pertama Indonesia kepada UNFCCC pada tahun 2016 sebagai bagian dari implementasi Perjanjian Paris. Perjanjian tersebut mewajibkan setiap negara yang meratifikasinya untuk menetapkan target penurunan emisi GRK hingga tahun 2030.

Untuk mencapai target tersebut, Indonesia dapat mengambil berbagai langkah strategis, seperti menghemat penggunaan energi listrik, mengganti pupuk kimia dengan pupuk organik, mengolah limbah dari peternakan, dan menerapkan sertifikasi ISO 14065 bagi perusahaan. Tantangan yang dihadapi cukup besar, mengingat Indonesia merupakan emiten karbon terbesar keenam di dunia. Dua kontributor utama emisi karbon di Indonesia adalah deforestasi yang masif dan ketergantungan tinggi pada batu bara sebagai sumber energi.

### METODE PENELITIAN

Proses Hirarki Analitik (PHA) atau dalam Bahasa Inggris disebut *Analytical Hierarchy Process* (AHP), pertama kali dikembangkan oleh Thomas L. Saaty, seorang ahli matematika dari Universitas Pittsburg, Amerika Serikat pada tahun 1970-an. AHP pada dasarnya didisain untuk menangkap secara rasional persepsi orang yang berhubungan sangat erat dengan permasalahan tertentu melalui prosedur yang didesain untuk sampai pada suatu

skala preferensi diantara berbagai set alternatif. Analisis ini ditujukan untuk membuat suatu model permasalahan yang tidak mempunyai struktur, biasanya ditetapkan untuk memecahkan masalah yang terukur (kuantitatif), masalah yang memerlukan pendapat (*judgement*) maupun pada situasi yang kompleks atau tidak terkerangka, pada situasi dimana data, informasi statistik sangat minim atau tidak ada sama sekali dan hanya bersifat kualitatif yang didasari oleh persepsi, pengalaman ataupun intuisi. AHP ini juga banyak digunakan pada keputusan untuk banyak kriteria, perencanaan, alokasi sumberdaya dan penentuan prioritas dari strategi strategi yang dimiliki pemain dalam situasi konflik (Suryadi dan Ramdhani 1998).

Dalam menyelesaikan permasalahan dengan AHP ada beberapa tahapan dari pengambilan keputusan yaitu (Saaty 1998):

1. Pembuatan konstruksi model; Membangun suatu model dari

permasalahan akan didasarkan komponen-komponen penting dalam masalah tersebut. Kriteria yang relevan dan alternatif keputusan akan distrukturkan ke dalam suatu hierarki dimana semakin tinggi levelnya, maka semakin strategis keputusannya. Sub komponen dan atribut merupakan elemen paling atas pada hierarki. Pemebentukan atribut pada tiap level dan definisi hubungannya akan dibutuhkan dalam konstruksi model.

2. Pembentukan matriks perbandingan berpasangan; Kriteria dan alternatif dilakukan dengan perbandingan berpasangan. Nilai dan definisi pendapat kualitatif dari skala perbandingan mengekspresikan pendapat dapat diukur menggunakan Tabel sebagai berikut.

Tabel 2. Skala Penilaian Perbandingan Pasangan (Saaty 1998)

Intensitas Kepentingan	Keterangan
1	Kedua elemen sama pentingnya
3	Elemen yang satu sedikit lebih penting daripada elemen yang lainnya
5	Elemen yang satu lebih penting daripada yang lainnya
7	Satu elemen jelas lebih mutlak penting daripada yang lainnya
9	Satu elemen mutlak penting dari pada elemen lainnya
2,4,6,8	Nilai-nilai antara dua nilai pertimbangan-pertimbangan uang berdekatan

Setelah perbandingan berpasangan telah selesai dibuat, vektor prioritas  $w$  yang disebut *eVector* atau *eigenvector* merupakan bobot prioritas suatu matrik yang dihitung dengan Persamaan sebagai berikut.

$$A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w \quad (\text{Persamaan 1})$$

dimana:

- $A$  = matrik perbandingan berpasangan
- $\lambda_{max}$  = *eigenvalue* terbesar dari  $A$

3. Sintesis prioritas; Menentukan prioritas dari elemen-elemen kriteria dapat dipandang sebagai bobot/kontribusi elemen tersebut terhadap tujuan pengambilan keputusan. AHP melakukan analisis prioritas elemen dengan metode perbandingan berpasangan antar dua elemen sehingga semua elemen yang ada tercakup. Prioritas ditentukan berdasarkan pandangan para pakar dan pihak-pihak yang berkepentingan terhadap pengambilan keputusan, baik

secara langsung (diskusi) maupun secara tidak langsung (kuisioner).

4. Perhitungan rasio konsistensi; Dalam proses pembobotan nilai kriteria, terdapat kemungkinan konsistensi dari perbandingan berpasangan yang telah dilakukan. Rasio konsistensi (*Consistency Ratio*) memberikan suatu penilaian numerik bagaimana ketidakkonsistenan suatu evaluasi. Indeks konsistensi (*Consistency Index*) suatu matrik perbandingan dihitung dengan Persamaan sebagai berikut.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Persamaan 2})$$

dimana:

- $\lambda_{max}$  = *eigenvalue* terbesar matrik perbandingan berpasangan  $n \times n$ .
- $n$  = jumlah item yang dibandingkan.

Rasio konsistensi diperoleh dengan membandingkan indeks konsistensi dengan suatu nilai yang sesuai dari bilangan indeks konsistensi

Strategi Adaptasi dan Mitigasi Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (Grk) Melalui Sektor Transportasi di Kota Bogor acak (*Random Consistency Index*) yang didapatkan dengan Persamaan 2.13. Jika  $CI < 0,1$ , maka penilaian responden dianggap konsisten. Jika  $CI \geq 0,1$ , maka penilaian responden tidak dianggap konsisten.

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (\text{Persamaan 3})$$

dimana:

- $CR = \text{Consistency Ratio}$
- $CI = \text{Consistency Index}$
- $RCI = \text{Random Consistency Index}$

## ANALISIS DAN ALTERNATIF SOLUSI/PENANGANAN

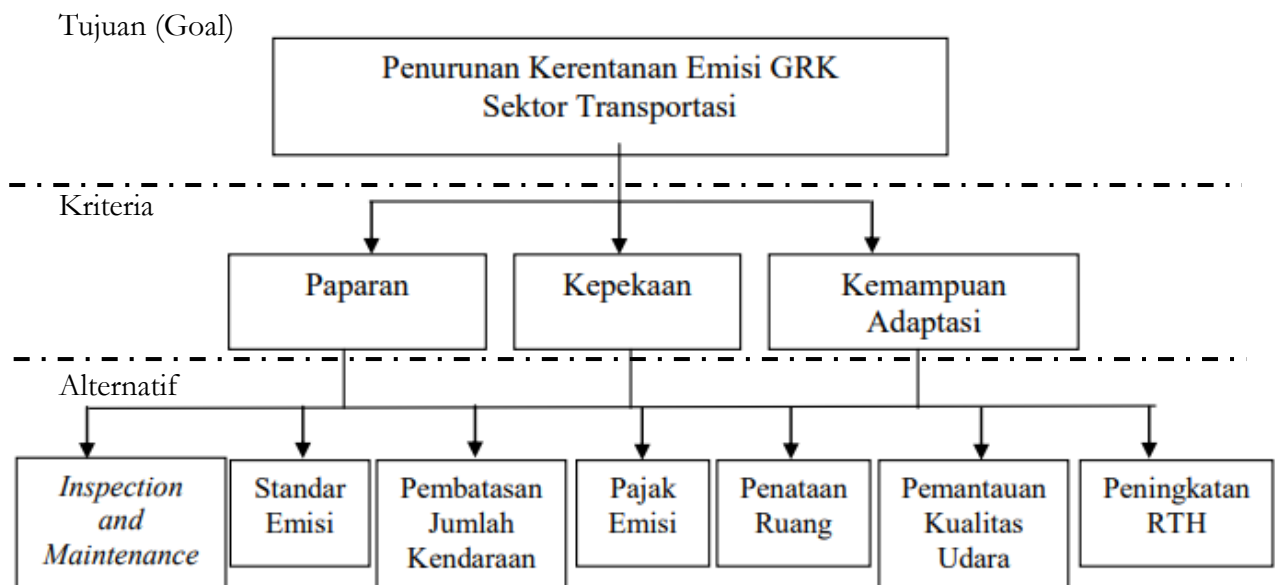
### Pembentukan Hirarki

Dalam bagian ini diperkenalkan suatu pendekatan konseptual untuk penilaian alternatif model dengan menggunakan model AHP (Gambar 1). Dalam model yang diusulkan dalam penelitian ini, setidaknya terdapat 3 level hirarki sebagai berikut:

1. Level 1: Sasaran dari keputusan yang akan diambil ditempatkan pada puncak hirarki.

Dalam hal ini sasaran yang dimaksud adalah “Penurunan Kerentanan Emisi GRK Sektor Transportasi” dan “Penurunan Emisi GRK Sektor Transportasi”

2. Level 2: Pada tingkatan kedua, diajukan kriteria-kriteria penilaian dari yang dapat menunjukkan kualitas atau tingkat pelayanan dari alternatif model yang Kriteria-kriteria tersebut terdiri dari:
  - a. Strategi Adaptasi Sektor Transportasi
    - 1) Paparan
    - 2) Kepekaan
    - 3) Kemampuan adaptasi
  - b. Strategi Mitigasi Sektor Transportasi
    - 1) Polusi Udara
    - 2) Biaya Investasi
    - 3) Efisiensi
    - 4) Keberlanjutan
    - 5) Kemudahan Manajemen
3. Level 3: Level III: Pada tingkatan ketiga, diusulkan alternatif model penurunan emisi GRK Sektor Transportasi.



Gambar 1. Model AHP Penurunan Kerentanan Emisi GRK Sektor Transportasi

Tabel 3. Matriks Orde 3 x 3 untuk Level 2 “Strategi Adaptasi Sektor Transportasi”

	<b>Paparan</b>	<b>Kepekaan</b>	<b>Kemampuan Adaptasi</b>
Paparan	a11	a12	a13
Kepekaan	a21	a22	a23
Kemampuan Adaptasi	a31	a32	a33

Tabel 4. Matriks Orde 5 x 5 untuk Level 2 “Strategi Mitigasi Sektor Transportasi”

	<b>Polusi Udara</b>	<b>Biaya Investasi</b>	<b>Efisiensi</b>	<b>Keberlanjutan</b>	<b>Kemudahan Manajemen</b>
Polusi Udara	a11	a12	a13	a14	a15
Biaya Investasi	a21	a22	a23	a24	a25
Efisiensi	a31	a32	a33	a34	a35
Keberlanjutan	a41	a42	a43	a44	a45
Kemudahan Manajemen	a51	a52	a53	a54	a55

Tabel 5. Matriks Orde 7 x 7 untuk Level 3 “Strategi Adaptasi Sektor Transportasi”

	<b>Inspection and Maintenance</b>	<b>Pengetatan Standar Emisi</b>	<b>Pembatasan Jumlah Kendaraan</b>	<b>Pajak Emisi</b>	<b>Penataan Ruang</b>	<b>Pemantauan Kualitas Udara</b>	<b>Peningkatan RTH</b>
<i>Inspection and Maintenance</i>	a11	a12	a13	a14	a15	a16	a17
Pengetatan Standar Emisi	a21	a22	a23	a24	a25	a26	a27
Pembatasan Jumlah Kendaraan	a31	a32	a33	a34	a35	a36	a37
Pajak Emisi	a41	a42	a43	a44	a45	a46	a47
Penataan Ruang	a51	a52	a53	a54	a55	a56	a57
Pemantauan Kualitas Udara	a61	a62	a63	a64	a65	a66	a67
Peningkatan RTH	a71	a72	a73	a74	a75	a76	a77

Tabel 6. Matriks Orde 7 x 7 untuk Level 3 “Strategi Mitigasi Sektor Transportasi”

	<b>Intelligent Transport System</b>	<b>ANDA LALIN</b>	<b>Penerapan Manajemen Parkir</b>	<b>Reformasi Sistem Transit</b>	<b>Peremajaan Armada Angkutan Umum</b>	<b>Gasifikasi Angkutan Umum</b>	<b>Smart Driving</b>
<i>Intelligent Transport System</i>	a11	a12	a13	a14	a15	a16	17
ANDALALIN	a21	a22	a23	a24	a25	a26	27
Penerapan Manajemen Parkir	a31	a32	a33	a34	a35	a36	37
Reformasi Sistem Transit	a41	a42	a43	a44	a45	a46	47
Peremajaan Armada Angkutan Umum	a51	a52	a53	a54	a55	a56	57
Gasifikasi Angkutan Umum	a61	a62	a63	a64	a65	a66	67
<i>Smart Driving</i>	a71	a72	a73	a74	a75	a76	77

**Tahap Pembobotan**

Hasil penilaian jawaban responden terhadap tiap pertanyaan selanjutnya dapat dibentuk matriks. Pembentukan matriks dilakukan pada tiap kelompok pertanyaan dengan ordo sesuai dengan jumlah pertanyaan dalam setiap kelompok sebagaimana diuraikan dalam bagian sebelumnya.

Hasil penilaian pada bagian sebelumnya dimasukkan dalam sel-sel yang berada di atas diagonal. Sel diagonal akan diisi dengan angka 1. Sementara sel lain akan diisi dengan angka kebalikan (invers) sesuai dengan pasangan sel sejenis (misal  $a_{ji} = a_{ij}$ ). Prosedur pemasukan jawaban adalah sebagai berikut:

1. Tiap jawaban responden pada tiap pertanyaan akan diberi penilaian sesuai dengan aturan Saaty;

2. Hasil penilaian dalam satu pertanyaan untuk semua responden (5 stakeholder) lalu dirata-rata;
3. Nilai rata-rata merupakan jawaban yang mewakili semua responden untuk tiap pertanyaan;
4. Nilai tersebut selanjutnya dimasukkan dalam matriks berpasangan dan ditempatkan sesuai dengan pasangan antar kriteria yang ditinjau.

**Matriks Pasangan Antar Kriteria**

- a. Matriks Strategi Adaptasi Sektor Transportasi

Merupakan matriks pendapat gabungan berordo 3 x 3 yang dibentuk dari nilai jawaban responden.

Tabel 7. Hasil pembentukan matriks 33

Kriteria	Paparan	Kepekaan	Kemampuan Adaptasi
Paparan	1,000	1,712	1,222
Kepekaan	0,584	1,000	0,491
Kemampuan Adaptasi	0,818	2,036	1,000

Tabel 8. Strategi Mitigasi Sektor Transportasi Matriks 55

Kriteria	Polusi Udara	Biaya Investasi	Efisiensi	Keberlanjutan	Kemudahan Manajemen
Polusi Udara	1,000	3,554	1,403	1,278	3,000
Biaya Investasi	0,281	1,000	0,447	0,359	0,412
Efisiensi	0,713	2,237	1,000	1,773	2,893
Keberlanjutan	0,783	2,787	0,564	1,000	1,496
Kemudahan Manajemen	0,333	2,426	0,346	0,668	1,000

**Matriks Pasangan Alternatif**

Tabel 9. Matrik Perbandingan Alternatif terhadap Kriteria 1 (Paparan)

Paparan	<i>Inspection and Maintenance</i>	Pengetatan Standar Emisi	Pembatasan Jumlah Kendaraan	Pajak Emisi	Penataan Ruang	Pemantauan Kualitas Udara	Peningkatan RTH
<i>Inspection and Maintenance</i>	1,000	0,411	0,257	1,022	0,481	0,750	0,374
Pengetatan Standar Emisi	2,433	1,000	0,605	2,433	1,248	0,995	0,976
Pembatasan Jumlah Kendaraan	3,895	1,652	1,000	2,474	2,075	3,738	0,857
Pajak Emisi	0,978	0,411	0,404	1,000	0,686	0,258	0,285
Penataan Ruang	2,079	0,801	0,482	1,458	1,000	0,391	0,411
Pemantauan Kualitas Udara	1,334	1,005	0,267	3,954	2,560	1,000	0,635
Peningkatan RTH	2,672	1,025	1,166	3,514	2,433	1,575	1,000

Tabel 10. Matrik Perbandingan Alternatif terhadap Kriteria 2 (Kepekaan)

Kepekaan	<i>Inspection and Maintenance</i>	Pengetatan Standar Emisi	Pembatasan Jumlah Kendaraan	Pajak Emisi	Penataan Ruang	Pemantauan Kualitas Udara	Peningkatan RTH
<i>Inspection and Maintenance</i>	1,000	0,468	0,944	3,040	1,000	1,049	0,493
Pengetatan Standar Emisi	2,135	1,000	0,424	2,119	1,173	1,192	0,382
Pembatasan Jumlah Kendaraan	1,060	2,358	1,000	3,067	3,607	3,312	1,617
Pajak Emisi	0,329	0,472	0,326	1,000	0,374	0,395	0,388
Penataan Ruang	1,000	0,852	0,277	2,675	1,000	0,473	1,235
Pemantauan Kualitas Udara	0,953	0,839	0,302	2,529	2,115	1,000	0,612
Peningkatan RTH	2,029	2,617	0,618	2,578	0,810	1,634	1,000

Tabel 11. Matrik Perbandingan Alternatif terhadap Kriteria 3 (Kapasitas Adaptasi)

Kapasitas Adaptasi	<i>Inspection and Maintenance</i>	Pengetatan Standar Emisi	Pembatasan Jumlah Kendaraan	Pajak Emisi	Penataan Ruang	Pemantauan Kualitas Udara	Peningkatan RTH
<i>Inspection and Maintenance</i>	1,000	0,404	0,351	1,340	1,490	0,421	0,296
Pengetatan Standar Emisi	2,474	1,000	0,740	2,661	1,595	1,129	0,960
Pembatasan Jumlah Kendaraan	2,846	1,352	1,000	3,954	1,120	0,871	0,599
Pajak Emisi	0,824	0,376	0,253	1,000	0,981	0,381	0,288
Penataan Ruang	0,741	0,627	0,893	1,019	1,000	0,785	0,912
Pemantauan Kualitas Udara	2,621	0,886	1,148	2,621	1,274	1,000	0,722
Peningkatan RTH	3,380	1,042	1,669	3,471	1,096	1,385	1,000

Tabel 12. Matrik Perbandingan Alternatif terhadap Kriteria 1 (Polusi Udara)

Polusi Udara	<i>Intelligent Transport System</i>	ANDALALIN	Penerapan Manajemen Parkir	Reformasi Sistem Transit	Peremajaan Armada Angkutan Umum	Gasifikasi Angkutan Umum	<i>Smart Driving</i>
<i>Intelligent Transport System</i>	1,000	2,192	0,842	0,404	0,416	0,624	1,272
ANDALALIN	0,456	1,000	1,440	0,774	0,715	1,104	3,437
Penerapan Manajemen Parkir	1,188	0,694	1,000	0,595	0,250	0,420	1,060
Reformasi Sistem Transit	2,474	1,292	1,680	1,000	0,965	0,770	0,553
Peremajaan Armada Angkutan Umum	2,403	1,399	3,994	1,037	1,000	1,944	1,944
Gasifikasi Angkutan Umum	1,601	0,906	2,380	1,298	0,514	1,000	2,173
<i>Smart Driving</i>	0,786	0,291	0,944	1,807	0,514	0,460	1,000



Tabel 13. Matrik Perbandingan Alternatif terhadap Kriteria 2 (Biaya Investasi)

<b>Biaya Investasi</b>	<b><i>Intelligent Transport System</i></b>	<b>ANDALA LIN</b>	<b>Penerapan Manajemen Parkir</b>	<b>Reformasi Sistem Transit</b>	<b>Peremajaan Armada Angkutan Umum</b>	<b>Gasifikasi Angkutan Umum</b>	<b><i>Smart Driving</i></b>
<i>Intelligent Transport System</i>	1,000	1,240	0,825	1,292	0,740	0,647	1,584
ANDALALIN	0,807	1,000	0,949	1,192	0,327	0,454	2,918
Penerapan Manajemen Parkir	1,213	1,054	1,000	2,147	0,877	0,978	1,440
Reformasi Sistem Transit	0,774	0,839	0,466	1,000	0,382	1,076	1,314
Peremajaan Armada Angkutan Umum	1,352	3,061	1,140	2,617	1,000	2,091	3,853
Gasifikasi Angkutan Umum	1,545	2,203	1,022	0,930	0,478	1,000	1,397
<i>Smart Driving</i>	0,631	0,343	0,694	0,761	0,260	0,716	1,000

Tabel 14. Matrik Perbandingan Alternatif terhadap Kriteria 3 (Efisiensi)

<b>Efisiensi</b>	<b><i>Intelligent Transport System</i></b>	<b>ANDALA LIN</b>	<b>Penerapan Manajemen Parkir</b>	<b>Reformasi Sistem Transit</b>	<b>Peremajaan Armada Angkutan Umum</b>	<b>Gasifikasi Angkutan Umum</b>	<b><i>Smart Driving</i></b>
<i>Intelligent Transport System</i>	1,000	1,272	1,240	0,473	0,448	0,456	1,915
ANDALALIN	0,786	1,000	0,258	0,715	0,451	0,481	0,985
Penerapan Manajemen Parkir	0,807	3,880	1,000	0,641	0,382	0,457	1,301
Reformasi Sistem Transit	2,115	1,399	1,560	1,000	0,739	1,445	1,413
Peremajaan Armada Angkutan Umum	2,234	2,216	2,617	1,353	1,000	2,091	1,399
Gasifikasi Angkutan Umum	2,192	2,079	2,188	0,692	0,478	1,000	0,985
<i>Smart Driving</i>	0,522	1,015	0,769	0,708	0,715	1,015	1,000

Tabel 15. Matrik Perbandingan Alternatif terhadap Kriteria 4 (Keberlanjutan)

<b>Keberlanjutan</b>	<b><i>Intelligent Transport System</i></b>	<b>ANDALA LIN</b>	<b>Penerapan Manajemen Parkir</b>	<b>Reformasi Sistem Transit</b>	<b>Peremajaan Armada Angkutan Umum</b>	<b>Gasifikasi Angkutan Umum</b>	<b><i>Smart Driving</i></b>
<i>Intelligent Transport System</i>	1,000	2,075	1,416	1,848	1,359	1,045	1,516
ANDALALIN	0,482	1,000	1,264	0,684	0,549	1,575	1,026
Penerapan Manajemen Parkir	0,706	0,791	1,000	1,184	1,241	1,110	0,825
Reformasi Sistem Transit	0,541	1,462	0,844	1,000	0,493	1,150	0,994
Peremajaan Armada Angkutan Umum	0,736	1,822	0,806	2,027	1,000	3,758	1,053
Gasifikasi Angkutan Umum	0,957	0,635	0,901	0,869	0,266	1,000	0,631
<i>Smart Driving</i>	0,660	0,974	1,213	1,006	0,949	1,584	1,000

Tabel 16. Matrik Perbandingan Alternatif terhadap Kriteria 5 (Kemudahan Manajemen)

Kemudahan Manajemen	<i>Intelligent Transport System</i>	ANDALALIN	Penerapan Manajemen Parkir	Reformasi Sistem Transit	Peremajaan Armada Angkutan Umum	Gasifikasi Angkutan Umum	<i>Smart Driving</i>
<i>Intelligent Transport System</i>	1,000	1,280	0,799	0,608	0,231	0,392	2,661
ANDALALIN	0,781	1,000	0,692	0,485	0,601	0,571	1,389
Penerapan Manajemen Parkir	1,251	1,445	1,000	0,815	1,190	1,107	1,490
Reformasi Sistem Transit	1,644	2,060	1,228	1,000	0,770	0,686	2,792
Peremajaan Armada Angkutan Umum	4,323	1,665	0,840	1,298	1,000	2,232	4,015
Gasifikasi Angkutan Umum	2,552	1,752	0,903	1,458	0,448	1,000	1,586
<i>Smart Driving</i>	0,376	0,720	0,671	0,358	0,249	0,631	1,000

**Hasil Bobot Prioritas dan Bobot Global**

Pembobotan tiap kriteria yang terlibat dalam hasil analisis AHP pada penelitian ini menggunakan bantuan *Microsoft Excel*. Untuk Tabel Perhitungan *Vektor Eigen* dan Nilai *Eigen*

Maksimum serta pengujian *Consistency Ratio* hasil dari pembobotan menggunakan *Microsoft Excel* dapat dilihat di Lampiran. Hasil akhir dari pengolahan data berdasarkan metode AHP adalah sebagai berikut:

Tabel 17. Bobot Prioritas Setiap Kriteria Strategi Adaptasi Sektor Transportasi

Kriteria	Bobot Prioritas
Paparan	0,452
Kepekaan	0,150
Kemampuan Adaptasi	0,398
<b>Consistency Ratio = 0,0373</b>	

Tabel 18. Bobot Prioritas Setiap Kriteria Strategi Mitigasi Sektor Transportasi

Kriteria	Bobot Prioritas
Polusi Udara	0,478
Biaya Investasi	0,119
Efisiensi	0,403
Keberlanjutan	0,299
Kemudahan Manajemen	0,189
<b>Consistency Ratio = -0,4310</b>	

Dari pengolahan data di atas kemudian dapat diperoleh bobot prioritas dari setiap alternatif terhadap setiap kriteria yang ada. Hasil

bobot prioritas dari masing-masing alternatif di setiap strategi sebagai berikut:

## a. Strategi Adaptasi Sektor Transportasi

Tabel 19. Bobot Prioritas Setiap Alternatif Terhadap Paparan

Alternatif	Bobot Prioritas
<i>Inspection and Maintenance</i>	0,047
Pengetatan Standar Emisi	0,107
Pembatasan Jumlah Kendaraan	0,169
Pajak Emisi	0,044

Tabel 19. Bobot Prioritas setiap Alternatif terhadap Paparan (Lanjutan)

Alternatif	Bobot Prioritas
Penataan Ruang	0,068
Pemantauan Kualitas Udara	0,098
Peningkatan Ruang Terbuka Hijau	0,149
<b>Consistency Ratio = 0,0384</b>	

Tabel 20. Bobot Prioritas setiap Alternatif terhadap Kepekaan

Alternatif	Bobot Prioritas
<i>Inspection and Maintenance</i>	0,124
Pengetatan Standar Emisi	0,131
Pembatasan Jumlah Kendaraan	0,266
Pajak Emisi	0,057
Penataan Ruang	0,113
Pemantauan Kualitas Udara	0,126
Peningkatan Ruang Terbuka Hijau	0,184
<b>Consistency Ratio = 0,0598</b>	

Tabel 21. Bobot Prioritas setiap Alternatif terhadap Kapasitas Adaptasi

Alternatif	Bobot Prioritas
<i>Inspection and Maintenance</i>	0,081
Pengetatan Standar Emisi	0,178
Pembatasan Jumlah Kendaraan	0,179
Pajak Emisi	0,066
Penataan Ruang	0,111
Pemantauan Kualitas Udara	0,171
Peningkatan Ruang Terbuka Hijau	0,214
<b>Consistency Ratio = 0,0376</b>	

Kemudian dari data di atas maka dapat dihasilkan bobot keseluruhan atau agregat dari alternatif terhadap keseluruhan kriteria yang ada.

Hasil bobot agregat dari masing-masing alternatif adalah sebagai berikut

Tabel 22. Bobot Global setiap Alternatif

Alternatif	Bobot Prioritas
<i>Inspection and Maintenance</i>	0,072
Pengetatan Standar Emisi	0,139
Pembatasan Jumlah Kendaraan	0,188
Pajak Emisi	0,055
Penataan Ruang	0,092
Pemantauan Kualitas Udara	0,131
Peningkatan Ruang Terbuka Hijau	0,180
<b>Consistency Ratio = -0,8491</b>	

## b. Strategi Mitigasi Sektor Transportasi

Tabel 23. Bobot Prioritas setiap Alternatif terhadap Polusi Udara

Alternatif	Bobot Prioritas
<i>Intelligent Transport System</i>	0,065
ANDALALIN	0,083
Penerapan Manajemen Parkir	0,052
Reformasi Sistem Transit	0,088
Peremajaan Armada Angkutan Umum	0,139
Gasifikasi Angkutan Umum	0,099
<i>Smart Driving</i>	0,056
<b>Consistency Ratio = 0,0786</b>	

Tabel 24. Bobot Prioritas setiap Alternatif terhadap Biaya Investasi

Alternatif	Bobot Prioritas
<i>Intelligent Transport System</i>	0,134
ANDALALIN	0,117
Penerapan Manajemen Parkir	0,160
Reformasi Sistem Transit	0,103
Peremajaan Armada Angkutan Umum	0,259
Gasifikasi Angkutan Umum	0,150
<i>Smart Driving</i>	0,077
<b>Consistency Ratio = 0,0338</b>	

Tabel 25. Bobot Prioritas setiap Alternatif terhadap Efisiensi

Alternatif	Bobot Prioritas
<i>Intelligent Transport System</i>	0,113
ANDALALIN	0,082
Penerapan Manajemen Parkir	0,121
Reformasi Sistem Transit	0,178
Peremajaan Armada Angkutan Umum	0,237
Gasifikasi Angkutan Umum	0,160
<i>Smart Driving</i>	0,108
<b>Consistency Ratio = 0,0539</b>	

Tabel 26. Bobot Prioritas setiap Alternatif terhadap Keberlanjutan

Alternatif	Bobot Prioritas
<i>Intelligent Transport System</i>	0,197
ANDALALIN	0,120
Penerapan Manajemen Parkir	0,133
Reformasi Sistem Transit	0,121
Peremajaan Armada Angkutan Umum	0,189
Gasifikasi Angkutan Umum	0,097
<i>Smart Driving</i>	0,142
<b>Consistency Ratio = 0,0350</b>	

Tabel 27. Bobot Prioritas setiap Alternatif terhadap Keberlanjutan

Alternatif	Bobot Prioritas
<i>Intelligent Transport System</i>	0,101
ANDALALIN	0,098
Penerapan Manajemen Parkir	0,154
Reformasi Sistem Transit	0,172
Peremajaan Armada Angkutan Umum	0,243
Gasifikasi Angkutan Umum	0,163
<i>Smart Driving</i>	0,069
<b>Consistency Ratio = 0,0420</b>	

Tabel 28. Bobot Global setiap Alternatif

Alternatif	Bobot Prioritas
<i>Intelligent Transport System</i>	0,171
ANDALALIN	0,141
Penerapan Manajemen Parkir	0,162
Reformasi Sistem Transit	0,195
Peremajaan Armada Angkutan Umum	0,296
Gasifikasi Angkutan Umum	0,190
<i>Smart Driving</i>	0,135
<b>Consistency Ratio = -0,8415</b>	

### Hasil Penilaian Akhir

#### Strategi Adaptasi Sektor Transportasi

Dalam upaya meningkatkan ketahanan sektor transportasi terhadap perubahan iklim dan polusi udara, beberapa strategi adaptasi perlu diimplementasikan secara efektif. Berdasarkan pembobotan alternatif yang dilakukan, alternatif yang memperoleh bobot global tertinggi adalah Pembatasan Jumlah Kendaraan (0,188). Pembatasan jumlah kendaraan ini mendapatkan prioritas utama karena dampaknya yang langsung terhadap pengurangan kepadatan lalu lintas dan polusi udara. Dengan mengurangi jumlah kendaraan yang beroperasi di jalan, dapat menurunkan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor, yang berperan signifikan dalam memperburuk kualitas udara dan mempercepat perubahan iklim (Quiros *et al.* 2017).

Alternatif kedua yang memperoleh bobot tinggi adalah Peningkatan Ruang Terbuka Hijau (0,180). Peningkatan ruang terbuka hijau memiliki peran yang sangat penting dalam menyerap polutan, terutama karbon dioksida dan partikel berbahaya lainnya. Tumbuhan yang ada di ruang terbuka hijau dapat berfungsi sebagai penyaring udara alami, sekaligus menyediakan ruang yang

lebih sehat bagi masyarakat untuk beraktivitas. Dengan memperbanyak ruang terbuka hijau, kota dapat lebih resilient terhadap polusi udara dan perubahan iklim, serta memberikan kualitas hidup yang lebih baik bagi warganya (Lee *et al.* 2015).

Sementara itu, Pengetatan Standar Emisi juga mendapatkan bobot yang cukup tinggi (0,139). Langkah ini bertujuan untuk membatasi emisi gas berbahaya yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor dengan menerapkan standar emisi yang lebih ketat. Hal ini akan mendorong penggunaan teknologi ramah lingkungan dan mempercepat transisi ke kendaraan yang lebih efisien dan lebih sedikit menghasilkan polusi. Pengetatan standar emisi menjadi salah satu pilar penting dalam mengurangi dampak negatif transportasi terhadap lingkungan (Crippa *et al.* 2016).

Di sisi lain, alternatif lainnya seperti Pemantauan Kualitas Udara (0,131) dan *Inspection and Maintenance* (0,072), meskipun memberikan kontribusi dalam pengurangan emisi dan peningkatan kondisi transportasi, memiliki bobot prioritas yang lebih rendah dibandingkan dengan alternatif-alternatif utama tersebut. Pemantauan kualitas udara penting untuk mengetahui tingkat polusi di berbagai area dan merespons kondisi

darurat, namun intervensi ini lebih bersifat reaktif daripada preventif (González *et al.* 2024). Sementara itu, inspeksi dan pemeliharaan kendaraan berperan dalam memastikan bahwa kendaraan yang beroperasi tetap dalam kondisi baik, namun dampaknya tidak secepat dan sekuat pembatasan jumlah kendaraan atau penataan ruang yang lebih strategis (S. Das 2021).

Dengan demikian, strategi adaptasi yang lebih sistemik dan langsung, seperti pembatasan jumlah kendaraan dan peningkatan ruang terbuka

hijau, menjadi pilihan prioritas dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan polusi udara. Sementara alternatif lainnya, meskipun tetap penting, perlu dipandang sebagai pelengkap untuk mendukung keberhasilan strategi utama.

Tabel 29. Hasil Akhir Pembobotan Paparan, Kepekaan, dan Kemampuan Adaptasi

Alternatif	Total Bobot	Paparan	Kepekaan	Kemampuan Adaptasi
Alternatif 1 ( <i>Inspection and Maintenance</i> )	0,072	0,047	0,124	0,081
Alternatif 2 (Pengetatan Standar Emisi)	0,139	0,107	0,131	0,178
Alternatif 3 (Pembatasan Jumlah Kendaraan)	0,188	0,169	0,266	0,179
Alternatif 4 (Pajak Emisi)	0,055	0,044	0,057	0,066
Alternatif 5 (Penataan Ruang)	0,092	0,068	0,113	0,111
Alternatif 6 (Pemantauan Kualitas Udara)	0,131	0,098	0,126	0,171
Alternatif 7 (Peningkatan RTH)	0,180	0,149	0,184	0,214

### Strategi Mitigasi Sektor Transportasi

Strategi mitigasi sektor transportasi bertujuan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara, serta meningkatkan efisiensi sistem transportasi secara keseluruhan. Berdasarkan hasil analisis pembobotan, beberapa strategi mitigasi yang mendapatkan prioritas tinggi antara lain Peremajaan Armada Angkutan Umum, Gasifikasi Angkutan Umum, dan Reformasi Sistem Transit. Masing-masing strategi ini memiliki dampak yang signifikan dalam mengurangi emisi dan meningkatkan kualitas transportasi.

Peremajaan armada angkutan umum mendapatkan bobot tertinggi (0,296), yang mencerminkan urgensinya dalam memperbaiki kualitas udara dan efisiensi transportasi.

Menggantikan kendaraan umum lama dengan kendaraan yang lebih efisien dan ramah lingkungan sangat penting untuk mengurangi polusi udara yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor. Kendaraan umum yang lebih baru biasanya dilengkapi dengan teknologi yang lebih bersih, seperti mesin yang lebih efisien bahan bakar dan emisi yang lebih rendah. Ini tidak hanya mengurangi dampak lingkungan dari sektor transportasi, tetapi juga meningkatkan kenyamanan dan daya tarik transportasi umum bagi masyarakat. Upaya ini juga berpotensi menurunkan biaya operasional dalam jangka panjang karena kendaraan baru lebih efisien dan lebih sedikit memerlukan perawatan (Milojević *et al.* 2018).

Gasifikasi angkutan umum mendapatkan prioritas kedua (0,190), menunjukkan pentingnya penggunaan bahan bakar alternatif yang lebih bersih untuk sektor transportasi. Gasifikasi merujuk pada penggunaan bahan bakar alternatif seperti gas alam atau biofuel yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Mengganti bahan bakar konvensional dengan bahan bakar yang lebih bersih dapat mengurangi emisi karbon dioksida, nitrogen oksida, dan partikel halus yang berbahaya bagi kesehatan masyarakat (Hofbauer dan Materazzi 2019). Gasifikasi angkutan umum juga dapat meningkatkan keberlanjutan transportasi dengan memanfaatkan sumber daya energi yang lebih terbarukan dan lokal (David dan Kopac 2018).

Reformasi sistem transit merupakan langkah penting lainnya yang mendapatkan bobot tinggi (0,195). Sistem transit yang efisien dan terintegrasi dapat meningkatkan aksesibilitas transportasi umum, mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi, dan pada gilirannya menurunkan emisi karbon (Alam *et al.* 2024). Reformasi ini melibatkan pengembangan infrastruktur transportasi umum yang lebih terhubung dan nyaman, seperti jaringan bus dan kereta yang saling terintegrasi. Meningkatkan efisiensi sistem transit juga berarti mengurangi

waktu perjalanan, meningkatkan frekuensi layanan, dan membuat transportasi umum lebih menarik bagi masyarakat (Almasi *et al.* 2021). Hal ini diharapkan dapat mendorong lebih banyak orang untuk beralih dari kendaraan pribadi ke transportasi umum, yang secara signifikan dapat mengurangi polusi udara dan kemacetan lalu lintas (Kumar *et al.* 2009).

Penerapan manajemen parkir yang efisien merupakan strategi mitigasi yang penting (0,162), meskipun memiliki bobot prioritas yang sedikit lebih rendah dibandingkan dengan alternatif sebelumnya. Pengelolaan parkir yang baik dapat mengurangi kemacetan lalu lintas, terutama di daerah-daerah padat (P. Das dan Ahmed 2023). Dengan mengurangi waktu yang dihabiskan pengemudi untuk mencari tempat parkir, manajemen parkir yang lebih efisien dapat mendorong penggunaan transportasi umum, mengurangi penggunaan kendaraan pribadi, dan mengurangi emisi yang dihasilkan oleh kendaraan yang terjebak dalam kemacetan (Liu 2020). Selain itu, sistem manajemen parkir yang terorganisir dapat mengoptimalkan penggunaan ruang dan mengurangi kebutuhan untuk membangun fasilitas parkir yang lebih banyak, yang bisa meningkatkan kualitas lingkungan urban (Jioudi *et al.* 2019).

Tabel 36. Hasil Akhir Pembobotan Polusi Udara, Biaya Investasi, Efisiensi, Keberlanjutan, dan Kemudahan Manajemen

Alternatif	Total Bobot	Polusi Udara	Biaya Investasi	Efisiensi	Keberlanjutan	Kemudahan Manajemen
Alternatif 1 ( <i>Intelligent Transport System</i> )	0,171	0,065	0,134	0,113	0,197	0,101
Alternatif 2 (ANDALALIN)	0,141	0,083	0,117	0,082	0,120	0,098
Alternatif 3 (Penerapan Manajemen Parkir)	0,162	0,052	0,160	0,121	0,133	0,154
Alternatif 4 (Reformasi Sistem Transit)	0,195	0,088	0,103	0,178	0,121	0,172
Alternatif 5 (Peremajaan Armada Angkutan Umum)	0,296	0,139	0,259	0,237	0,189	0,243
Alternatif 6 (Gasifikasi angkutan umum)	0,190	0,099	0,150	0,160	0,097	0,163
Alternatif 7 ( <i>Smart Driving</i> )	0,135	0,056	0,077	0,108	0,142	0,069

Strategi *Smart Driving* memperoleh bobot prioritas yang lebih rendah (0,135) dibandingkan dengan alternatif lainnya, meskipun tetap penting

dalam mitigasi emisi, *Smart driving* berfokus pada peningkatan kesadaran pengemudi dalam mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi

(Bätz *et al.* 2020). Melalui pelatihan pengemudi, penggunaan teknologi kendaraan cerdas, dan penerapan teknik mengemudi yang efisien, emisi dapat dikurangi (Basarić *et al.* 2017). Namun, dampaknya terhadap skala besar lebih terbatas dibandingkan dengan peremajaan armada atau penggunaan bahan bakar alternatif, karena lebih bergantung pada perilaku individu. ANDALALIN (Analisis Dampak Lalu Lintas) merupakan strategi mitigasi yang juga memiliki bobot prioritas yang lebih rendah (0,141). ANDALALIN berfokus pada analisis dan perencanaan lalu lintas untuk memastikan bahwa proyek pembangunan atau perubahan infrastruktur tidak menambah beban lalu lintas yang berlebihan. Meskipun strategi ini penting untuk pengelolaan dampak lalu lintas di area baru atau yang sedang berkembang, kontribusinya terhadap pengurangan emisi lebih terbatas dibandingkan dengan strategi yang lebih langsung seperti peremajaan armada atau gasifikasi angkutan umum (Barth dan Boriboonsomsin 2008).

#### **Analisis Efektivitas Kebijakan Penurunan Emisi GRK dari Sektor Transportasi di Kota Bogor**

Kota Bogor, sebagai kota dengan tingkat kepadatan penduduk dan kendaraan yang tinggi, menghadapi tantangan serius dalam mengurangi emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari sektor transportasi. Berdasarkan data yang telah disajikan, beberapa alternatif strategi untuk menurunkan emisi GRK sektor transportasi di Kota Bogor telah dianalisis. Strategi-strategi ini melibatkan pendekatan yang bersifat langsung, seperti pembatasan jumlah kendaraan, serta intervensi jangka panjang, seperti peremajaan armada angkutan umum dan reformasi sistem transit.

Strategi Adaptasi, strategi yang memiliki bobot prioritas tertinggi adalah Pembatasan Jumlah Kendaraan (0,188), yang memberikan dampak langsung dalam mengurangi kepadatan lalu lintas dan polusi udara. Pembatasan jumlah kendaraan dapat mengurangi kemacetan yang selama ini menjadi salah satu penyebab utama tingginya emisi GRK di Kota Bogor (Hawari *et al.* 2024). Dengan menerapkan kebijakan pembatasan, misalnya melalui ganjil-genap atau pembatasan kendaraan bermotor di area tertentu, Kota Bogor dapat memperbaiki kualitas udara dan mengurangi emisi karbon secara signifikan.

Selain itu, Peningkatan Ruang Terbuka Hijau (0,180) menjadi strategi penting lainnya karena ruang terbuka hijau berfungsi sebagai penyerapan polutan, memberikan oksigen yang lebih bersih, serta menciptakan lingkungan yang lebih sehat bagi masyarakat (Muslichah dan Sutrisno 2024). Penataan ruang juga menjadi bagian dari solusi jangka panjang yang membantu mengurangi dampak negatif dari pembangunan yang tidak terorganisir.

Strategi Mitigasi di sisi lain, strategi yang mendapatkan bobot prioritas tertinggi adalah Peremajaan Armada Angkutan Umum (0,296). Ganti rugi kendaraan umum lama dengan kendaraan yang lebih efisien dan ramah lingkungan akan mengurangi polusi udara secara signifikan (Hidayat *et al.* 2017). Kebijakan ini sangat penting karena angkutan umum merupakan salah satu kontributor utama emisi di kota-kota besar. Dengan kendaraan yang lebih modern, berbahan bakar lebih bersih, dan efisiensi yang lebih tinggi, kota ini dapat mengurangi emisi GRK secara langsung.

Strategi Gasifikasi Angkutan Umum (0,190) dan Reformasi Sistem Transit (0,195) juga merupakan alternatif yang sangat penting. Gasifikasi angkutan umum mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menggantinya dengan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan (Yulianti *et al.* 2018). Sementara itu, reformasi sistem transit berfokus pada peningkatan aksesibilitas dan efisiensi transportasi umum, yang dapat mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi, yang berpotensi menurunkan emisi GRK.

Efektivitas Kebijakan dalam menilai efektivitas kebijakan, peremajaan armada angkutan umum adalah yang paling efektif dalam hal pengurangan emisi GRK, diikuti oleh pembatasan jumlah kendaraan dan gasifikasi angkutan umum. Kebijakan pembatasan jumlah kendaraan, meskipun sangat efektif dalam mengurangi polusi di jangka pendek, memerlukan dukungan masyarakat yang lebih besar agar dapat dilaksanakan dengan sukses (Al-Adha dan Atmojo 2023). Kebijakan ini harus disertai dengan solusi transportasi alternatif yang memadai agar masyarakat tidak terdampak terlalu besar. Sementara itu, strategi jangka panjang seperti peningkatan ruang terbuka hijau dan reformasi sistem transit memberikan manfaat besar dalam hal keberlanjutan lingkungan dan pengurangan emisi secara keseluruhan (Risyani dan Bahtiar



2022). Meskipun membutuhkan waktu dan investasi yang besar, kedua strategi ini berperan penting dalam menciptakan Kota Bogor yang lebih hijau dan ramah lingkungan dalam jangka panjang.

Dengan demikian, kebijakan yang berfokus pada peremajaan armada angkutan umum, gasifikasi angkutan umum, dan reformasi sistem transit menunjukkan potensi besar dalam mengurangi emisi GRK sektor transportasi di Kota Bogor. Selain itu, kebijakan yang lebih langsung seperti pembatasan jumlah kendaraan dan peningkatan ruang terbuka hijau juga dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengurangan emisi. Untuk memastikan efektivitas kebijakan ini, perlu adanya kerjasama antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat dalam mengimplementasikan kebijakan dengan efektif dan efisien, sambil memastikan bahwa alternatif transportasi yang ramah lingkungan dan efisien tersedia bagi masyarakat.

### **Strategi Adaptasi Yang Tepat Untuk Menurunkan Emisi GRK dari Sektor Transportasi di Kota Bogor**

Strategi adaptasi yang tepat untuk menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) dari sektor transportasi di Kota Bogor harus melibatkan pendekatan yang komprehensif dan berkelanjutan. Berdasarkan analisis bobot prioritas dari berbagai alternatif yang ada, ada beberapa strategi yang dapat diimplementasikan untuk mencapai tujuan tersebut.

*Pertama*, Pembatasan Jumlah Kendaraan (0,188) menjadi strategi yang paling efektif. Pembatasan ini, seperti penerapan sistem ganjil-genap atau pembatasan kendaraan di kawasan tertentu, dapat mengurangi kemacetan dan emisi secara langsung. Hal ini akan menurunkan jumlah kendaraan pribadi di jalan, yang merupakan penyumbang utama polusi udara di Kota Bogor. Namun, keberhasilan strategi ini bergantung pada peningkatan kualitas dan ketersediaan transportasi publik yang dapat menjadi alternatif bagi masyarakat yang terbiasa menggunakan kendaraan pribadi.

*Kedua*, Peningkatan Ruang Terbuka Hijau (0,180) juga menjadi strategi penting dalam menurunkan emisi GRK. Dengan memperbanyak ruang terbuka hijau seperti taman kota dan area hijau lainnya, Kota Bogor dapat meningkatkan penyerapan polutan dan memperbaiki kualitas udara (Arifin 2015). Selain itu, ruang terbuka hijau

akan memberikan manfaat sosial bagi masyarakat dengan menyediakan ruang yang lebih nyaman dan sehat untuk beraktivitas. Ini juga dapat membantu mengurangi suhu kota, yang berkontribusi pada pengurangan efek pemanasan global.

*Ketiga*, Pengetatan Standar Emisi (0,139) untuk kendaraan bermotor merupakan langkah yang krusial. Dengan memperkenalkan regulasi yang lebih ketat terkait emisi gas buang kendaraan, kota ini dapat mengurangi polusi udara yang disebabkan oleh kendaraan bermotor. Hal ini akan mendorong pemilik kendaraan untuk mengganti kendaraan tua yang lebih polutif dengan kendaraan yang lebih efisien dan ramah lingkungan (Sulasminingsih *et al.* 2024). Meskipun strategi ini membutuhkan investasi yang cukup besar dalam pengawasan dan pengujian emisi kendaraan, dampak jangka panjangnya terhadap pengurangan emisi sangat signifikan.

Dengan demikian, strategi adaptasi yang tepat untuk menurunkan emisi GRK dari sektor transportasi di Kota Bogor harus melibatkan sinergi antara pembatasan kendaraan pribadi, peningkatan ruang terbuka hijau, dan pengetatan standar emisi. Implementasi yang efektif dari ketiga strategi ini akan menciptakan lingkungan yang lebih bersih, sehat, dan ramah lingkungan bagi masyarakat Bogor.

### **Strategi Mitigasi Yang Tepat Untuk Menurunkan Emisi GRK dari Sektor Transportasi di Kota Bogor**

Berdasarkan data yang ada, analisis strategi mitigasi yang tepat untuk menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) dari sektor transportasi di Kota Bogor dapat difokuskan pada beberapa alternatif yang memberikan dampak signifikan dalam mengurangi polusi udara dan meningkatkan efisiensi sistem transportasi. Beberapa strategi mitigasi yang memiliki bobot prioritas tertinggi dan dapat diterapkan secara efektif di Kota Bogor adalah sebagai berikut:

*Pertama*, Peremajaan Armada Angkutan Umum (0,296) menjadi strategi mitigasi yang paling efektif. Mengganti armada angkutan umum yang lama dengan kendaraan yang lebih efisien dan ramah lingkungan dapat langsung mengurangi emisi GRK. Kendaraan baru yang menggunakan teknologi ramah lingkungan, seperti kendaraan listrik atau berbahan bakar alternatif yang lebih bersih, akan mengurangi jumlah polusi yang dihasilkan oleh transportasi umum (Al Qodri dan

Widyastutik 2023). Selain itu, peremajaan armada juga akan meningkatkan kenyamanan dan kualitas layanan transportasi umum, yang pada gilirannya dapat menarik lebih banyak orang untuk beralih dari kendaraan pribadi ke transportasi umum, mengurangi kemacetan dan emisi.

*Kedua*, Gasifikasi Angkutan Umum (0,190) adalah alternatif penting yang dapat diterapkan. Penggunaan bahan bakar alternatif yang lebih bersih, seperti gas alam atau energi terbarukan untuk transportasi umum, akan membantu menurunkan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan polutan lainnya yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor. Gasifikasi dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang lebih berpolusi, sekaligus meningkatkan efisiensi energi dalam sektor transportasi umum (Zubaydah *et al.* 2024).

*Ketiga*, Reformasi Sistem Transit (0,195) juga sangat relevan untuk Kota Bogor. Meningkatkan aksesibilitas dan efisiensi sistem transit, seperti memperbaiki sistem bus dan kereta, serta memperluas jaringan transportasi publik, dapat mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi. Dengan reformasi ini, masyarakat akan lebih terdorong untuk menggunakan transportasi publik yang lebih

ramah lingkungan, yang pada akhirnya akan mengurangi jumlah kendaraan pribadi di jalan dan menurunkan tingkat emisi GRK (Widyatami 2021).

Selain itu, Penerapan Manajemen Parkir (0,162) juga memiliki peran penting dalam mengurangi emisi GRK. Manajemen parkir yang lebih efisien dapat mengurangi kemacetan dan mendorong masyarakat untuk menggunakan transportasi publik. Dengan membatasi area parkir di pusat kota dan menyediakan fasilitas parkir yang memadai di area transit, orang akan lebih terdorong untuk beralih ke transportasi umum daripada mengandalkan kendaraan pribadi (Nur *et al.* 2024).

Dengan demikian, kombinasi antara peremajaan armada angkutan umum, gasifikasi angkutan umum, reformasi sistem transit, dan manajemen parkir akan memberikan dampak yang signifikan dalam mengurangi emisi GRK dari sektor transportasi di Kota Bogor. Penerapan strategi mitigasi ini secara terintegrasi akan menciptakan sistem transportasi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan, serta mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi yang menjadi penyumbang utama polusi udara.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Adha Y, Atmojo ME. 2023. Efektivitas Program Jak Lingko dalam Upaya Menurunkan Indeks Kemacetan di DKI Jakarta. *Demokrasi* 3(1).
- Al Ayyubi MS, Arifin HS, Kaswanto RL. 2024. Rekomendasi Strategi Pengelolaan Lanskap Publik Ruang Terbuka Hijau dan Biru di Kota Bogor. *Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian dan Lingkungan* 11(2): 102–112. <https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v11i2.57137>
- Al Qodri MI, Widyastutik. 2023. Emisi Energi dan Kebijakan Kendaraan Listrik: Studi Komparasi Antara China dan Indonesia. *Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian dan Lingkungan*, 10(3): 133–144. <https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v10i3.48350>
- Alam T, Gupta R, Nasurudeen Ahamed N, Ullah A, Almaghthwi A. 2024. Smart Mobility Adoption In Sustainable Smart Cities to Establish A Growing Ecosystem: Challenges and Opportunities. *Mrs Energy and Sustainability* 11(2): 304–316. <https://doi.org/10.1557/s43581-024-00092-4>
- Almasi MH, Oh Y, Sadollah A, Byon YJ, Kang S. 2021. Urban Transit Network Optimization Under Variable Demand With Single And Multi-Objective Approaches Using Metaheuristics: The Case Of Daejeon, Korea. *International Journal of Sustainable Transportation* 15(5): 386–406. <https://doi.org/10.1080/15568318.2020.1821414>
- Arifin HS. 2015. Revitalisasi Ruang Terbuka Biru Sebagai Upaya Manajemen Lanskap Pada Skala Bio-Regional. *Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian dan Lingkungan* 1(3): 172–180. <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jkebijakan/article/view/10294>
- Barth M, Boriboonsomsin K. 2008. Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion. *Transportation Research Record*,

- 2058: 163–171.  
<https://doi.org/10.3141/2058-20>
- Basarić VB, Jambrović M, Miličić MB, Savković, TM, Basarić, DM, Bogdanović VZ. 2017. Positive Effects of Eco-Driving in Public Transport: A Case Study of the City Novi Sad. *Thermal Science* 21: 683–692.  
<https://doi.org/10.2298/Tsci150219160b>
- Bätz A, Heger S, Gimpel H, Wöhl M. 2020. Driving Sustainably - The Influence of IoT-Based Eco-Feedback on Driving Behavior. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences* 2020: 912–921.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85102354416&partnerid=40&md5=9a15b50e24e70ce865c964aa3384dd47>
- BPS 2024. *Perkembangan Jumlah Kendaraan Bermotor Menurut Jenis (Unit)*.  
<https://www.bps.go.id/indicator/17/57/1/jumlah-kendaraan-bermotor.html>
- Crippa M, Janssens-Maenhout G, Guizzardi D, Galmarini S. 2016. Eu Effect: Exporting Emission Standards for Vehicles Through The Global Market Economy. *Journal of Environmental Management* 183: 959–971.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.068>
- Das P, Ahmed MA. 2023. Effects of Parking Price on Parking Demand in the Central Business District, Silchar. *Advances in Transportation Studies* 61: 277–288.  
<https://doi.org/10.53136/979122180919018>
- Das S. 2021. Automobile Safety Inspection. In *International Encyclopedia of Transportation* 2: 85–89. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102671-7.10112-5>
- Dasanto BD, Sulistiyanti S, Anria A, Boer R. 2022. Dampak Perubahan Iklim terhadap Kenaikan Muka Air Laut di Wilayah Pesisir Pangandaran. *Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian dan Lingkungan* 9(2): 82–94.  
<https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v9i2.28039>
- David E, Kopac J. 2018. Pyrolysis of Rapeseed Oil Cake in a Fixed Bed Reactor to Produce Bio-Oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 134: 495–502.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.07.016>
- For Sustainability I-LG. 2016. *Kurangi Efek Pemanasan Global, Pemkot Komit Turunkan Gas Emisi*.  
<https://kotabogor.go.id/berita/kurangi-efek-pemanasan-global-pemkot-komit-turunkan-gas-emisi>
- González V, Godoy J, Meléndez F, Arroyo P, Díaz F, López Á, Suárez JI, Santos JP, Lozano J. 2024. Sniffing Smartwatch For Online Monitoring of Selected Odorants. *Chemical Engineering Transactions* 112: 97–102.  
<https://doi.org/10.3303/Cet24112017>
- Hawari AY, Suwaryo U, Kartini DS. 2024. Agile Governance Pemerintah Kota Bogor dalam Pembangunan Transportasi Publik Biskita untuk Mengatasi Kemacetan. *Jurnal Ilmiah Administrasi Publik* 10(1): 18–30.
- Hidayat A, Nuva N, Dewi S. 2017. Estimasi Nilai Pajak Emisi dan Kebijakan Kendaraan Umum Berbahan Bakar Bensin di Kota Bogor. *Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian dan Lingkungan* 3(1): 1–10.  
<https://journal.ipb.ac.id/index.php/jkebijakan/article/view/15240>
- Hofbauer H, Materazzi M. 2019. Waste Gasification Processes for SNG Production. In *Substitute Natural Gas From Waste: Technical Assessment and Industrial Applications of Biochemical and Thermochemical Processes* 105–160). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815554-7.00007-6>
- Jioudi B, Sabir E, Moutaouakkil F, Medromi H. 2019. Congestion Awareness Meets Zone-Based Pricing Policies for Efficient Urban Parking. *Ieee Access* 7: 161510–161523.  
<https://doi.org/10.1109/access.2019.2951674>
- Jong NH. 2022. *Indonesia Won't Sacrifice Economy for More Ambitious Emissions Cuts*. <https://www.example.com>
- Kumar P, Kulkarni SY, Parida M. 2009. Multi-Modal Transportation System in Urban India: A Way Forward Towards Seamless Transport. *Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division* 90: 13–18.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84859742033&partnerid=40&md5=c018b12d4ad00b9ac5d5726f4b50f3d8>
- Lee Ack, Jordan HC, Horsley J. 2015. Value of Urban Green Spaces in Promoting Healthy Living and Wellbeing: Prospects For Planning. *Risk Management and Healthcare Policy* 8 131–137.

- <https://doi.org/10.2147/rmhp.S61654>
- Liu Y. 2020. Impact of Parking Fees on Social Benefits Based on the Emergence of Shared Parking. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management* 15(1): 54–74. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85079528717&partnerid=40&cmd5=5eb6e9dace7e6318684593684c95d8a1>
- Milojević S, Skrucany T, Milošević H, Stanojević D, Pantić M, Stojanović B. 2018. Alternative Drive Systems and Environmentally Friendly Public Passengers Transport. *Applied Engineering Letters* 3(3): 105–113. <https://doi.org/10.18485/aeletters.2018.3.3.4>
- Muslichah DA, Sutrisno AJ. 2024. Restorasi Lanskap Permukiman Dusun Pancuran Kota Salatiga dengan Pendekatan Green Landscape. *Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian dan Lingkungan* 11(2): 131–142. <https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v11i2.55615>
- Nopember ITS. 2024. *Analisis Faktor Emisi Jejak Karbon Pada Sektor Permukiman di Kecamatan Bogor Timur Kota Bogor*. <https://repository.its.ac.id/analisis-faktor-emisi-karbon-bogor>
- Nur A, Isak YJ, Adyatma ME, Ryandhika R, Ajiansyah MR. 2024. Peranan Transportasi Publik dalam Pengurangan Kemacetan di Jakarta. *Journal Of Informatics and Business* 2(3): 432–442.
- Quiros DC, Smith J, Thiruvengada A, Huai T, Hu S. 2017. Greenhouse Gas Emissions From Heavy-Duty Natural Gas, Hybrid, And Conventional Diesel On-Road Trucks during Freight Transport. *Atmospheric Environment* 168: 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066>
- Risyani I, Bahtiar R. 2022. Estimasi Nilai Pajak Emisi Kendaraan Angkutan Kota di Kota Bogor. *Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian dan Lingkungan* 9(3): 161–176. <https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v9i3.34830>
- Saaty TL. 1998. *The Analytic Hierarchy Process*. University of Pittsburgh.
- Sulasminingsih S, Juwariyah T, Siahaan Y, Putri BH, Putra NA. 2024. Penerapan Tema SDGs Kehidupan Sehat dan Sejahtera untuk Menangani Polusi Udara di Jakarta. *Ikra-Ith Teknologi Jurnal Sains dan Teknologi* 8(1): 18–26.
- Suryadi K, Ramdhani MA. 1998. *Sistem Pendukung Keputusan*. PT Remaja Rosda Karya.
- Widyatami FS. 2021. Potensi dan Permasalahan Reformasi Transportasi Umum Massal di Kota Malang. *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik Sipil* 5(2): 65–75.
- World Economic Forum. 2023. *The Global Risks Report 2023 18th Edition*. World Economic Forum.
- Yulianti M, Nurrochmat DR, Kuncahyo B. 2018. Simulasi Model Pengembangan Gasifikasi Listrik Berbasis Biomasa Hutan Tanaman Energi. *Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian dan Lingkungan* 5(1): 49–70. <https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v5i1.27210>
- Zubaydah A, Sabilah AZ, Sari DP, Hidayah Fna. 2024. Mengurangi Emisi: Mendorong Transisi Ke Energi Bersih untuk Mengatasi Polusi Udara. *Biocephaly: Journal Of Science Education* 4(1): 11–21.