

BAB II — TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori Penelitian

Penelitian ini dibangun di atas lima landasan teori yang saling berkaitan: (1) teori mesin pembakaran dalam, yang menjelaskan proses konversi energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik; (2) teori pembakaran, yang menjelaskan kebutuhan udara, bahan bakar, temperatur, tekanan, dan waktu reaksi; (3) teori pembentukan emisi, yang menjelaskan mekanisme terbentuknya CO, HC, NO_x, dan polutan lain; (4) teori pengendalian emisi, yang mencakup peran perawatan, penyetulan AFR, dan *catalytic converter*; serta (5) teori eksternalitas lingkungan, yang menjelaskan bahwa emisi kendaraan menimbulkan biaya sosial yang tidak sepenuhnya ditanggung pemilik kendaraan (Boardman et al., 2018).

Tabel 2.1 Landasan Teori dan Relevansi Penelitian

Teori	Isi	Relevansi
<i>Internal Combustion Engine</i>	Konversi energi kimia → energi mekanik di ruang bakar melalui siklus kerja.	Menjelaskan sumber energi dan gas buang kendaraan.
Teori Pembakaran	Kebutuhan udara, bahan bakar, temperatur, tekanan, dan waktu reaksi.	Menjelaskan peran AFR dan lambda terhadap CO-HC.
Teori Pembentukan Emisi	Mekanisme terbentuknya CO, HC, NO _x , dan opasitas.	Dasar interpretasi hasil <i>gas analyzer</i> .

Teori	Isi	Relevansi
Teori Pengendalian Emisi	Peran perawatan, AFR, dan <i>catalytic converter</i> .	Dasar rekomendasi teknis pasca-uji emisi.
Eksternalitas Lingkungan	Emisi menimbulkan biaya sosial tak langsung.	Dasar BCR, <i>Net Benefit</i> , dan manfaat lingkungan.

2.2 Mesin Pembakaran Dalam (*Internal Combustion Engine*)

Mesin pembakaran dalam (ICE) merupakan mesin konversi energi yang mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik melalui proses pembakaran di dalam ruang bakar. Energi panas yang dihasilkan meningkatkan tekanan gas di dalam silinder sehingga mendorong piston dan menghasilkan kerja mekanis pada poros engkol. ICE masih menjadi sistem penggerak utama kendaraan bermotor karena efisiensi termal yang relatif tinggi, konstruksi kompak, dan kemampuan menghasilkan daya besar (Heywood, 2018).

Pada kendaraan berbahan bakar bensin, prinsip kerja yang umum adalah siklus Otto empat langkah. Setiap langkah memiliki implikasi teknis yang berbeda terhadap kualitas pembakaran dan emisi gas buang.

Tabel 2.2 Siklus Kerja Mesin Empat Langkah dan Implikasinya terhadap Emisi

Langkah	Proses Utama	Implikasi terhadap Emisi
Hisap (<i>Intake</i>)	Campuran udara-bahan bakar masuk ke silinder melalui katup masuk.	Filter udara kotor atau sensor udara tidak akurat menyebabkan campuran <i>rich</i> → CO meningkat.
Kompresi (<i>Compression</i>)	Campuran dimampatkan;	Kebocoran kompresi akibat keausan ring

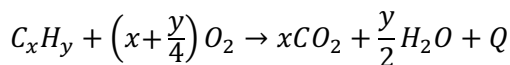
Langkah	Proses Utama	Implikasi terhadap Emisi
	tekanan dan temperatur meningkat.	piston → pembakaran tidak sempurna → HC meningkat.
Usaha (<i>Power</i>)	Busi memercikkan api; campuran terbakar dan mendorong piston.	<i>Misfire</i> atau pengapian lemah → bahan bakar tidak terbakar sempurna → HC meningkat.
Buang (<i>Exhaust</i>)	Gas hasil pembakaran dikeluarkan ke knalpot.	CO, HC, CO ₂ , O ₂ , dan λ dapat diukur dengan <i>gas analyzer</i> untuk mengevaluasi kualitas pembakaran.

Faktor-faktor yang memengaruhi kualitas pembakaran meliputi AFR, tekanan kompresi, temperatur ruang bakar, sistem pengapian, kualitas bahan bakar, kondisi injektor atau karburator, dan efektivitas *catalytic converter* (Stone, 2012; Pulkrabek, 2014). Dalam penelitian ini, evaluasi kondisi mesin melalui uji emisi diposisikan sebagai alat diagnosis teknis kualitas pembakaran, sejalan dengan temuan Batutah dan Nguyen (2025) bahwa karakteristik gas buang merepresentasikan kondisi teknis mesin.

2.3 Teori Pembakaran Hidrokarbon

Pembakaran hidrokarbon ideal terjadi ketika oksigen mencukupi sehingga seluruh karbon teroksidasi menjadi CO₂ dan seluruh hidrogen menjadi H₂O. Secara teoritis:

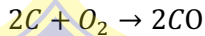
Persamaan 2.1 Pembakaran Sempurna Hidrokarbon



Dimana: C_xH_y = hidrokarbon bahan bakar, O_2 = oksigen, CO_2 = karbon dioksida, H_2O = uap air, Q = energi panas hasil pembakaran

Pada pembakaran tidak sempurna akibat kekurangan oksigen:

Persamaan 2.2 Pembentukan CO



Pembentukan NOx pada temperatur tinggi (hanya sebagai landasan teoritis; tidak diukur dalam penelitian ini):

Persamaan 2.3 Pembentukan NO Teoritis



Pembakaran tidak sempurna pada kendaraan aktual dapat disebabkan oleh: suplai oksigen tidak mencukupi, pencampuran tidak homogen, pendinginan dinding silinder (*flame quenching*), pengapian lemah, kualitas bahan bakar rendah, deposit karbon, atau penurunan tekanan kompresi (Stone, 2012).

Kinerja mesin dapat dievaluasi melalui parameter efisiensi termal:

Persamaan 2.4 Efisiensi Termal

$$\eta_{th} = \frac{W_{out}}{Q_{in}} \times 100\%$$

Dimana: η_{th} = efisiensi termal (%), W_{out} = kerja mekanik yang dihasilkan (kJ), Q_{in} = energi panas yang masuk dari bahan bakar (kJ).

Dalam penelitian ini, efisiensi termal tidak dihitung secara langsung karena tidak tersedia data W_{out} , Q_{in} , torsi, daya poros, LHV, konsumsi bahan bakar aktual, atau BSFC. Kualitas pembakaran dievaluasi secara tidak langsung melalui indikator CO, HC, AFR, dan lambda.

2.4 Air Fuel Ratio dan Lambda

Air Fuel Ratio (AFR) adalah rasio massa udara terhadap massa bahan bakar yang masuk ke ruang bakar:

Persamaan 2.5 Air Fuel Ratio

$$AFR = \frac{m_{udara}}{m_{bahan\ bakar}}$$

Dimana, AFR Air Fuel Ratio (- (tak berdimensi)), m_{udara} Massa udara yang masuk ke ruang bakar (kg), $m_{bahan\ bakar}$ Massa bahan bakar yang terbakar (kg).

Persamaan 2.6 Lambda (Excess Air Ratio)

$$\lambda = \frac{AFR_{aktual}}{AFR_{stoikiometri}}$$

Dimana, λ Excess Air Ratio (Lambda), AFR_{aktual} Air Fuel Ratio aktual hasil pengukuran (kg udara/kg bahan bakar), $AFR_{stoikiometri}$ Air Fuel Ratio teoritis (kg udara/kg bahan bakar).

Untuk mesin bensin, nilai stoikiometri AFR adalah 14,7:1 ($\lambda = 1,0$), menandakan seluruh bahan bakar terbakar sempurna dengan oksigen yang tersedia.

Tabel 2.3 Interpretasi AFR dan Lambda pada Mesin Bensin

Kondisi	Nilai AFR/ λ	Makna	Dampak Emisi
<i>Rich mixture</i>	AFR < 14,7 atau $\lambda < 1,0$	Bahan bakar berlebih relatif terhadap oksigen	CO naik, HC naik, konsumsi BBM meningkat
Stoikiometri	AFR $\approx$ 14,7 atau $\lambda \approx 1,0$	Campuran mendekati teoritis optimal	Pembakaran optimal; <i>three-way catalyst</i> bekerja efektif
<i>Lean mixture</i>	AFR > 14,7 atau $\lambda > 1,0$	Udara berlebih relatif terhadap bahan bakar	CO turun; HC dapat naik bila <i>misfire</i> ; NOx berpotensi meningkat

Hasil pengukuran pada penelitian ini menunjukkan rata-rata $\lambda = 0,994$ dengan 67,9% kendaraan berada pada kondisi *rich* ($\lambda < 1,0$). Meski nilai rata-rata mendekati stoikiometri, distribusi lambda yang condong ke bawah 1,0 konsisten dengan nilai CO rata-rata sebelum perawatan sebesar 3,554% volume.

2.5 Teori Pembentukan Emisi

2.5.1 Karbon Monoksida (CO)

CO adalah gas beracun tidak berbau yang terbentuk akibat pembakaran tidak sempurna ketika oksigen tidak cukup untuk mengoksidasi seluruh karbon menjadi CO_2 . Kadar CO tinggi pada uji emisi mengindikasikan: campuran *rich*, filter udara kotor, injektor/karburator tidak presisi, *idle* tidak stabil, pengapian lemah, atau *catalytic converter* tidak bekerja optimal. Pada penelitian ini, CO diukur dalam % volume dan merupakan variabel dependen utama analisis regresi.

2.5.2 Hidrokarbon (HC)

HC merupakan bahan bakar yang tidak terbakar sempurna, diukur dalam ppm. HC tinggi dapat terjadi karena *misfire*, *flame quenching*, kebocoran kompresi, deposit karbon, busi aus, atau atomisasi bahan bakar yang tidak baik (Stone, 2012). Dalam penelitian ini, HC sebelum dan sesudah perawatan digunakan untuk menilai efektivitas intervensi perawatan ringan melalui uji Wilcoxon *Signed-Rank*.

2.5.3 Nitrogen Oksida (NOx)

NOx terbentuk pada temperatur pembakaran tinggi ketika nitrogen dan oksigen bereaksi. Meskipun tidak diukur dalam penelitian ini, NOx dibahas sebagai *trade-off* teknis: pembakaran yang terlalu *lean* dapat menurunkan CO tetapi meningkatkan NOx. Oleh karena itu, optimasi emisi tidak cukup hanya mengejar CO-HC rendah tanpa memperhatikan kondisi *catalytic converter* dan lambda.

2.5.4 Opasitas Diesel

Opasitas adalah indikator kepekatan asap pada kendaraan diesel. Kendaraan diesel lebih tepat dievaluasi melalui opasitas asap daripada CO-HC pada *idle*, karena mesin diesel menggunakan prinsip penyalaaan kompresi dan tidak memiliki campuran udara-bahan bakar yang homogen seperti mesin bensin. Rizaly dan Batutah (2025) membuktikan bahwa variasi bahan bakar Dexlite, Dexlite+aditif, dan Shell Biodiesel memengaruhi kepekatan asap pada Mitsubishi Canter FE 74. Dalam penelitian ini, 2 kendaraan diesel dianalisis terpisah melalui opasitas dan tidak dimasukkan ke dalam model regresi CO-HC.

2.6 Catalytic Converter dan Material Katalis

Catalytic converter merupakan perangkat pengendali emisi pada saluran buang. Pada *three-way catalytic converter*, tiga reaksi berlangsung secara simultan:

Tabel 2.4 Reaksi Pengendalian Emisi pada *Catalytic Converter*

Polutan	Reaksi Pengendalian	Produk	Kondisi Optimal
CO	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$	CO_2	Katalis aktif; oksigen tersedia; $\lambda \approx 1$
HC	$\text{C}_x\text{H}_y + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$	Temperatur katalis $\geq 250^\circ\text{C}$; $\lambda \approx 1$
NOx	$2\text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$	N_2, O_2	Reduksi optimum pada λ stoikiometri

Sofana dan Batutah (2025) menekankan bahwa efektivitas *catalytic converter* dipengaruhi oleh desain substrat, luas permukaan, material katalis, *coating*, temperatur operasi, dan kondisi lambda. Dalam model penelitian ini, *catalytic*

converter ditempatkan sebagai strategi pengendalian emisi hilir (*downstream*), sementara perawatan dan penyetelan AFR merupakan strategi hulu (*upstream*) yang bekerja sebelum gas buang memasuki sistem pembuangan.

2.7 Gas Analyzer dan Validitas Instrumen

Gas analyzer digunakan untuk mengukur komposisi gas buang kendaraan. Pada pengujian kendaraan bensin, parameter utama adalah CO (% volume) dan HC (ppm), sedangkan parameter pendukung meliputi CO₂, O₂, lambda, dan AFR.

Tabel 2.5 Parameter Gas Analyzer dan Makna Teknik

Parameter	Satuan	Makna Teknik	Interpretasi
CO	% volume	Pembakaran tidak sempurna	Tinggi berarti campuran <i>rich</i> atau oksidasi karbon belum sempurna
HC	ppm	Bahan bakar tidak terbakar	Tinggi berarti <i>misfire</i> , injektor kotor, atau kompresi lemah
CO ₂	% volume	Produk pembakaran relatif sempurna	Nilai stabil mengindikasikan pembakaran lebih baik
O ₂	% volume	Oksigen sisa	Tinggi dapat menunjukkan campuran miskin atau kebocoran udara
Lambda	—	Rasio AFR aktual terhadap stoikiometri	Mendekati 1 menunjukkan campuran mendekati ideal

Validitas data uji emisi tidak dinilai melalui validitas kuesioner, melainkan melalui: (1) kalibrasi alat dengan *zero/span*

calibration, (2) pengulangan pengukuran pada kendaraan yang sama bila pembacaan berfluktuasi, (3) kestabilan *idle* yang diverifikasi dengan tachometer, dan (4) pencatatan temperatur kerja mesin sebelum pengujian dimulai.

Instrumen utama penelitian ini adalah *Gas Analyzer* CERTUS–CGA buatan Italia (tahun pembuatan 2020) dengan spesifikasi: rentang ukur CO 0–9,99% vol.; HC 0–9.999 ppm vol.; O₂ 0–25% vol.; lambda 0,5–5,0; dan interval kalibrasi berkala 12 bulan.

2.8 Baku Mutu Emisi Kendaraan

Baku mutu emisi kendaraan operasional di Indonesia diatur dalam Permen LHK Nomor 8 Tahun 2023 untuk kendaraan bermotor kategori M, N, O, dan L yang telah memasuki masa pakai lebih dari tiga tahun.

Kategori	Jenis	Contoh Umum
M	Angkutan penumpang	Mobil pribadi, MPV, bus
N	Angkutan barang	Pick-up, truk, kontainer
O	Gandengan/trailer	Semi-trailer, caravan
L	Roda dua & tiga	Motor, bajaj, becak motor

Klasifikasi ini mengacu pada standar *UNECE* (*United Nations Economic Commission for Europe*) yang juga diadopsi oleh regulasi kendaraan bermotor di Indonesia melalui Kementerian Perhubungan.

Tabel 2.6 Ringkasan Baku Mutu Emisi Kendaraan Operasional

Kategori	Tahun Pembuatan	CO Maks	HC Maks	Metode
M bensin	< 2007	4,0% vol.	1.000 ppm	<i>Idle</i>
M bensin	2007–2018	1,0% vol.	150 ppm	<i>Idle</i>

Kategori	Tahun Pembuatan	CO Maks	HC Maks	Metode
M bensin	> 2018	0,5% vol.	100 ppm	Idle
L bensin	< 2010	4,5% vol.	2.000 ppm	Idle
L bensin	≥ 2010	4,0% vol.	1.800 ppm	Idle
Diesel	Sesuai kategori	—	—	Opasitas asap

Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2023).

Baku mutu ini menjadi titik acuan komparatif hasil pengukuran pada penelitian ini. Kendaraan bensin berusia > 10 tahun yang diuji rata-rata menghasilkan CO sesudah perawatan sebesar 2,779% volume — nilai yang masih melebihi batas kategori M bensin tahun pembuatan 2007–2018 (1,0% vol.), tetapi berada di bawah batas kategori M bensin sebelum 2007 (4,0% vol.).

2.9 Analisis Statistik

Analisis statistik berfungsi mengubah data hasil pengukuran menjadi bukti empiris yang dapat diinterpretasikan dan dibandingkan. Pemilihan metode statistik dalam penelitian ini mengikuti prinsip kesesuaian antara metode dan distribusi data aktual, sebagaimana ditekankan oleh Field (2018) dan Corder dan Foreman (2014).

2.9.1 Statistik Deskriptif

Statistik deskriptif meliputi rata-rata, median, standar deviasi, nilai minimum, dan nilai maksimum untuk menggambarkan profil sampel secara ringkas.

Persamaan 2.7 Rata-rata Sampel

$$\bar{x} = (\sum X_i) / n$$

Persamaan 2.8 Standar Deviasi

$$SD = \sqrt{[\sum(X_i - \bar{x})^2 / (n - 1)]}$$

2.9.2 Uji Normalitas Shapiro-Wilk

Uji normalitas menggunakan Shapiro-Wilk dipilih karena jumlah sampel $n < 50$. Razali dan Wah (2011) membuktikan bahwa Shapiro-Wilk memiliki daya uji (*statistical power*) lebih tinggi dibandingkan Kolmogorov-Smirnov untuk sampel kecil. Kriteria: data berdistribusi normal apabila $p > 0,05$.

Hasil uji Shapiro-Wilk pada data penelitian ini menunjukkan bahwa variabel HC sesudah perawatan ($p = 0,031$) dan skor perawatan ($p = 0,006$) tidak berdistribusi normal. Konsekuensinya, metode statistik primer dipilih dari kelompok non-parametrik.

2.9.3 Korelasi Spearman (Metode Primer)

Korelasi Spearman digunakan sebagai metode primer karena tidak mensyaratkan normalitas distribusi dan lebih *robust* terhadap pencilan (*outlier*). Korelasi Spearman bekerja berdasarkan peringkat (*rank*) nilai, bukan nilai asli data (Corder & Foreman, 2014).

Persamaan 2.9 Korelasi Spearman

$$r_s = 1 - [6 \sum d_i^2 / n(n^2 - 1)]$$

di mana d_i = selisih peringkat antara dua variabel untuk observasi ke- i .

Panduan interpretasi kekuatan korelasi mengikuti Schober et al. (2018): $r_s < 0,4$ = lemah; $0,4-0,59$ = sedang; $0,6-0,79$ = kuat; $\geq 0,8$ = sangat kuat.

2.9.4 Korelasi Pearson (Uji Sensitivitas)

Korelasi Pearson digunakan sebagai uji sensitivitas untuk variabel-variabel yang terbukti berdistribusi normal, untuk mengkonfirmasi konsistensi hasil dengan metode parametrik.

Persamaan 2.10 Korelasi Pearson

$$r = [n\sum XY - (\sum X)(\sum Y)] / \sqrt{\{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]\}}$$

2.9.5 Uji Wilcoxon Signed-Rank (Uji Beda Sebelum-Sesudah)

Uji Wilcoxon *Signed-Rank* merupakan uji beda dua sampel berpasangan non-parametrik yang digunakan untuk menguji apakah penurunan emisi sebelum dan sesudah perawatan signifikan secara statistik. Uji ini dipilih menggantikan *paired t-test* karena variabel HC sudah perawatan tidak berdistribusi normal (Siegel & Castellan, 1988).

Hipotesis:

- H_0 : Tidak terdapat perbedaan emisi sebelum dan sesudah perawatan (median selisih = 0)

- H_1 : Terdapat perbedaan emisi yang signifikan sebelum dan sesudah perawatan (median selisih $\neq 0$)

Kriteria keputusan: tolak H_0 apabila $p < 0,05$.

Ukuran efek dihitung menggunakan Cohen's d berdasarkan selisih pasangan; $d > 0,8$ dikategorikan efek besar (Cohen, 1988).

2.9.6 Uji Kruskal-Wallis (Perbandingan Antar Kelompok)

Uji Kruskal-Wallis adalah uji non-parametrik untuk membandingkan lebih dari dua kelompok independen. Uji ini digunakan sebagai pengganti ANOVA satu arah karena skor perawatan — variabel yang sangat terkait dengan kelompok usia — tidak berdistribusi normal (Field, 2018).

Hipotesis:

- H_0 : Tidak terdapat perbedaan emisi antar kelompok usia kendaraan
- H_1 : Terdapat perbedaan emisi yang signifikan antar kelompok usia

Kelompok usia yang dibandingkan: 3–5 tahun, 6–10 tahun, dan > 10 tahun.

2.9.7 Regresi Linear Sederhana dan Berganda

Regresi linear sederhana digunakan untuk memodelkan pengaruh satu prediktor terhadap emisi:

Persamaan 2.11 Regresi Linear Sederhana

$$Y = a + bX + \varepsilon$$

Regresi linear berganda digunakan untuk mengontrol pengaruh beberapa prediktor secara simultan:

Persamaan 2.12 Regresi Linear Berganda

$$CO/HC = a + b_1(Usia) + b_2(AFR) + b_3(Skor) + \varepsilon$$

Untuk model berganda, uji multikolinearitas dilakukan menggunakan *Variance Inflation Factor* (VIF). Nilai VIF < 10 dianggap tidak bermasalah, sedangkan VIF < 5 menunjukkan tidak ada multikolinearitas signifikan (Hair et al., 2019).

Persamaan 2.13 Variance Inflation Factor

$$VIF(X_i) = 1 / (1 - R_i^2)$$

di mana R_i^2 adalah koefisien determinasi dari regresi X_i terhadap prediktor lainnya.

2.10 Analisis Ekonomi Program Uji Emisi

Analisis ekonomi digunakan untuk mengevaluasi kelayakan program uji emisi dari perspektif manfaat-biaya. Karena penelitian ini tidak mengukur konsumsi bahan bakar aktual secara langsung, analisis ekonomi dinyatakan sebagai analisis skenario dengan asumsi yang transparan, mengikuti kerangka Boardman et al. (2018).

Persamaan 2.14 Total Biaya

$$TC = FC + VC$$

Persamaan 2.15 Benefit Cost Ratio

$$BCR = \Sigma \text{Benefit} / \Sigma \text{Cost}$$

Persamaan 2.16 Net Benefit

$$NB = \text{Benefit} - \text{Cost}$$

Tabel 2.7 Kriteria Keputusan Analisis Ekonomi

Nilai BCR	Nilai NB	Keputusan
BCR > 1	NB > 0	Layak secara ekonomi
BCR = 1	NB = 0	Impas
BCR < 1	NB < 0	Tidak layak

Vandenbulcke et al. (2025) dalam *systematic review* menemukan bahwa strategi pengendalian polusi udara secara umum memiliki rasio manfaat-biaya yang positif, mendukung relevansi pendekatan BCR dalam penelitian ini. Vital Strategies (2024) juga melaporkan bahwa program pengendalian polusi udara di Jakarta menghasilkan manfaat ekonomi yang signifikan melebihi biayanya.

2.11 State of the Art dan Penelitian Terdahulu

Tabel 2.8 State of the Art Penelitian 2021–2026

Peneliti /Lembaga	Tahun	Fokus	Metode	Relevansi
Rizaly & Batutah	2025	Opasitas diesel, variasi bahan bakar Dextrite/Shell Biodiesel	Eksperimental	Dasar analisis diesel via opasitas; pengaruh bahan bakar terhadap emisi.

Peneliti /Lembaga	Tahun	Fokus	Metode	Relevansi
Sofana & Batutah	2025	Desain substrat dan material <i>catalytic converter</i>	<i>Systematic review</i>	Desain katalis memengaruhi reduksi CO, HC, NOx.
Batutah & Nguyen	2025	O ₂ , CO, CO ₂ , HC sebagai indikator performa All New Ertiga	Pengujian gas buang	Mendukung CO-HC-AFR/λ sebagai indikator kualitas pembakaran.
Wang et al.	2024	Biaya, kesehatan, dan dampak ekonomi pengendalian polusi	<i>Systematic review</i>	Manfaat ekonomi pengendalian polusi umumnya melampaui biayanya.
Vital Strategies	2024	CBA pengendalian polusi udara Jakarta	Laporan CBA	Mendukung analisis BCR untuk kebijakan uji emisi.
Vandenbulcke et al.	2025	<i>Cost-effectiveness</i> mitigasi polusi udara	<i>Systematic review</i>	Mendukung evaluasi ekonomi strategi pengendalian polusi.
Kováčiková et al.	2024	Dampak emisi mesin terhadap lingkungan	<i>Review</i>	Menegaskan dampak CO ₂ , NOx, PM terhadap iklim

Peneliti /Lembaga	Tahun	Fokus	Metode	Relevansi
				dan kualitas udara.
Xia et al.	2021	<i>Remote sensing</i> dan <i>machine learning</i> untuk emisi kendaraan	Pengukuran <i>on-road</i>	Menunjukkan perlunya pengawasan emisi berbasis data nyata.
WHO	2021	Panduan kualitas udara global	<i>Guideline</i>	Mendukung urgensi pengendalian polutan udara dan dampak kesehatan.
KLHK	2023	Baku mutu emisi kendaraan bermotor	Regulasi	Dasar acuan baku mutu uji emisi kendaraan operasional.
European Environment Agency	2025	Emisi polutan dari transportasi Eropa	Indikator lingkungan	Transportasi jalan tetap menjadi fokus utama pengurangan polutan.

2.12 Kerangka Konseptual

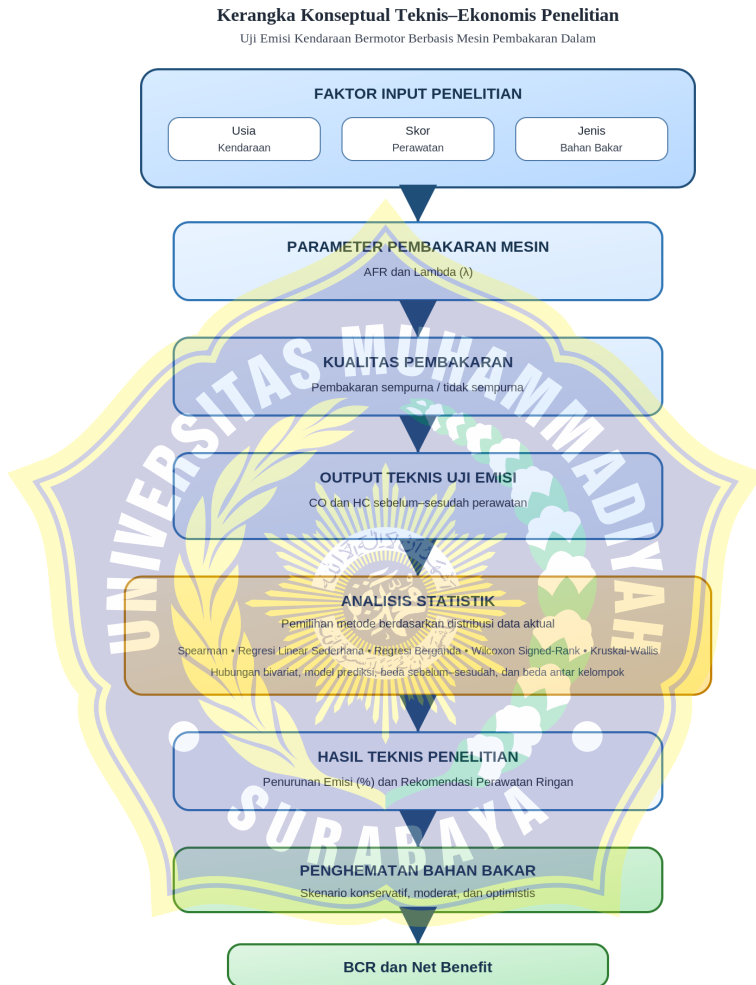
Kerangka konseptual penelitian menjelaskan alur hubungan antarvariabel: usia kendaraan, skor perawatan, dan jenis bahan bakar memengaruhi AFR dan lambda. AFR dan lambda menentukan kualitas pembakaran yang selanjutnya

memengaruhi emisi CO dan HC. Hasil uji emisi menjadi dasar rekomendasi perawatan ringan. Perbaikan kualitas pembakaran pasca-perawatan menghasilkan potensi penghematan bahan bakar yang selanjutnya dievaluasi secara ekonomis melalui BCR dan *Net Benefit*.

Seluruh hubungan antarvariabel diuji menggunakan metode statistik yang dipilih berdasarkan distribusi data aktual: korelasi Spearman untuk hubungan bivariat, regresi linear sederhana dan berganda untuk model prediksi, uji *Wilcoxon Signed-Rank* untuk pengujian beda sebelum-sesudah, dan uji Kruskal-Wallis untuk perbandingan antar kelompok usia.



Gambar 2.1 Kerangka Konseptual Teknis-Ekonomis Penelitian



Perawatan → AFR/ λ → Kualitas Pembakaran → CO/HC
(*Spearman, Regresi, Wilcoxon, Kruskal-Wallis*) → Penurunan Emisi → Penghematan BBM (Skenario) → BCR / Net Benefit