

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran udara perkotaan merupakan persoalan multidisipliner yang melibatkan aspek teknik mesin, kualitas lingkungan, kesehatan masyarakat, ekonomi, dan tata kelola transportasi. Pada wilayah metropolitan seperti Kota Surabaya, kendaraan bermotor berbasis mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine/ICE*) masih menjadi moda transportasi dominan, sehingga emisi gas buang menjadi salah satu isu penting dalam pengendalian kualitas udara. Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO, 2021), pencemaran udara merupakan penyebab meningkatnya penyakit pernapasan, penyakit kardiovaskular, gangguan metabolik, dan kematian prematur akibat paparan polutan seperti partikel halus (PM_{2.5}), karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO₂), dan hidrokarbon (HC).

Kota Surabaya sebagai kota metropolitan terbesar kedua di Indonesia menghadapi tekanan transportasi harian yang tinggi. Data registrasi kendaraan bermotor (Korlantas Polri/ERI) yang diolah peneliti menunjukkan pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor di Kota Surabaya dari 2.790.660 unit pada tahun 2020 menjadi 3.522.845 unit pada tahun 2024, dengan laju pertumbuhan rata-rata tahunan (CAGR) sebesar 6,0% yang dihitung dari kedua titik data tersebut, sehingga jumlah kendaraan pada tahun 2025 diproyeksikan mencapai 3.734.216 unit (diolah peneliti, 2026). Sebagai pembanding, data registrasi Korlantas per Mei 2025 mencatat sekitar 3,81 juta unit kendaraan di Kota Surabaya. Pertumbuhan ini secara langsung meningkatkan beban emisi dari sumber bergerak.

Tabel 1.1 Data Pertumbuhan Kendaraan Bermotor Kota Surabaya Tahun 2020–2025

Tahun	Sepeda Motor (unit)	Mobil Penumpang (unit)	Bus/Truk/Lainnya (unit)	Total Kendaraan	Status
2020	2.095.160	510.200	185.300	2.790.660	Resmi
2021	2.210.065	525.450	189.100	2.924.615	Resmi
2022	2.368.890	548.700	194.200	3.111.790	Resmi
2023	2.541.295	570.150	199.500	3.310.945	Resmi
2024	2.722.445	595.300	205.100	3.522.845	Estimasi
2025*	2.885.792	631.018	217.406	3.734.216	Proyeksi

Sumber: diolah peneliti (2026) berdasarkan data registrasi kendaraan bermotor Korlantas Polri (ERI). Status: 2020–2023 = data resmi; 2024 = estimasi sementara; 2025 = proyeksi metode CAGR 6,0% yang diterapkan seragam per kategori.

Laju pertumbuhan kendaraan dihitung menggunakan metode **Compound Annual Growth Rate (CAGR)** untuk mengetahui rata-rata pertumbuhan tahunan jumlah kendaraan dalam periode pengamatan. Rumus CAGR digunakan karena mampu menggambarkan pertumbuhan majemuk dari nilai awal menuju nilai akhir dalam beberapa tahun.

$$CAGR = \left(\frac{V_t}{V_0} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Dimana: CAGR Laju pertumbuhan tahunan majemuk, V_t Nilai akhir pada tahun terakhir, V_0 Nilai awal pada tahun pertama, n Jumlah periode/tahun antara V_0 dan V_t

Apabila hasil perhitungan dikalikan 100%, maka nilai CAGR dinyatakan dalam persen per tahun:

$$CAGR(\%) = \left[\left(\frac{V_t}{V_0} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \times 100\%$$

keterangan:

Nilai V_0 merupakan jumlah kendaraan pada tahun awal pengamatan, sedangkan V_t merupakan jumlah kendaraan pada tahun akhir pengamatan. Jumlah periode n dihitung berdasarkan selisih tahun antara tahun awal dan tahun akhir. Hasil CAGR digunakan sebagai dasar proyeksi kecenderungan pertumbuhan kendaraan, bukan sebagai data resmi, sehingga hasil proyeksi diberi keterangan “diolah peneliti”.

Data pemantauan kualitas udara Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Surabaya menunjukkan tren peningkatan konsentrasi polutan utama dari tahun 2022 hingga 2024, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.2.

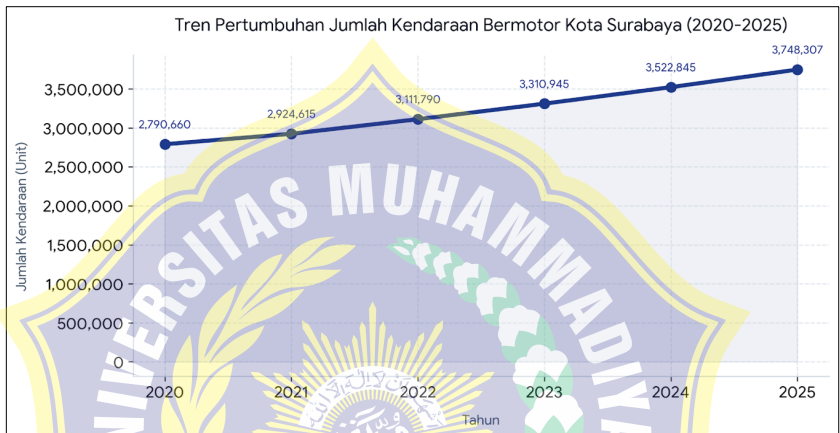
Tabel 1.2 Data Kualitas Udara Kota Surabaya Tahun 2022–2024

Parameter	2022	2023	2024	Satuan
PM2.5	29,4	31,2	33,1	µg/m ³
CO (ambien)	1,12	1,18	1,24	mg/m ³
NO ₂	24,8	26,5	28,1	µg/m ³
AQI	72	76	81	Indeks

Sumber: parameter ambien PM2.5, CO, dan NO₂ dari DLH Kota Surabaya (AQMS); nilai AQI dari IQAir (basis PM2.5, standar US EPA). Catatan: AQI (IQAir) tidak setara dengan ISPU (DLH/KLHK, PermenLHK No. 14 Tahun 2020) sehingga keduanya tidak dapat diperbandingkan secara langsung; angka tahunan perlu dikonfirmasi dari laporan resmi DLH dan World Air Quality Report IQAir beserta tanggal akses. Catatan: satuan CO pada tabel ini adalah mg/m³ untuk kualitas udara ambien, berbeda dari satuan % volume yang digunakan dalam pengujian emisi kendaraan.

Visualisasi Tren dan Kurva Pertumbuhan

Gambar 1.1 Kurva pertumbuhan kendaraan bermotor Kota Surabaya 2020-2025 (Sumber: diolah peneliti berdasarkan data registrasi Korlantas Polri/ERI; tahun 2024 estimasi sementara dan 2025 proyeksi metode CAGR 6,0%).



(Catatan: Kurva di atas menunjukkan tren linier positif, menandakan beban volume kendaraan yang terus bertambah secara konstan pada jaringan jalan arteri utama Kota Surabaya.)

Dari perspektif Teknik Mesin, gas buang kendaraan merupakan hasil akhir dari proses pembakaran di ruang bakar. Pada kondisi ideal, bahan bakar hidrokarbon bereaksi dengan oksigen dalam jumlah cukup sehingga menghasilkan karbon dioksida, uap air, dan energi panas. Namun, kondisi operasi aktual tidak selalu ideal karena dipengaruhi oleh rasio udara-bahan bakar, suhu ruang bakar, tekanan kompresi, kualitas pengapian, kondisi filter udara, injektor atau karburator, kualitas bahan bakar, serta tingkat perawatan kendaraan. Ketika suplai oksigen tidak mencukupi atau pencampuran udara dan bahan bakar tidak homogen, sebagian karbon akan teroksidasi menjadi karbon monoksida dan sebagian hidrokarbon keluar sebagai

bahan bakar tidak terbakar. Namun, pembakaran aktual pada kendaraan jarang benar-benar sempurna karena dipengaruhi oleh *Air Fuel Ratio* (AFR), temperatur ruang bakar, sistem pengapian, kualitas bahan bakar, tekanan kompresi, kondisi injektor atau karburator, serta riwayat perawatan kendaraan (Heywood, 2018; Stone, 2012).

Parameter CO dan HC sangat penting dalam uji emisi kendaraan bensin karena keduanya merepresentasikan kualitas pembakaran. CO tinggi menunjukkan oksidasi karbon belum berlangsung sempurna, sedangkan HC tinggi menunjukkan adanya fraksi bahan bakar yang tidak terbakar akibat misfire, flame quenching, injektor kotor, busi lemah, atau kebocoran kompresi. Oleh sebab itu, pengukuran CO dan HC menggunakan gas analyzer dapat diposisikan sebagai alat diagnosis teknis kondisi pembakaran kendaraan, bukan sekadar prosedur administratif.

Penelitian yang dilakukan Batutah dan Nguyen (2025) menegaskan bahwa karakteristik gas buang (O_2 , CO, CO_2 , HC) merepresentasikan kondisi teknis mesin dan kualitas pembakaran kendaraan. Sofana dan Batutah (2025) dalam *systematic review* menunjukkan bahwa desain substrat dan material *catalytic converter* memengaruhi efektivitas reduksi emisi CO, HC, dan NO_x secara signifikan. Rizaly dan Batutah (2025) membuktikan bahwa variasi jenis bahan bakar dan penambahan aditif berpengaruh terhadap kepekatan asap diesel. Kajian internasional Wang et al. (2024) melalui *systematic review* menemukan bahwa manfaat ekonomi program pengendalian pencemaran udara secara konsisten melampaui biayanya.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini menyusun model integratif yang menghubungkan AFR dan lambda sebagai

indikator campuran udara-bahan bakar, CO dan HC sebagai indikator kualitas pembakaran, perawatan kendaraan sebagai intervensi teknis, serta BCR dan *Net Benefit* sebagai indikator kelayakan ekonomi skenario. Pendekatan statistik yang digunakan mengikuti temuan aktual data: karena sejumlah variabel tidak berdistribusi normal berdasarkan uji Shapiro-Wilk, korelasi Spearman ditetapkan sebagai metode primer, dilengkapi uji Wilcoxon *Signed-Rank* untuk pengujian beda sebelum-sesudah perawatan, dan uji Kruskal-Wallis untuk perbandingan antar kelompok usia kendaraan.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, identifikasi masalah penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor di Kota Surabaya meningkatkan beban emisi sektor transportasi secara signifikan. Sebagian besar kendaraan berusia lebih dari sepuluh tahun berpotensi mengalami penurunan kualitas pembakaran akibat keausan komponen dan perawatan yang tidak optimal.
2. Uji emisi selama ini sering dipahami sebagai kewajiban administratif semata, padahal hasil pengukuran CO, HC, AFR, dan lambda dapat digunakan sebagai diagnosis teknis kondisi mesin. Analisis terpadu yang mengintegrasikan aspek teknik mesin, statistik non-parametrik, dan ekonomi dalam satu model penelitian masih belum banyak dikembangkan.
3. Pengujian statistik yang tepat mensyaratkan pemilihan metode berdasarkan distribusi data. Apabila normalitas tidak terpenuhi, uji parametrik (Pearson, ANOVA) tidak dapat digunakan sebagai metode primer; uji non-

parametrik seperti Spearman, Wilcoxon, dan Kruskal-Wallis harus diprioritaskan.

4. Analisis kelayakan ekonomi program uji emisi perlu dinyatakan sebagai analisis skenario karena konsumsi bahan bakar aktual sebelum dan sesudah perawatan belum diukur secara langsung.
5. Kendaraan bensin dan diesel memerlukan pemisahan analisis karena parameter uji emisi yang dominan berbeda: kendaraan bensin menggunakan CO dan HC, sedangkan kendaraan diesel menggunakan opasitas asap.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah di atas, rumusan masalah penelitian adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik emisi CO, HC, AFR, dan lambda kendaraan bermotor berbasis mesin pembakaran dalam pada sampel penelitian di Kota Surabaya?
2. Bagaimana hubungan usia kendaraan dan skor perawatan terhadap kadar CO dan HC pada kendaraan bensin berdasarkan uji korelasi Spearman dan analisis regresi linear?
3. Apakah perawatan ringan setelah uji emisi secara statistik signifikan menurunkan kadar CO dan HC berdasarkan uji Wilcoxon *Signed-Rank*?
4. Apakah terdapat perbedaan emisi CO dan HC yang signifikan antar kelompok usia kendaraan berdasarkan uji Kruskal-Wallis?
5. Bagaimana kelayakan ekonomis program uji emisi berdasarkan skenario BCR dan *Net Benefit*?

1.4 Batasan Masalah

1. Data penelitian terdiri atas 30 kendaraan; 28 kendaraan bensin dianalisis untuk CO, HC, AFR, dan lambda, sedangkan 2 kendaraan diesel dianalisis terpisah melalui opasitas asap.
2. Pengukuran dilakukan pada kondisi *idle* stabil menggunakan *gas analyzer*. Pengujian *real driving emission* (RDE) dan PEMS tidak dilakukan.
3. Parameter utama kendaraan bensin adalah CO (% volume), HC (ppm), AFR, lambda, usia kendaraan, dan skor perawatan. NOx, CO₂, O₂, konsumsi bahan bakar aktual, torsi, daya poros, dan BSFC tidak menjadi hasil pengukuran utama; variabel tersebut dibahas sebagai teori dan rekomendasi penelitian lanjutan.
4. Pemilihan metode statistik mengikuti hasil uji normalitas Shapiro-Wilk: korelasi Spearman sebagai metode primer untuk variabel yang tidak memenuhi normalitas, Pearson sebagai uji sensitivitas, Wilcoxon *Signed-Rank* untuk pengujian beda sebelum-sesudah, dan Kruskal-Wallis untuk perbandingan antar kelompok usia.
5. Analisis ekonomi dinyatakan sebagai analisis skenario, bukan pengukuran konsumsi BBM aktual, dengan asumsi biaya dan manfaat yang dinyatakan secara transparan.

1.5 Tujuan Penelitian

1. Mengukur dan menganalisis karakteristik emisi CO, HC, AFR, dan lambda kendaraan bermotor pada sampel penelitian di Kota Surabaya.
2. Menganalisis hubungan usia kendaraan dan skor perawatan terhadap kadar CO dan HC menggunakan

- korelasi Spearman dan regresi linear sederhana serta berganda.
3. Menguji secara statistik apakah perawatan ringan setelah uji emisi menurunkan emisi CO dan HC secara signifikan menggunakan uji Wilcoxon *Signed-Rank*.
 4. Menguji perbedaan emisi antar kelompok usia kendaraan menggunakan uji Kruskal-Wallis.
 5. Menghitung kelayakan ekonomis program uji emisi menggunakan BCR dan *Net Benefit* pada skenario konservatif, moderat, dan optimistis.

1.6 Manfaat Penelitian

Tabel 1.3 Manfaat Penelitian

Jenis Manfaat	Uraian
Akademik	Memperkaya kajian Teknik Mesin tentang hubungan ICE, AFR/lambda, CO-HC, dan kualitas pembakaran melalui pendekatan statistik non-parametrik yang lebih tepat secara metodologis.
Praktis	Membantu pemilik kendaraan memahami bahwa uji emisi dapat menjadi alat diagnosis teknis yang diikuti rekomendasi perawatan berbasis data.
Industri/Bengkel	Menyediakan kerangka diagnosis untuk menerjemahkan nilai CO, HC, AFR, dan lambda menjadi rekomendasi servis spesifik (filter udara, busi, injektor, kompresi, <i>catalytic converter</i>).
Kebijakan	Memberikan dasar kuantitatif bagi Pemerintah Kota Surabaya untuk mengintegrasikan uji emisi dengan edukasi, pengawasan kendaraan tua (> 10 tahun), dan program perawatan rekomendatif.

1.7 Research Gap, Practical Gap, Theoretical Gap, dan Novelty

Tabel 1.4 Matriks Gap dan Novelty Penelitian

Aspek	Kondisi Penelitian Terdahulu	Kontribusi Penelitian Ini
<i>Research gap</i>	Studi terdahulu membahas emisi, bahan bakar, atau <i>catalytic converter</i> secara terpisah tanpa integrasi statistik non-parametrik.	Penelitian ini mengintegrasikan CO/HC, AFR/ λ , perawatan, Spearman, Wilcoxon, Kruskal-Wallis, dan BCR/NB dalam satu model.
<i>Practical gap</i>	Uji emisi sering berhenti pada pemeriksaan kelulusan administratif tanpa tindak lanjut teknis.	Penelitian menempatkan uji emisi sebagai diagnosis teknis yang diikuti rekomendasi perawatan dan evaluasi ekonomi.
<i>Theoretical gap</i>	Keterkaitan teori pembakaran, statistik berbasis distribusi aktual, dan ekonomi program belum banyak dikembangkan dalam skripsi Teknik Mesin.	Model menyambungkan kualitas pembakaran dengan analisis statistik yang responsif terhadap distribusi data dan manfaat ekonomi skenario.
<i>Novelty</i>	Pemilihan metode statistik pada studi emisi kendaraan lokal umumnya belum mempertimbangkan konsekuensi pelanggaran normalitas secara eksplisit.	Model: AFR/ λ $\rightarrow$ CO/HC $\rightarrow$ Spearman/Wilcoxon/Kruskal-Wallis $\rightarrow$ perawatan $\rightarrow$ BCR/Net Benefit.

1.8 Model Konseptual Penelitian

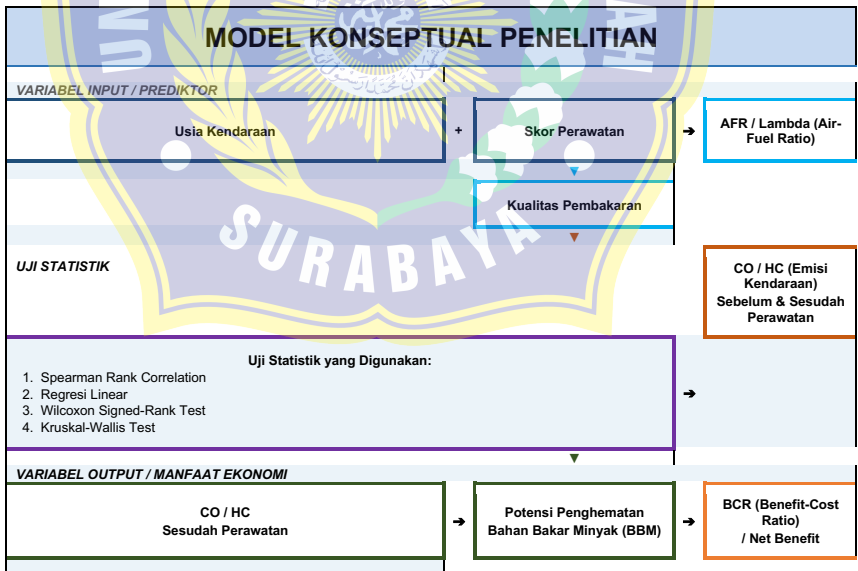
Model konseptual penelitian dikembangkan berdasarkan hubungan antara kualitas pembakaran, emisi kendaraan, intervensi perawatan, dan manfaat ekonomi. Model ini menjadi kerangka logis yang menghubungkan seluruh variabel penelitian:

Usia Kendaraan + Skor Perawatan → AFR/Lambda → Kualitas Pembakaran → CO/HC

(Diuji dengan Spearman, Regresi Linear, Wilcoxon Signed-Rank, Kruskal-Wallis)

CO/HC sesudah Perawatan → Potensi Penghematan BBM → BCR / Net Benefit

Gambar 1.2 Model konseptual integrasi teknis-ekonomis uji emisi kendaraan bermotor.



MODEL KONSEPTUAL PENELITIAN

Keterangan Alur Model

Usia Kendaraan + Skor Perawatan → AFR/Lambda → Kualitas Pembakaran → CO/HC (Emisi)
CO/HC Sesudah Perawatan → Potensi Penghematan BBM → BCR / Net Benefit
Pengujian: Spearman | Regresi Linear | Wilcoxon Signed-Rank | Kruskal-Wallis

1.9 Sistematika Penulisan

BAB I memuat pendahuluan, identifikasi masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, matriks gap-novelty, dan model konseptual.

BAB II memuat landasan teori: mesin pembakaran dalam, pembakaran hidrokarbon, AFR/lambda, emisi CO-HC-NO_x-opasitas, *catalytic converter*, *gas analyzer*, baku mutu emisi, analisis statistik (termasuk uji non-parametrik: Spearman, Wilcoxon, Kruskal-Wallis), dan analisis ekonomi BCR/Net Benefit.

BAB III menjelaskan desain penelitian, populasi dan sampel, variabel, instrumen, prosedur pengujian emisi, dan teknik analisis data yang telah diperbarui sesuai temuan distribusi data aktual.

BAB IV menyajikan hasil pengukuran, statistik deskriptif, uji normalitas, korelasi Spearman, regresi sederhana dan berganda (dengan uji VIF), uji Wilcoxon sebelum-sesudah, uji Kruskal-Wallis antar kelompok usia, dan analisis ekonomi skenario.

BAB V memuat kesimpulan, implikasi penelitian, keterbatasan, dan saran untuk penelitian lanjutan.