

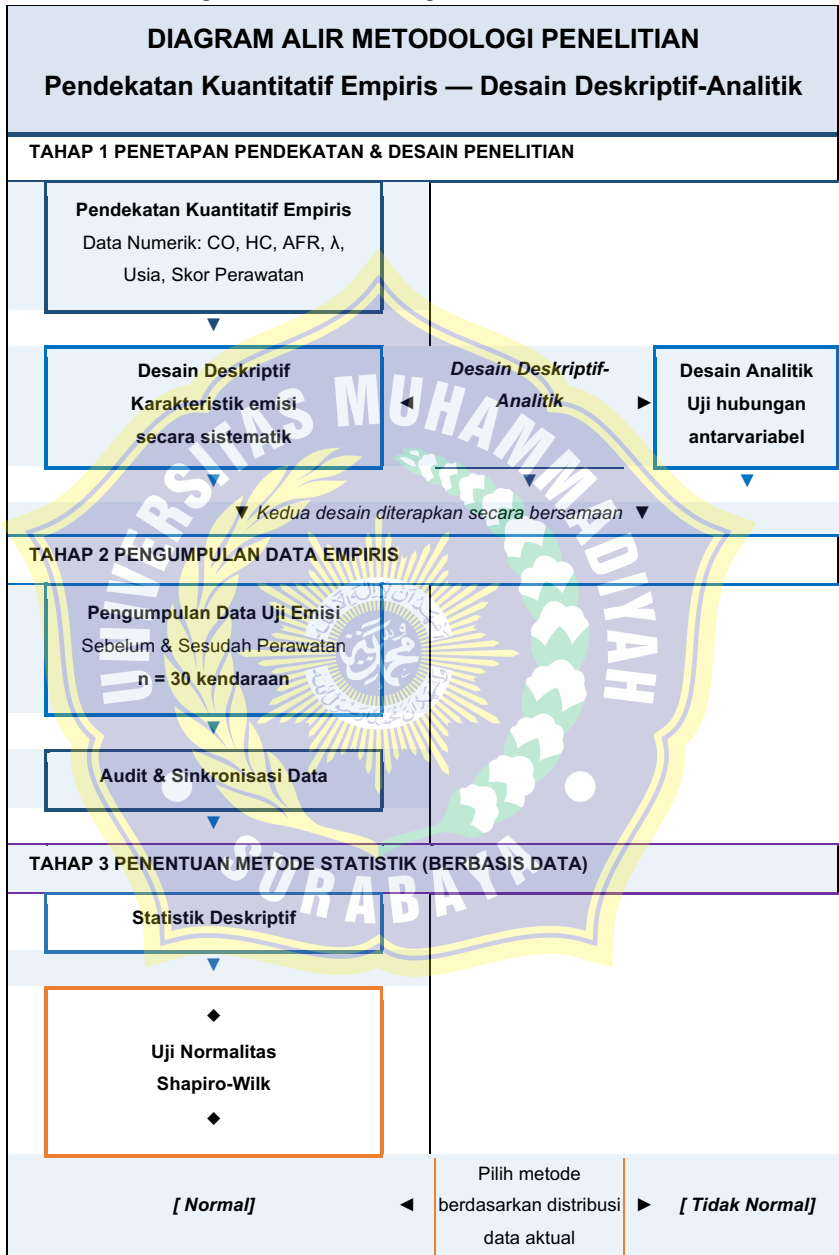
BAB III — METODOLOGI PENELITIAN

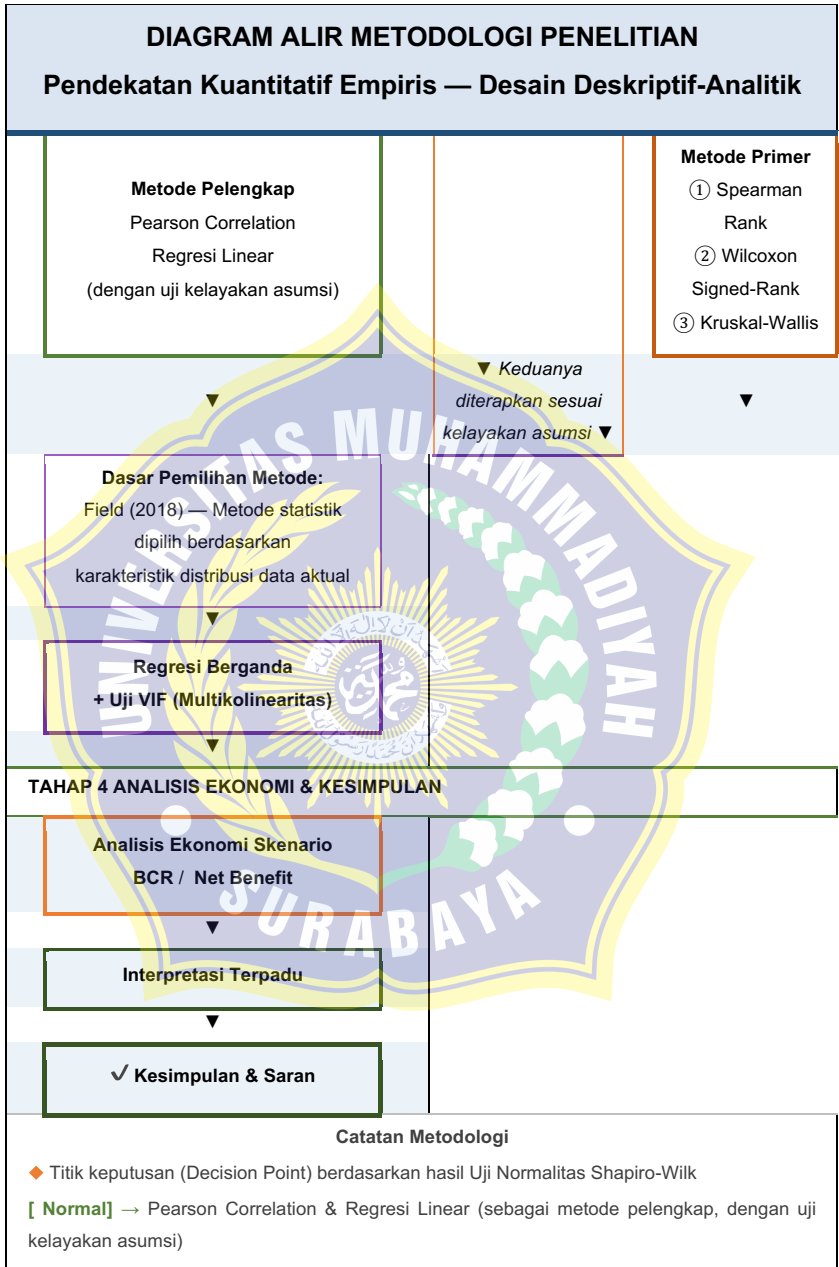
3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif empiris dengan desain deskriptif-analitik. Pendekatan kuantitatif dipilih karena data utama berupa hasil pengukuran instrumen berupa nilai numerik CO, HC, AFR, lambda, usia kendaraan, dan skor perawatan. Desain deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik emisi kendaraan secara sistematis, sedangkan desain analitik digunakan untuk menguji hubungan antarvariabel.

Pemilihan metode statistik pada penelitian ini tidak ditentukan *a priori* semata berdasarkan konvensi, melainkan mengikuti hasil uji normalitas Shapiro-Wilk terhadap data aktual. Setelah uji normalitas dilakukan, ditetapkan bahwa: (1) korelasi Spearman menjadi metode korelasi primer; (2) uji Wilcoxon *Signed-Rank* digunakan untuk pengujian beda sebelum-sesudah perawatan; (3) uji Kruskal-Wallis digunakan untuk perbandingan emisi antar kelompok usia; serta (4) korelasi Pearson dan regresi linear digunakan sebagai metode pelengkap dengan memperhatikan kelayakan asumsinya. Pendekatan ini sesuai dengan rekomendasi Field (2018) yang menegaskan bahwa metode statistik harus dipilih berdasarkan karakteristik distribusi data, bukan berdasarkan kemudahan atau konvensi semata.

Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian







3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Kota Surabaya pada periode Januari–Juni 2026. Lokasi pengambilan data adalah titik layanan uji emisi, bengkel mitra, atau area pengujian yang memenuhi persyaratan: ventilasi cukup, kendaraan dapat *idle* stabil, rem parkir aktif, dan tidak ada kebocoran sistem pembuangan yang terlihat. Pemilihan Kota Surabaya didasarkan pada tingginya aktivitas transportasi, relevansi kebijakan uji emisi, dan ketersediaan data pertumbuhan kendaraan yang lengkap.

3.3 Populasi, Sampel, dan Teknik Sampling

Populasi penelitian adalah kendaraan bermotor berbasis mesin pembakaran dalam yang beroperasi di Kota Surabaya. Sampel berjumlah 30 kendaraan yang dipilih menggunakan teknik *purposive sampling*, dengan kriteria inklusi yang telah ditetapkan sebelum pengumpulan data.

Kriteria Inklusi:

1. Kendaraan berbasis mesin pembakaran dalam (bensin atau solar) dan beroperasi aktif di Kota Surabaya.
2. Kendaraan berusia lebih dari tiga tahun (sesuai cakupan Permen LHK No. 8/2023).

3. Kendaraan berada pada kondisi operasional normal dan dapat diuji pada kondisi *idle* stabil.
4. Pemilik atau operator bersedia mengikuti pengukuran emisi dan memberikan data usia kendaraan serta riwayat perawatan.
5. Data minimum tersedia: usia kendaraan, jenis bahan bakar, nilai uji emisi (sebelum dan sesudah perawatan), dan skor perawatan.

Kriteria Eksklusi:

1. Kendaraan yang tidak dapat mencapai kondisi *idle* stabil karena kerusakan teknis berat.
2. Kendaraan yang tidak bersedia mengikuti perawatan ringan pasca-uji emisi.

Dari 30 kendaraan, 28 menggunakan bahan bakar bensin (analisis CO-HC-AFR/ λ) dan 2 menggunakan solar (analisis opasitas asap terpisah). Jumlah sampel 30 kendaraan diposisikan sebagai studi awal eksploratif dengan keterbatasan generalisasi yang dinyatakan secara eksplisit. Untuk generalisasi populasi kota atau target publikasi Scopus, penelitian lanjutan disarankan menggunakan minimal 80–100 kendaraan dengan stratifikasi jenis kendaraan, usia, teknologi mesin, dan jenis bahan bakar.

Skor kondisi kendaraan digunakan sebagai variabel ordinal untuk menggambarkan tingkat kelayakan teknis kendaraan berdasarkan hasil observasi lapangan. Skor ini disusun berdasarkan enam indikator, yaitu riwayat servis berkala, kondisi filter udara, kondisi oli mesin, stabilitas putaran idle, kondisi visual asap gas buang, serta indikasi gangguan sistem

bahan bakar atau pengapian. Setiap indikator diberi nilai 1 apabila memenuhi kriteria baik dan nilai 0 apabila tidak memenuhi kriteria. Total nilai dari keenam indikator kemudian dikonversi menjadi skor 1 sampai 6.

Pemberian skor ini bertujuan untuk menyediakan ukuran sederhana mengenai kondisi perawatan kendaraan yang dapat dianalisis hubungannya dengan emisi gas buang, khususnya CO dan HC. Semakin tinggi skor menunjukkan bahwa kendaraan berada pada kondisi teknis yang lebih baik, sedangkan skor rendah menunjukkan adanya indikasi perawatan yang kurang optimal. Karena skor menunjukkan tingkatan kategori, maka variabel ini diperlakukan sebagai data ordinal. Oleh sebab itu, analisis korelasi yang melibatkan skor menggunakan Spearman sebagai metode utama.

3.4 Variabel Penelitian dan Definisi Operasional

Tabel 3.1 Variabel Penelitian

Kelompok	Simbol	Variabel	Satuan	Definisi Operasional
Bebas	X1	Usia kendaraan	Tahun	Selisih tahun penelitian (2026) dengan tahun produksi kendaraan.
Bebas	X2	Skor perawatan	Skor 1–6	Skor komposit frekuensi servis berkala, <i>tune-up</i> , penggantian oli, dan perawatan sistem bahan bakar. Skor 6 = perawatan sangat rutin; skor 1 = tidak pernah dirawat.

Kelompok	Simbol	Variabel	Satuan	Definisi Operasional
Antara	Z1	AFR	kg udara/kg BBM	Rasio massa udara terhadap massa bahan bakar yang terbaca pada <i>gas analyzer</i> .
Antara	Z2	Lambda (λ)	—	Perbandingan AFR aktual terhadap AFR stoikiometri (14,7:1).
Terikat	Y1	CO	% volume	Konsentrasi karbon monoksida dalam gas buang saat <i>idle</i> .
Terikat	Y2	HC	ppm	Konsentrasi hidrokarbon tidak terbakar dalam gas buang saat <i>idle</i> .
Ekonomi	E	BCR dan NB	Rasio / Rp	Indikator kelayakan ekonomis skenario program uji emisi dan perawatan.
Kontrol	C	<i>Idle</i> , suhu kerja, BBM, injeksi/katalis	Beragam	Faktor yang dikendalikan agar hasil pengukuran lebih reliabel dan konsisten.

3.5 Variabel Kontrol

Tabel 3.2 Variabel Kontrol

Variabel Kontrol	Alasan Teknis	Perlakuan dalam Penelitian
<i>rpm idle</i>	Memengaruhi pembacaan gas buang secara langsung.	<i>Idle</i> harus stabil sesuai spesifikasi kendaraan sebelum probe dimasukkan.
Temperatur mesin	Mesin dingin meningkatkan emisi sementara.	Pengujian dilakukan setelah temperatur kerja mesin tercapai.
Sistem bahan bakar	Injeksi/karburator berbeda karakteristiknya terhadap AFR.	Dicatat dalam formulir observasi.
Kondisi <i>catalytic converter</i>	Memengaruhi CO-HC yang terukur di ujung knalpot.	Diperiksa secara visual; dicatat bila ada indikasi kerusakan.
Jenis bahan bakar	Bensin dan diesel memiliki parameter uji berbeda secara fundamental.	Analisis dipisahkan sejak pengumpulan data.
Kapasitas mesin (cc)	Memengaruhi pola pembakaran dan emisi pada beberapa kondisi.	Dicatat untuk pengembangan model regresi lanjutan.

3.6 Instrumen Penelitian

Instrumen utama adalah *gas analyzer* CERTUS–CGA (Italia, 2020) dengan spesifikasi lengkap sebagai berikut:

Spesifikasi	Nilai
Merek	CERTUS – CGA
Tahun produksi	2020, Made in Italy
Rentang temperatur	5–40°C
<i>Power supply</i>	1–15 Vdc, 20W

Spesifikasi	Nilai
Interval kalibrasi	12 bulan
Rentang tekanan	85–106 kPa
<i>Warm-up time</i>	10 menit
<i>Gas flow</i>	4 L/menit
Rentang CO	0–9,99% vol.
Rentang HC	0–9.999 ppm vol.
Rentang O ₂	0–25% vol.
Rentang lambda	0,5–5,0
RPM counter	300–9.990 rpm

Gambar 3.2 Alat Uji Smoke Tester dan Gas Analyzer Tester
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)



Tabel 3.3 Prosedur Validasi dan Reliabilitas Instrumen

Aspek	Prosedur	Tujuan
<i>Zero calibration</i>	Menetapkan pembacaan nol sebelum pengukuran.	Mengurangi bias sistematik alat.
<i>Span calibration</i>	Menggunakan gas standar bila tersedia.	Memastikan pembacaan sesuai

Aspek	Prosedur	Tujuan
		konsentrasi referensi.
<i>Repeatability</i>	Mengulang pengukuran 2–3 kali pada kendaraan yang sama apabila nilai berfluktuasi.	Menilai konsistensi dan memilih nilai stabil.
Kontrol <i>idle</i>	Menjaga rpm stabil dan mesin pada temperatur kerja.	Mengurangi variasi akibat kondisi operasional.

Instrumen pendukung meliputi tachometer (verifikasi rpm *idle*), termometer/indikator suhu mesin, *smoke tester* (untuk kendaraan diesel), formulir observasi, dan perangkat lunak pengolahan data (SPSS versi 26).

3.7 Prosedur Pengujian Emisi

1. Memastikan kendaraan berada pada area aman dengan ventilasi cukup; rem parkir aktif; tidak ada kebocoran sistem pembuangan yang terlihat.
2. Menyalakan mesin dan membiarkan hingga mencapai temperatur kerja normal.
3. Memverifikasi kestabilan *idle* menggunakan tachometer.
4. Melakukan *zero/span check* pada *gas analyzer* sesuai prosedur alat.
5. Memasukkan probe *gas analyzer* ke ujung knalpot pada kedalaman yang dianjurkan (minimal 30 cm).
6. Merekam nilai CO, HC, CO₂, O₂, lambda, dan AFR setelah pembacaan stabil.

7. Mengulang pembacaan 2–3 kali bila nilai berfluktuasi; mengambil rata-rata pembacaan stabil.
8. Mencatat kondisi kendaraan: usia, jenis BBM, skor perawatan, sistem bahan bakar, kondisi visual.
9. Melakukan perawatan ringan (pembersihan filter udara, pengecekan busi, penyetelan *idle*, pembersihan injektor/karburator sesuai kondisi).
10. Mengulang pengukuran CO dan HC setelah perawatan untuk mendapatkan data "sesudah".
11. Membandingkan hasil dengan baku mutu Permen LHK No. 8/2023 dan menyusun interpretasi teknis.

3.8 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dalam enam tahap yang berurutan, dengan pemilihan metode statistik yang responsif terhadap distribusi data aktual:

Tahap 1 — Audit dan Sinkronisasi Data Master dataset disinkronkan untuk memastikan konsistensi angka antara abstrak, BAB IV, BAB V, dan lampiran.

Tahap 2 — Statistik Deskriptif Menghitung mean, median, standar deviasi, minimum, dan maksimum untuk seluruh variabel utama.

Tahap 3 — Uji Normalitas Shapiro-Wilk Menentukan distribusi data sebagai dasar pemilihan metode statistik selanjutnya.

Tahap 4 — Analisis Korelasi dan Regresi Meliputi: korelasi Spearman (primer), korelasi Pearson (sensitivitas untuk variabel

normal), regresi linear sederhana, dan regresi linear berganda dengan uji VIF.

Tahap 5 — Pengujian Hipotesis Beda dan Kelompok Meliputi: uji Wilcoxon *Signed-Rank* untuk beda CO dan HC sebelum-sesudah perawatan, dan uji Kruskal-Wallis untuk perbandingan emisi antar kelompok usia kendaraan.

Tahap 6 — Analisis Ekonomi Skenario Menghitung BCR dan *Net Benefit* pada tiga skenario (konservatif, moderat, optimistis).

Tabel 3.4 Rancangan Teknik Analisis Data

Metode	Rumus/Alat	Tujuan	Dasar Pemilihan
Statistik deskriptif	Mean, SD, min, median, max	Menggambarkan profil sampel	Standar deskriptif
Shapiro-Wilk	W dan p-value	Uji normalitas distribusi data	n < 50 (Razali & Wah, 2011)
Spearman (primer)	r, dan p-value	Korelasi bivariat non-parametrik	HC sesudah dan skor tidak normal
Pearson (sensitivitas)	r dan p-value	Konfirmasi untuk variabel normal	Usia, AFR, CO terbukti normal
Regresi sederhana	$Y = a + bX + \epsilon$	Model prediksi emisi satu prediktor	Semua variabel

Metode	Rumus/Alat	Tujuan	Dasar Pemilihan
Regresi berganda	$Y = a + b_1 \text{Usia} + b_2 \text{AFR} + b_3 \text{Skor} + \varepsilon$	Model prediksi multi-prediktor	Kontrol confounding
VIF	$VIF = 1/(1-R_i^2)$	Deteksi multikolinearitas	Wajib untuk model berganda
Wilcoxon Signed-Rank	W dan p-value	Beda emisi sebelum-sesudah (berpasangan)	HC sesudah tidak normal; pengganti <i>paired t-test</i>
Cohen's d	$d = \Delta/SD_{\Delta}$	Ukuran efek perawatan	Melengkapi uji signifikansi
Kruskal-Wallis	H dan p-value	Beda emisi antar ≥ 3 kelompok	Skor perawatan tidak normal; pengganti ANOVA
Penurunan emisi (%)	$[(E_{sblm} - E_{sdh})/E_{sblm}] \times 100\%$	Efektivitas perawatan ringan	Deskriptif kuantitatif
BCR dan NB	$\Sigma \text{Benefit} / \Sigma \text{Cost}; NB = B - C$	Kelayakan ekonomi program	Boardman et al. (2018)

3.8.1 Persamaan Analisis Utama

Persamaan 3.1 Model Regresi Sederhana CO

$$CO = a + b_1(\text{Usia}) + \varepsilon$$

Persamaan 3.2 Model Regresi Sederhana HC

$$HC = a + b_1(\text{Usia}) + \varepsilon$$

Persamaan 3.3 Model Regresi Berganda

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

Persamaan 3.4 Persentase Penurunan Emisi

$$\text{Penurunan (\%)} = [(E_{\text{sebelum}} - E_{\text{sesudah}}) / E_{\text{sebelum}}] \times 100\%$$

Persamaan 3.5 BCR

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

Persamaan 3.6 Net Benefit

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

3.8.2 Hipotesis Penelitian

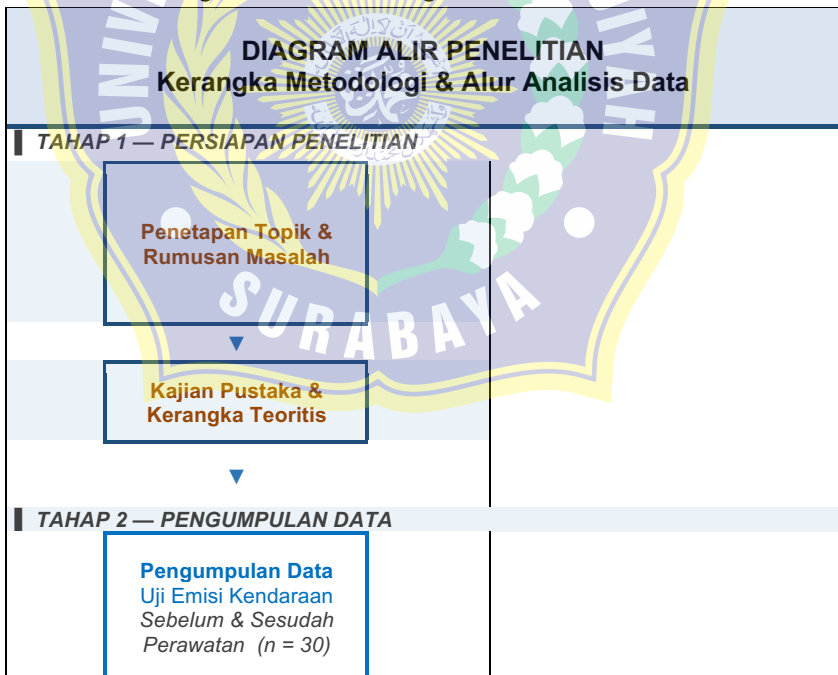
Tabel 3.5 Hipotesis Penelitian

No	Hipotesis	Metode Uji	Kriteria
H ₁	Usia kendaraan berkorelasi positif signifikan dengan CO sesudah perawatan	Spearman	$p < 0,05$; $r_s > 0$

No	Hipotesis	Metode Uji	Kriteria
H ₂	Skor perawatan berkorelasi negatif signifikan dengan CO sesudah perawatan	Spearman	$p < 0,05$; $r_s < 0$
H ₃	Perawatan ringan menurunkan CO secara signifikan	Wilcoxon	$p < 0,05$
H ₄	Perawatan ringan menurunkan HC secara signifikan	Wilcoxon	$p < 0,05$
H ₅	Terdapat perbedaan emisi CO yang signifikan antar kelompok usia	Kruskal-Wallis	$p < 0,05$
H ₆	Program uji emisi + perawatan ringan layak secara ekonomi (skenario moderat)	BCR	BCR > 1; NB > 0

3.9 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi dan Sintesis Penelitian



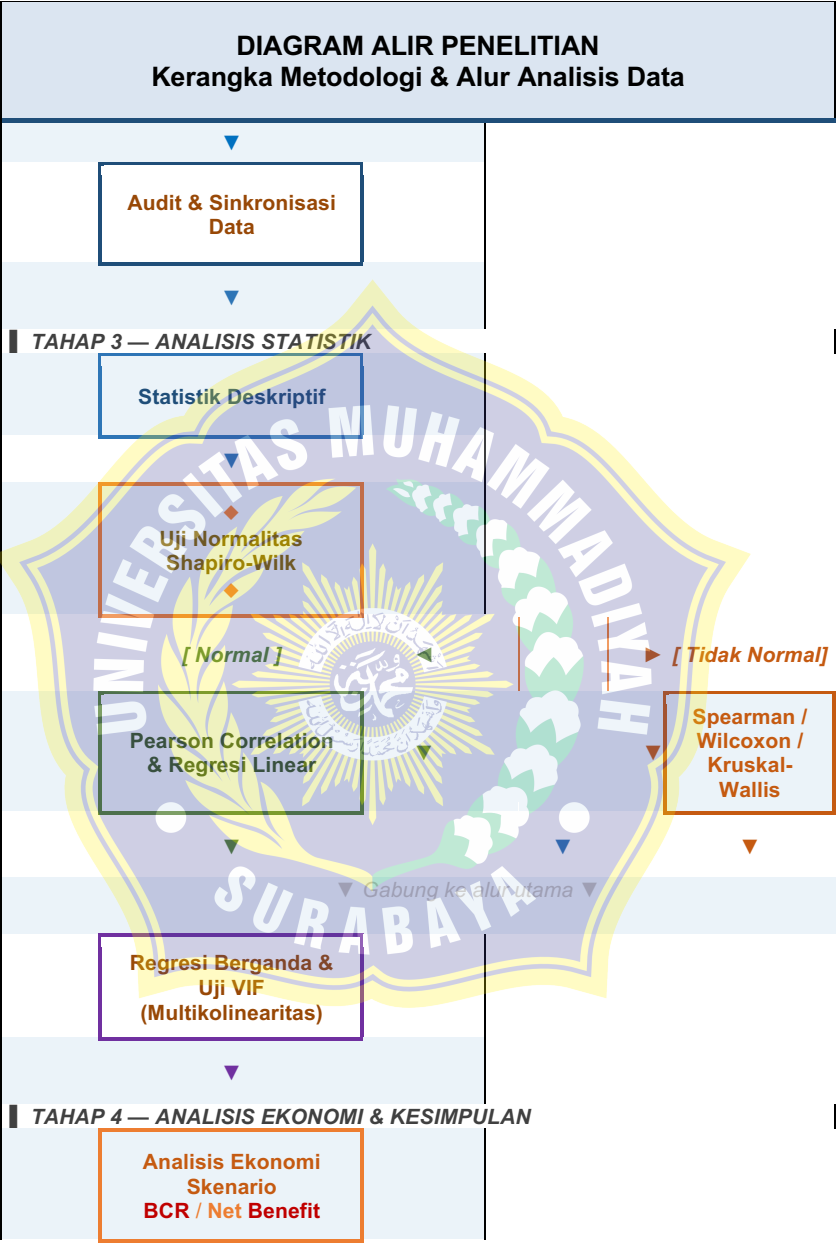


DIAGRAM ALIR PENELITIAN Kerangka Metodologi & Alur Analisis Data

▼

Interpretasi Terpadu

▼

✓
Kesimpulan & Saran

Keterangan Diagram Alir

◆ Simbol belah ketupat = Titik keputusan (Decision Point)

[Normal] → Pearson Correlation & Regresi Linear

[Tidak Normal] → Spearman / Wilcoxon Signed-Rank / Kruskal-Wallis

Kedua jalur bergabung kembali ke: Regresi Berganda + Uji VIF → Analisis Ekonomi
→ Kesimpulan

Penetapan Topik & Rumusan Masalah → Kajian Pustaka
& Kerangka Teoritis → Pengumpulan Data (Uji Emisi: sebelum &
sesudah perawatan, n=30) → Audit & Sinkronisasi Data →
Statistik Deskriptif → Uji Normalitas Shapiro-Wilk → [Normal] →
Pearson/Regresi → [Tidak Normal] →
Spearman/Wilcoxon/Kruskal-Wallis → Regresi Berganda + Uji
VIF → Analisis Ekonomi Skenario (BCR/NB) → Interpretasi
Terpadu → Kesimpulan & Saran