ANALISIS PERPINDAHAN STATUS KUALITAS UDARA BERDASARKAN KONSENTRASI PM2.5 DENGAN *CONTINUOUS-TIME MARKOV CHAIN* (CTMC)

THARA AMALIA SEPTIANI
H1091221045

SKRIPSI

PROGRAM STUDI STATISTIK
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
PONTIANAK
2026

ANALISIS PERPINDAHAN STATUS KUALITAS UDARA BERDASARKAN KONSENTRASI PM2.5 DENGAN *CONTINUOUS-TIME MARKOV CHAIN* (CTMC)

THARA AMALIA SEPTIANI
H1091221045

Skripsi
Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Statistik pada Program Studi Statistik

PROGRAM STUDI STATISTIK
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
PONTIANAK
2026

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Tugas Akhir	: Analisis Perpindahan Status Kualitas Udara Berdasarkan Konsentrasi PM2.5 dengan Continuous-Time Markov Chain (CTMC)
Nama Mahasiswa	: Thara Amalia Septiani
NIM	: H1091221045
Jurusan/Program Studi	: Matematika/Statistik
Tanggal Lulus	: 3 Juni 2026
SK Pembimbing	: No.3598/UN22.8/TD.06/2025/Tanggal 9 Oktober 2025
SK Penguji	: No.2856/DST/UN22.8/DT.00.09/2026/Tanggal 5 Juni 2026

Dosen Pembimbing

Pembimbing I	Pembimbing II
Shantika Martha, M.Si.	Neva Satyahadewi, M.Sc., CRA., CRP., CRMP.
NIP 198403082008122003	NIP 198212042005012001

Dosen Penguji

Ketua Penguji	Anggota Penguji
Nurfitri Imro'ah, M.Si.	Hendra Perdana, M.Sc.
NIP 198907182019032021	NIP 198810102019031020

Pimpinan Sidang (merangkap anggota penguji)	Sekretaris Sidang (merangkap anggota penguji)
Shantika Martha, M.Si.	Neva Satyahadewi, M.Sc., CRA., CRP., CRMP.
NIP 198403082008122003	NIP 198212042005012001

Mengesahkan
Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Tanjungpura

Prof. Dr. Gusrizal, M.Si.
NIP 197108022000031001

PERNYATAAN INTEGRITAS AKADEMIK

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Thara Amalia Septiani

NIM : H1091221045

Program Studi/ Jurusan : Statistik/Matematika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

dengan ini menyatakan bahwa dokumen ilmiah Tugas Akhir yang disajikan ini tidak mengandung unsur pelanggaran integritas akademik sesuai Peraturan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, Dan Teknologi Republik Indonesia Nomor 39 Tahun 2021. Apabila di kemudian hari dokumen ilmiah Tugas Akhir ini mengandung unsur pelanggaran integritas akademik sesuai ketentuan perundangan tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dan/atau sanksi hukum yang berlaku.

Demikian pernyatan ini untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Pontianak, 3 Juni 2026



Thara Amalia Septiani

H1091221045

Analisis Perpindahan Status Kualitas Udara Berdasarkan Konsentrasi PM2.5 dengan *Continuous-Time Markov Chain* (CTMC)

Abstrak

Kualitas udara merupakan faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap kesehatan masyarakat, khususnya yang berkaitan dengan konsentrasi partikel halus PM2.5. Status kualitas udara dapat berubah dari waktu ke waktu sehingga diperlukan pendekatan analisis yang mampu menggambarkan pola perpindahan status tersebut secara probabilistik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik perpindahan status kualitas udara PM2.5 serta mengestimasi probabilitas transisi dan ekspektasi waktu bertahan setiap status kualitas udara menggunakan pendekatan *Continuous-Time Markov Chain* (CTMC). Data yang digunakan berupa data konsentrasi PM2.5 per jam yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Stasiun Meteorologi Kelas l Supadio pada periode Agustus hingga Oktober 2025. Konsentrasi PM2.5 diklasifikasikan ke dalam status kualitas udara berdasarkan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), kemudian dibentuk transisi antarstatus berdasarkan urutan pengamatan per jam. Parameter model CTMC berupa matriks generator (*Q-matrix*) diestimasi menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation*. Hasil analisis menunjukkan bahwa status baik memiliki ekspektasi waktu bertahan paling lama, yaitu sekitar 6,41 jam, diikuti status sedang sekitar 3,29 jam, sedangkan status tidak sehat memiliki waktu bertahan paling singkat, yaitu sekitar 1,76 jam. Distribusi *steady-state* menunjukkan bahwa dalam jangka panjang kualitas udara cenderung berada pada status baik dengan probabilitas sekitar 63,38%, diikuti status sedang sebesar 34,66%, sementara status tidak sehat memiliki probabilitas yang relatif kecil. Pola probabilitas transisi dalam interval satu jam menunjukkan bahwa perubahan status kualitas udara umumnya terjadi secara bertahap.

Kata kunci: PM2.5, Kualitas Udara, Probabilitas Transisi, waktu bertahan, *Steady-state*

Analysis of Air Quality State Transitions Based on PM2.5 Concentrations With Continuous-Time Markov Chain (CTMC)

Abstract

Air quality is an environmental factor that affects public health, particularly in relation to fine particulate matter PM2.5. Changes in air quality status may occur over time, requiring an analytical approach that can probabilistically describe transition patterns between air quality states. This study aims to analyze the transition characteristics of PM2.5 air quality status and to estimate transition probabilities and expected holding times using the Continuous-Time Markov Chain (CTMC) approach. The data consist of hourly PM2.5 concentration records obtained from the Indonesian Agency for Meteorology, Climatology, and Geophysics (BMKG) Supadio Class 1 Meteorological Station for the period August to October 2025. PM2.5 concentrations were classified into air quality statuses based on the Air Pollution Standard Index, and transitions between statuses were constructed according to the hourly observation sequence. The CTMC model parameters, represented by the generator matrix (Q-matrix), were estimated using the Maximum Likelihood Estimation method. The results indicate that the good air quality status has the longest expected holding time, approximately 6.41 hours, followed by the moderate status at about 3.29 hours, while the unhealthy status exhibits the shortest holding time at around 1.76 hours. The steady-state distribution shows that, in the long run, air quality tends to remain in the good status with a probability of approximately 63.38%, followed by the moderate status at 34.66%, whereas the unhealthy status has a relatively small probability. The one-hour transition probabilities indicate that changes in air quality generally occur gradually.

Keywords: *PM2.5, Air Quality, Transitions Probability, Holding Time, Steady-state*

PRAKATA

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul "**Analisis Perpindahan Status Kualitas Udara Berdasarkan Konsentrasi PM2.5 dengan *Continuous-Time Markov Chain* (CTMC)***"*. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Statistika pada Program Studi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa keberhasilan yang dicapai tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dukungan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan kesehatan, kekuatan, kemudahan, serta petunjuk kepada penulis dalam setiap tahap penyusunan skripsi ini.
2. Ayahanda tercinta, atas doa, dukungan, dan kasih sayang yang tiada henti kepada penulis. Serta Ibunda tercinta (Almh.), yang meskipun telah berpulang, namun doa, kasih sayang, dan nasihat semasa hidupnya senantiasa menjadi sumber kekuatan dan motivasi bagi penulis dalam menyelesaikan pendidikan.
3. Adik laki-laki penulis, yang selalu memberikan semangat, dukungan, dan keceriaan sehingga menjadi penyemangat tersendiri bagi penulis selama masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi.
4. Ibu Shantika Martha, M.Si., selaku dosen pembimbing pertama, yang telah dengan sabar memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang sangat berarti selama masa penyusunan skripsi ini.
5. Ibu Neva Satyahadewi, M.Sc., CRA., CRP., CRMP., selaku dosen pembimbing kedua, atas bimbingan, saran, serta motivasi yang diberikan kepada penulis.
6. Ibu Nurfitri Imro'ah, M.Si., selaku dosen penguji pertama, yang telah memberikan kritik, saran, dan koreksi yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini.

7. Bapak Hendra Perdana, M.Sc., selaku dosen penguji kedua, yang telah memberikan kritik, saran, dan koreksi yang membangun demi perbaikan skripsi ini.
8. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Pengajar Program Studi Statistika atas ilmu, wawasan, serta pengalaman berharga yang telah diberikan selama masa perkuliahan.
9. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang telah memberikan data serta informasi yang dibutuhkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
10. Sahabat-sahabat tercinta penulis yaitu Kade, Murni, Brigitha, Vivi, Peby, Lija, Cici, Ika, Risma, Rahma, Cindi, dan Della yang selalu memberikan dukungan, semangat, serta bantuan yang berharga kepada penulis.
11. Teman-teman Majestic Statistika Angkatan 2022, yang telah berjuang bersama, saling mendukung, dan membersamai penulis sejak awal perkuliahan hingga penyelesaian skripsi.
12. Seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, serta kontribusi dalam berbagai bentuk selama proses penyusunan skripsi ini, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.
13. Terakhir, penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada diri saya sendiri, karena telah berjuang dan bertahan tanpa lelah meski terkadang jalan yang di tempuh seringkali sulit dan penuh ragu.

Penulis berharap karya ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan pihak-pihak yang memerlukannya. Segala bentuk kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi perbaikan karya ini di masa yang akan datang. Terima kasih. Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Pontianak, 3 Juni 2026



Thara Amalia Septiani

DAFTAR ISI

Abstrak ..... **iv**
Abstract ..... **v**
PRAKATA ..... **vi**
DAFTAR ISI ..... **viii**
DAFTAR GAMBAR ..... **x**
DAFTAR TABEL ..... **xi**
DAFTAR SIMBOL ..... **xii**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Batasan Masalah 4
1.5 Tinjauan Pustaka 5
1.6 Metodologi Penelitian 6
BAB II LANDASAN TEORI **8**
2.1 Kualitas Udara 8
2.2 *Particulate Matter* (PM2.5) 10
2.3 Proses Stokastik 11
2.4 *Markov Chain* 12
BAB III CONTINUOUS-TIME MARKOV CHAIN (CTMC) **13**
3.1 *Continuous-Time Markov Chain* (CTMC) 13
3.2 Matriks Generator (*Q-Matrix*) 15
3.3 Estimasi Parameter Model 17
3.4 Ekspektasi Waktu Bertahan (*Holding Time*) 19
3.5 Distribusi Keadaan Tunak *(Steady-State)* 20
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN **22**
4.1 Analisis Deskriptif 22
4.2 Analisis Transisi Status Kualitas Udara 25

4.3 Estimasi Matriks Generator (Q-*Matrix*) 29
4.4 Analisis Waktu Bertahan (*Holding Time*) 32
4.5 Analisis Distribusi Keadaan Tunak (*Steady-State*) 34
4.6 Analisis Probabilitas Transisi Antar Status 35
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 38
5.1 Kesimpulan 38
5.2 Saran 38
DAFTAR PUSTAKA 40
LAMPIRAN 43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 *Flowchart* Penelitian.....7
Gambar 4.1 Grafik *Time Series* Konsentrasi PM2.5 per Jam.....23

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Status Kualitas Udara 9
Tabel 4.1 Statistik Deskriptif Konsentrasi PM2.5 23
Tabel 4.2 Frekuensi Transisi Status Kualitas Udara 26
Tabel 4.3 Distribusi Transisi Bulanan Berdasarkan Status Awal..... 28
Tabel 4.4 Hasil Pemeriksaan Homogenitas Waktu 28
Tabel 4.5 *Holding Time* Tiap Status Kualitas Udara..... 33
Tabel 4.6 *Steady-State* Status Kualitas Udara 34
Tabel 4.7 Probabilitas Transisi Status Kualitas Udara 35

DAFTAR SIMBOL

I_p	: Nilai indeks pencemar udara (ISPU) untuk polutan ke-p
I_{hi}	: Nilai indeks ISPU batas atas pada rentang yang bersesuaian
I_{lo}	: Nilai indeks ISPU batas bawah pada rentang yang bersesuaian
C_p	: Konsentrasi polutan hasil pengukuran (µg/m³)
C_{hi}	: Batas atas konsentrasi polutan pada rentang ISPU tertentu
C_{lo}	: Batas bawah konsentrasi polutan pada rentang ISPU tertentu
X_t	: Status kualitas udara pada waktu t
X_{t+s}	: Status kualitas udara pada waktu $t+s$
t	: Waktu pengamatan
S	: Himpunan *state* (status kualitas udara)
$\boldsymbol{P(t)}$	: Matriks probabilitas transisi pada waktu t
$p_{ij}(t)$	: Probabilitas transisi dari *state* i ke *state* j dalam waktu t
$\boldsymbol{I}$	: Matriks indentitas
$\boldsymbol{Q}$	: Matriks generator CTMC
q_{ij}	: Laju transisi dari *state* i ke $j, i \neq j$
q_{ii}	: Laju keluar dari *state* i
N_{ij}	: Jumlah transisi dari *state* i ke j
T_i	: Total waktu pada state i
$\hat{q}_{ij}$	: Estimasi laju transisi dari *state* i ke $j, i \neq j$
$\hat{q}_{ii}$	: Estimasi laju keluar dari *state* i
$\boldsymbol{\pi}$	: Vektor distribusi *steady-state*
π_i	: Probabilitas *steady-state* state i
n	: Jumlah status kualitas udara
u	: Panjang selang waktu setelah waktu t
k	: Indeks state perantara
$L(Q)$	: Fungsi likelihood dari matriks generator $\boldsymbol{Q}$
$\ell(\mathrm{Q})$	: Fungsi *log-likelihood* dari matriks generator $\boldsymbol{Q}$

χ^2 : Statistik uji *chi-square*

R : Jumlah periode pengamatan pada uji homogenitas waktu

C : Jumlah status tujuan pada uji homogenitas waktu

O_{rc} : Frekuensi transisi aktual pada periode ke-r dan status tujuan ke-c

E_{rc} : Frekuensi harapan pada periode ke-r dan status tujuan ke-c

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kualitas udara merupakan faktor penting yang memengaruhi kesehatan, masyarakat, ekonomi, dan lingkungan. Salah satu polutan udara yang menjadi perhatian adalah PM2.5 (partikel dengan diameter ≤ 2.5 mikrometer), yang dapat menimbulkan kesehatan serius, terutama pada sistem pernapasan. Paparan konsentrasi PM2.5 yang tinggi dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti ISPA (Infeksi Saluran Pernapasan Akut) (Syafaati et al., 2023). Selain itu, konsentrasi PM2.5 dapat bervariasi menurut waktu dan lokasi, sehingga tingkat paparan dan risiko kesehatan yang diterima masyarakat juga dapat berbeda.

Dalam beberapa tahun terakhir, peningkatan jumlah kendaraan bermotor, aktivitas industri dan pembakaran bahan bakar fosil menjadi penyumbang utama pencemaran udara di berbagai wilayah Indonesia, terutama di kawasan perkotaan (Iriani & Pribadi, 2023). Kondisi pencemaran udara tersebut berdampak pada meningkatnya konsentrasi PM2.5, yang pada waktu dan lokasi tertentu dapat melampaui ambang batas aman yang ditetapkan oleh WHO. Akibatnya, status kualitas udara dapat mengalami perubahan dari kategori baik menjadi tidak sehat dalam waktu yang relatif singkat (Istiana et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa kualitas udara bersifat fluktuatif dan perlu dianalisis dengan pendekatan yang mampu menggambarkan pola perubahan kondisi dari waktu ke waktu.

Sejauh ini, berbagai metode telah digunakan untuk memodelkan distribusi dan sebaran PM2.5. Salah satu model yang banyak digunakan adalah AERMOD (*Atmospheric Dispersion Modeling System*) yang dirancang untuk memprediksi penyebaran polutan di udara dengan mempertimbangkan kondisi atmosfer seperti kecepatan dan arah angin, suhu udara, tinggi lapisan pencampuran, dan stabilitas atmosfer (Iriani & Pribadi, 2023). Pendekatan ini memberikan informasi penting

mengenai pola sebaran spasial dan estimasi konsentrasi PM2.5 pada suatu wilayah. Namun demikian, dalam konteks pengelolaan kualitas udara, informasi mengenai perubahan kondisi atau status kualitas udara dari waktu ke waktu juga diperlukan. Analisis terhadap pola perubahan status kualitas udara dapat memberikan pemahaman tambahan mengenai dinamika kondisi udara, yang relevan untuk mendukung upaya pemantauan dan sistem peringatan dini.

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk memodelkan perubahan status kualitas udara adalah *Continuous-Time Markov Chain* (CTMC). Pendekatan ini memandang perubahan kondisi sebagai suatu proses stokastik yang berlangsung dalam waktu kontinu, sehingga sesuai untuk merepresentasikan perubahan status yang terjadi sepanjang waktu pengamatan. Penggunaan CTMC sebagai kerangka pemodelan telah diterapkan dalam berbagai konteks, salah satunya pada pemodelan sistem epidemik yang dilakukan oleh Eliska et al. (2021). Dengan demikian, CTMC tidak hanya menggambarkan kemungkinan terjadinya perpindahan status kualitas udara, tetapi juga merepresentasikan proses perubahan kondisi tersebut dalam kerangka waktu yang berlangsung secara kontinu.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan model berbasis Markov untuk menganalisis data kualitas udara dan memprediksi parameter polutan. Salah satu contohnya adalah penelitian Liu et al. (2024) yang menggunakan *Gaussian Hidden Markov Model* (GHMM) untuk memodelkan deret waktu indeks kualitas udara (*Air Quality Index*) berbasis data harian, sehingga mampu menggambarkan ketergantungan temporal serta hubungan antara emisi industri dan kondisi kualitas udara. Meski demikian, dinamika kualitas udara pada kenyataannya merupakan proses yang berlangsung secara berkelanjutan, di mana perubahan kondisi dapat terjadi kapan saja dalam rentang waktu pengamatan dan tidak selalu bertepatan dengan interval pencatatan data. Oleh karena itu, diperlukan suatu kerangka pemodelan yang mampu merepresentasikan proses perubahan status kualitas udara dalam waktu kontinu, tanpa bergantung pada langkah waktu tertentu. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk tujuan tersebut adalah CTMC, yang memodelkan perpindahan status sebagai

proses stokastik dalam waktu kontinu dan banyak digunakan untuk merepresentasikan sistem dinamis (Ross, 2014).

Di Indonesia, penelitian kualitas udara umumnya masih fokus pada analisis deskriptif atau hubungan polutan dengan faktor meteorologis (Santoso et al., 2020). Sementara itu, penelitian yang secara khusus membahas perubahan status kualitas udara dari waktu ke waktu menggunakan kerangka probabilistik masih relatif terbatas. Kondisi ini menunjukkan adanya peluang untuk mengembangkan pendekatan analisis yang dapat menggambarkan pola perpindahan status kualitas udara, khususnya melalui penggunaan model berbasis waktu kontinu seperti CTMC.

Kabupaten Kubu Raya menjadi wilayah yang menarik untuk diteliti karena lokasinya yang berdekatan dengan pusat aktivitas ekonomi dan transportasi di Kalimantan Barat, serta kerentanannya terhadap kebakaran lahan gambut (Ruliyansyah & Pramulya, 2021). Kondisi tersebut berpotensi memengaruhi kualitas udara di wilayah ini dan menyebabkan perubahan kondisi kualitas udara dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, analisis terhadap pola perubahan status kualitas udara menjadi relevan untuk dilakukan. Sejauh ini, kajian mengenai PM2.5 di Indonesia umumnya masih berfokus pada gambaran konsentrasi polutan dan keterkaitannya dengan faktor meteorologis, seperti yang ditunjukkan pada studi karakteristik PM2.5 dan parameter meteorologi di Jakarta serta analisis konsentrasi dan sebaran PM2.5 di Kota Bogor (Iriani & Pribadi, 2023; Istiana et al., 2023). Penelitian ini menggunakan data konsentrasi PM2.5 yang diperoleh dari BMKG Stasiun Meteorologi Kelas I Supadio. Dengan mempertimbangkan bahwa kualitas udara dapat mengalami perubahan kondisi dari waktu ke waktu, penelitian ini menggunakan pendekatan CTMC untuk merepresentasikan pola perpindahan status kualitas udara. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi akademis dalam pengembangan metode analisis kualitas udara, serta mendukung upaya pengelolaan kualitas udara dan peringatan dini kesehatan masyarakat.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, rumusan masalah dalam penelitian ini dirumuskan untuk menjawab permasalahan terkait dinamika kualitas udara di Kabupaten Kubu Raya, sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik perpindahan status kualitas udara berdasarkan konsentrasi PM2.5 di Kabupaten Kubu Raya?
2. Berapa besar probabilitas transisi dan lama waktu bertahan setiap status kualitas udara berdasarkan model *Continuous-Time Markov Chain* (CTMC)?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik perpindahan status kualitas udara berdasarkan konsentrasi PM2.5 di Kabupaten Kubu Raya.
2. Mengestimasi probabilitas transisi dan lama waktu bertahan setiap status kualitas udara dengan pendekatan *Continuous-Time Markov Chain* (CTMC).

1.4 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus dan sistematis penelitian, beberapa batasan masalah diterapkan sebagai berikut:

1. Data yang digunakan adalah konsentrasi PM2.5 per jam dari BMKG Stasiun Meteorologi Kelas l Supadio pada wilayah Kabupaten Kubu Raya dengan periode pengamatan Agustus–Oktober 2025. Data dibatasi pada hasil pengukuran di lokasi stasiun pemantauan dan tidak mencakup seluruh wilayah Kabupaten Kubu Raya.
2. Kategori status kualitas udara ditentukan berdasarkan standar ISPU (Indeks Standar Pencemar Udara) untuk parameter PM2.5.

1.5 Tinjauan Pustaka

Penelitian yang dilakukan oleh Iriani & Pribadi (2023) menganalisis sebaran konsentrasi PM2.5 di Jalur Protokol Kota Bogor menggunakan model AERMOD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi PM2.5 cenderung tinggi di area dengan lalu lintas padat dan aktivitas industri. Pendekatan AERMOD efektif dalam menggambarkan sebaran spasial polutan udara. Namun, fokus analisis penelitian tersebut lebih diarahkan pada aspek spasial, sehingga dinamika perubahan status kualitas udara dari waktu ke waktu belum menjadi perhatian utama.

Dalam penelitian lain, Syafaati et al. (2023) menganalisis kualitas udara di Kota Sorong dengan fokus pada parameter PM2.5 menggunakan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas udara sering berada pada kategori kurang sehat, terutama pada musim kemarau akibat peningkatan aktivitas transportasi dan industri. Penelitian menggunakan analisis deskriptif, sehingga hasil penelitian lebih menekankan pada gambaran kondisi kualitas udara, tanpa secara khusus mengkaji pola perubahan status kualitas udara dari waktu ke waktu.

Eliska et al. (2021) menerapkan CTMC untuk menganalisis dinamika penyebaran penyakit Rubella melalui model epidemik SVEIR. Dalam penelitian tersebut, CTMC digunakan untuk merepresentasikan perubahan status penyakit sebagai proses stokastik dalam waktu kontinu. Meskipun berada pada konteks epidemiologi, kerangka CTMC yang digunakan bersifat umum dan dapat diterapkan untuk memodelkan perubahan status pada sistem lain, termasuk kualitas udara.

Selain itu, Ross (2014) membahas konsep dasar teori probabilitas dan proses stokastik yang menjadi landasan dalam pemodelan CTMC, termasuk definisi dan sifat matriks generator (*Q-matrix*). Pembahasan tersebut memberikan kerangka teoretis mengenai bagaimana laju perpindahan antarstatus direpresentasikan dalam proses Markov waktu kontinu, sehingga menjadi dasar dalam memahami dinamika perubahan suatu sistem dari waktu ke waktu.

1.6 Metodologi Penelitian

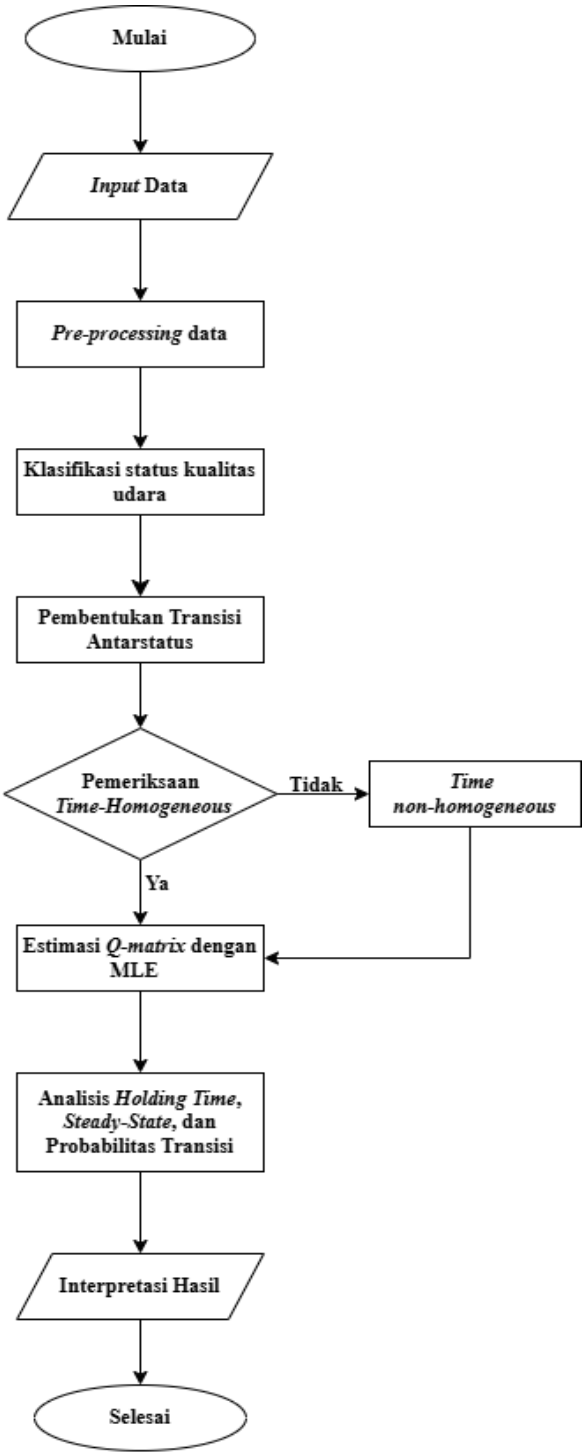
Penelitian ini menggunakan data konsentrasi PM2.5 per jam yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Stasiun Meteorologi Kelas l Supadio pada periode Agustus–Oktober 2025. Tahap awal penelitian diawali dengan *preprocessing* data dengan mengecek missing value, outlier, dan mengecek konsistensi data, selanjutnya adalah analisis deskriptif untuk mengetahui karakteristik umum konsentrasi PM2.5 di Kabupaten Kubu Raya.

Setelah itu, data konsentrasi PM2.5 diklasifikasikan ke dalam status kualitas udara berdasarkan ISPU, yaitu baik, sedang, tidak sehat, sangat tidak sehat, dan berbahaya. Klasifikasi ini bertujuan untuk mengubah data numerik konsentrasi PM2.5 menjadi data kategorik berupa status kualitas udara yang akan digunakan sebagai ruang status dalam pemodelan CTMC.

Tahap berikutnya adalah pembentukan transisi antarstatus kualitas udara berdasarkan urutan pengamatan per jam. Pada tahap ini disusun urutan status kualitas udara dari waktu ke waktu, kemudian dihitung jumlah perpindahan antarstatus serta total waktu sistem berada pada setiap status.

Setelah itu, dilakukan pemeriksaan homogenitas waktu untuk mengetahui apakah pola transisi antarstatus kualitas udara berbeda secara signifikan antarbulan pengamatan. Berdasarkan data transisi yang diperoleh, selanjutnya adalah mengestimasi parameter model CTMC, yaitu matriks generator (*Q-matrix*), menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) dengan bantuan perangkat lunak R.

Tahap akhir penelitian berupa analisis lanjutan berdasarkan matriks generator yang telah diestimasi. Analisis ini meliputi perhitungan ekspektasi waktu bertahan (*holding time*) pada setiap status kualitas udara serta distribusi keadaan tunak (*steady-state*) untuk menggambarkan kecenderungan jangka panjang status kualitas udara. Alur tahapan penelitian disajikan dalam bentuk *flowchart* pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 *Flowchart* Penelitian