

Penerapan Rantai Markov untuk Menentukan Probabilitas Kategori Hujan Harian di Institut Teknologi Sumatera

Tugas Besar Pemodelan Stokastik



Disusun Oleh Kelompok 1 RA:

Nadilla Andhara Putri (121450003)

Mujadid Choirus Surya (121450015)

Balqis Dwian Fitri Zamzami (121450018)

Ayu Erlinawati (121450025)

PROGRAM STUDI SAINS DATA

FAKULTAS SAINS INSTITUT TEKNOLOGI SUMATERA

2025

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola transisi curah hujan harian di lingkungan Institut Teknologi Sumatera (ITERA) menggunakan pendekatan Rantai Markov sebagai model stokastik yang mampu merepresentasikan dinamika perubahan kondisi cuaca dari satu hari ke hari berikutnya. Data yang digunakan merupakan data curah hujan 10-menitan yang diperoleh dari *Automatic Weather Station* (AWS) ITERA untuk periode 1 Januari hingga 31 Agustus 2024. Data tersebut melalui proses preprocessing berupa seleksi variabel, pembersihan nilai yang tidak valid, transformasi menjadi data harian melalui agregasi total curah hujan, serta diskretisasi ke dalam kategori cuaca berdasarkan standar BMKG, yaitu Berawan, Hujan Ringan, Hujan Sedang, Hujan Lebat, dan Hujan Sangat Lebat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap kategori hujan memiliki kecenderungan transisi yang berbeda-beda, di mana kategori dengan intensitas rendah seperti Berawan dan Hujan Ringan menunjukkan probabilitas bertahan yang lebih tinggi dibanding kategori dengan intensitas lebih tinggi. Matriks probabilitas transisi 1-langkah memberikan gambaran perubahan cuaca harian secara langsung, sedangkan distribusi probabilitas n-langkah memperlihatkan kecenderungan pola cuaca dalam beberapa hari ke depan. Selain itu, probabilitas steady state mengindikasikan kategori cuaca yang lebih dominan dalam jangka panjang. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa model Rantai Markov mampu memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai dinamika curah hujan harian di ITERA dan dapat digunakan sebagai dasar untuk analisis prediksi cuaca berbasis probabilistik.

Kata Kunci: AWS ITERA Stokastik, Curah hujan, Probabilitas Transisi, Rantai Markov, Steady State.

BAB I

PENDAHULUAN

Fenomena alam dalam kehidupan sehari-hari seringkali bersifat tidak pasti dan dipengaruhi oleh banyak faktor acak. Ketidakpastian tersebut tampak pada berbagai peristiwa, seperti pergerakan lempeng bumi, dinamika pasar keuangan, hingga perubahan kondisi cuaca. Perubahan kondisi cuaca, terutama curah hujan, memiliki peran penting terhadap aktivitas manusia. Curah hujan yang sangat tinggi dapat memicu banjir, sementara curah hujan yang rendah berpotensi menimbulkan kekeringan. Dampak dari cuaca ekstrem ini merupakan salah satu tantangan lingkungan yang serius di berbagai wilayah di dunia [1]. Beberapa daerah di Indonesia bahkan termasuk kategori rawan bencana akibat tingginya variabilitas curah hujan. Sebagaimana dijelaskan pada indeks kerawanan bencana, wilayah tertentu memiliki peluang terjadinya banjir yang cukup besar [2], yang dipengaruhi oleh faktor seperti intensitas hujan dan kondisi lingkungan (misalnya penggunaan lahan dan karakteristik permukaan) [3]. Selain itu, hujan ringan ataupun sedang juga dapat menyebabkan genangan yang mengganggu aktivitas masyarakat serta merusak infrastruktur [4].

Untuk meminimalkan risiko tersebut, diperlukan upaya mitigasi yang didukung oleh informasi cuaca yang lebih akurat. Namun, kondisi cuaca tidak dapat ditentukan secara pasti karena proses ini bersifat acak dan dipengaruhi oleh banyak variabel yang berubah setiap waktu. Oleh karena itu, pendekatan probabilistik menjadi penting dalam upaya memprediksi kemungkinan terjadinya suatu kondisi cuaca. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk menganalisis fenomena yang bersifat acak adalah model stokastik berbasis rantai Markov, sebagaimana dibahas dalam penelitian Ihsan dan rekan-rekannya [5]. Model ini memungkinkan peneliti untuk melihat bagaimana suatu kondisi cuaca pada hari tertentu dipengaruhi oleh kondisi hari sebelumnya. Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa rantai Markov dapat diterapkan secara efektif dalam memodelkan perubahan cuaca harian di berbagai wilayah. Misalnya, penelitian yang dilakukan oleh Nurhamiddin dan Sulisa (2019) mengaplikasikan metode ini pada data cuaca harian di Kota Ternate dengan mengelompokkan kondisi cuaca menjadi empat kategori cerah, berawan, hujan ringan, dan hujan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pola transisi antar kondisi cuaca dapat diprediksi dengan baik, di mana hujan ringan menjadi kondisi yang paling dominan dengan probabilitas rata-rata di atas 43% [6]. Penelitian lain oleh Sipayung dkk. (2024) menganalisis data cuaca harian di Kota Medan menggunakan pendekatan Rantai Markov dan menemukan bahwa model ini mampu memberikan estimasi yang cukup akurat terkait peluang perubahan cuaca dari satu hari ke hari berikutnya [7]. Selain itu, probabilitas *steady state* yang dihasilkan menunjukkan dominasi cuaca cerah berawan dan berawan dalam jangka panjang. Kedua penelitian ini menegaskan bahwa Rantai Markov merupakan metode yang sesuai untuk mempelajari pola transisi cuaca serta memperkirakan kondisi cuaca masa depan berdasarkan keadaan sebelumnya.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, penelitian ini menerapkan rantai Markov untuk menganalisis dan menentukan probabilitas kategori hujan harian di lingkungan Institut Teknologi Sumatera (ITERA). Berbeda dengan penelitian terdahulu yang berfokus pada wilayah lain atau menggunakan rentang data terbatas, penelitian ini memanfaatkan data curah hujan harian yang lebih panjang dan diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori hujan untuk mengetahui kecenderungan kondisi cuaca harian di ITERA.

1.1 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pola transisi probabilitas antar kategori hujan harian di lingkungan Institut Teknologi Sumatera (ITERA) periode tahun 2024?
2. Bagaimana probabilitas jangka panjang dari model Rantai Markov menggambarkan kecenderungan perubahan status cuaca harian di ITERA?

1.2 Tujuan

1. Menganalisis pola transisi antar kategori hujan harian di ITERA menggunakan pendekatan Rantai Markov.
2. Menentukan distribusi probabilitas jangka panjang dari model Rantai Markov sebagai dasar untuk prediksi kecenderungan cuaca harian di ITERA.

1.3 Manfaat Penelitian

1. Memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai dinamika transisi antar kategori cuaca harian melalui Matriks Probabilitas Transisi 1-Langkah. Hasil ini dapat menjadi referensi akademis untuk studi pola cuaca dan model stokastik di wilayah ITERA.
2. Menyediakan model prediksi probabilistik berbasis Rantai Markov yang dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan mitigasi risiko bencana hidrometeorologi, seperti banjir akibat hujan ekstrem.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hujan

Curah hujan merupakan bentuk presipitasi yang terjadi ketika partikel air di atmosfer mengalami pengembunan dan jatuh ke permukaan bumi. Proses ini terjadi melalui tahapan kondensasi uap air yang kemudian turun sebagai bagian dari siklus hidrologi. Selain hujan, bentuk presipitasi lainnya meliputi salju dan es. Kejadian hujan bersifat sangat bervariasi, baik dari sisi waktu maupun lokasi, sehingga menjadi salah satu unsur cuaca yang paling dinamis. Intensitas hujan menggambarkan jumlah curah hujan dalam suatu interval waktu tertentu, misalnya dalam satuan mm/jam atau mm/hari [8]. Sementara itu, curah hujan didefinisikan sebagai tinggi air hujan yang tertampung pada suatu permukaan datar yang tidak mengalami infiltrasi, aliran, maupun penguapan, dan di Indonesia umumnya diukur dalam satuan milimeter. Pengukuran curah hujan oleh Balai Besar Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BBMKG) dilakukan setiap hari dalam periode 24 jam pada pukul 00.00 GMT [8].

Secara klimatologis, curah hujan merupakan salah satu parameter penting yang menentukan kondisi hidrologi dan ketersediaan air. Kecukupan curah hujan mendukung kebutuhan air bagi makhluk hidup, sedangkan intensitas yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat menimbulkan dampak seperti banjir maupun kekeringan. Data curah hujan harian, yang umumnya meliputi nilai minimum, maksimum, dan rata-rata, sering digunakan dalam berbagai analisis untuk mendukung perencanaan dan mitigasi. Informasi ini menjadi dasar penting dalam penentuan awal musim hujan dan kemarau, pengelolaan sumber daya air, serta upaya antisipasi bencana hidrometeorologi [9]. Berdasarkan besarnya curah hujan yang tercatat dalam suatu periode, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) mengelompokkan intensitas hujan ke dalam beberapa kategori [10], yaitu:

1. Hujan ringan : 1,0-5,0 mm/jam atau 5-20 mm/hari.
2. Hujan sedang : 5,0-10 mm/jam atau 20-50 mm/hari.
3. Hujan lebat : 10-20 mm/jam atau 50-100 mm/hari.
4. Hujan sangat lebat : > 20 mm/hari atau >100 mm/hari.

2.2 Pemodelan Stokastik

Pemodelan stokastik merupakan pendekatan matematis yang digunakan untuk merepresentasikan fenomena yang memiliki unsur ketidakpastian dan dipengaruhi oleh variabel acak. Dalam

banyak kasus, sistem yang diamati tidak dapat dimodelkan secara deterministik karena adanya variabilitas yang tidak terkontrol. Model stokastik banyak digunakan dalam meteorologi, hidrologi, biologi, ekonomi, serta berbagai proses alam yang bersifat tidak pasti. Hasil penelitian mengenai curah hujan di Pringsewu menunjukkan bahwa perilaku hujan harian memiliki komponen stokastik yang kuat dan berfluktuasi secara acak setelah komponen periodiknya dihilangkan, sehingga pendekatan stokastik diperlukan untuk menggambarkan variabilitas tersebut [10].

Proses stokastik didefinisikan sebagai himpunan variabel acak $\{X_t\}$ yang terindeks oleh waktu t . Setiap nilai yang muncul dipengaruhi oleh distribusi peluang tertentu, bukan oleh formula eksak. Dalam konteks klimatologi, model stokastik digunakan karena perubahan cuaca sangat dipengaruhi oleh dinamika atmosfer yang kompleks. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pendekatan stokastik, seperti proses Poisson, model *autoregressive* stokastik, hingga rantai Markov, efektif untuk memodelkan pola hujan dan perubahan cuaca harian. Temuan pada studi pemodelan stokastik curah hujan Lampung juga memperkuat bahwa komponen stokastik dapat dimodelkan menggunakan *autoregressive* (AR), terutama ketika fluktuasi curah hujan bersifat acak akibat faktor atmosfer yang berubah-ubah dari waktu ke waktu [11].

Pemodelan stokastik dipilih pada penelitian ini karena mampu menggambarkan bagaimana keadaan cuaca pada satu hari berkaitan dengan keadaan di hari sebelumnya. Hal ini menjadikan model stokastik, khususnya Rantai Markov, relevan sebagai metode untuk memperkirakan probabilitas transisi kategori curah hujan. Selain itu, beberapa penelitian lingkungan menunjukkan bahwa variabilitas curah hujan dipengaruhi oleh faktor atmosfer yang bersifat non-deterministik sehingga membutuhkan pendekatan probabilistik seperti model stokastik dalam proses pemodelannya, terutama untuk analisis hujan harian dan simulasi iklim skala mikro [12].

2.3 Rantai Markov

Rantai Markov merupakan suatu model atau proses stokastik dalam matematika yang menggambarkan urutan variabel acak, di mana setiap perubahan keadaan terjadi sesuai dengan aturan transisi yang ditentukan oleh proses Markov. Konsep rantai Markov diperkenalkan oleh Andrey A. Markov pada tahun 1907. Dalam pengembangannya, Markov menjelaskan bahwa suatu proses dapat dimodelkan sebagai rangkaian kejadian berurutan di mana hasil dari suatu percobaan hanya bergantung pada keadaan sebelumnya yang paling dekat, dan tidak dipengaruhi

oleh kejadian-kejadian yang lebih lampau[13]. Dengan kata lain, proses ini memiliki sifat ingatan terbatas (*memoryless*) sehingga ketergantungan hanya terjadi pada satu tahap sebelum kejadian berlangsung. Rantai Markov didefinisikan sebagai sebuah proses stokastik yang distribusi bersyarat dari keadaan pada waktu mendatang sepenuhnya ditentukan oleh keadaan sistem pada waktu sekarang. Proses ini tidak memerlukan informasi tambahan dari keadaan-keadaan sebelumnya di luar waktu t . Oleh karena itu, model Markov sangat efektif digunakan untuk menggambarkan perubahan suatu sistem secara bertahap dari satu keadaan ke keadaan yang lain[14]. Dalam banyak aplikasi, termasuk peramalan cuaca, model ini membantu mempelajari pola kemungkinan transisi dan memprediksi dinamika sistem pada periode berikutnya.

Dasar analisis rantai Markov terletak pada representasi proses stokastiknya dalam bentuk urutan kejadian dengan probabilitas transisi tertentu. Probabilitas-probabilitas tersebut disusun dalam sebuah matriks yang dikenal sebagai matriks probabilitas transisi, yang menyajikan peluang perpindahan dari satu keadaan ke keadaan lain secara terstruktur dan mudah dianalisis[15]. Dengan menggunakan matriks ini, peneliti dapat menghitung peluang jangka pendek maupun jangka panjang, serta menentukan keadaan-keadaan yang paling mungkin terjadi pada masa mendatang.

Secara matematis, sifat Markov dirumuskan sebagai berikut:

$$P(X_{t+1} = j \mid X_t = i, X_{t-1}, \dots, X_0) = P(X_{t+1} = j \mid X_t = i)$$

di mana:

- X_t adalah keadaan pada waktu t
- i dan j adalah elemen dari ruang keadaan (state space).

Dalam rantai Markov, perpindahan dari satu keadaan ke keadaan lainnya dinyatakan melalui peluang transisi. Peluang transisi merupakan probabilitas bahwa sistem berpindah dari keadaan i pada waktu t menuju keadaan j pada waktu $t+1$.

Secara matematis, peluang transisi didefinisikan sebagai:

$$p_{ij} = P(X_{t+1} = j \mid X_t = i)$$

dengan syarat:

$$p_{ij} \geq 0, \quad \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$$

Setiap p_{ij} menunjukkan kemungkinan sistem bergerak dari keadaan awal i ke keadaan target j . Jika rantai Markov memiliki n keadaan, maka seluruh peluang transisi disajikan dalam bentuk matriks transisi berukuran $n \times n$.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

Setiap baris pada matriks transisi merepresentasikan keadaan saat ini, sedangkan kolom menunjukkan keadaan pada langkah berikutnya. Karena setiap baris merupakan distribusi probabilitas, maka jumlah peluang dalam satu baris selalu bernilai 1.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Sumber Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data sekunder merupakan data yang diperoleh atau dikumpulkan oleh pihak lain dan telah tersedia dalam bentuk dokumen atau catatan. Sumber data dalam penelitian ini berasal dari Stasiun Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (MKG) Institut Teknologi Sumatera (ITERA). Data yang diperoleh merupakan data runtun waktu (*time-series*) kuantitatif yang dicatat secara otomatis oleh sistem *Automatic Weather Station* (AWS) yang terpasang di lingkungan kampus ITERA. Data mentah memiliki interval pencatatan (resolusi temporal) setiap 10 menit. Adapun periode data yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1 Januari 2024 hingga 31 Agustus 2024.

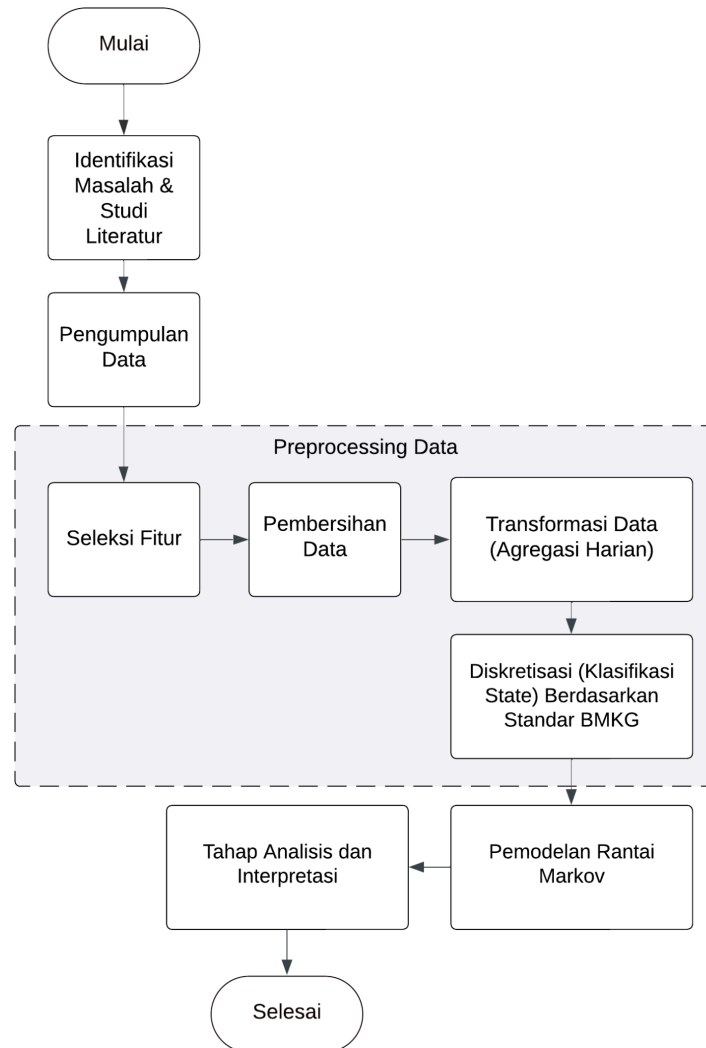
3.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan teknik studi dokumentasi dan permintaan data. Peneliti mengajukan permintaan kepada pihak Stasiun MKG ITERA untuk mendapatkan rekaman historis (arsip) data cuaca. Data diperoleh dalam format digital yaitu .csv yang berisi catatan historis dari variabel-variabel cuaca yang terekam oleh sensor stasiun.

3.3 Variabel Penelitian

Data mentah yang diperoleh dari Stasiun MKG ITERA merupakan data multivariate time-series yang dicatat setiap 10 menit, mencakup tujuh variabel observasi cuaca utama, yaitu *Datetime* (waktu pencatatan), *rainfall* (curah hujan), *windspeed* (kecepatan angin), *airtemp* (suhu udara), *airhum* (kelembapan udara), *airpress* (tekanan udara), dan *uvrad* (radiasi UV). Sesuai dengan fokus penelitian, hanya dua variabel yang dipilih dan digunakan untuk pemodelan Rantai Markov. Variabel *Datetime* digunakan sebagai dasar untuk melakukan agregasi data dari 10 menitan menjadi data harian, sementara variabel *rainfall* merupakan variabel dependen utama yang diagregasi secara harian dan diklasifikasikan untuk membentuk Ruang Keadaan (*State Space*) model. Variabel lainnya (*windspeed*, *airtemp*, *airhum*, *airpress*, dan *uvrad*) tidak digunakan dalam analisis ini karena model berfokus pada transisi state curah hujan itu sendiri.

3.2 Tahapan Penelitian



3.2.1 Identifikasi Masalah dan Studi Literatur

Tahap awal penelitian dimulai dengan identifikasi masalah, yaitu adanya ketidakpastian pola cuaca harian di lingkungan Institut Teknologi Sumatera (ITERA). Untuk memodelkan ketidakpastian ini, ditentukan tujuan penelitian yaitu menerapkan Rantai Markov untuk menganalisis probabilitas transisi antar kategori hujan harian. Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan landasan teoretis mengenai proses stokastik, Rantai Markov (termasuk properti Markov, matriks transisi, dan distribusi stasioner), serta standar klasifikasi curah hujan yang ditetapkan oleh BMKG.

3.2.2 Pengumpulan Data

Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan data sekunder yang berasal dari Stasiun Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (MKG) ITERA. Data mentah yang diperoleh merupakan data *time-series* dengan interval pencatatan 10 menit. Data ini mencakup berbagai variabel cuaca, namun yang relevan untuk penelitian ini adalah *Datetime* (waktu pencatatan) dan *rainfall* (curah hujan).

3.2.3 Preprocessing Data

Tahap preprocessing data merupakan tahapan krusial yang terdiri dari empat langkah berurutan. Pertama, Seleksi Fitur, di mana dari seluruh variabel data mentah, hanya variabel *Datetime* dan *rainfall* yang dipilih. Kedua, Pembersihan Data, di mana variabel *Datetime* dikonversi ke format tanggal-waktu yang standar. Variabel *rainfall* yang masih bertipe object (teks) dibersihkan dengan mengganti desimal koma (,) menjadi titik (.) dan memaksa konversi ke tipe numeric, di mana nilai yang tidak valid (seperti '-') diubah menjadi NaN lalu diganti dengan nilai 0.

Ketiga, Transformasi Data, di mana data 10 menit yang sudah bersih ditransformasi menjadi data harian. Hal ini dilakukan dengan proses agregasi menggunakan metode penjumlahan (SUM) pada 144 data poin *rainfall* setiap harinya untuk mendapatkan total curah hujan harian (mm/hari). Keempat, Diskretisasi (Klasifikasi *State*), di mana data *total_rainfall_harian* yang bersifat numerik kontinu diubah menjadi data kategorikal diskrit. Sebuah fungsi diterapkan untuk mengklasifikasikan setiap nilai harian ke dalam Ruang Keadaan (*State Space*) yang telah ditentukan ("Berawan", "Hujan Ringan", "Hujan Sedang", "Hujan Lebat") berdasarkan standar resmi BMKG.

3.2.4 Pemodelan Rantai Markov

Pada tahap ini, urutan *state* digunakan untuk mengestimasi Matriks Transisi Probabilitas (P) 1-langkah, yang menunjukkan probabilitas perpindahan dari satu kondisi cuaca ke kondisi lainnya pada hari berikutnya.

3.2.5 Tahap Analisis dan Interpretasi

Pada tahap ini, dilakukan analisis mendalam terhadap hasil model, termasuk interpretasi Matriks Transisi, perhitungan Distribusi Stasioner (probabilitas jangka panjang), analisis Probabilitas n-Langkah, dan simulasi.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data mentah yang telah melalui tahap pra-pemrosesan (*preprocessing*), di mana nilai curah hujan harian diklasifikasikan ke dalam Ruang Keadaan (*State Space*) yang terdiri dari 'Berawan', 'Hujan Ringan', 'Hujan Sedang', dan 'Hujan Lebat' berdasarkan standar resmi BMKG dan diperoleh 244 observasi harian yang siap digunakan dalam pemodelan Rantai Markov. Tabel 4.1 berikut menampilkan lima baris pertama dari data serta Tabel 4.2 deskripsi dari kolom data yang digunakan.

Tabel 4.1 Sampel Data Cuaca di ITERA periode 2024

Datetime	total_rainfall_harian	state
2024-01-01	7.6	Hujan Ringan
2024-01-02	17.4	Hujan Ringan
2024-01-03	411.4	Hujan Sangat Lebat
2024-01-04	3308.2	Hujan Sangat Lebat
2024-01-05	1150.0	Hujan Sangat Lebat

Tabel 4.2 Deskripsi Data Cuaca di ITERA periode 2024

Nama Kolom	Deskripsi
Datetime	Waktu pencatatan data cuaca oleh sensor AWS.
total_rainfall_harian	Total curah hujan per hari (0 - 5812.4 mm/hari).
state	Kategori cuaca (Berawan, Hujan Ringan, Hujan Sedang, Hujan Lebat, dan Hujan Sangat Lebat).

4.2 Hasil Pemodelan Rantai Markov

Berdasarkan data curah hujan harian tahun 2024 yang telah melalui tahap preprocessing, tahap selanjutnya yaitu pemodelan Rantai Markov dengan menggunakan *package* markovchain pada *software* R. Tahapan ini mencakup eksplorasi data, identifikasi ruang keadaan, estimasi matriks transisi, probabilitas n-langkah, distribusi stasioner, dan simulasi.

4.2.1 Hasil Eksplorasi Data

Sebelum melakukan pemodelan Rantai Markov, dilakukan eksplorasi data untuk memahami karakteristik dan pola data curah hujan harian yang telah diklasifikasikan. Eksplorasi ini meliputi analisis statistik deskriptif, distribusi frekuensi kategori cuaca, dan visualisasi pola temporal curah hujan sepanjang periode pengamatan. Analisis statistik deskriptif dilakukan untuk memahami karakteristik distribusi data curah hujan harian di ITERA pada periode Januari - Agustus 2024. Tabel 4.4 menunjukkan ringkasan statistik dari variabel `total_rainfall_harian`.

Tabel 4.4 Statistik Deskriptif

Ukuran Statistik	Nilai (mm/hari)
Minimum	0.0
Kuartil 1	0.0
Median	20.6
Mean	345.6
Kuartil 3	272.4
Maksimum	5812.4

Dari Tabel 4.4, dapat dilihat data curah hujan di ITERA memiliki variabilitas yang sangat tinggi. Nilai minimum sebesar 0.0 mm/hari menunjukkan adanya hari-hari tanpa hujan (kategori cuaca berawan), sementara nilai maksimum mencapai 5812.4 mm/hari yang merupakan intensitas hujan yang sangat ekstrem (kategori cuaca hujan sangat lebat). Nilai rata-rata curah hujan harian adalah 345.6 mm/hari, jauh lebih tinggi dibandingkan nilai median sebesar 20.6 mm/hari. Nilai kuartil pertama sebesar 0.0 mm/hari menunjukkan bahwa setidaknya 25% hari dalam periode pengamatan tidak mengalami hujan. Setelah melihat hasil dari statistik deskriptif eksplorasi data selanjutnya yaitu memahami pola kejadian cuaca harian di ITERA, dilakukan analisis frekuensi dari setiap kategori state yang telah didefinisikan. Tabel 4.5 menyajikan distribusi frekuensi dan persentase dari kelima kategori cuaca. Pola distribusi kejadian cuaca yang didominasi kategori tertentu juga ditemukan pada studi curah hujan di Ternate, di mana kategori berawan dan hujan ringan lebih sering muncul dalam dataset harian [17].

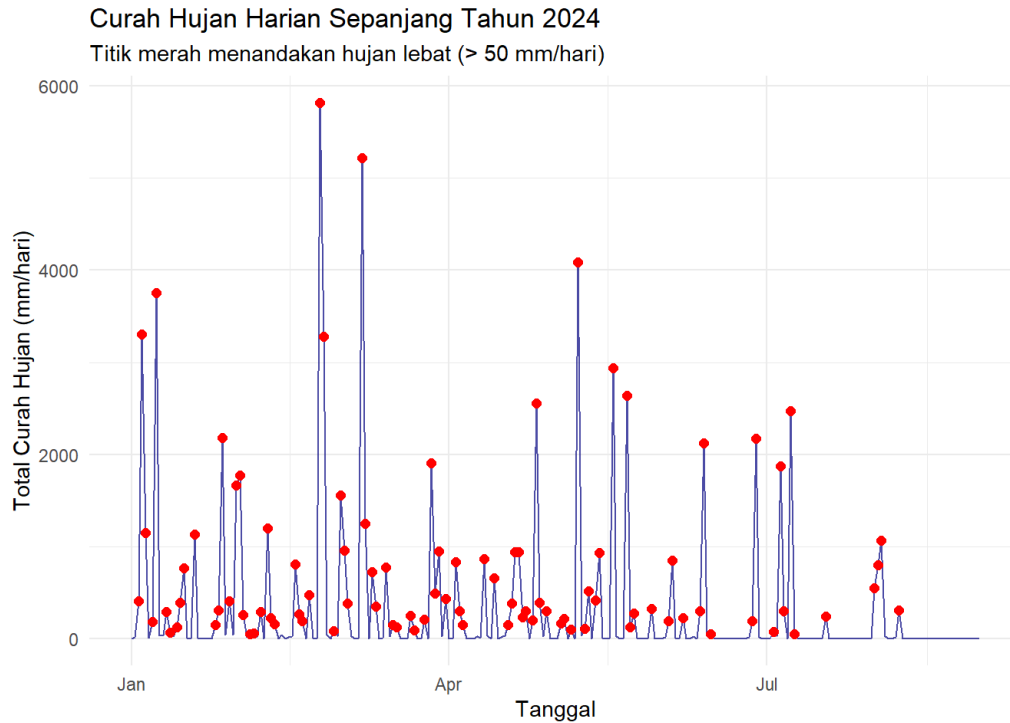
Tabel 4.5 Distribusi Frekuensi Cuaca

Kategori (<i>State</i>)	Jumlah Hari	Persentase (%)
Berawan	102	41.80
Hujan Ringan	19	7.79
Hujan Sedang	29	11.89
Hujan Lebat	9	3.69
Hujan Sangat Lebat	85	34.84

Berdasarkan Tabel 4.5, Kategori Berawan merupakan kategori yang paling dominan dengan frekuensi 102 hari (41.80%), diikuti oleh Hujan Sangat Lebat dengan 85 hari (34.84%). Kondisi Hujan Sedang terjadi pada 29 hari (11.89%), sementara Hujan Ringan hanya terjadi pada 19 hari (7.79%). Kategori Hujan Lebat memiliki frekuensi terendah dengan hanya 9 hari (3.69%).

Hasil ini menunjukkan karakteristik cuaca yang cukup ekstrem di wilayah ITERA, di mana kondisi cuaca cenderung berpolarisasi antara tidak hujan (berawan) dan hujan dengan intensitas sangat tinggi. Tingginya persentase Hujan Sangat Lebat (34.84%) mengindikasikan bahwa ketika hujan terjadi di wilayah ini, intensitasnya cenderung sangat tinggi. Hal ini sejalan dengan data statistik deskriptif yang menunjukkan nilai maksimum curah hujan yang sangat ekstrem.

Untuk memahami dinamika curah hujan sepanjang periode pengamatan, dilakukan visualisasi *time series* yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4.1 Grafik Curah Hujan Harian

Grafik *time series* menunjukkan fluktuasi curah hujan harian yang sangat dinamis sepanjang periode Januari-Agustus 2024. Titik-titik merah pada grafik menandakan hari-hari dengan hujan lebat (>50 mm/hari), yang tersebar tidak merata sepanjang periode pengamatan. Terlihat bahwa terdapat beberapa periode dengan intensitas hujan yang sangat tinggi, terutama pada bulan Januari dan beberapa waktu di pertengahan tahun. Pola ini menunjukkan bahwa curah hujan di ITERA tidak mengikuti pola deterministik yang sederhana, melainkan bersifat stokastik dengan variabilitas tinggi, yang memperkuat justifikasi penggunaan model Rantai Markov dalam penelitian ini. Dari hasil eksplorasi data ini, dapat disimpulkan bahwa data curah hujan harian di ITERA memiliki karakteristik yang sesuai untuk dimodelkan dengan pendekatan stokastik.

4.2.2 Hasil Identifikasi Ruang Keadaan (*State Space*)

Ruang keadaan (*state space*) merupakan himpunan semua kondisi cuaca yang mungkin terjadi dalam model. Berdasarkan klasifikasi yang telah dilakukan pada tahap *preprocessing*, diperoleh lima kategori state yang unik dari data observasi tahun 2024. Ruang keadaan yang teridentifikasi adalah: $S = \{\text{Berawan, Hujan Ringan, Hujan Sangat Lebat, Hujan Sedang, Hujan Lebat}\}$. Kelima state tersebut membentuk ruang keadaan lengkap yang akan menjadi dasar dalam konstruksi model Rantai Markov. Setiap state merepresentasikan kondisi cuaca diskrit yang saling eksklusif, di mana pada suatu hari tertentu hanya satu kondisi yang dapat terjadi. Identifikasi ruang keadaan ini penting untuk memastikan bahwa semua kemungkinan kondisi cuaca telah tercakup dalam model dan tidak ada state yang terlewatkan. Pendekatan diskretisasi serupa juga

digunakan dalam pemodelan curah hujan untuk kebutuhan irigasi, di mana data numerik diubah menjadi kategori cuaca berdasarkan batasan intensitas resmi [18].

4.2.3 Hasil Estimasi Matriks Transisi

Matriks probabilitas transisi (P) merupakan komponen fundamental dalam model Rantai Markov yang menggambarkan peluang perpindahan dari satu state ke state lainnya dalam satu langkah waktu (satu hari). Setiap elemen P_{ij} dalam matriks menyatakan probabilitas berpindah dari state i pada hari ini ke state j pada hari berikutnya. Matriks transisi diestimasi menggunakan metode *maximum likelihood* dengan menghitung frekuensi relatif dari urutan state yang teramati pada data 2024. Hasil estimasi matriks transisi 1-langkah disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Matriks Transisi P 1-Langkah

Kategori (State)	Berawan	Hujan Lebat	Hujan Ringan	Hujan Sangat Lebat	Hujan Sedang
Berawan	0.673	0.030	0.030	0.208	0.059
Hujan Lebat	0.333	0.111	0.111	0.000	0.444
Hujan Ringan	0.474	0.000	0.053	0.368	0.105
Hujan Sangat Lebat	0.165	0.035	0.141	0.482	0.176
Hujan Sedang	0.276	0.069	0.034	0.552	0.069

Setiap baris pada matriks merepresentasikan distribusi probabilitas kondisi cuaca pada hari berikutnya, dengan syarat jumlah probabilitas pada setiap baris sama dengan 1. Matriks ini memberikan informasi penting mengenai kecenderungan perubahan cuaca di ITERA. Selanjutnya, berdasarkan matriks transisi yang telah diestimasi, dibuat objek formal *markovchain* untuk analisis lebih lanjut. Ringkasan model Rantai Markov yang dihasilkan menunjukkan bahwa:

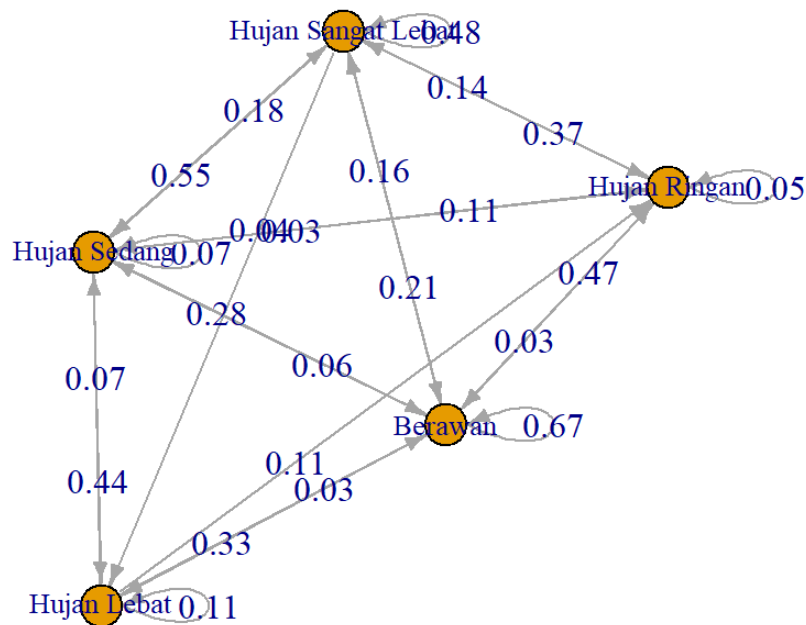
- Model terdiri dari 5 *state*: Hujan Ringan, Hujan Sangat Lebat, Hujan Sedang, Hujan Lebat, dan Berawan
- Semua state bersifat *recurrent* (berulang), tidak ada yang bersifat *transient* (sementara)
- Tidak terdapat *absorbing states* (state menyerap)
- Rantai bersifat *irreducible*, artinya semua state dapat saling dijangkau

Karakteristik ini menunjukkan bahwa model Rantai Markov yang terbentuk memiliki struktur yang baik untuk analisis jangka panjang. Fenomena transisi bertahap menuju hujan ekstrem

seperti yang terlihat pada matriks ini konsisten dengan temuan bahwa perpindahan langsung menuju kategori intensitas tinggi jarang terjadi dalam model cuaca berbasis Markov [19].

4.2.4 Hasil Diagram Transisi

Untuk memberikan visualisasi yang lebih intuitif mengenai hubungan antar *state* dalam model Rantai Markov, dibuat diagram transisi yang menggambarkan probabilitas perpindahan antar *state*. Diagram ini divisualisasikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Diagram Transisi Cuaca Harian (2024)

Diagram transisi menunjukkan kelima *state* sebagai node (lingkaran), dengan panah-panah yang menghubungkan antar node merepresentasikan probabilitas transisi. Ketebalan atau label pada panah menunjukkan besarnya probabilitas transisi dari satu *state* ke *state* lainnya. Dari diagram ini, dapat diamati bahwa beberapa transisi memiliki probabilitas yang lebih tinggi dibandingkan transisi lainnya, yang mengindikasikan adanya pola tertentu dalam perubahan cuaca harian di ITERA. *Loop* (panah yang kembali ke *state* itu sendiri) menunjukkan probabilitas persistensi, di mana *state* tertentu cenderung bertahan pada hari berikutnya.

4.2.5 Hasil Distribusi Stasioner

Distribusi stasioner (π) merupakan distribusi probabilitas jangka panjang dari setiap *state*, yang menggambarkan proporsi waktu sistem berada pada masing-masing kondisi cuaca dalam jangka panjang, terlepas dari kondisi awal. Distribusi ini diperoleh dengan menyelesaikan persamaan $\pi P = \pi$, di mana π adalah vektor distribusi stasioner dan P adalah matriks transisi. Hasil perhitungan distribusi stasioner disajikan pada Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Distribusi Stasioner (Probabilitas Jangka Panjang)

Kategori (<i>State</i>)	Probabilitas
Hujan Ringan	0.4213
Hujan Sangat Lebat	0.0372
Hujan Sedang	0.0739
Hujan Lebat	0.3487
Berawan	0.1191

Distribusi stasioner pada Tabel 4.7 tersebut menunjukkan bahwa dalam jangka panjang, sistem cuaca di ITERA akan menghabiskan sekitar 42.13% waktu dalam kondisi Hujan Ringan, 34.87% dalam kondisi Hujan Lebat, dan 11.91% dalam kondisi Berawan. Kondisi Hujan Sangat Lebat dan Hujan Sedang masing-masing hanya terjadi sekitar 3.72% dan 7.39% dari waktu. Kecenderungan distribusi jangka panjang menuju pola probabilitas stabil seperti ini juga diperkuat oleh penelitian modern yang menganalisis struktur dependensi temporal dalam proses curah hujan menggunakan rantai Markov [20].

4.3 Interpretasi Hasil

Hasil estimasi matriks probabilitas transisi menunjukkan bahwa pola curah hujan harian di ITERA didominasi oleh self-transition, yang terlihat dari nilai probabilitas terbesar pada elemen diagonal. Hal ini menandakan bahwa kondisi cuaca pada satu hari cenderung bertahan pada kategori yang sama pada hari berikutnya [17]. State Berawan memiliki probabilitas bertahan tertinggi, sehingga dapat dianggap sebagai kondisi yang paling stabil secara harian. Sebaliknya, perpindahan antar kategori hujan dengan intensitas tinggi memiliki probabilitas yang relatif kecil, bahkan beberapa transisi tidak muncul sama sekali, seperti perpindahan langsung dari Hujan Lebat ke Hujan Sangat Lebat. Pola ini menunjukkan bahwa perubahan menuju intensitas hujan ekstrem cenderung terjadi secara bertahap melalui kategori menengah, konsisten dengan karakteristik proses meteorologis. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa lonjakan langsung menuju hujan ekstrem sangat jarang terjadi dalam transisi cuaca harian [19].

Analisis probabilitas jangka panjang menunjukkan bahwa distribusi peluang berubah secara gradual dan bergerak menuju distribusi steady state. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun pola cuaca bersifat stokastik dan fluktuatif, sistem tetap memiliki kecenderungan jangka panjang yang dapat diprediksi. Distribusi steady state juga memperlihatkan bahwa dalam jangka panjang kategori Hujan Ringan dan Hujan Lebat memiliki peluang dominan, meskipun pada skala harian state Berawan lebih stabil. Secara keseluruhan, interpretasi ini menunjukkan bahwa model

Rantai Markov mampu menggambarkan dinamika perubahan curah hujan harian di ITERA baik pada horizon jangka pendek maupun jangka panjang.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data curah hujan harian tahun 2024 menggunakan model Rantai Markov, diperoleh beberapa kesimpulan utama sebagai berikut. Pertama, data curah hujan yang telah melalui proses preprocessing berhasil diklasifikasikan ke dalam lima kategori cuaca, sehingga membentuk urutan state harian yang menjadi dasar penyusunan matriks transisi. Kedua, pola transisi menunjukkan bahwa kategori dengan intensitas rendah, seperti Berawan dan Hujan Ringan, memiliki probabilitas bertahan yang lebih tinggi dibanding kategori dengan intensitas hujan yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi cuaca ringan cenderung lebih stabil dari hari ke hari. Ketiga, matriks probabilitas transisi 1-langkah mampu memberikan gambaran perubahan cuaca harian secara langsung, sedangkan distribusi probabilitas n-langkah menunjukkan kecenderungan kondisi cuaca dalam beberapa hari ke depan. Keempat, hasil *steady state* mengindikasikan kategori cuaca tertentu yang lebih dominan dalam jangka panjang, terlepas dari kondisi awal. Secara keseluruhan, model Rantai Markov terbukti efektif dalam menggambarkan dinamika perubahan curah hujan harian di ITERA dan dapat digunakan sebagai pendekatan awal untuk analisis prediksi cuaca berbasis probabilistik.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Pertama, penelitian dapat menggunakan rentang data yang lebih panjang agar pola transisi yang diperoleh semakin stabil dan representatif. Kedua, penambahan variabel meteorologis lain, seperti suhu udara, kelembapan, tekanan udara, atau kecepatan angin, berpotensi meningkatkan kemampuan model dalam menggambarkan dinamika cuaca yang kompleks. Ketiga, penggunaan model stokastik lain, seperti Hidden Markov Model (HMM) atau model *time-series* berbasis *machine learning*, dapat dijadikan pembanding untuk memperoleh hasil prediksi yang lebih komprehensif. Keempat, penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan pengembangan sistem pemantauan cuaca berbasis probabilitas untuk mendukung kebutuhan operasional dan mitigasi risiko hidrometeorologi di lingkungan kampus ITERA.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] World Meteorological Organization, **Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation**. Geneva: Publications Board, 2009.
- [2] BNPB, **Indeks Rawan Bencana Indonesia**. Jakarta: Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2011.
- [3] Badan Pusat Statistik Provinsi Banten, **Provinsi Banten dalam Angka**. Banten: BPS Provinsi Banten, 2019.
- [4] Kementerian Negara Perencanaan Pembangunan Nasional, **Laporan Perkiraan Kerusakan*
- [5] H. Ihsan, W. Sanusi, and H. Hasriani, "Peramalan pola curah hujan di Kota Makassar menggunakan model rantai Markov," **Journal of Mathematics, Computations, and Statistics**, vol. 2, no. 1, pp. 19–30, 2019. dan *Kerugian Pasca Bencana Banjir**. Tangerang: BAPPENAS, 2007.
- [6] F. Nurhamiddin and F. M. Sulisa, "Peramalan cuaca menggunakan metode rantai Markov (studi kasus: rekaman cuaca harian di Kantor BMKG Kota Ternate)," *BIOSAINSTEK*, vol. 2, no. 1, pp. 16–22, 2019.
- [7] S. C. S. Sipayung, T. L. Lastiar, T. M. Hutagalung, and S. N. Amalia, "Peramalan prakiraan cuaca setiap hari di Kota Medan dengan pendekatan rantai Markov," **Konstanta: Jurnal Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**, vol. 2, no. 2, pp. 247–261, Jun. 2024.
- [8] S. Maliska, N. Fitriyati dan Mahmudi, "Aplikasi Model GSTAR-I dengan pendekatan invers matriks autokovarians (IMAK) pada prakiraan curah hujan di provinsi Banten," *Jurnal Logika*, vol. 7, no. 1, pp. 73-85, 2017.
- [9] M. M. Ramadlon dan T. Hariyanto, "Analisa Perbandingan Curah Hujan Berdasarkan Data Citra NOAA AVHRR dengan Data Curah Hujan di Lapangan," *GEOID*, vol. 10, no. 1, pp. 1-7, 2014.
- [10] Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), **Prosedur Standar Operasional Pelaksanaan Peringatan Dini, Pelaporan, dan Diseminasi Informasi Cuaca Ekstrem**, Peraturan KBMG No. KEP.009, 2010.
- [11] Pratikasiwi, H. A., Sinaga, E. D. P., Nirwani, H., Royna, M., Perdinan, and A. Faqih, "Stochastics Modelling of Rainfall Process in Asia Region: A Systematics Review," *Environ. Sci. Proc.*, vol. 19, p. 22, 2022.
- [12] B. Arizona, A. Zakaria, and O. T. Purwadi, "Studi Pemodelan Stokastik Curah Hujan Harian di Stasiun Kota Metro," *JRSDD*, vol. 3, no. 1, pp. 37–44, 2015.

- [13] A. Zakaria, "Pemodelan Periodik dan Stokastik Curah Hujan Harian di Wilayah Pringsewu," *Jurnal Rekayasa*, vol. 19, no. 3, pp. 1–10, 2015.
- [14] A. M. Wusko and M. Nizar, "Pendekatan Rantai Markov dalam Penelitian Universitas di Pasuruan," *J. Knowl. Ind. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 63–70, 2017.
- [15] F. D. N. F. Rofiroh and Salim, "Aplikasi Rantai Markov pada Prediksi Hari Bersalju di Beberapa Kota Amerika Serikat," *STATMAT J. Stat. Mat.*, vol. 2, no. 2, pp. 131–141, 2020.
- [16] S. Set, Y. A. Lesnussa, and A. Z. Wattimena, "Peramalan Cuaca Menggunakan Metode Rantai Markov," *J. Mat.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, 2021.
- [17] A. Shulhany, D. Afifah, and A. Fauzi, "Markov Chain Modeling for Daily Rainfall Classification in Banten Province," *STATMAT: Jurnal Statistika dan Matematika*, vol. 4, no. 1, pp. 15–26, 2022.
- [18] R. Erwanto, D. W. Handayani, and T. C. Koerniawan, "Application of Markov Chain Models for Rainfall Simulation in Agricultural Irrigation Planning," *agriTECH*, vol. 37, no. 3, pp. 245–255, Universitas Gadjah Mada, 2017.
- [19] R. S. Wahyudi, U. Utami, and D. A. Lestari, "Higher-order Markov Models for Extreme Rainfall Transitions in Indonesia," *Jurnal Riset dan Aplikasi Matematika (JRAM)*, vol. 7, no. 2, pp. 112–121, 2021.
- [20] S. De Gregorio and M. Ortner, "Temporal Dependency Modeling of Rainfall Using Advanced Markov Frameworks," *arXiv preprint arXiv:2501.08755*, 2025.