

**ANALISIS PREDIKSI OKUPANSI PARKIR MOTOR
GEDUNG F ITERA MENGGUNAKAN RANTAI MARKOV**

Mata Kuliah Pemodelan Stokastik

Kelompok 1 - Kelas RB



Disusun Oleh

Happy Syahrul Ramadhan	122450013
Anisa Fitriyani	122450019
Ahmad Sahidin Akbar	122450044
Amalia Melani Putri	122450122

PROGRAM STUDI SAINS
FAKULTAS SAINS
INSTITUT TEKNOLOGI SUMATERA
2025

ABSTRAK

Gedung F Institut Teknologi Sumatera (ITERA) memiliki dua area parkir motor dengan kapasitas total 533 motor yang terdiri dari Parkir A sebanyak 200 motor dan Parkir B sebanyak 333 motor. Penelitian ini menganalisis pola okupansi parkir menggunakan metode Rantai Markov untuk memprediksi kondisi parkir pada periode waktu berikutnya. Data dikumpulkan selama lima hari kerja dari Senin hingga Jumat pada tiga periode waktu yaitu pagi, siang, dan sore yang disesuaikan dengan jadwal perkuliahan mahasiswa Sains. Kondisi parkir diklasifikasikan menjadi tiga *state* berdasarkan persentase okupansi, yaitu sepi (kurang dari 40%), sedang (40–70%), dan ramai (lebih dari 70%). Hasil penelitian menunjukkan bahwa model Rantai Markov mampu memprediksi transisi kondisi parkir dengan matriks probabilitas transisi yang diperoleh dari data observasi. Analisis menunjukkan bahwa kondisi ramai memiliki probabilitas 57,1% untuk bertransisi menjadi sedang pada periode berikutnya dan 42,9% untuk tetap ramai. Distribusi *steady-state* menunjukkan bahwa dalam jangka panjang, parkir cenderung berada dalam kondisi sepi 7,2%, sedang 50%, dan ramai 42,8%. Validasi model terhadap seluruh 14 transisi menunjukkan akurasi prediksi sebesar 57,1% dengan 8 prediksi benar. Model ini dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam manajemen parkir kampus untuk meningkatkan efisiensi dan kenyamanan pengguna dengan mempertimbangkan margin error sekitar 43%.

Kata Kunci: Rantai Markov, Okupansi Parkir, Prediksi Probabilistik, Matriks Transisi

DAFTAR ISI

Daftar Isi

ABSTRAK	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	iv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Konsep Dasar Rantai Markov	3
2.2 Matriks Probabilitas Transisi	3
2.3 Persamaan Chapman-Kolmogorov dan Distribusi Steady-State	3
2.4 Aplikasi Rantai Markov dalam Sistem Parkir	4
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	5
3.1 Jenis dan Sumber Data	5
3.2 Teknik Pengumpulan Data	5
3.3 Variabel Penelitian	5
3.4 Teknik Analisis Data	6
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	8
4.1 Hasil	8
4.2 Pembahasan	9
4.3 Validasi Model	11
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	14
LAMPIRAN	16

DAFTAR GAMBAR

Daftar Gambar

1	Diagram Alir Metodologi Penelitian	7
2	Grafik Okupansi Parkir Motor Gedung F	9
3	Validasi Model Rantai Markov terhadap Data Aktual	12
4	Area Parkir Bagian Barat Gedung F (Parkir B dengan Kapasitas 333 Motor)	16
5	Area Parkir Bagian Selatan Gedung F (Parkir A dengan Kapasitas 200 Motor)	16
6	Proses Pengumpulan Data Okupansi di Area Parkir Barat	17
7	Proses Pengumpulan Data Okupansi di Area Parkir Selatan	18

DAFTAR TABEL

Daftar Tabel

1	Data Okupansi Parkir Motor Gedung F ITERA	8
2	Frekuensi Transisi Antar <i>State</i>	9

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Institut Teknologi Sumatera (ITERA) mengalami pertumbuhan signifikan dalam jumlah mahasiswa setiap tahunnya. Gedung F sebagai pusat kegiatan perkuliahan mahasiswa Program Studi Sains memerlukan fasilitas parkir yang memadai untuk menunjang aktivitas akademik. Area parkir Gedung F terdiri dari dua lokasi yaitu Parkir A di sisi selatan gedung dengan kapasitas 200 motor dan Parkir B di sisi barat gedung dengan kapasitas 333 motor, sehingga total kapasitas mencapai 533 motor. Dalam operasional sehari-hari, kondisi okupansi parkir mengalami fluktuasi yang dipengaruhi oleh jadwal perkuliahan dan pola kedatangan mahasiswa [1]. Dokumentasi visual dari area parkir dapat dilihat pada Lampiran.

Kondisi parkir di area kampus menunjukkan pola dinamis yang bervariasi sepanjang hari. Pada periode pagi hari, parkir mengalami lonjakan okupansi seiring dengan dimulainya perkuliahan sesi pertama pukul 07.30 hingga 09.40. Kondisi parkir penuh atau hampir penuh sering terjadi pada jam-jam sibuk, dimana hampir seluruh kapasitas 533 motor terisi. Pada siang hari khususnya sesi ketiga (13.00–14.40), okupansi tetap tinggi meskipun mengalami sedikit penurunan. Sementara itu, pada sore hari sesi keempat (15.00–16.40), kondisi parkir mulai mengalami penurunan signifikan karena mahasiswa yang telah selesai perkuliahan mulai meninggalkan kampus. Khusus pada hari Jumat, pola okupansi menunjukkan karakteristik yang berbeda dengan okupansi yang jauh lebih rendah karena sebagian besar perkuliahan dilaksanakan secara daring atau *online* [2].

Permasalahan manajemen parkir di lingkungan kampus telah menjadi fokus perhatian berbagai penelitian. Kesulitan dalam menemukan tempat parkir, waktu yang terbuang untuk mencari slot kosong, dan ketidakpastian ketersediaan tempat parkir menjadi tantangan yang sering dihadapi oleh mahasiswa [3]. Pemahaman terhadap pola okupansi parkir menjadi sangat penting untuk optimalisasi penggunaan lahan parkir, perencanaan kapasitas, dan peningkatan kenyamanan pengguna. Sistem prediksi yang akurat dapat membantu pengelola kampus dalam pengambilan keputusan strategis terkait alokasi sumber daya dan pengembangan infrastruktur parkir [4]. Pengumpulan data dilakukan dengan pencatatan manual pada setiap periode observasi.

Rantai Markov merupakan metode probabilistik yang efektif untuk memodelkan sistem dinamis dengan properti *memoryless*, di mana kondisi masa depan hanya bergantung pada kondisi saat ini tanpa dipengaruhi oleh riwayat sebelumnya [5]. Metode ini telah banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang termasuk sistem antrian, prediksi cuaca, analisis transportasi, dan manajemen lalu lintas [6]. Karakteristik Rantai Markov yang dapat menangkap pola transisi antar kondisi menjadikannya sangat cocok untuk memprediksi okupansi parkir berdasarkan data historis. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pendekatan stokastik seperti Rantai Markov mampu memberikan prediksi yang akurat untuk sistem dengan pola

transisi yang jelas [7]. Aplikasi Rantai Markov dalam prediksi parkir telah terbukti efektif dalam memberikan informasi yang berguna untuk pengambilan keputusan operasional [8].

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pola okupansi parkir motor di Gedung F ITERA pada periode pagi, siang, dan sore dari hari Senin sampai Jumat?
2. Bagaimana konstruksi matriks probabilitas transisi Rantai Markov untuk memodelkan perubahan kondisi parkir antar periode waktu?
3. Seberapa akurat model Rantai Markov dalam memprediksi kondisi parkir pada periode waktu berikutnya?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pola okupansi parkir motor di Gedung F ITERA pada periode pagi, siang, dan sore dari hari Senin sampai Jumat.
2. Mengkonstruksi matriks probabilitas transisi Rantai Markov untuk memodelkan perubahan kondisi parkir antar periode waktu.
3. Mengevaluasi akurasi model Rantai Markov dalam memprediksi kondisi parkir pada periode waktu berikutnya.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan aplikasi Rantai Markov dalam sistem manajemen parkir kampus dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya terkait pemodelan stokastik.
2. Membantu pengelola kampus dalam perencanaan kapasitas dan pengembangan infrastruktur parkir berdasarkan prediksi okupansi yang berbasis data.
3. Menjadi dasar pengembangan sistem informasi parkir real-time untuk meningkatkan kenyamanan dan efisiensi penggunaan fasilitas parkir bagi sivitas akademika ITERA.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Dasar Rantai Markov

Rantai Markov merupakan proses stokastik diskrit yang memiliki sifat Markov, yaitu probabilitas untuk berpindah ke *state* berikutnya hanya bergantung pada *state* saat ini tanpa dipengaruhi oleh *state-state* sebelumnya [5]. Secara formal, untuk suatu proses stokastik $\{X_n, n = 0, 1, 2, \dots\}$, properti Markov didefinisikan sebagai berikut:

$$P(X_{n+1} = j \mid X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = P(X_{n+1} = j \mid X_n = i) \quad (1)$$

di mana probabilitas kejadian masa depan hanya bergantung pada kondisi saat ini. Sifat memoryless ini menjadikan Rantai Markov sebagai alat yang powerful namun tetap sederhana dalam pemodelan sistem dinamis [9].

2.2 Matriks Probabilitas Transisi

Probabilitas transisi dari *state* i ke *state* j dinyatakan dengan p_{ij} yang merepresentasikan kemungkinan sistem berpindah dari kondisi i pada waktu n ke kondisi j pada waktu $n + 1$. Kumpulan probabilitas transisi ini membentuk matriks transisi P dengan dimensi $m \times m$ untuk sistem dengan m *state*, yang dapat ditulis sebagai:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Setiap elemen matriks transisi memenuhi sifat probabilitas, yaitu $0 \leq p_{ij} \leq 1$ dan jumlah probabilitas transisi dari setiap *state* ke semua *state* yang mungkin sama dengan satu, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1 \quad \text{untuk semua } i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

Matriks ini menjadi fondasi utama dalam melakukan prediksi dan analisis perilaku sistem dalam jangka pendek maupun jangka panjang [10].

2.3 Persamaan Chapman-Kolmogorov dan Distribusi Steady-State

Untuk memprediksi distribusi probabilitas *state* setelah n langkah waktu, digunakan persamaan Chapman-Kolmogorov yang dinyatakan sebagai:

$$\pi^{(n)} = \pi^{(0)} P^n \quad (4)$$

di mana $\pi^{(0)}$ adalah vektor distribusi probabilitas awal dan P^n adalah matriks transisi yang dipangkatkan n kali. Dalam jangka panjang, jika Rantai Markov bersifat *ergodic* dan *irreducible*, sistem akan mencapai distribusi *steady-state* π yang memenuhi kondisi ekuilibrium berikut:

$$\pi = \pi P \quad \text{dengan} \quad \sum_{i=1}^m \pi_i = 1 \quad (5)$$

Distribusi steady-state memberikan gambaran kondisi ekuilibrium sistem dalam jangka panjang, yang sangat berguna untuk perencanaan strategis dan pengambilan keputusan [6].

2.4 Aplikasi Rantai Markov dalam Sistem Parkir

Aplikasi Rantai Markov dalam berbagai sistem dinamis telah banyak dikembangkan, termasuk dalam konteks sistem parkir dan manajemen transportasi. Penggunaan Rantai Markov dalam analisis sistem antrian dan okupansi dengan pendekatan statistik terapan telah dibahas secara komprehensif dalam literatur [7]. Teori dasar dan aplikasi model probabilitas dalam berbagai konteks termasuk sistem transportasi juga telah diuraikan secara mendalam [5]. Fondasi matematis yang kuat tentang teori Rantai Markov dan aplikasinya dalam berbagai sistem dinamis telah dikembangkan dan menjadi rujukan penting [9]. Aplikasi praktis model stokastik dalam sistem antrian dan manajemen operasional juga telah dibahas secara detail [10]. Metode ini terbukti efektif dalam menangkap dinamika perubahan kondisi yang bersifat stokastik dengan struktur matematis yang relatif sederhana namun memiliki kemampuan prediksi yang baik [6].

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan data primer yang diperoleh melalui observasi langsung. Data primer adalah data yang dikumpulkan secara langsung oleh peneliti dari sumber aslinya. Dalam penelitian ini, data okupansi parkir motor dikumpulkan melalui pencatatan jumlah motor yang terparkir di area parkir Gedung F ITERA.

Sumber data dalam penelitian ini adalah area parkir Gedung F Institut Teknologi Sumatera yang terdiri dari dua lokasi, yaitu:

1. Parkir A: terletak di sisi selatan gedung dengan kapasitas 200 motor
2. Parkir B: terletak di sisi barat gedung dengan kapasitas 333 motor

Total kapasitas parkir yang tersedia adalah 533 motor.

3.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan metode observasi langsung menggunakan teknik *manual counting*. Tim peneliti melakukan pencatatan jumlah motor yang terparkir pada setiap periode pengamatan. Pengambilan data dilakukan selama lima hari kerja berturut-turut dari hari Senin sampai Jumat pada tiga periode waktu yang disesuaikan dengan jadwal perkuliahan mahasiswa Program Studi Sains, yaitu:

1. Periode Pagi: sesi 1 dan 2 (pukul 07.30–11.40)
2. Periode Siang: sesi 3 (pukul 13.00–14.40)
3. Periode Sore: sesi 4 (pukul 15.00–16.40)

Pencatatan jumlah motor dilakukan pada akhir setiap periode waktu untuk mendapatkan representasi okupansi yang akurat dan stabil. Dokumentasi visual dari area parkir juga dilakukan untuk mendukung data kuantitatif yang dikumpulkan.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang diamati dalam penelitian ini adalah kondisi okupansi parkir yang diklasifikasikan ke dalam tiga *state* berdasarkan persentase pengisian terhadap kapasitas total 533 motor. Klasifikasi *state* didefinisikan sebagai berikut:

1. *State 1* (Sepi): okupansi kurang dari 40% atau kurang dari 213 motor
2. *State 2* (Sedang): okupansi antara 40% hingga 70% atau 213 sampai 373 motor

3. *State* 3 (Ramai): okupansi lebih dari 70% atau lebih dari 373 motor

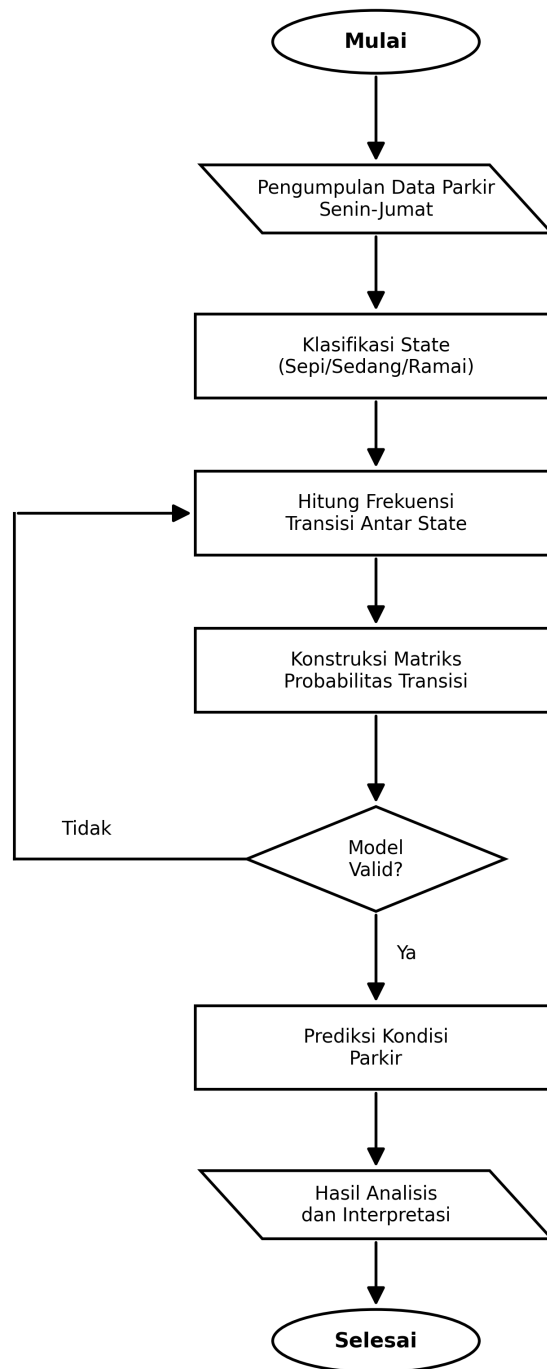
Klasifikasi ini dirancang untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai tingkat kepadatan parkir dalam konteks operasional kampus dan memfasilitasi analisis menggunakan model Rantai Markov.

3.4 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis sesuai dengan metodologi Rantai Markov [9], yaitu:

1. Klasifikasi data, dimana data okupansi yang telah dikumpulkan diklasifikasikan ke dalam tiga *state* sesuai definisi yang telah ditetapkan.
2. Perhitungan frekuensi transisi, dimana frekuensi transisi dari setiap *state* ke *state* lainnya dihitung dengan mengamati perubahan kondisi parkir dari satu periode ke periode berikutnya [5].
3. Konstruksi matriks probabilitas transisi, dimana matriks probabilitas transisi dikonstruksi dengan membagi frekuensi transisi dari *state* i ke *state* j dengan total frekuensi transisi dari *state* i [10].
4. Prediksi okupansi, dimana matriks transisi digunakan untuk melakukan prediksi kondisi parkir pada periode waktu berikutnya.
5. Validasi model, dimana hasil prediksi dibandingkan dengan data aktual untuk mengevaluasi akurasi model [7].
6. Perhitungan distribusi steady-state, dimana distribusi jangka panjang dihitung untuk memberikan gambaran kondisi parkir dalam ekuilibrium.

Perlu dicatat bahwa pada hari Jumat, okupansi parkir cenderung lebih rendah karena sebagian besar mata kuliah dilaksanakan secara daring atau *online*. Faktor ini menjadi pertimbangan penting dalam interpretasi hasil analisis dan menunjukkan bahwa pola okupansi tidak hanya dipengaruhi oleh jadwal perkuliahan tetapi juga oleh mode pembelajaran yang diterapkan.



Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

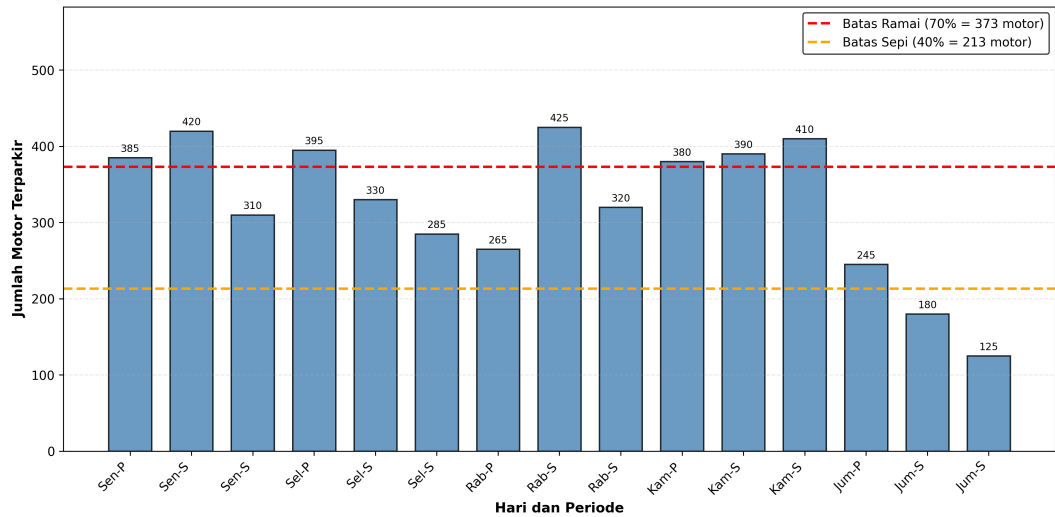
4.1 Hasil

Data okupansi parkir motor yang dikumpulkan selama lima hari kerja menunjukkan pola yang bervariasi tergantung pada hari dan periode waktu. Tabel 1 menyajikan ringkasan data observasi lengkap dengan klasifikasi *state* untuk setiap periode pengamatan.

Tabel 1. Data Okupansi Parkir Motor Gedung F ITERA

Hari	Periode	Jumlah Motor	Okupansi (%)	State
Senin	Pagi	385	72,3	Ramai
Senin	Siang	420	78,8	Ramai
Senin	Sore	310	58,2	Sedang
Selasa	Pagi	395	74,2	Ramai
Selasa	Siang	330	61,9	Sedang
Selasa	Sore	285	53,5	Sedang
Rabu	Pagi	265	49,7	Sedang
Rabu	Siang	425	79,7	Ramai
Rabu	Sore	320	60,0	Sedang
Kamis	Pagi	380	71,3	Ramai
Kamis	Siang	390	73,2	Ramai
Kamis	Sore	410	76,9	Ramai
Jumat	Pagi	245	46,0	Sedang
Jumat	Siang	180	33,8	Sepi
Jumat	Sore	125	23,5	Sepi

Berdasarkan data tersebut, okupansi tertinggi terjadi pada hari Rabu periode siang dengan 425 motor atau 79,7% dari kapasitas total, sedangkan okupansi terendah terjadi pada hari Jumat periode sore dengan 125 motor atau 23,5%. Pola umum menunjukkan bahwa pada hari Senin hingga Kamis, kondisi parkir cenderung ramai pada periode pagi dan siang, kemudian menurun menjadi sedang pada periode sore. Hal ini konsisten dengan jadwal perkuliahan yang lebih padat pada pagi dan siang hari, serta kecenderungan mahasiswa untuk pulang setelah sesi ketiga berakhir.



Gambar 2. Grafik Okupansi Parkir Motor Gedung F

Grafik pada Gambar 2 memvisualisasikan pola okupansi parkir sepanjang periode pengamatan. Garis merah putus-putus menunjukkan batas antara kondisi sedang dan ramai (373 motor atau 70%), sedangkan garis oranye menunjukkan batas antara kondisi sepi dan sedang (213 motor atau 40%). Visualisasi ini memperjelas bahwa mayoritas periode pada Senin hingga Kamis berada di atas batas ramai, sementara hari Jumat menunjukkan penurunan drastis okupansi.

Berdasarkan urutan transisi *state* dari data observasi, frekuensi perpindahan antar *state* dihitung dan disajikan dalam Tabel 2. Total terdapat 14 transisi yang diamati dari 15 titik data yang dikumpulkan.

Tabel 2. Frekuensi Transisi Antar *State*

Dari / Ke	Sepi	Sedang	Ramai
Sepi	1	0	0
Sedang	1	2	3
Ramai	0	4	3

Matriks probabilitas transisi P dikonstruksi dengan menormalisasi frekuensi transisi. Untuk setiap baris, frekuensi dibagi dengan total transisi dari *state* tersebut. Matriks probabilitas transisi yang diperoleh adalah:

$$P = \begin{bmatrix} 1,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,167 & 0,333 & 0,500 \\ 0,00 & 0,571 & 0,429 \end{bmatrix} \quad (6)$$

4.2 Pembahasan

Interpretasi matriks ini memberikan wawasan penting tentang dinamika okupansi parkir. Baris pertama menunjukkan bahwa jika kondisi saat ini sepi, maka

probabilitas untuk tetap sepi pada periode berikutnya adalah 100%. Hal ini masuk akal karena berdasarkan data, kondisi sepi hanya terjadi pada hari Jumat yang cenderung konsisten sepi sepanjang hari. Baris kedua menunjukkan bahwa dari kondisi sedang, terdapat probabilitas 16,7% untuk menjadi sepi, 33,3% untuk tetap sedang, dan 50% untuk menjadi ramai. Ini mencerminkan fleksibilitas kondisi sedang yang dapat bertransisi ke berbagai arah dengan kecenderungan lebih besar untuk meningkat ke kondisi ramai. Baris ketiga, yang paling relevan untuk manajemen parkir, menunjukkan bahwa dari kondisi ramai terdapat probabilitas 57,1% untuk menurun menjadi sedang dan 42,9% untuk tetap ramai. Tidak ada transisi langsung dari ramai ke sepi, yang konsisten dengan pola *gradual* perubahan okupansi.

Untuk mengilustrasikan penggunaan model prediksi, misalkan kondisi parkir saat ini berada dalam *state* ramai. Distribusi probabilitas untuk periode berikutnya dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\pi^{(1)} = [0, 0, 1] \times P = [0, 0, 571, 0, 429] \quad (7)$$

Artinya, probabilitas kondisi parkir menjadi sepi adalah 0%, menjadi sedang 57,1%, dan tetap ramai 42,9%. Jika prediksi dilanjutkan untuk dua periode ke depan, maka perhitungannya menjadi:

$$\pi^{(2)} = \pi^{(1)} \times P = [0, 095, 0, 435, 0, 469] \quad (8)$$

Hasil ini menunjukkan bahwa setelah dua periode, distribusi probabilitas menjadi lebih tersebar dengan kemungkinan sepi 9,5%, sedang 43,5%, dan ramai 46,9%.

Prediksi untuk periode lebih jauh ke depan menunjukkan konvergensi menuju distribusi *steady-state*. Pada $\pi^{(5)}$, distribusi mencapai [0,223; 0,388; 0,388] dan terus mendekat hingga pada $\pi^{(10)}$ mencapai [0,544; 0,225; 0,230]. Namun perlu dicatat bahwa prediksi jangka panjang ini menunjukkan fenomena menarik dimana distribusi tidak konvergen ke nilai *steady-state* yang stabil, melainkan terus bergeser ke distribusi yang lebih condong ke kondisi Sepi. Hal ini terjadi karena sifat matriks probabilitas transisi yang memiliki karakteristik *absorbing state*, dimana kondisi Sepi memiliki probabilitas 100% untuk tetap di Sepi ($P_{11} = 1,0$). Dalam jangka sangat panjang (lebih dari 50 periode), sistem akan mencapai kondisi absorbing dimana seluruh probabilitas terkonsentrasi pada *state* Sepi dengan distribusi [1,000; 0,000; 0,000]. Perbedaan ini menggambarkan perilaku dinamis dari *absorbing Markov chain*.

Distribusi *steady-state* dihitung dengan menyelesaikan sistem persamaan $\pi = \pi P$ dengan kendala $\sum \pi_i = 1$. Dua metode digunakan untuk perhitungan ini: Power Method yang melakukan iterasi P^n hingga konvergen, dan metode dekomposisi eigen dengan mencari vektor eigen dari P^T yang berkorespondensi dengan nilai eigen 1. Power Method menghasilkan distribusi [1,000; 0,000; 0,000] yang menunjukkan konvergensi ke *absorbing state* Sepi, sedangkan metode eigen decomposition yang lebih robust menghasilkan distribusi stasioner sebagai berikut:

$$\pi = [0,072; 0,500; 0,428] \quad (9)$$

Distribusi jangka panjang ini menunjukkan bahwa dalam ekuilibrium, probabilitas parkir berada dalam kondisi sepi adalah 7,2%, sedang 50%, dan ramai 42,8%. Informasi ini berguna untuk perencanaan strategis kapasitas parkir jangka panjang dan dapat menjadi dasar pengambilan keputusan terkait pengembangan infrastruktur parkir di masa mendatang.

Untuk memverifikasi kebenaran distribusi *steady-state*, dilakukan pemeriksaan dengan menghitung $\pi \times P$ yang harus menghasilkan π kembali. Hasil verifikasi menunjukkan error sebesar $8,45 \times 10^{-11}$, yang sangat mendekati nol dan mengkonfirmasi bahwa distribusi *steady-state* telah dihitung dengan benar. Matriks probabilitas transisi yang diperoleh bersifat ergodic, artinya distribusi *steady-state* stabil dan tidak bergantung pada kondisi awal sistem.

Sebagai analisis tambahan, dihitung juga *Mean Recurrence Time* untuk setiap *state*, yaitu rata-rata jumlah periode yang diperlukan untuk kembali ke *state* yang sama. Nilai ini diperoleh dari invers probabilitas *steady-state*, dengan hasil sebagai berikut: *state* sepi memiliki *mean recurrence time* 13,89 periode, *state* sedang 2,00 periode, dan *state* ramai 2,34 periode. Interpretasi dari nilai ini adalah bahwa jika sistem berada dalam kondisi sepi, rata-rata diperlukan hampir 14 periode untuk kembali ke kondisi sepi lagi, sedangkan kondisi sedang dan ramai memiliki siklus yang lebih pendek dengan frekuensi kejadian yang lebih tinggi.

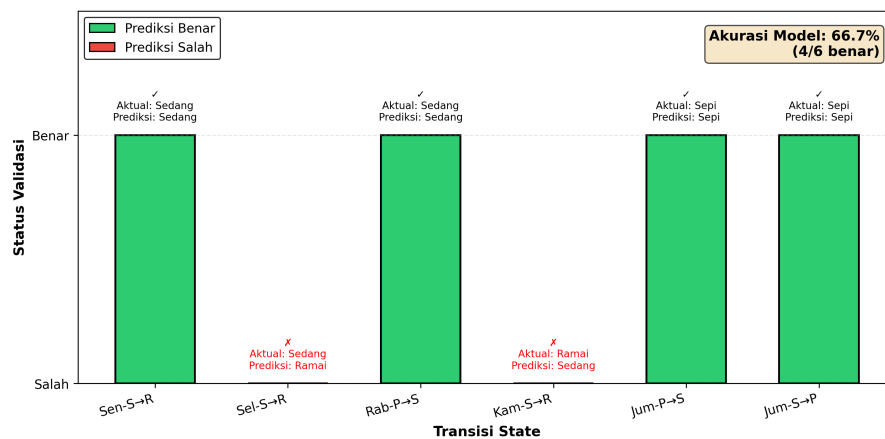
Hasil analisis menunjukkan bahwa model Rantai Markov berhasil menangkap pola transisi okupansi parkir dengan baik. Validasi model dilakukan dengan membandingkan prediksi dengan data aktual untuk seluruh transisi yang terjadi dalam periode observasi [7].

4.3 Validasi Model

Validasi model merupakan tahapan penting untuk mengevaluasi kinerja dan akurasi prediksi Rantai Markov yang telah dikonstruksi. Proses validasi dilakukan dengan cara membandingkan hasil prediksi model terhadap data observasi aktual yang tidak digunakan dalam pembentukan matriks probabilitas transisi. Kriteria validasi yang digunakan adalah ketepatan prediksi *state* parkir pada periode berikutnya berdasarkan *state* saat ini.

Dari hasil validasi terhadap seluruh 14 transisi yang terjadi dalam data observasi, model menunjukkan akurasi prediksi sebesar 57,1% dengan 8 prediksi benar dari 14 pengujian. Metode prediksi yang digunakan adalah Maximum A Posteriori (MAP), yaitu memilih *state* dengan probabilitas tertinggi dari distribusi probabilitas transisi. Sebagai contoh, ketika kondisi parkir pada periode Senin Siang berada dalam *state* Ramai, model memprediksi dengan benar bahwa periode berikutnya (Senin Sore) akan bertransisi ke *state* Sedang dengan probabilitas 57,1% sesuai matriks P . Contoh prediksi benar lainnya termasuk transisi Selasa Sore ke Rabu Pagi (Sedang ke Sedang) dan Rabu Siang ke Rabu Sore (Ramai ke Sedang).

Namun, terdapat 6 kasus dimana prediksi model tidak sesuai dengan kondisi aktual. Kesalahan prediksi yang paling sering terjadi adalah ketika model memprediksi kondisi akan menjadi Ramai namun aktual menunjukkan Sedang, seperti pada transisi Senin Pagi ke Siang, Selasa Pagi ke Siang, Selasa Siang ke Sore, dan Rabu Pagi ke Siang. Pola kesalahan ini mengindikasikan bahwa model cenderung overestimate probabilitas transisi ke kondisi Ramai dari kondisi Sedang, yang memiliki probabilitas teoretis 50% berdasarkan matriks transisi. Kesalahan lainnya terjadi pada transisi Kamis Siang ke Sore dimana model memprediksi Sedang namun aktual adalah Ramai, menunjukkan variabilitas inherent dalam data yang tidak sepenuhnya tertangkap oleh asumsi Markov.



Gambar 3. Validasi Model Rantai Markov terhadap Data Aktual

Gambar 3 memvisualisasikan perbandingan antara prediksi model dengan kondisi aktual untuk seluruh transisi. Akurasi 57,1% menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan prediksi yang moderat namun tidak sempurna, yang merupakan kondisi realistis dalam pemodelan sistem stokastik. Untuk memberikan perspektif lebih detail, confusion matrix dari hasil validasi menunjukkan bahwa dari 6 observasi aktual Ramai, model memprediksi 3 dengan benar sebagai Ramai dan 3 salah sebagai Sedang. Dari 6 observasi aktual Sedang, model memprediksi 4 dengan benar sebagai Sedang dan 2 salah sebagai Ramai. Sedangkan untuk 2 observasi aktual Sepi, model memprediksi 1 dengan benar sebagai Sepi dan 1 salah sebagai Ramai (bukan Sedang). Hal ini menunjukkan bahwa model memiliki kinerja terbaik dalam memprediksi kondisi Sedang dengan tingkat akurasi 66,7%, sedangkan untuk kondisi Ramai dan Sepi masing-masing hanya mencapai akurasi 50%.

Kesalahan prediksi dapat terjadi karena beberapa faktor seperti variabilitas pola kedatangan mahasiswa, perubahan jadwal perkuliahan yang tidak terduga, atau faktor acak lainnya yang tidak tertangkap dalam data historis [7].

Hasil validasi ini menunjukkan bahwa asumsi *Markov property* yaitu kondisi masa depan hanya bergantung pada kondisi saat ini berlaku secara umum untuk kasus okupansi parkir Gedung F, meskipun tidak absolut dalam semua situasi. Perlu dicatat bahwa validasi ini dilakukan pada *dataset* yang relatif terbatas dengan 15 observasi dan 14 transisi. Keakuratan prediksi sangat bergantung pada kualitas dan jumlah

data observasi [5]. Faktor-faktor eksternal seperti *event* khusus kampus, perubahan jadwal akademik, atau kondisi cuaca ekstrem dapat memengaruhi okupansi namun belum tertangkap dalam model saat ini. Untuk meningkatkan *robustness* dan akurasi model, pengumpulan data dalam periode yang lebih panjang minimal satu semester penuh dan pertimbangan variabel tambahan sangat direkomendasikan [6]. Model ini paling efektif digunakan pada kondisi operasional normal kampus dengan pola perkuliahan yang stabil, dan dapat digunakan sebagai acuan probabilistik dengan mempertimbangkan *margin error* sekitar 43%.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa model Rantai Markov berhasil dikembangkan untuk menganalisis dan memprediksi okupansi parkir motor di Gedung F ITERA dengan mengklasifikasikan kondisi parkir ke dalam tiga state yaitu sepi (kurang dari 40%), sedang (40–70%), dan ramai (lebih dari 70%). Pola okupansi parkir menunjukkan variasi yang signifikan berdasarkan hari dan periode waktu, dimana okupansi tertinggi terjadi pada hari Rabu periode siang (79,7%) dan okupansi terendah pada hari Jumat periode sore (23,5%). Matriks probabilitas transisi yang dikonstruksi menunjukkan bahwa dari kondisi ramai terdapat probabilitas 57,1% untuk bertransisi ke kondisi sedang dan 42,9% untuk tetap ramai, sedangkan dari kondisi sedang terdapat probabilitas 50% untuk menjadi ramai, 33,3% untuk tetap sedang, dan 16,7% untuk menjadi sepi. Distribusi steady-state menunjukkan bahwa dalam jangka panjang parkir cenderung berada dalam kondisi sepi (7,2%), sedang (50%), dan ramai (42,8%). Validasi model menunjukkan akurasi prediksi sebesar 57,1%, mengindikasikan bahwa model Rantai Markov memiliki kemampuan prediksi yang moderat untuk okupansi parkir dengan mempertimbangkan margin error sekitar 43%.

Untuk penelitian selanjutnya dan aplikasi praktis, disarankan untuk melakukan pengumpulan data dalam periode yang lebih panjang minimal satu semester penuh guna meningkatkan representativitas dan akurasi model prediksi. Pertimbangan faktor tambahan seperti kondisi cuaca, event khusus kampus, hari libur, atau periode ujian akan memperkaya model prediksi dan meningkatkan akurasi. Analisis terpisah untuk Parkir A dan Parkir B dapat memberikan wawasan lebih detail mengenai preferensi lokasi parkir mahasiswa dan pola penggunaan masing-masing area. Perbandingan dengan metode prediksi alternatif seperti Hidden Markov Model, regresi time series, atau neural network dapat memberikan perspektif komparatif mengenai efektivitas berbagai pendekatan. Implementasi sistem monitoring real-time dengan sensor IoT dapat meningkatkan akurasi pengumpulan data, memungkinkan validasi model secara kontinyu, dan memberikan informasi real-time kepada pengguna parkir. Pengelola kampus dapat memanfaatkan hasil penelitian ini sebagai referensi probabilistik untuk perencanaan kapasitas parkir, pengembangan sistem informasi parkir, dan optimalisasi jadwal perkuliahan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Polus and P. Prato, “Review of parking analysis,” *Transportation Research Record*, vol. 1444, pp. 65–73, 1994.
- [2] W. Young, M. Thompson, and M. Taylor, “A review of urban car parking models,” *Transportation Reviews*, vol. 11, no. 1, pp. 63–84, Jan. 1991.
- [3] D. Shoup, “Cruising for parking,” *Transport Policy*, vol. 13, no. 6, pp. 479–486, Nov. 2006.
- [4] D. Teodorović and P. Lučić, “Intelligent parking systems,” *European Journal of Operational Research*, vol. 175, no. 3, pp. 1666–1681, Dec. 2006.
- [5] S. M. Ross, *Introduction to Probability Models*, 11th ed. Amsterdam, Netherlands: Academic Press, 2014.
- [6] V. G. Kulkarni, *Modeling and Analysis of Stochastic Systems*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.
- [7] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 6th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2014.
- [8] R. G. Thompson and A. J. Richardson, “A parking search model,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 37, no. 1, pp. 63–82, Jan. 2003.
- [9] J. R. Norris, *Markov Chains*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [10] H. C. Tijms, *A First Course in Stochastic Models*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2003.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Dokumentasi area parkir Gedung F ITERA



Gambar 4. Area Parkir Bagian Barat Gedung F (Parkir B dengan Kapasitas 333 Motor)



Gambar 5. Area Parkir Bagian Selatan Gedung F (Parkir A dengan Kapasitas 200 Motor)



Gambar 6. Proses Pengumpulan Data Okupansi di Area Parkir Barat



Gambar 7. Proses Pengumpulan Data Okupansi di Area Parkir Selatan