

Analisis Deteriorasi Perkerasan Jalan Tol Terdampak Banjir dengan Model *Markov Chain* Transisi Homogen dan Non-Homogen

Danang Eko Saputro

Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email: danang.saputro@live.com

Russ Bona Frazila

Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email: frazila@itb.ac.id

Febri Zukhruf

Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email: febri.zukhruf@itb.ac.id

Abstrak

Model dan analisis yang mampu meramalkan dampak banjir terhadap kinerja perkerasan jalan raya, sangat penting untuk mengantisipasi penurunan kekuatan struktur perkerasan pasca terjadinya banjir. Model probabilistik, seperti *Markov Chain*, dianggap lebih realistik daripada model deterministik seperti HDM-III (Patterson), yang kurang sesuai untuk menilai perkerasan jalan tol yang terdiri dari perkerasan kaku dengan lapisan *blacktop* AC-WC. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan penggunaan model *Markov Chain* dengan MPT Homogen dan MPT Non-Homogen dalam menganalisis deteriorasi perkerasan jalan tol khususnya jika terdapat kejadian seperti banjir sehingga akan diketahui MPT mana yang lebih sesuai untuk digunakan dalam kondisi tersebut.

Analisis yang dilakukan pada jalan tol Jakarta-Cikampek dan Padaleunyi selama periode tahun 2020-2023 menghasilkan nilai MAPE model *Markov Chain* dalam kategori akurasi layak/wajar sebesar 25.75% untuk MPT Homogen dan 22.50% untuk MPT Non Homogen. Berdasarkan hal tersebut, model *Markov Chain* dengan MPT Non Homogen lebih tepat digunakan untuk memodelkan deteriorasi perkerasan jalan tol selama periode terjadinya kejadian khusus misalnya banjir dibandingkan dengan MPT Homogen. Penelitian ini juga menunjukkan perbedaan pola program pemeliharaan (frekuensi dan tingkat penanganan) di mana model *Markov Chain* menghasilkan luasan proyeksi kebutuhan program pemeliharaan berupa rehabilitasi mayor tahun 2024-2028 lebih besar dibandingkan rencana jangka panjang yang telah disusun menggunakan model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson).

Kata-kata Kunci: Banjir, deteriorasi, *Markov Chain*, Model Performa Perkerasan.

Abstract

The loss in pavement structural strength following flooding must be predicted using models and analysis that can forecast how flooding would affect highway pavement performance. When evaluating highway pavements made up of stiff pavements with AC-WC blacktop layers, probabilistic models like Markov Chain are seen to be more realistic than deterministic models like HDM-III (Patterson). This study compares the application of Markov Chain models with Homogeneous and Non-Homogeneous TPM in assessing toll road pavement deterioration, particularly during floods, in order to determine whether TPM is more suited for usage in these circumstances.

The analysis of the 2020–2023 Jakarta–Cikampek and Padaleunyi toll roads produced a MAPE value for the Markov Chain model in the acceptable/reasonable accuracy category of 22.50% for the Non-Homogeneous TPM and 25.75% for the Homogeneous TPM. This suggests that, in contrast to the Homogeneous TPM, the Markov Chain model with Non-Homogeneous TPM is more suited for simulating pavement deterioration on toll roads during times of unusual occurrences, such floods. Additionally, this study illustrates differences in maintenance program patterns (frequency and treatment level), with the Markov Chain model generating a larger projection of maintenance program needs in the form of major rehabilitation for 2024–2028 than the long-term plan which was created using the IRI HDM-III (Patterson) deterioration model.

Keywords: Flood, deterioration, *Markov Chain*, Pavement Performance Model.

* Penulis Korespondensi: danang.saputro@live.com

1. Pendahuluan

Banjir pada ruas jalan tol misalnya Jalan Tol Jakarta-Cikampek terjadi pada tanggal 01 Januari 2020 di beberapa lokasi (KM 08, KM 17, KM 21, KM 24, dan KM 27) serta Jalan Tol Padalarang-Cileunyi terjadi pada tanggal 12 Agustus 2020 di KM 130.

Banjir menyebabkan perkerasan tergenang sehingga kekuatan strukturnya menurun (Avilés-Rojas dkk, 2023). Lintasan kendaraan pada perkerasan yang tergenang air meningkatkan kerusakan melebihi asumsi desain, sehingga mempercepat proses deteriorasinya (Wang dkk., 2020).

Dalam konteks banjir yang terjadi pada suatu ruas jalan, diperlukan analisis dan model yang dapat memprediksi dampak banjir terhadap performa perkerasan jalan sehingga dapat dilakukan antisipasi secara efektif terhadap berkurangnya kekuatan struktur perkerasan jalan pasca terjadinya banjir.

Model performa perkerasan terdiri atas model deterministik dan probabilistik. Model deterministik memodelkan deteriorasi perkerasan sebagai fungsi variabel tetap berbasis persamaan matematis, sementara model probabilistik memprediksi kondisi perkerasan menggunakan distribusi probabilitas untuk menangkap ketidakpastian di masa depan (Wasiq & Golroo, 2024).

Penggunaan model deterministik salah satunya HDM-III (Paterson, 1992) yang merupakan kombinasi dari model penurunan masing-masing tipe kerusakan perkerasan antara lain retak, alur, lubang, pelepasan butir, dan tambalan memiliki keterbatasan di mana secara spesifik hanya dapat mengakomodir struktur perkerasan lentur. Hal ini tentunya akan membatasi proses analisis yang dilakukan pada struktur perkerasan kaku maupun komposit, terutama pada ruas jalan tol yang ditinjau pada penelitian ini.

Berbeda dengan HDM-III (Patterson) yang bersifat deterministik, model *Markov Chain* adalah model probabilistik yang banyak digunakan untuk memperkirakan kinerja perkerasan. Metodologi ini secara efektif mengelola basis data yang tidak lengkap, berkualitas rendah, dan tidak akurat, seperti yang ditunjukkan oleh Mrawira dan Amador (2008). Model *Markov Chain* memanfaatkan Matriks Probabilitas Transisi (MPT) yang menggambarkan kemungkinan bahwa suatu bagian perkerasan, dalam kondisi tertentu pada waktu tertentu, akan beraser ke kondisi lain atau tetap sama pada periode berikutnya (Wasiq & Golroo, 2024).

Pengembangan model *Markov Chain* berdasarkan nilai MPT-nya dapat dikategorikan ke dalam dua jenis utama: Homogen dan Non-Homogen. Dalam proses *Markov Chain* Homogen (tidak bergantung

pada waktu), semua MPT diasumsikan identik. Hal ini berarti bahwa probabilitas transisi dari satu keadaan ke keadaan lain tetap konstan dari waktu ke waktu atau secara bertahap. Berbeda dengan pendekatan Homogen, pada pola transisi Non-Homogen, probabilitas transisi dari satu keadaan ke keadaan lain berbeda untuk masing-masing keadaan pada setiap satuan waktu. Wasiq dan Golroo (2024) menyimpulkan bahwa model *Markov Chain* dengan pola transisi kombinasi antara Homogen dan Non-Homogen berhasil memberikan prediksi yang lebih realistik terhadap deteriorasi perkerasan. Mempertimbangkan penjelasan di atas, penulis menganggap perlu untuk membandingkan model *Markov Chain* Homogen dan Non-Homogen dalam menganalisis deteriorasi perkerasan jalan tol khususnya jika terdapat kejadian seperti banjir sehingga akan diketahui MPT mana yang lebih sesuai untuk digunakan dalam kondisi tersebut.

Penelitian ini juga diharapkan dapat menjelaskan proses deteriorasi perkerasan jalan tol (IRI dan PCI) di masa mendatang sesuai model *Markov Chain* dengan transisi Homogen dan Non Homogen dibandingkan model deterministik HDM-III (Patterson) yang saat ini telah digunakan, sehingga kebutuhan program pemeliharaan di masa mendatang dapat ditentukan dengan lebih efektif.

2. Studi Literatur

2.1. Model performa perkerasan berbasis *Markov Chain*

Issa & Abu Eisheh (2019) mengembangkan model *Markov Chain* Homogen untuk kondisi perkerasan lentur untuk meningkatkan efisiensi rencana pemeliharaan dan rehabilitasi jalan. Pendekatan ini melibatkan evaluasi bagian perkerasan secara visual dan menggunakan Indeks Kondisi Perkerasan (*Pavement Condition Index/PCI*). Studi ini merekomendasikan prediksi dini, idealnya dalam jangka waktu 5-10 tahun, untuk memfasilitasi pemeliharaan preventif yang hemat biaya seperti penutupan retak dan pelapisan ulang. Strategi ini bertujuan untuk mengoptimalkan alokasi anggaran yang terbatas untuk pemeliharaan jalan.

Abaza (2017) memperkenalkan dua model Markovian empiris yang dirancang untuk memprediksi probabilitas transisi pada perkerasan jalan yang direhabilitasi: satu model yang dirancang untuk transisi bertahap-Homogen dan satu lagi untuk transisi Non-Homogen. Model-model ini menggunakan data perkerasan asli untuk menghitung probabilitas kerusakan, dengan memasukkan penyesuaian untuk beban lalu lintas yang meningkat dan kekuatan perkerasan yang berkurang.

Kharbat dkk. (2023) melakukan penelitian untuk menilai

akurasi, keandalan, dan efektivitas pendekatan gabungan yang menggunakan teknik prediktif, khususnya *Markov Chain* dan *Artificial Neural Networks* (ANNs), untuk prediksi yang akurat terhadap kondisi kinerja perkerasan jalan dalam jangka menengah dan jangka panjang (tahunan). Temuan penelitian tersebut menunjukkan keefektifan Rantai Markov sebagai metode yang ampuh untuk memprediksi kinerja perkerasan jalan.

Selanjutnya berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Wasiq dan Golroo (2024), didapatkan kesimpulan bahwa pendekatan *hybrid* yang mengkombinasikan Model *Markov Chain* dengan pola Homogen dan Non Homogen berhasil memberikan prediksi yang lebih realistik.

Mengacu kepada referensi penelitian di atas, penelitian ini akan memiliki perbedaan terutama terkait pengembangan model *Markov Chain* untuk memprediksi performa perkerasan jalan tol yang sebelumnya belum pernah dilakukan terutama di Indonesia.

2.2. Pengembangan transisi homogen dan non homogen

Abaza (2022) mengembangkan model transisi probabilitas untuk kurva deteriorasi perkerasan dengan pendekatan *Markov Chain* Homogen dan Non-Homogen. Ia menyebut bahwa model Markov dengan waktu dan kondisi diskrit merupakan bentuk yang paling umum digunakan dalam prediksi kinerja perkerasan (Abaza, 2016, 2017; Abaza dkk., 2004; Galvis Arce & Zhang, 2021; Kobayashi dkk., 2010; Li dkk., 1996). *Markov Chain* Homogen mendistribusikan MPT yang sama untuk setiap transisi dalam periode analisis, sedangkan pada kasus *Markov Chain* Non-Homogen nilai MPT berbeda untuk setiap transisi.

Pada pengembangan model *Markov Chain* Homogen, vektor probabilitas kondisi, $S^{(n)}$, dihitung dari perkalian antara vektor baris probabilitas keadaan awal, $S^{(0)}$, dengan matriks probabilitas transisi, $P^{(n)}$, yang dipangkatkan (n) dimana:

$$S(n) = S(0) P^{(n)} \quad (1)$$

dengan:

$$\begin{aligned} S(n) &= [S_1(n), S_2(n), \dots, S_m(n)] \\ S(0) &= [S_1(0), S_2(0), \dots, S_m(0)] \\ &= [1, 0, \dots, 0] \text{ untuk perkerasan baru} \\ \sum_{i=1}^m S_i(k) &= 1.0 \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned}$$

Elemen-elemen matriks probabilitas transisi (P) yang digunakan dalam Persamaan (1) menunjukkan probabilitas transisi. Probabilitas transisi ($P_{i,j}$) mewakili probabilitas transisi dari keadaan (i) ke keadaan (j) dalam satu transisi, atau dapat dituliskan sebagai:

$$P = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & P_{1,3} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_{2,2} & P_{2,3} & P_{2,4} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & P_{3,3} & P_{3,4} & P_{4,5} & 0 & \dots & 0 \\ & & & \vdots & & & & \\ & & & \vdots & & & & \\ 0 & 0 & \dots & P_{m-1,m-1} & 0 & P_{m-1,m} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1.0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Pada entri matriks di atas, diagonal utama menunjukkan tingkat kerusakan perkerasan sedangkan entri di bawah diagonal utama menunjukkan tingkat perbaikan perkerasan. Entri di bawah diagonal diberi nilai nol jika tidak ada pemeliharaan dan rehabilitasi perkerasan. Oleh karena itu, MPT sebagaimana diuraikan dalam persamaan (2) di atas dapat digunakan untuk memprediksi deteriorasi perkerasan.

Selanjutnya Persamaan (3) memberikan model matematika yang terkait dengan *Markov Chain* Non-Homogen untuk kondisi waktu diskrit. Model ini dapat menggunakan MPT yang berbeda untuk setiap transisi dalam periode analisis yang terdiri dari (n) transisi. Sehingga dapat disimpulkan, $P(k)$ adalah MPT yang terkait dengan (k) transisi.

$$S(n) = S(0) \prod_{k=1}^n P_{(k)} \quad (3)$$

MPT ini mirip dengan yang ditunjukkan oleh Persamaan (2) namun dapat memiliki probabilitas transisi deteriorasi perkerasan yang berbeda untuk setiap tahun transisi.

2.3. Program preservasi jalan terdampak banjir

Yamany dan Abraham (2021) mengusulkan peningkatan akurasi prediksi kondisi perkerasan dengan mengintegrasikan variabel pemeliharaan preventif ke dalam model *Markov Chain* non-homogen. Pendekatan ini menunjukkan bahwa pemeliharaan preventif berperan signifikan dalam memperbaiki kinerja prediktif model terhadap kondisi perkerasan.

Aulia (2023) membandingkan model *Markov Chain* dengan IRMS V.3 serta penggunaan bilangan acak dari LCG (*Linear Congruential Generator*) pada pemodelan kinerja perkerasan jalan yang terdampak banjir dan yang tidak terdampak banjir di Provinsi Bengkulu. Analisis *Markov Chain* memiliki perbedaan ketika membandingkan jumlah keputusan penanganan yang dibuat menggunakan probabilitas tinggi dengan Pedoman IRMS V.3. Model *Markov Chain* menunjukkan penurunan kondisi jalan lebih cepat sehingga memerlukan penanganan lebih sering frekuensinya dibandingkan IRMS V.3 yang cenderung lebih lambat

Pada penelitian ini, program pemeliharaan yang ditinjau

secara spesifik merupakan rehabilitasi mayor dengan pendekatan *decision tree* berbasis nilai ekspektasi yang akan dibahas lebih lanjut pada sub bab 2.5

2.4. Rencana Jangka Panjang (RJP) program pemeliharaan jalan tol

Referensi penyusunan RJP Program Pemeliharaan jalan tol dilakukan menggunakan pendekatan model deteriorasi IRI. Permodelan deteriorasi menggunakan parameter IRI tersebut merupakan simplifikasi model Highway Design and Maintenance HDM-III (Patterson-Attoh, 1992) melalui persamaan :

$$IRI_n = 1.04e^{0.023n} \times [IRI_0 + 263(1 + SNC)^{-5} \times CSA_n] \quad (4)$$

dimana :

IRI_n : Kekasaran jalan pada tahun ke-n (m/km)
 IRI_0 : Kekasaran jalan pada tahun dasar (m/km)
 SNC : Nilai Struktur dari kekuatan perkerasan
 CSA_n : Kumulatif standar axle (juta ESA/lajur)

Nilai Struktur dari kekuatan perkerasan didapat dari persamaan :

$$SNC = [0.04 \times \sum(a_i \times h_i)] + SN_{sg} \quad (5)$$

dimana :

a_i : *Material and layer strength coefficient*
 h_i : Ketebalan lapisan (mm)
 SN_{sg} : *Subgrade contribution*, dihitung dengan rumus Hodges et al, 1975 yaitu:
 $3.51 \log CBR - 0.86 (\log CBR)^2 - 1.43$
 CBR : *Insitu California Bearing Ratio of Subgrade (%)*

Pada penyusunan RJP Program Pemeliharaan jalan tol tersebut, komponen pekerjaan yang menjadi ruang lingkup utama yaitu pekerjaan *capital expenditure* berupa program *scrapping filling overlay* (SFO) yang merupakan lingkup dari pekerjaan rehabilitasi mayor serta program rekonstruksi. Periode penyusunan RJP yaitu setiap 5 (lima) tahun, dengan data RJP terbaru yang menjadi referensi pada penelitian ini yaitu RJP periode tahun 2024-2028.

Pada periode proyeksi untuk $t=1$ (tahun 2024) sampai dengan $t=5$ (tahun 2025), karena model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson) hanya dapat memproyeksikan nilai IRI, maka diperlukan penyesuaian atas *decision tree* tersebut sehingga hanya mempertimbangkan besaran nilai IRI. **Tabel 1** berikut menunjukkan *decision tree* yang digunakan selama periode proyeksi tahun 2024 sampai dengan tahun 2028:

Tabel 1. Decision tree program pemeliharaan pada RJP Tahun 2024-2028

No	Nilai IRI	Program Pemeliharaan
1	$0 < IRI < 2$	Pemantauan Rutin
2	$2 \leq IRI < 3$	Pemeliharaan Rutin
3	$3 \leq IRI < 4$	Pemeliharaan Preventif
4	$4 \leq IRI < 5$	Rehabilitasi Minor
5	$5 \leq IRI < 10$	Rehabilitasi Mayor
6	$10 \leq IRI$	Rekonstruksi

Selanjutnya hal penting yang perlu diperhatikan pada proyeksi RJP Program Pemeliharaan jalan tol yaitu terkait efektivitas program pemeliharaan, di mana nilai IRI akan diproyeksikan turun pada periode ke $t+1$ jika dilakukan pemeliharaan pada tahun ke t . Rincian penurunan proyeksi nilai IRI setelah dilakukan program pemeliharaan sebagai berikut:

- IRI setelah penanganan untuk pemeliharaan preventif maupun rehabilitasi minor turun menjadi 3 m/km dengan catatan mutu/kualitas pekerjaan dapat dijaga dengan baik.
- IRI setelah penanganan untuk rehabilitasi mayor dan rekonstruksi turun menjadi 2 m/km dengan catatan mutu/kualitas pekerjaan dapat dijaga dengan baik.

Perbandingan proyeksi program pemeliharaan berbasis model *Markov Chain* dengan RJP berbasis model HDM-III (Patterson) akan dianalisis lebih lanjut pada penelitian ini.

2.5. Konsep nilai ekspektasi

Pada tahapan analisis menggunakan model *Markov Chain*, diperlukan suatu pendekatan untuk mengubah besaran probabilitas pada vektor kondisi dari hasil analisis menjadi suatu nilai deterministik yang digunakan sebagai acuan pengambilan keputusan program pemeliharaan. Pendekatan yang diusulkan pada penelitian ini yaitu berupa nilai ekspektasi.

Nilai ekspektasi dari variabel acak X didefinisikan sebagai jumlah dari semua nilai x yang dapat diambil oleh X , dikalikan bobot dengan probabilitasnya menurut Persamaan (6) berikut:

$$\mathbb{E}(X) = \sum_{x \in X(\Omega)} x \cdot P_x(x) \quad (6)$$

dimana:

$\mathbb{E}(X)$: Nilai ekspektasi variabel acak X
 x : Nilai yang dapat diambil dari setiap variabel acak X
 $P_x(x)$: Probabilitas terhadap nilai x dari variabel acak X

2.6. Validasi model dengan nilai MAPE

Validasi model *Markov Chain* dilakukan dengan melihat MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) 2019–2023 antara model dan nilai observasi lapangan. Metrik MAPE merupakan alat yang populer di bidang statistik dan *machine learning* untuk menilai keakuratan prediksi model regresi. Sebagaimana dinyatakan oleh Nuha (2023), MAPE merupakan ukuran rata-rata persentase perbedaan antara nilai data yang diamati dan nilai yang diantisipasi model. Nilai MAPE dihitung menggunakan Persamaan (7) berikut:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{y_n - \hat{y}_n}{y_n} \right| \quad (7)$$

dimana:

- N : Jumlah sampel data,
- yn : Nilai observasi dari data ke- n ,
- \hat{y}_n : Nilai prediksi dari model untuk data ke- n ,
- $| |$: Nilai absolut dari selisih nilai observasi dan nilai prediksi

Berdasarkan Lewis (1982), ada empat cara yang mungkin untuk melihat nilai MAPE yang dihasilkan dari perhitungan, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 2** di bawah ini:

Tabel 2. *Klasifikasi nilai MAPE*

No	Nilai MAPE	Akurasi Model
1	< 10%	Sangat Baik
2	10-20%	Baik
3	20-50%	Layak/Wajar
5	> 50%	Tidak Baik

3. Metodologi

3.1. Tahapan penelitian

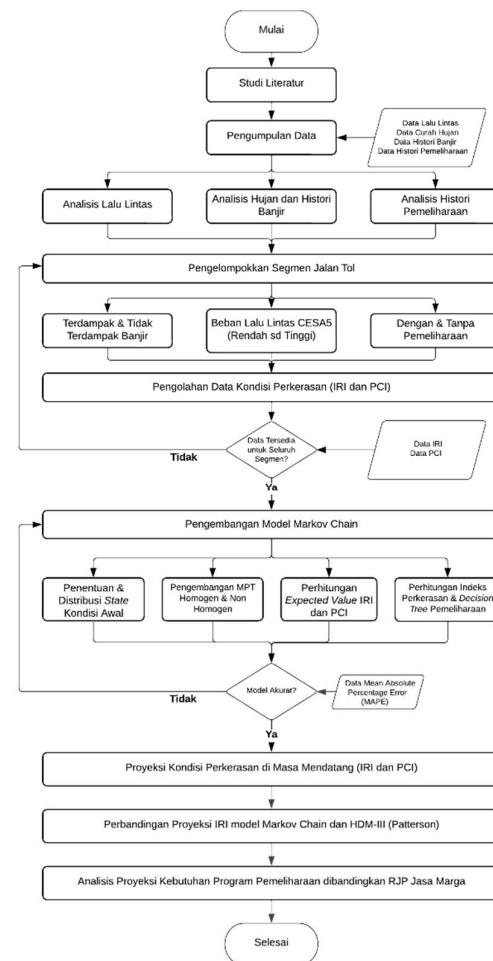
Tahapan penelitian ini dapat dijelaskan sesuai diagram alir sesuai **Gambar 1** berikut:

3.2. Lokasi penelitian

Jalan tol yang ditinjau pada penelitian ini yaitu Jalan Tol Jakarta-Cikampek dan Padalarang-Cileunyi.

Jalan Tol Jakarta-Cikampek memiliki panjang total 72.10 km. Jalan tol ini dioperasikan sejak tahun 1988 dengan konfigurasi lajur lalu lintas saat ini di mayoritas segmen yaitu 4/2 D.

Jalan Tol Padaleunyi memiliki panjang total 35,50 km. Jalan tol ini dioperasikan sejak tahun 1991 dengan konfigurasi lajur lalu lintas saat ini di mayoritas segmen yaitu 3/2 D.



Gambar 1. Diagram alir penelitian



Gambar 2. Lokasi penelitian

3.3. Tahapan Analisis Awal

Tahap ini terdiri dari analisis curah hujan, lalu lintas, dan riwayat penanganan. Curah hujan saat terjadi banjir tahun 2020 dikuantifikasi melalui analisis frekuensi dengan metode Distribusi Gumbell.

Segmen jalan diidentifikasi melalui analisis lalu lintas berdasarkan kategorisasi beban lalu lintasnya.

Kajian lalu lintas ini mengikuti pedoman yang ditetapkan dalam **Tabel 3** Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) untuk tahun 2024:

Tabel 3. Klasifikasi Lalu Lintas sesuai MDP 2024

No	Nilai CESA5 ($\times 10^6$)	Kategori
1	$CESA5 \leq 1$	Sangat Rendah
2	$1 < CESA5 \leq 4$	Rendah
3	$4 < CESA5 \leq 10$	Sedang
4	$10 < CESA5 \leq 30$	Tinggi
5	$CESA5 > 30$	Sangat Tinggi

Analisis riwayat penanganan dilakukan untuk mengetahui dampak program pemeliharaan jalan yang dilakukan selama periode 5 tahun terakhir (2019-2023) terhadap kondisi permukaan jalan yaitu IRI dan PCI.

Selanjutnya pengelompokan segmen ruas jalan tol dilakukan hanya untuk *main road* (tidak termasuk jalan akses). Satu segmen ruas jalan tol didefinisikan untuk setiap 1 lajur lalu lintas sepanjang 100 meter.

3.4. Tahapan pengembangan model *Markov Chain*

Data yang digunakan dalam pengembangan model *Markov Chain* Hybrid ini adalah data IRI dan PCI. Dengan demikian, untuk menentukan kriteria *state* kondisi ditentukan berdasarkan pengelompokan nilai IRI dan PCI. Pengklasifikasian nilai IRI dan PCI yang akan dijadikan kriteria *state* kondisi dapat dilihat pada **Tabel 4** dan **Tabel 5** berikut:

Tabel 4. Kriteria *state* kondisi IRI

No	State IRI	Rentang Nilai IRI
1	IRI-1	$IRI < 2$
2	IRI-2	$2 \leq IRI < 4$
3	IRI-3	$4 \leq IRI < 6$
4	IRI-4	$6 \leq IRI < 8$
5	IRI-5	$IRI \geq 8$

Tabel 5. Kriteria *state* kondisi PCI

No	State PCI	Rentang Nilai PCI
1	PCI-1	$85 < PCI \leq 100$
2	PCI-2	$70 < PCI \leq 85$
3	PCI-3	$55 < PCI \leq 70$
4	PCI-4	$25 < PCI \leq 55$
5	PCI-5	$PCI \leq 25$

MPT disusun berdasarkan data historis IRI dan PCI dari tahun 2019 hingga tahun 2023. Pada tahap ini,

nilai probabilitas transisi kondisi perkerasan $P_{t,t+1}$ dari *state* tahun ke-*t* ke *state* tahun ke-(*t*+1) dihitung dengan menggunakan Persamaan (7) berikut:

$$P_{t,t+1} = \frac{n_{t,t+1}}{n_t} \quad (8)$$

dimana:

$n_{t,t+1}$: jumlah segmen jalan yang bertransisi dari *state* *t* ke *state* *t*+1 dalam 1 siklus
 n_t : jumlah total segmen jalan pada *state* *t* sebelum transisi

MPT Homogen disusun dengan nilai $P_{t,t+1}$ yang sama selama periode transisi tahun 2019-2023. Adapun MPT Non Homogen disusun dengan pendekatan nilai $P_{t,t+1}$ setiap periode transisi berbeda selama tahun 2019-2023. Dalam hal ini probabilitas transisi akan ditinjau berupa *moving average* 3 tahun yaitu:

- Periode tahun 2019-2021
- Periode tahun 2020-2022
- Periode tahun 2021-2023

Pertimbangan skenario *moving average* tersebut adalah untuk memastikan probabilitas transisi yang berbeda diantara rentang waktu pengamatan tahun 2019 sd 2023. Pada setiap periode *moving average* selama 3 (tiga) tahun, terdapat 2 (dua) kali proses transisi yang dianggap masih mewakili probabilitas perubahan kondisi yang tidak signifikan untuk rentang waktu yang lebih pendek dibanding pada pendekatan pengembangan MPT Homogen.

3.5. Tahapan proyeksi performa perkerasan dan program pemeliharaan

Setelah mendapatkan nilai MPT Homogen dan MPT Non-Homogen, *Markov Chain* dibangun dengan melakukan proses iterasi selama *t* periode transisi sebagai berikut:

- 2020-2023 : Validasi model *Markov Chain*
- 2024-2028 : Proyeksi performa perkerasan

Untuk tujuan analisis kondisi masa mendatang, vektor kondisi awal dan MPT yang disesuaikan dengan dampak banjir dan kategori lalu lintas dikalikan dengan matriks. Pada analisis ini dikelompokan kriteria probabilitas kondisi masa mendatang dengan pembagian skenario:

- Jika tidak ditangani selama periode transisi;
- Jika ditangani selama periode transisi sesuai *decision tree* nilai ekspektasi;

Penyusunan *decision tree* program pemeliharaan didasarkan pada Indikator Kinerja Program Rating Kondisi Jalan Nasional, yang selanjutnya disebut sebagai IKP Rating Kondisi Jalan sesuai Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Kementerian PUPR No: 09/SE/Db/2021 tentang Perencanaan dan Pemrogaman Pekerjaan Preservasi Jaringan Jalan.

Namun demikian, terdapat penyesuaian *decision tree* program pemeliharaan pada penelitian ini dengan pertimbangan data primer maupun sekunder berupa nilai RSL dan kondisi drainase yang tidak ditinjau. Dengan demikian, bobot untuk RSL dan Efektivitas Drainase perlu didistribusi untuk komponen IRI dan PCI. Selain itu, istilah IKP Rating Kondisi Jalan disesuaikan menjadi Indeks Perkerasan (IP) yang mencakup nilai IRI dan PCI dengan bobot diubah menjadi 70% nilai IRI dan 30% nilai PCI. Selanjutnya *decision tree* program pemeliharaan untuk model *Markov Chain* ditampilkan pada **Tabel 6** sebagai berikut:

Tabel 6. Decision tree model Markov Chain

No	State IRI	Nilai IP	Jenis Penanganan
1	IRI-1	<2	Perawatan Rutin
2	IRI-1	2 ≤ IP < 3	Pemeliharaan Rutin
3	IRI-2	2 ≤ IP < 3	Rehabilitasi Minor
4	IRI-3	3 ≤ IP < 4	Rehabilitasi Mayor
5	IRI-4	3 ≤ IP < 4	Rehabilitasi Mayor
6	IRI-5	4 ≤ IP < 5	Rekonstruksi

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Analisis Awal

4.1.1. Analisis histori curah hujan

Berdasarkan hasil analisis frekuensi dengan Distribusi Gumbell serta besaran periode ulang hujan saat terjadi banjir, kejadian banjir di jalan tol dipengaruhi oleh besaran curah hujan yang terjadi dan kondisi (kategori) hujan. Banjir terjadi saat curah hujan yang turun termasuk kategori ekstrim dengan curah hujan rata-rata regional >200 mm/hari.

4.1.2. Perhitungan beban lalu lintas

Berdasarkan hasil perhitungan CESAS5, seluruh segmen jalan tol berada pada klasifikasi lalu lintas **Sangat Tinggi** sesuai MDP 2024. Adapun sampel hasil perhitungan nilai CESAS5 pada segmen Jalan Tol Padalarang-Cileunyi Jalur A (arah Cileunyi) sesuai **Tabel 7** sebagai berikut:

Tabel 7. Klasifikasi Lalu Lintas jalan tol Padalarang-Cileunyi Jalur A

No	Segmen	CESAS5 (x10 ⁶)	Klasifikasi
1	Padalarang Itc-Padalarang	42.20	Sgt Tinggi
2	Padalarang Itc-Pasteur Itc	66.21	Sgt Tinggi
3	Pasteur Itc-Pasir Koja Itc	63.83	Sgt Tinggi
4	Pasir Koja Itc-Kopo Itc	61.86	Sgt Tinggi
5	Kopo Itc-Moh.Toha Itc	59.06	Sgt Tinggi

Tabel 7. Klasifikasi Lalu Lintas jalan tol Padalarang-Cileunyi Jalur A (Lanjutan)

No	Segmen	CESAS5 (x10 ⁶)	Klasifikasi
6	Moh.Toha Itc-Buah Batu Itc	53.60	Sgt Tinggi
7	Buah Batu Itc-Cileunyi	47.70	Sgt Tinggi

4.1.3. Segmentasi ruas jalan tol

Segmentasi ruas jalan tol selanjutnya dilihat dari pertimbangan histori banjir (*with flood* dan *no flood*) serta histori pemeliharaan (*with maintenance* atau *no maintenance*) karena untuk seluruh segmen beban lalu lintasnya berada pada klasifikasi sangat tinggi.

4.2. Pengembangan model *Markov Chain*

4.2.1. Pengembangan MPT Homogen & Non Homogen

Berdasarkan segmentasi ruas jalan tol di atas, hasil pengembangan MPT Homogen untuk nilai IRI dan PCI sebanyak 8 buah dengan daftar sesuai **Tabel 8** sebagai berikut:

Tabel 8. Daftar MPT Homogen

No	Kode MPT	Detail
1	IRI-H1	No Flood No Maintenance
2	IRI-H2	No Flood With Maintenance
3	IRI-H3	With Flood No Maintenance
4	IRI-H4	With Flood With Maintenance
5	PCI-H5	No Flood No Maintenance
6	PCI -H6	No Flood With Maintenance
7	PCI -H7	With Flood No Maintenance
8	PCI -H8	With Flood With Maintenance

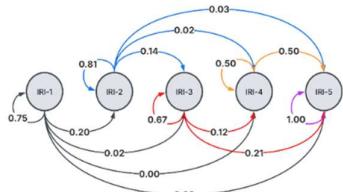
Selanjutnya hasil pengembangan MPT Non Homogen untuk nilai IRI dan PCI sebanyak 24 buah dengan daftar sesuai **Tabel 9** sebagai berikut:

Tabel 9. Daftar MPT Non Homogen

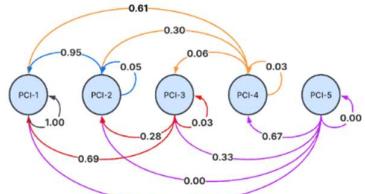
No	Kode MPT	Tahun	Detail
1	IRI-NH1	19-21	No Flood No Maintenance
2	IRI-NH2	20-22	No Flood No Maintenance
3	IRI-NH3	21-23	No Flood No Maintenance
4	IRI-NH4	19-21	No Flood With Maintenance
5	IRI-NH5	20-22	No Flood With Maintenance
6	IRI-NH6	21-23	No Flood With Maintenance
7	IRI-NH7	19-21	With Flood No Maintenance

8	IRI-NH8	20-22	With Flood No Maintenance
9	IRI-NH9	21-23	With Flood No Maintenance
10	IRI-NH10	19-21	With Flood With Maintenance
11	IRI-NH11	20-22	With Flood With Maintenance
12	IRI-NH12	21-23	With Flood With Maintenance
13	PCI-NH13	19-21	No Flood No Maintenance
14	PCI-NH14	20-22	No Flood No Maintenance
15	PCI-NH15	21-23	No Flood No Maintenance
16	PCI-NH16	19-21	No Flood With Maintenance
17	PCI-NH17	20-22	No Flood With Maintenance
18	PCI-NH18	21-23	No Flood With Maintenance
19	PCI-NH19	19-21	With Flood No Maintenance
20	PCI-NH20	20-22	With Flood No Maintenance
21	PCI-NH21	21-23	With Flood No Maintenance
22	PCI-NH22	19-21	With Flood With Maintenance
23	PCI-NH23	20-22	With Flood With Maintenance
24	PCI-NH24	21-23	With Flood With Maintenance

Selanjutnya MPT Homogen dan MPT Non Homogen tersebut dapat digambarkan menggunakan ilustrasi *Finite State Machine* (FSM), dengan sampel MPT sesuai **Gambar 3** dan **Gambar 4** berikut:



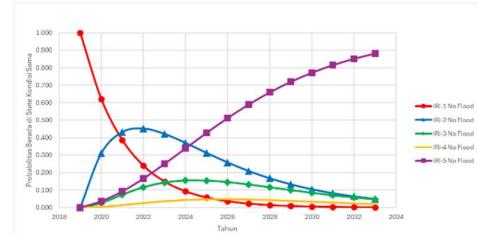
Gambar 3. FSM untuk MPT IRI H1



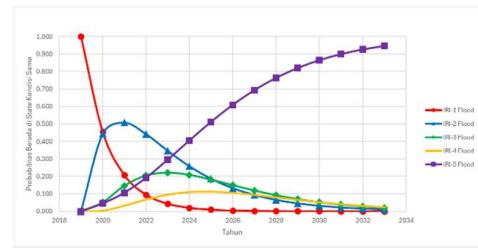
Gambar 4. FSM untuk MPT PCI NH24

4.2.2. Perbandingan vektor kondisi

Berikut ini ditampilkan perbandingan vektor kondisi IRI pada segmen jalan tol terdampak banjir dan tidak terdampak banjir untuk kondisi tanpa dilakukan pemeliharaan (*no maintenance*) dengan menggunakan MPT Homogen untuk transisi selama 10 tahun sesuai **Gambar 5** dan **Gambar 6**.



Gambar 5. Perbandingan vektor kondisi awal IRI-1 MPT Homogen (*no flood no maintenance*)



Gambar 6. Perbandingan vektor kondisi awal IRI-1 MPT Homogen (*with flood no maintenance*)

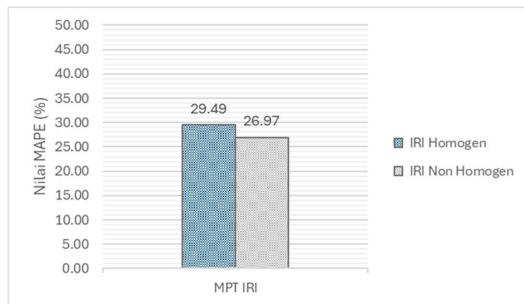
Berdasarkan **Gambar 5** dan **Gambar 6**, secara umum segmen jalan tol yang tidak terdampak banjir memiliki peluang untuk tetap berada pada kondisi yang sama (IRI-1) lebih besar dibandingkan segmen terdampak banjir. Hal ini juga menunjukkan bahwa segmen terdampak banjir memiliki probabilitas lebih besar untuk menurun kondisinya menjadi IRI-2, IRI-3 bahkan IRI-5 dibandingkan segmen yang tidak terdampak banjir.

4.2.3. Validasi model Markov Chain

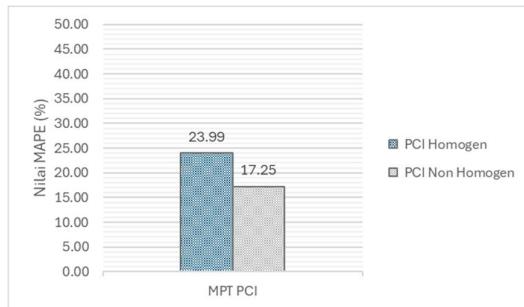
Analisis validasi model *Markov Chain* dilakukan melalui kertas kerja untuk seluruh segmen ruas jalan tol yang ditinjau dengan tahapan terdiri dari:

- Distribusi vektor kondisi awal (IRI dan PCI)
- Perhitungan IP periode tahun ke t
- Penentuan Keputusan Program Pemeliharaan tahun ke t (*no maintenance/with maintenance*)
- Proyeksi vektor kondisi tahun ke t+1
- Nilai Ekspektasi IRI & PCI tahun ke t+1
- Perhitungan IP periode tahun ke t+1
- Iterasi proses hingga tahun ke t+n
- Perhitungan Distribusi Data & Nilai MAPE

Perbandingan nilai MAPE untuk distribusi data IRI maupun PCI untuk periode analisis tahun 2020-2023 dengan MPT Homogen dan MPT Non Homogen terdapat pada **Gambar 7** dan **Gambar 8** sebagai berikut:



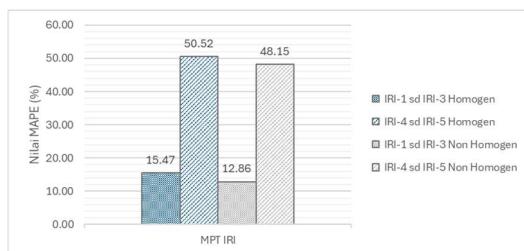
Gambar 7. Perbandingan MAPE distribusi data IRI tahun 2020-2023



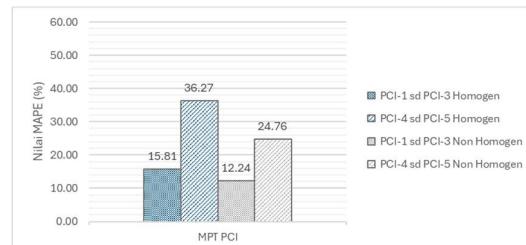
Gambar 8. Perbandingan MAPE distribusi data PCI tahun 2021-2023

Berdasarkan nilai MAPE yang didapatkan untuk distribusi data IRI model *Markov Chain* tahun 2020-2023 baik pada MPT Homogen dan MPT Non Homogen sebesar 26-29% mengindikasikan model *Markov Chain* memiliki akurasi yang layak/wajar dalam memodelkan probabilitas transisi *state* kondisi IRI. Untuk nilai MAPE untuk distribusi data PCI, MPT Non Homogen sebesar 17% (kategori akurasi baik) sedangkan MPT Non Homogen sebesar 23% (kategori akurasi layak/wajar) dalam memodelkan probabilitas transisi *state* kondisi PCI.

Jika dilihat lebih detail untuk setiap *state* kondisi dan dilakukan pengelompokan *state* kondisi 1-3 serta *state* kondisi 4-5, akan didapat perbandingan distribusi data IRI dan PCI untuk periode analisis tahun 2020-2023 dengan MPT Homogen dan MPT Non-Homogen sesuai **Gambar 9** dan **Gambar 10** sebagai berikut:



Gambar 9. Perbandingan MAPE distribusi data IRI per state kondisi tahun 2020-2023



Gambar 10. Perbandingan MAPE distribusi data PCI per state kondisi tahun 2021-2023

Berdasarkan **Gambar 9** dan **Gambar 10** tersebut, model *Markov Chain* merepresentasikan transisi yang lebih baik untuk IRI dengan kategori IRI-1, IRI-2, IRI-3 (rentang nilai IRI antara 0-6 m/km) serta PCI dengan kategori PCI-1, PCI-2, PCI-3 (rentang nilai PCI antara 55-100), terbukti dengan nilai MAPE distribusi data yang lebih kecil dibanding untuk *state* kondisi lain (IRI-4, IRI-5, PCI-4 dan PCI-5). Hal ini terjadi karena distribusi data kondisi perkerasan jalan tol mayoritas berada pada rentang *state* kondisi 1 sampai 3 di atas sebagai konsekuensi dari adanya penerapan kebijakan SPM jalan tol (nilai IRI maksimal 4 m/km dan perkerasan tidak mengalami kerusakan lubang, retak & rutting).

Selanjutnya apabila dilakukan perbandingan kebutuhan program pemeliharaan antara model *Markov Chain* dengan MPT Homogen maupun MPT Non-Homogen dengan *decision tree* melalui tahapan yang telah dijabarkan sebelumnya, didapat hasil perbandingan untuk ruas Jalan Tol Jakarta-Cikampek dan Jalan Tol Padalarang-Cileunyi sebagai berikut:

Tabel 10. Nilai MAPE perbandingan luas program pemeliharaan tahun 2020-2023

No	Ruas Jalan Tol	MPT	Luas Pemeliharaan [*]	MAPE
		Model	Observasi	
1	Jakarta-Cikampek	Homogen	1,451.70	1,219.78 20%
2	Jakarta-Cikampek	Non Homogen	1,415.12	1,219.78 18%
3	Padalarang-Cileunyi	Homogen	303.08	231.00 30%
4	Padalarang-Cileunyi	Non Homogen	293.15	231.00 28%

* dalam ribu m²

Berdasarkan **Tabel 10** di atas, secara umum model *Markov Chain* dengan MPT Homogen dan MPT Non Homogen memiliki akurasi yang layak/wajar dalam memodelkan luas program pemeliharaan Jalan Tol Jakarta-Cikampek maupun Padalarang-Cileunyi sesuai *decision tree* yang telah disusun sebelumnya.

Nilai luas program pemeliharaan yang lebih besar pada model dibandingkan data observasi lapangan menunjukkan bahwa model *Markov Chain* menghasilkan deteriorasi kondisi perkerasan lebih cepat sehingga kebutuhan pemeliharaan lebih banyak dibandingkan data observasi lapangan.

Secara umum dapat terlihat pula bahwa nilai MAPE

model *Markov Chain* dengan MPT Non Homogen sedikit lebih baik dibandingkan nilai MAPE model *Markov Chain* dengan MPT Homogen, dengan rincian sesuai **Tabel 11** sebagai berikut:

Tabel 11. Perbandingan nilai MAPE model *Markov Chain*

Parameter	MAPE Model <i>Markov Chain</i>		Δ
	Homogen	Non Homogen	
Distribusi Data IRI	29.00%	27.00%	2.00%
Distribusi Data PCI	24.00%	17.00%	7.00%
Pml Jakarta-Cikampek	20.00%	18.00%	2.00%
Pml Padalarang Cileunyi	30.00%	28.00%	2.00%
Rata-rata	25.75%	22.50%	3.25%

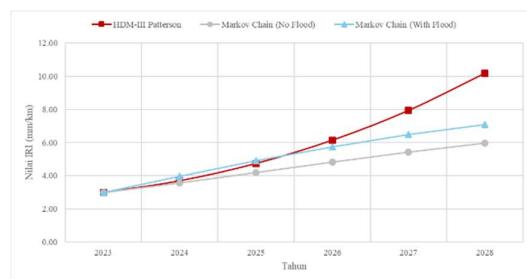
4.3. Proyeksi performa perkerasan dan program pemeliharaan

4.3.1. Perbandingan proyeksi IRI

Pada analisis perbandingan proyeksi IRI, dilakukan pengembangan vektor kondisi setiap tahun selama periode proyeksi (tahun 2024 hingga tahun 2028) pada model *Markov Chain* melalui perkalian antara matriks vektor kondisi dengan MPT Homogen. Analisis dilakukan pada segmen tidak terdampak banjir (*no flood*) dan segmen terdampak banjir (*with flood*) dengan asumsi segmen tersebut tidak dilakukan pemeliharaan (*no maintenance*)

Adapun nilai ekspektasi IRI untuk model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson) akan diambil langsung dari analisis yang telah dilakukan terhadap data observasi lapangan dengan Persamaan (4) di atas.

Selanjutnya perbandingan proyeksi IRI dilakukan dengan sampel *state* kondisi awal IRI-2 pada tahun 2023 sesuai **Gambar 11** sebagai berikut:



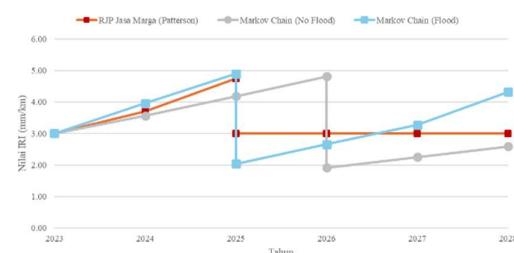
Gambar 11. Perbandingan proyeksi *state* kondisi awal IRI-2

Nilai IRI terbesar pada akhir periode yaitu pada model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson) sedangkan nilai IRI terendah pada akhir periode yaitu pada model *Markov Chain* untuk segmen tidak terdampak banjir. Selain itu, jika tidak dilakukan

pemeliharaan sampai akhir periode proyeksi, model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson) akan memiliki nilai IRI paling besar dibandingkan model *Markov Chain*. Model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson) juga tidak mempertimbangkan efek dampak banjir pada suatu segmen jalan tol dan bernilai sama baik pada segmen terdampak banjir dan tidak terdampak banjir.

4.3.2. Perbandingan proyeksi program pemeliharaan

Pada bagian ini, dilakukan evaluasi kebutuhan program pemeliharaan untuk pengembangan model *Markov Chain* dengan MPT Homogen pada ruas tidak terdampak banjir (*no flood*) dan ruas terdampak banjir (*with flood*) yang dibandingkan dengan kebutuhan program pemeliharaan pada model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson) dengan *decision tree* yang sama. Perbandingan proyeksi program pemeliharaan antara model *Markov Chain* untuk kondisi segmen tidak terdampak banjir (*no flood*) dengan MPT Homogen dengan nilai ekspektasi IRI berdasarkan model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson) untuk sampel *state* kondisi awal IRI-2 pada tahun 2023 sebagaimana terdapat pada **Gambar 12** berikut:



Gambar 12. Perbandingan proyeksi program pemeliharaan segmen dengan *state* kondisi awal IRI-2

Model *Markov Chain* dengan MPT Homogen untuk kondisi No Flood memberikan hasil proyeksi berupa program pemeliharaan rehabilitasi mayor pada $t=4$ (tahun 2027) untuk segmen yang memiliki kondisi awal IRI-2 dan tidak terdampak banjir. Model *Markov Chain* dengan MPT Homogen untuk kondisi *with flood* memberikan hasil proyeksi berupa program pemeliharaan rehabilitasi mayor pada $t=3$ (tahun 2026) untuk segmen yang memiliki kondisi awal IRI-2 dan terdampak banjir. Model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson) memberikan hasil proyeksi berupa program rehabilitasi minor pada $t=2$ (tahun 2025) yang menurunkan nilai IRI menjadi 3.00 m/km. Setelah tahun 2025, diasumsikan bahwa terdapat penanganan berupa pemeliharaan preventif dan rehabilitasi minor setiap tahunnya sehingga nilai IRI berdasarkan model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson) dianggap tetap sebesar 3.00 m/km.

Perbedaan kondisi proyeksi program pemeliharaan

ini juga disebabkan karena model *Markov Chain* tidak memiliki MPT khusus untuk perbaikan dengan pemeliharaan preventif maupun rehabilitasi minor, sehingga nilai IRI akan menjadi lebih besar untuk selanjutnya dilakukan pemeliharaan berupa rehabilitasi mayor jika nilai IRI masuk rentang *decision tree* terkait.

4.3.3. Perbandingan proyeksi luasan program pemeliharaan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan terhadap proyeksi IRI dan program pemeliharaan, didapat rekapitulasi kebutuhan program pemeliharaan berupa rehabilitasi mayor sesuai **Tabel 12** berikut:

Tabel 12. Perbandingan proyeksi luasan program pemeliharaan

No	Ruas Jalan Tol	Luas Pemeliharaan*		
		Markov Chain	RJP (Patters on)	Δ
1	Jakarta-Cikampek	505.98	422.67	83.31
2	Padalarang-Cileunyi	455.18	409.74	45.43
	Total	961.16	832.42	128.74

* dalam ribu m²

4.3.4. Analisis implikasi penerapan kebijakan RJP sesuai model HDM-III (Patterson)

Berdasarkan analisis pada sub bab 4.3.3 sebelumnya, model *Markov Chain* memproyeksikan kebutuhan program pemeliharaan sebesar $\pm 15\%$ lebih besar dibandingkan RJP. Namun demikian, hal tersebut belum tentu akan membuat kebutuhan biaya pemeliharaan model *Markov Chain* menjadi lebih mahal karena adanya perbedaan pola proyeksi program pemeliharaan di mana pada penelitian ini model *Markov Chain* hanya mempertimbangkan metode rehabilitasi mayor sedangkan RJP yang berbasis model HDM-III (Patterson) juga mempertimbangkan program pemeliharaan lainnya yang dilakukan setiap tahun untuk mempertahankan nilai IRI dan PCI sesuai **Tabel 13** sebagai berikut:

Tabel 13. Perbandingan pola proyeksi pemeliharaan

No	Markov Chain	RJP Jasa Marga (HDM-III Patterson)
1	-	Perawatan Rutin
2	-	Pemeliharaan Rutin
3	-	Rehabilitasi Minor
4	Rehabilitasi Mayor	Rehabilitasi Mayor
5	-	Rekonstruksi

Perhitungan lebih detail perlu dilakukan untuk

membandingkan model mana yang memberikan proyeksi biaya pemeliharaan paling optimal bagi pengelola jalan tol dengan catatan kedua model memiliki *decision tree* program pemeliharaan yang sama.

5. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat disampaikan dari hasil penelitian ini antara lain:

- Validasi yang telah dilakukan menggunakan parameter MAPE menunjukkan akurasi model *Markov Chain* secara umum menunjukkan akurasi yang layak/wajar dengan rata-rata nilai MAPE 25.75% untuk MPT Homogen dan 22.50% untuk MPT Non Homogen.
- Deteriorasi perkerasan berupa peningkatan nilai IRI dan penurunan nilai PCI terbukti lebih cepat terjadi pada kondisi segmen jalan tol yang selalu terdampak banjir dibandingkan segmen jalan tol tidak terdampak banjir.
- Model *Markov Chain* dengan MPT Non Homogen lebih tepat digunakan untuk memodelkan deteriorasi perkerasan jalan tol selama periode terjadinya kejadian khusus misalnya banjir dibandingkan dengan MPT Homogen, karena sampel data transisi antar *state* kondisi yang lebih spesifik pada periode kejadian khusus dan tidak terpengaruh oleh transisi pada tahun-tahun normal.
- Model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson) tidak mempertimbangkan efek dampak banjir pada suatu segmen jalan tol dan bernilai sama pada segmen terdampak dan tidak terdampak banjir. Di sisi lain, pendekatan nilai ekspektasi dapat mengantisipasi *drawback* model *Markov Chain* di mana hasil proyeksi probabilitas dapat dikonversi menjadi nilai deterministik.
- Perbedaan pola (frekuensi dan jenis) program pemeliharaan terjadi karena model *Markov Chain* yang dikembangkan pada penelitian ini belum mengakomodir program pemeliharaan lainnya seperti pada model deteriorasi IRI HDM-III (Patterson).

6. Saran

Beberapa masukan untuk pengembangan model *Markov Chain* untuk penelitian selanjutnya:

- Pengembangan MPT untuk program pemeliharaan rutin, pemeliharaan preventif & rehabilitasi minor yang berbeda dengan rehabilitasi mayor.
- Pemilihan sampel jalan tol yang memiliki karakteristik lalu lintas berbeda & usia relatif baru (dengan historikal pemeliharaan lengkap sejak

- selesai konstruksi).
- c. Pengembangan MPT Non Homogen akan lebih baik jika periode data historikal IRI dan PCI lebih panjang (>5 tahun) serta pengolahan dilakukan dengan transisi setiap tahun.

Daftar Pustaka

- Abaza, K. A. (2016). *Back-calculation of transition probabilities for Markovian-based pavement performance prediction models*. International Journal of Pavement Engineering, 17(3), 253–264. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.993185>
- Abaza, K. A. (2017). *Empirical Markovian-based models for rehabilitated pavement performance used in a life cycle analysis approach*. Structure and Infrastructure Engineering, 13(5), 625–636. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1187180>
- Abaza, K. A. (2022). *Optimal novel approach for estimating the pavement transition probabilities used in Markovian prediction models*. International Journal of Pavement Engineering, 23(8), 2809–2820. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1873326>
- Abaza, K. A., Ashur, S. A., & Al-Khatib, I. A. (2004). Integrated Pavement Management System with a Markovian Prediction Model. Journal of Transportation Engineering, 130(1), 24–33. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:1\(24\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:1(24))
- Aulia, Y. B. (2023). Analisis Program Preservasi Jalan Terdampak Banjir Menggunakan Model *Markov Chain* [Tesis]. Institut Teknologi Bandung.
- Avilés-Rojas, N., Suárez, F., Chamorro, A., & González, A. (2023). *Flood impact on structural response of asphalt pavement: A finite element modeling approach*. Structures, 57, 105259. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105259>
- Haas, R., Hudson, W. R., & Zaniewski, J. P. (1994). Modern pavement management.
- Handayani, O. T. (2022). *Analisis Pengaruh Banjir terhadap Deteriorasi Perkerasan Berdasarkan Kondisi Permukaannya* [Tesis]. Institut Teknologi Bandung.
- Hu, A., Bai, Q., Chen, L., Meng, S., Li, Q., & Xu, Z. (2022). *A review on empirical methods of pavement performance modeling*. Construction and Building Materials, 342, 127968. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127968>
- Issa, A., & Abu Eisheh, S. (2019). *Development of Pavement Performance Model for Proper Rehabilitation and Maintenance using First Order Markov Chain*. Dalam Proc. Interdependence between Structural Engineering and Construction Management (6 ed.). ISEC Press.
- Kharbat, S. A., Basheer, M. B., & Hashim, A. Q. M. (2023). *A Novel Methodology for Predicting Roadway Deterioration in Iraq*. International Journal of Engineering, 36(1), 41–49. <https://doi.org/10.5829/IJE.2023.36.01A.06>
- Khattak, M. J., Landry, C., Veazey, J., & Zhang, Z. (2013). *Rigid and composite pavement index-based performance models for network pavement management system in the state of Louisiana*. International Journal of Pavement Engineering, 14(7), 612–628. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.715643>
- Kobayashi, K., Do, M., & Han, D. (2010). *Estimation of Markovian transition probabilities for pavement deterioration forecasting*. KSCE Journal of Civil Engineering, 14(3), 343–351. <https://doi.org/10.1007/s12205-010-0343-x>
- Li, N., Xie, W.-C., & Haas, R. (1996). *Reliability-Based Processing of Markov Chains for Modeling Pavement Network Deterioration*. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board, 1524(1), 203–213. <https://doi.org/10.1177/0361198196152400124>
- Mrawira, D. M., & Amador, L. E. (2008). *Performance Modeling for Asset Management: What to do when you only have two data points?*
- Wang, W., Wang, L., Miao, Y., Cheng, C., & Chen, S. (2020). *A survey on the influence of intense rainfall induced by climate warming on operation safety and service life of urban asphalt pavement*. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 1(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s43065-020-00003-0>
- Wasiq, S., & Golroo, A. (2024). *Probabilistic pavement performance modeling using hybrid Markov Chain: A case study in Afghanistan*. Case Studies in Construction Materials, 20, e03023. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2024.E03023>
- Wuebbles, D., Fahey, D., Hibbard, K., Dokken, D., Stewart BC, & Maycock, T. (2018). *Climate science special report: Fourth national climate assessment*. Dalam US Global Change Research Program: Washington, DC,

- USA: Vol. I. US Global Change Research Program.
- Yamany, M. S., & Abraham, D. M. (2021). *Hybrid Approach to Incorporate Preventive Maintenance Effectiveness into Probabilistic Pavement Performance Models*. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 147(1), 04020077. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000227>
- Zumrawi, M. (2016). *Investigating Causes of Pavement Deterioration In Khartoum State*. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 7(2), 203–214. <http://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=7&Issue=2>

