

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Infrastruktur jalan merupakan komponen vital yang mendukung mobilitas barang dan jasa serta konektivitas masyarakat, sehingga memainkan peran fundamental dalam pertumbuhan ekonomi dan peningkatan kualitas hidup suatu wilayah. Ketersediaan jaringan jalan dengan kondisi yang baik menjadi prasyarat utama bagi kelancaran aktivitas ekonomi dan sosial. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengelolaan jalan yang efektif agar perkerasan jalan dapat berfungsi secara optimal sepanjang umur layanannya.

Dalam konteks tersebut, Sistem Manajemen Perkerasan (*Pavement Management System* / PMS) dan Sistem Manajemen Pemeliharaan Perkerasan (*Pavement Maintenance Management System* / PMMS) diidentifikasi sebagai komponen fundamental dalam manajemen aset infrastruktur yang bertujuan menjamin keberlanjutan layanan serta optimalisasi umur layanan jalan (Parikesit, 2012). PMS berfungsi sebagai instrumen strategis yang memanfaatkan basis data kondisi jalan secara sistematis untuk memformulasikan rencana penanganan yang tepat sasaran melalui pemeliharaan rutin maupun rehabilitasi guna mencegah kerusakan dini (Susanto, 2010). Secara operasional, sistem ini mengintegrasikan berbagai elemen kunci, termasuk penilaian indeks kondisi perkerasan (PCI) untuk menjamin objektivitas data (Setiawan & Setyawan, 2016), serta pemanfaatan peta digital interaktif berbasis Sistem Informasi Geografis yang mendukung pengambilan keputusan secara spasial dan transparan (Hidayat, 2018).

Seiring bertambahnya waktu, perkerasan jalan tidak dapat terlepas dari proses degradasi akibat interaksi kompleks berbagai faktor. Beban lalu lintas yang berulang, terutama fenomena beban berlebih (*overloading*), serta kondisi lingkungan ekstrem seperti fluktuasi suhu dan curah hujan tinggi di wilayah tropis, menjadi pemicu utama penurunan kualitas material perkerasan (Suaryana, 2016). Faktor-faktor tersebut, jika dipadukan dengan karakteristik material yang tidak memadai, berkontribusi secara kolektif terhadap percepatan kerusakan jalan. Dalam upaya mengendalikan laju penurunan tersebut, penggunaan model kinerja perkerasan menjadi sangat krusial. Model ini dirancang untuk memprediksi kondisi perkerasan di masa depan dengan mengintegrasikan variabel intensitas lalu lintas, kondisi iklim,

serta data historis pemeliharaan sesuai dengan standar yang ditetapkan dalam Manual Desain Perkerasan Jalan (Kementerian PUPR, 2017).

Akurasi dalam memprediksi kondisi perkerasan merupakan elemen fundamental dalam PMS karena menjadi basis utama dalam perencanaan strategi rehabilitasi dan optimasi biaya siklus hidup aset jalan (Mulyono dkk., 2010). Dengan model prediksi yang andal, penyelenggara jalan dapat menentukan prioritas penanganan dan melakukan intervensi pemeliharaan secara tepat waktu. Pendekatan proaktif ini terbukti efektif dalam mencegah kerusakan yang lebih progresif, sehingga mampu menekan biaya penanganan jangka panjang dan menjaga tingkat layanan jalan tetap optimal (Parikesit & Antameng, 2012).

Di Indonesia, permasalahan beban lalu lintas berlebih (*overloading*) masih sering terjadi dan menjadi salah satu penyebab utama percepatan kerusakan struktural perkerasan, bahkan sebelum umur rencana tercapai. Kondisi ini berdampak langsung pada meningkatnya kebutuhan dan biaya pemeliharaan jalan. Untuk memantau dan mengevaluasi tingkat degradasi perkerasan, berbagai indeks kondisi perkerasan telah dikembangkan dan digunakan secara luas dalam PMS, antara lain *Pavement Condition Index* (PCI), *Present Serviceability Index* (PSI), *International Roughness Index* (IRI), dan *Present Serviceability Rating* (PSR). Di antara berbagai indeks tersebut, IRI merupakan salah satu indikator kinerja yang paling umum digunakan karena bersifat kuantitatif, objektif, serta relatif mudah diintegrasikan dalam sistem manajemen jalan.

Namun, dalam praktik dan penelitian sebelumnya, pemodelan kondisi perkerasan jalan banyak menggunakan pendekatan deterministik, seperti regresi linear, karena kemudahannya dalam implementasi serta interpretasi hubungan antar variabel. Berbagai penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa pendekatan ini memiliki keterbatasan mendasar. Penelitian Mulyana et al. (2023) menunjukkan bahwa hubungan antara volume lalu lintas dan nilai IRI tidak selalu signifikan, yang mengindikasikan bahwa regresi linear belum mampu menjelaskan kompleksitas variabilitas kondisi perkerasan. Temuan serupa oleh Susanto (2017) mencatat nilai koefisien determinasi (R^2) yang relatif rendah, menegaskan bahwa variabilitas kondisi tidak dapat dijelaskan secara optimal hanya dengan pendekatan deterministik yang bersifat kaku.

Keterbatasan ini semakin terlihat pada hubungan antar-indikator seperti IRI dan PCI. Penelitian Setyaji et al. (2022) menunjukkan bahwa model regresi yang

dihasilkan tetap bersifat statis dan hanya menghasilkan satu nilai prediksi tunggal. Akibatnya, model semacam ini gagal menggambarkan ketidakpastian (*uncertainty*) yang melekat pada proses degradasi jalan akibat fluktuasi beban dan lingkungan (Utomo, 2015). Model deterministik cenderung mengabaikan dinamika perubahan kondisi dari waktu ke waktu dan tidak mampu menyajikan rentang kemungkinan kondisi di masa depan.

Sebagai upaya mengatasi kelemahan tersebut, diperlukan pendekatan alternatif yang lebih adaptif, yaitu Model Rantai Markov. Pendekatan stokastik ini mampu memodelkan penurunan kondisi perkerasan melalui Matriks Probabilitas Transisi (MPT), yang secara eksplisit mengakomodasi elemen ketidakpastian dan perilaku acak material di lapangan (Setyawan & Harianto, 2017). Keunggulan metode ini telah dibuktikan dalam penelitian Setyawan, Ulum, & Zarkasi (2015) yang mengembangkan model degradasi perkerasan pada Jalan Nasional di Jawa Tengah, di mana model Markov mampu merepresentasikan kondisi perkerasan yang dinamis jauh lebih baik daripada model regresi tradisional. Melalui Rantai Markov, data historis IRI tidak hanya dilihat sebagai tren linear, melainkan diolah untuk mendefinisikan tahapan kondisi (*state*) dan peluang perpindahannya dari waktu ke waktu.

Penerapan model ini menjadi sangat relevan dalam menjawab tantangan operasional di lapangan, khususnya mengenai kesenjangan (*gap*) antara kondisi pada saat survei awal dengan kondisi aktual pada saat pelaksanaan pekerjaan. Fenomena ini sering kali mengakibatkan keputusan pemeliharaan diambil berdasarkan data prediksi yang belum teruji akurasinya terhadap kondisi riil di lapangan. Penelitian Haryanto (2017) mengenai penggunaan model stokastik untuk perkerasan kaku menunjukkan bahwa prediksi berbasis probabilitas transisi memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai sisa umur layanan jalan (*remaining service life*). Oleh karena itu, diperlukan sebuah simulasi yang tidak hanya memproyeksikan kondisi masa depan, tetapi juga divalidasi dengan data aktual guna memastikan reliabilitas model tersebut.

Dengan landasan metodologis yang lebih representatif, hasil prediksi berbasis Rantai Markov ini diharapkan dapat memberikan dasar yang kuat dalam penyusunan rekomendasi teknis pemeliharaan jalan. Sebagaimana ditegaskan oleh Zulakmal (2020), penggunaan model prediksi yang tepat sangat krusial agar program preservasi jalan dapat dilaksanakan secara lebih efektif, efisien, dan tepat sasaran

sesuai dengan dinamika kondisi aktual perkerasan pada saat pekerjaan dimulai. Penelitian ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan mengaplikasikan metode Rantai Markov untuk memproyeksikan kondisi IRI secara lebih akurat demi optimalisasi strategi pemeliharaan infrastruktur jalan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, rumusan masalah dalam penelitian ini mencakup hal-hal berikut:

1. Bagaimana data historis kondisi perkerasan jalan, khususnya nilai *International Roughness Index* (IRI), dapat digunakan untuk membangun model prediksi kondisi perkerasan jalan berbasis Rantai Markov?
2. Bagaimana hasil simulasi model Rantai Markov dalam memproyeksikan kondisi perkerasan jalan di masa depan, serta tingkat akurasi model tersebut apabila divalidasi dengan kondisi aktual di lapangan?

1.3. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah :

1. Penelitian ini dilaksanakan pada Ruas Jalan Trans Papua Segmen Manokwari – Bintuni yang berada dalam pengelolaan Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Papua Barat – Papua Barat Daya.
2. Nilai IRI yang diperoleh dalam studi ini tidak dikaitkan dengan faktor kualitas material, proses konstruksi, maupun kondisi cuaca di lokasi penelitian.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis data historis kondisi perkerasan jalan, khususnya nilai *International Roughness Index* (IRI), untuk menyusun model prediksi kondisi perkerasan jalan berbasis Rantai Markov, termasuk pendefinisian keadaan (*state*) dan Matriks Probabilitas Transisi.

2. Melakukan simulasi model Rantai Markov untuk memproyeksikan kondisi perkerasan jalan di masa depan serta memvalidasi hasil prediksi dengan kondisi aktual perkerasan jalan di lapangan.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

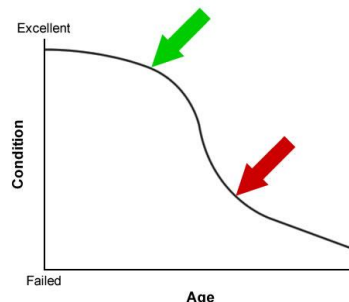
1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan metode prediksi kondisi perkerasan jalan berbasis pendekatan probabilistik melalui penerapan model Rantai Markov dengan menggunakan indikator *International Roughness Index* (IRI).
2. Menyediakan model prediksi kondisi perkerasan jalan yang tervalidasi dan dapat digunakan sebagai alat bantu dalam perencanaan serta pengambilan keputusan pemeliharaan jalan secara lebih efektif dan berbasis data.
3. Memberikan dasar teknis dalam penyusunan rekomendasi pemeliharaan jalan yang lebih tepat sasaran, sehingga dapat mendukung optimalisasi kinerja perkerasan dan efisiensi penggunaan anggaran pemeliharaan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Hubungan Kondisi dan Umur Jalan

Semua jenis perkerasan jalan, baik perkerasan lentur maupun kaku, secara alami akan mengalami penurunan kondisi seiring waktu. Penurunan ini umumnya bersifat progresif, dimulai dari kerusakan ringan seperti retak rambut atau keausan permukaan, yang kemudian berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius apabila tidak segera ditangani. Pada tahap awal masa layanan, kondisi perkerasan biasanya masih baik, namun seiring bertambahnya umur dan akumulasi beban lalu lintas serta pengaruh lingkungan seperti curah hujan dan suhu ekstrem, kerusakan kecil tersebut dapat berkembang menjadi retak struktural, deformasi permanen, atau bahkan lubang (Kementerian PUPR, 2016)

Menurut Ens (2012), laju kerusakan aset infrastruktur diperkirakan akan meningkat secara bertahap setiap saat, menunjukkan bahwa tanpa intervensi yang tepat, kondisi infrastruktur akan terus memburuk. Kurva kerusakan (tanpa pemeliharaan) secara umum dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kurva Kerusakan Infrastruktur (Ens, 2012)

Laju kerusakan perkerasan jalan di Indonesia sulit diprediksi secara akurat karena kompleksitas dalam menentukan nilai kondisi perkerasan dan keterbatasan dalam pengumpulan data yang lengkap. Keterbatasan ini disebabkan oleh kurangnya peralatan canggih serta staf terlatih yang mampu melakukan evaluasi teknis secara menyeluruh. Meskipun berbagai sistem manajemen perkerasan (*Pavement Management System* atau PMS) telah dikembangkan, implementasinya sering kali tidak mengikuti prosedur formal yang baku. Akibatnya, penilaian kondisi jalan lebih banyak didasarkan pada pendekatan subjektif atau pengalaman personal, termasuk dalam menentukan probabilitas perubahan kondisi jalan dari waktu ke

waktu. Penelitian oleh Setiabudi et al. (2024) menunjukkan bahwa penerapan teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), *big data*, dan *data mining* dapat mendukung sistem manajemen perkerasan yang lebih cerdas dan komprehensif di Indonesia. Namun, implementasi teknologi ini menghadapi tantangan karena lemahnya konsep dan ketersediaan sumber daya yang ada saat ini.

Pemeliharaan aset infrastruktur jalan memerlukan pendekatan sistematis yang mencakup penilaian kondisi, pemodelan kinerja, optimasi program, serta pengembangan rencana taktis dan strategis. Salah satu elemen kunci dalam pendekatan ini adalah penggunaan model kinerja perkerasan yang mampu memprediksi kondisi perkerasan di masa mendatang berdasarkan kondisi saat ini,

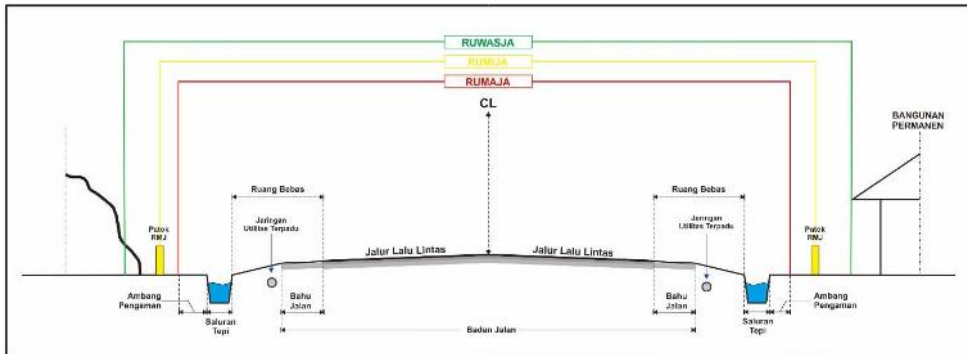
2.2. Pengertian Jalan

Jalan adalah prasarana transportasi darat yang meliputi segala bagian Jalan, termasuk bangunan penghubung, bangunan pelengkap dan perlengkapannya yang diperuntukkan bagi lalu lintas, yang berada pada permukaan tanah, di atas permukaan tanah, di bawah permukaan tanah, dan/atau air, serta di atas permukaan air, kecuali jalan rel, jalan lori, dan jalan kabel (Undang – Undang Nomor 2 Tahun 2022)

2.2.1. Bagian – Bagian Jalan

Penampang melintang jalan merupakan potongan melintang tegak lurus terhadap sumbu jalan yang menggambarkan susunan dan bentuk bagian-bagian konstruksi jalan dari arah melintang. Penampang melintang ini berfungsi untuk menunjukkan elemen-elemen penting dari struktur jalan, termasuk lapisan perkerasan, bahu jalan, saluran drainase, serta batas-batas ruang jalan. Berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2022 tentang Perubahan Kedua Atas Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004 Tentang Jalan, ruang jalan dibagi ke dalam tiga bagian utama, yaitu Ruang Manfaat Jalan (RUMAJA), Ruang Milik Jalan (RUMIJA), dan Ruang Pengawasan Jalan (RUWASJA). RUMAJA mencakup seluruh badan jalan, saluran tepi jalan, serta ambang pengaman yang digunakan langsung untuk lalu lintas. RUMIJA adalah ruang yang terdiri dari RUMAJA beserta sejalur tanah tertentu di luar RUMAJA yang diperlukan untuk keutuhan fungsi jalan. Sementara itu, RUWASJA merupakan wilayah di luar RUMIJA

yang berada di bawah pengawasan penyelenggara jalan untuk menjamin keamanan dan keberlanjutan fungsi jalan



Gambar 2.2 Penampang Melintang Jalan (Bina Marga, 2024)

Berdasarkan Pasal 1 Ayat (4) Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan, bagian jalan mencakup beberapa komponen berikut:

1. Konstruksi perkerasan jalan

Merupakan bagian utama jalan yang dirancang untuk menerima beban lalu lintas. Perkerasan jalan terdiri dari lapisan-lapisan struktural (seperti lapis pondasi dan lapis permukaan) yang berfungsi untuk mendistribusikan beban kendaraan ke tanah dasar secara merata.

2. Bahu jalan

Terletak di samping lajur lalu lintas utama, bahu jalan menyediakan ruang tambahan bagi kendaraan darurat, perawatan jalan, dan sebagai elemen keamanan. Bahu jalan juga membantu menahan tepi perkerasan agar tidak rusak.

3. Saluran tepi jalan

Sistem drainase di sisi jalan yang berfungsi untuk mengalirkan air permukaan agar tidak menggenangi badan jalan, sehingga menjaga daya tahan struktur jalan dan meningkatkan keselamatan pengguna jalan.

4. Pelengkap jalan

Termasuk berbagai fasilitas tambahan yang menunjang kenyamanan, keamanan, dan keteraturan lalu lintas, seperti trotoar, marka jalan, rambu lalu lintas, pagar pengaman, serta penerangan jalan.

5. Bangunan penghubung

Meliputi struktur konstruksi seperti jembatan, gorong-gorong, *flyover*, dan *underpass* yang memungkinkan kesinambungan jalan melintasi hambatan geografis seperti sungai, rel kereta api, atau jalan lainnya.

2.2.2. Lapis Permukaan Jalan

Lapis permukaan jalan merupakan lapisan paling atas dari struktur perkerasan jalan yang langsung bersentuhan dengan beban lalu lintas. Lapisan ini memiliki peran penting dalam mendistribusikan beban kendaraan ke lapisan di bawahnya serta melindungi struktur jalan dari kerusakan akibat faktor lingkungan (Bina Marga, 2020). Fungsi lapis permukaan jalan antara lain :

1. Menahan dan menyebarkan beban lalu lintas

Lapis permukaan harus mampu menahan beban kendaraan dan menyebarkannya ke lapisan di bawahnya tanpa mengalami deformasi permanen.

2. Memberikan kenyamanan dan keselamatan berkendara

Permukaan jalan yang rata dan memiliki kekesatan yang cukup akan meningkatkan kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan.

3. Melindungi lapisan di bawahnya dari infiltrasi air

Lapis permukaan berfungsi sebagai lapisan kedap air yang mencegah masuknya air ke dalam lapisan perkerasan di bawahnya, sehingga menghindari kerusakan akibat kelembapan.

4. Sebagai lapisan aus (*wearing course*)

Lapis permukaan dirancang untuk menahan keausan akibat gesekan roda kendaraan dan dapat diganti atau diperbaiki secara berkala tanpa mempengaruhi struktur di bawahnya.

Untuk memenuhi fungsi-fungsi utama lapisan permukaan jalan, umumnya digunakan bahan pengikat aspal yang mampu membentuk lapisan kedap air. Penggunaan aspal sebagai bahan pengikat tidak hanya meningkatkan stabilitas struktural lapisan permukaan, tetapi juga memperpanjang umur layanan jalan dengan meningkatkan daya tahan terhadap beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan

2.2.3. Jenis Lapis Permukaan Jalan

Berikut beberapa jenis lapis permukaan jalan yang umum digunakan di Indonesia (Bina Marga, 2020) :

1. **Lapis Aspal Beton (LASTON)**

Merupakan campuran agregat kasar, agregat halus, filler, dan aspal panas yang dihamparkan dan dipadatkan dalam keadaan panas. LASTON memiliki sifat kedap air dan stabilitas tinggi sehingga sering digunakan pada jalan dengan volume lalu lintas sedang hingga tinggi.

2. **Lapis Penetrasi Makadam (LAPEN)**

Terbuat dari agregat bergradasi terbuka yang diikat dengan aspal keras yang disemprotkan pada permukaan agregat kemudian dipadatkan. LAPEN cocok untuk jalan dengan lalu lintas ringan hingga sedang dan lebih ekonomis dibanding LASTON.

3. **Lapis Tipis Aspal Beton (LATASTON)**

Merupakan lapisan tipis dari campuran agregat bergradasi timpang dengan aspal keras, biasanya dengan ketebalan 25-30 mm, berfungsi sebagai lapisan pelindung dan perbaikan permukaan.

4. **Lapis Tipis Aspal Pasir (LATASIR)**

Terbuat dari campuran pasir dan aspal keras yang dihamparkan dalam keadaan panas. LATASIR biasa digunakan sebagai lapisan pelindung untuk meningkatkan kededapan air pada permukaan perkerasan.

5. **Laburan Batu Satu Lapis (BURTU)**

Lapisan permukaan yang terdiri dari aspal panas yang ditaburi dengan satu lapisan agregat berukuran seragam, memberikan perlindungan sekaligus meningkatkan kekasaran permukaan.

6. **Laburan Batu Dua Lapis (BURDA)**

Teknik pelapisan yang menggunakan dua lapisan agregat yang ditabur berturut-turut di atas aspal panas, memberikan daya tahan yang lebih baik dibandingkan laburan satu lapis.

7. **Hot Rolled Asphalt (HRA)**

Campuran aspal dan agregat bergradasi timpang yang dipadatkan dalam keadaan panas dengan permukaan yang keras dan tahan lama, biasanya digunakan pada jalan dengan lalu lintas berat.

2.3. Jenis Kerusakan Jalan

Menurut Silvia Sukirman (1999) kerusakan jalan dapat dikelompokkan menjadi dua kategori utama, yaitu:

1. Kerusakan Struktural

Kerusakan struktural merupakan jenis kerusakan yang menandakan telah terjadinya kegagalan pada perkerasan jalan, baik sebagian maupun keseluruhan lapisan perkerasan. Kerusakan ini terjadi ketika satu atau lebih komponen struktural jalan tidak lagi mampu menanggung beban lalu lintas yang melintas di atasnya. Ciri khas dari kerusakan struktural adalah sifatnya yang progresif, yaitu semakin memburuk seiring waktu apabila tidak segera dilakukan penanganan yang tepat. Dalam banyak kasus, apabila kerusakan ini diabaikan, maka kondisi perkerasan akan mengalami degradasi lebih lanjut yang berdampak pada kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan. Oleh karena itu, perbaikan terhadap kerusakan struktural umumnya memerlukan pembangunan ulang (rekonstruksi) pada bagian perkerasan yang rusak secara menyeluruh untuk mengembalikan fungsinya secara optimal.

2. Kerusakan Fungsional

Kerusakan fungsional adalah jenis kerusakan pada jalan yang tidak secara langsung memengaruhi kekuatan struktur perkerasan, namun berdampak terhadap kenyamanan, keamanan, dan pelayanan jalan bagi pengguna. Kerusakan ini biasanya terjadi pada permukaan jalan dan mencakup perubahan bentuk atau kondisi yang mengganggu kelancaran arus lalu lintas. Contoh kerusakan fungsional antara lain retak rambut (hairline cracks), pelapukan permukaan (ravelling), permukaan bergelombang (corrugation), aspal berlebih (bleeding), serta genangan air akibat kerataan atau kemiringan melintang yang buruk. Meskipun tidak mengindikasikan kegagalan struktural, kerusakan ini perlu segera ditangani agar tidak berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius dan mengarah pada kerusakan struktural. Perbaikan terhadap kerusakan fungsional biasanya cukup dilakukan dengan pemeliharaan rutin atau perbaikan lokal, tanpa memerlukan rekonstruksi menyeluruh.

Jenis-jenis kerusakan jalan menurut Direktorat Jenderal Bina Marga, sebagaimana tercantum dalam dokumen teknis seperti Manual Pemeliharaan Jalan, Pavement Management System (PMS) 2017 :

1. Retak-retak (*Cracking*)

- Retak buaya (*Alligator cracking*): Retakan berbentuk seperti kulit buaya yang menandakan kelelahan struktural.
- Retak memanjang dan melintang: Biasanya akibat susut, perubahan suhu, atau sambungan lapisan bawah.
- Retak refleksi (*Reflection cracking*): Retakan yang muncul mengikuti sambungan atau retak di lapisan bawah.
- Retak tepi (*Edge cracking*): Retak yang terjadi di pinggir jalan karena drainase buruk atau beban berat.

2. Alur (*Rutting*)

Penurunan memanjang pada jalur roda kendaraan akibat deformasi plastis lapisan perkerasan atau pondasi.

3. Pelapukan (*Ravelling*)

Kehilangan butiran agregat permukaan akibat hilangnya ikatan antara aspal dan agregat.

4. Lubang (*Potholes*)

Lubang pada permukaan jalan yang terbentuk akibat perkembangan retak dan pelapukan yang tidak ditangani.

5. Permukaan Bergelombang (*Shoving and Corrugation*)

Gelombang pada permukaan jalan, biasanya terjadi di daerah pengereman atau tanjakan.

6. *Bleeding* (Aspal Berlebih)

Timbulnya lapisan aspal di permukaan akibat kadar aspal yang terlalu tinggi atau pemadatan berlebih.

7. *Stripping*

Lepasnya ikatan antara aspal dan agregat karena masuknya air, mengurangi daya tahan lapisan perkerasan.

8. Ambblas (*Depression/Settlement*)

Penurunan lokal permukaan jalan akibat kegagalan struktur bawah atau pondasi jalan.

9. Delaminasi

Terangkat atau terlepasnya lapisan perkerasan akibat lemahnya ikatan antar lapisan.

2.4. Umur Rencana Perkerasan Jalan

Umur rencana perkerasan jalan merupakan jangka waktu yang diperkirakan selama perkerasan jalan dapat berfungsi secara optimal tanpa memerlukan rehabilitasi besar (Bina Marga, 2024). Umur rencana perkerasan jalan berbeda tergantung pada jenis perkerasan yang digunakan. Perkerasan lentur (aspal) umumnya dirancang untuk memiliki umur rencana antara 10 hingga 15 tahun. Sementara itu, perkerasan kaku (beton) memiliki umur rencana yang lebih panjang, yakni berkisar antara 20 sampai 30 tahun. Sedangkan perkerasan semirigid biasanya memiliki umur rencana di antara kedua tipe tersebut, sekitar 15 sampai 20 tahun.

2.4.1. Pemeliharaan Jalan

Pemeliharaan jalan adalah serangkaian kegiatan teknis yang dilakukan secara berkala untuk menjaga kondisi perkerasan dan elemen jalan lainnya agar tetap berfungsi secara optimal. Pemeliharaan jalan merupakan bagian integral dari program preservasi jalan, yang bertujuan mempertahankan tingkat pelayanan jalan dan memperpanjang umur rencana perkerasan (Bina Marga 2021).

2.4.2. Program Pemeliharaan Jalan

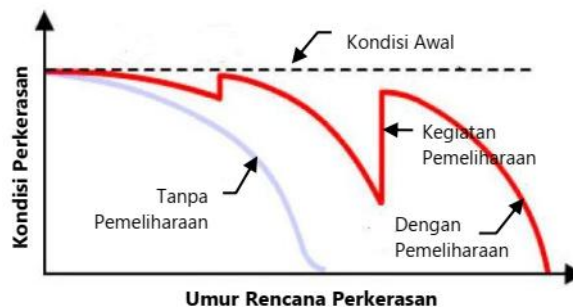
Menurut Kementerian Pekerjaan Umum (2011), kegiatan pemrograman pemeliharaan jalan mencakup proses identifikasi dan penetapan ruas atau segmen jalan yang akan ditangani melalui berbagai jenis pekerjaan pemeliharaan, seperti pemeliharaan rutin, pemeliharaan berkala, rehabilitasi, maupun rekonstruksi. Pemilihan jenis penanganan jalan dilakukan berdasarkan parameter-parameter tertentu yang menggambarkan kondisi eksisting ruas jalan. Parameter ini berfungsi sebagai alat bantu teknis bagi pengelola infrastruktur dalam menentukan tindakan pemeliharaan yang paling sesuai.

Penentuan jenis program penanganan jalan mengacu pada Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor: 13/PRT/M/2011, Tentang Tata Cara Pemeliharaan dan Penilikan Jalan, yang ditampilkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Penentuan Jenis Penanganan Jalan (Kementerian Pekerjaan Umum, 2011)

Kondisi Jalan	Persentase Batasan Kerusakan	Program Penanganan
Baik (B)	< 6%	Pemeliharaan Rutin
Sedang (S)	6 - < 11 %	Pemeliharaan Berkala
Rusak Ringan (RR)	11 - < 15 %	Rehabilitasi
Rusak Berat (RB)	> 15%	Rekonstruksi

Pemeliharaan jalan yang dilakukan secara tepat waktu dan sesuai standar teknis akan memperpanjang umur rencana perkerasan. Hal ini terjadi karena pemeliharaan mampu memperlambat laju kerusakan dan menjaga kondisi jalan mendekati kondisi awal saat perkerasan dibangun. Sebaliknya, ketidakteraturan dalam pelaksanaan pemeliharaan akan menyebabkan percepatan degradasi kondisi jalan, yang pada akhirnya akan mengurangi umur layanan dari perkerasan secara signifikan (Departemen Pekerjaan Umum, 2005). Hubungan antara kondisi dan umur rencana perkerasan jalan (dengan pemeliharaan), ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Hubungan Kondisi dan Umur Rencana Perkerasan Jalan dengan Intervensi Pemeliharaan (DepartemenPekerjaan Umum, 2005)

2.4.3. Survei Pemeliharaan Jalan

Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 13/PRT/M/2011 tentang Tata Cara Pemeliharaan dan Penilaian Jalan, pelaksanaan survei pemeliharaan jalan memiliki peran penting dalam penyediaan data yang mendukung pengambilan keputusan teknis dan administratif terkait pengelolaan jalan. Survei ini

dilaksanakan untuk memperoleh data administratif dan kondisi fisik jalan, yang menjadi dasar dalam penyusunan program pemeliharaan.

Survei ini terbagi ke dalam dua jenis utama, yaitu:

1. Survei Inventarisasi Jalan

Survei ini bertujuan untuk mengumpulkan data statis mengenai karakteristik setiap ruas jalan. Informasi yang dihimpun mencakup fungsi dan status jalan, kondisi bangunan pelengkap serta perlengkapan jalan, volume lalu lintas, data geometrik jalan, jenis konstruksi perkerasan, serta kondisi lingkungan sekitar. Kegiatan ini dilaksanakan setidaknya satu kali setiap tahun dan berfungsi sebagai basis data inventaris yang mendukung proses pengelolaan jalan nasional maupun daerah.

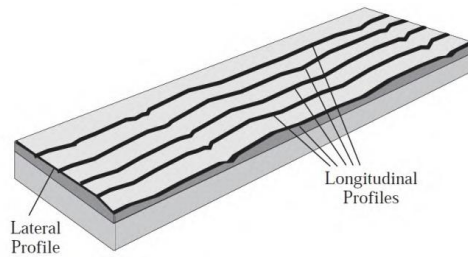
2. Survei Kondisi Jalan

Survei ini fokus pada aspek fisik dan operasional jalan, termasuk kondisi lajur lalu lintas, bahu jalan, bangunan pendukung, perlengkapan jalan, serta lahan dalam ruang milik jalan dan ruang manfaat jalan. Tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi tingkat kerusakan serta kebutuhan penanganan teknis terhadap jalan. Sesuai ketentuan, survei ini harus dilakukan paling sedikit dua kali dalam satu tahun agar kondisi jalan dapat terus dimonitor secara berkelanjutan.

2.4.4. *International Roughness Index (IRI)*

Kekasaran jalan merujuk pada variasi tinggi rendah permukaan jalan yang menimbulkan getaran pada kendaraan yang melewatinya. Konsep ini telah lama diakui sebagai salah satu indikator utama dalam menilai kinerja suatu jalan. Getaran yang dihasilkan akibat permukaan yang tidak rata tidak hanya berdampak pada kenyamanan pengemudi, tetapi juga mempengaruhi keausan komponen kendaraan serta aspek keselamatan berkendara. Selain itu, gaya dinamis yang timbul dari getaran tersebut memberikan kontribusi langsung terhadap percepatan kerusakan struktur jalan (Sayers, Gillespie, & Queiroz, 1986).

Kekasaran didapatkan dari profil memanjang jalan seperti yang terlihat dalam Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Potongan Profil Memanjang dan Melintang Jalan (Sumber : Sayers & Karamihas, 1998)

Gambar 2.5 menunjukkan potongan profil jalan secara memanjang dan melintang. Dari profil melintang tersebut, dapat diidentifikasi adanya superelevasi serta berbagai jenis kerusakan seperti kerusakan alur dan kerusakan lainnya. Sementara itu, profil memanjang jalan memungkinkan pengamatan terhadap grade rencana, tingkat kekasaran permukaan, dan tekstur jalan (Sayers & Karamihas, 1998).

Pada sekitar tahun 1987, *The International Road Roughness Experiment* yang didukung oleh Bank Dunia dimulai dengan melibatkan tim peneliti dari beberapa negara, yaitu Brasil, Inggris, Perancis, Amerika Serikat, dan Belgia. Eksperimen ini bertujuan untuk mengembangkan pedoman standar dalam pelaksanaan serta kalibrasi pengukuran kekasaran permukaan jalan. Dari kegiatan tersebut lahirlah standar internasional yang dikenal dengan nama *International Roughness Index* (IRI), yang dihasilkan melalui sistem pengukuran kekasaran jalan tipe respons, yaitu *Response-Type Road Roughness Measurement Systems* (RTRRMS) (Latif, 2009).

IRI dihitung berdasarkan respon dinamis kendaraan yang melaju di atas permukaan jalan, dengan menggunakan metode pengukuran yang disebut *Response-Type Road Roughness Measurement Systems* (RTRRMS). Indeks ini menggambarkan tingkat ketidakrataan permukaan jalan dalam satuan meter per kilometer (m/km) atau inch per mile, yang menggambarkan jumlah vertikal perpindahan suspensi kendaraan yang disebabkan oleh kondisi jalan.

Nilai IRI yang rendah menunjukkan permukaan jalan yang halus dan nyaman dilalui, sementara nilai yang tinggi menandakan permukaan jalan yang kasar dan berpotensi mengurangi kenyamanan berkendara serta mempercepat kerusakan kendaraan. Oleh karena itu, IRI tidak hanya digunakan sebagai parameter teknis untuk evaluasi kondisi jalan, tetapi juga sebagai indikator kunci dalam manajemen

pemeliharaan jalan dan perencanaan rehabilitasi. Nilai IRI sesuai dengan Kondisi perkerasan jalan yang umum di Indonesia ditunjukkan dalam tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kriteria Kondisi Jalan Berdasarkan Nilai IRI Pada Tipe Permukaan
(Kementerian Pekerjaan Umum, 2016)

Tipe Jalan	Status Kondisi	Rentang IRI
Aspal Umum	Baik	≤ 4
Aspal Umum	Sedang	$> 4 - \leq 8$
Aspal Umum	Rusak Ringan	$> 8 - \leq 12$
Aspal Umum	Rusak Berat	> 12
Jalan Penmac	Baik	≤ 8
Jalan Penmac	Sedang	$8 \leq \text{IRI} \leq 10$
Jalan Penmac	Rusak Ringan	$10 \leq \text{IRI} \leq 12$
Jalan Penmac	Rusak Berat	> 12
Jalan Tanah/Gravel	Baik	≤ 10
Jalan Tanah/Gravel	Sedang	$10 \leq \text{IRI} \leq 15$
Jalan Tanah/Gravel	Rusak Ringan	$15 \leq \text{IRI} \leq 20$
Jalan Tanah/Gravel	Rusak Berat	> 20

Penggunaan IRI telah menjadi standar global dalam pengukuran kekasaran jalan karena kemampuannya memberikan hasil yang konsisten, objektif, dan mudah diinterpretasikan untuk berbagai jenis jalan dan kendaraan.

2.5. Sistem Manajemen Perkerasan

Menurut Departemen Pekerjaan Umum (2005), Sistem Manajemen Perkerasan (SMP) merupakan suatu pendekatan sistematis yang dirancang untuk mendukung proses pengambilan keputusan dalam pengelolaan infrastruktur jalan. Sistem ini bertujuan agar kegiatan penyelenggaraan dan pemeliharaan jalan dapat dilakukan secara lebih efektif dan efisien. SMP berfungsi sebagai alat bantu dalam pengelolaan aset jalan secara menyeluruh, yang dilaksanakan secara bertahap sesuai dengan rencana pemeliharaan jaringan jalan.

Keberhasilan dalam merencanakan kegiatan pemeliharaan atau menetapkan prioritas intervensi dalam SMP sangat bergantung pada keakuratan dalam memprediksi kinerja perkerasan di masa depan serta data kondisi aktual jalan

saat ini (Li, 2005). Apabila model penurunan kinerja perkerasan yang digunakan tidak secara memadai merepresentasikan proses degradasi aktual, maka kebijakan pemeliharaan yang dirumuskan akan cenderung tidak optimal (Durango & Madanat, 2002). Oleh karena itu, pemantauan kinerja perkerasan dan pengembangan model prediktif yang akurat merupakan elemen kunci dalam keberhasilan implementasi SMP.

Tjan dan Pitaloka (2005) menekankan bahwa akurasi dalam memproyeksikan kondisi perkerasan jalan merupakan aspek krusial dalam sistem ini. Salah satu pendekatan yang dianggap andal untuk tujuan tersebut adalah teknik Markovian, yaitu teknik probabilistik yang dinilai tepat dalam memodelkan perilaku penurunan kondisi perkerasan. Selain itu, menurut Haas et al. (dalam Arimbi, 2015), rantai Markov menjadi metode yang sangat efektif untuk membangun model kinerja, karena memprediksi kondisi masa depan hanya berdasarkan status kondisi terkini dari perkerasan.

2.5.1. Model Markov

Penurunan kondisi perkerasan dipengaruhi oleh beberapa faktor yang diantaranya sulit untuk diamati. Beban lalu lintas dan perubahan kondisi lingkungan setiap saat sulit untuk diprediksi. Hal ini membuat kinerja atau penurunan kondisi perkerasan sangat bervariasi menunjukkan karakteristik yang tidak pasti atau acak. Lebih lanjut, ketidakpastian dapat terjadi dari proses inspeksi dan pengukuran dan ketidakmampuan untuk mengukur faktor-faktor penyebab proses penurunan kondisi jalan, dan memodelkan proses penurunan kondisi sebenarnya dari material. (Anonim)

Model probabilitas mencoba menyelesaikan karakteristik stokastik dari penurunan kondisi jalan. Kebanyakan model probabilitas yang diajukan adalah berdasarkan model proses Markov. Rantai Markov adalah jenis khusus dari proses stokastik waktu diskrit dimana suatu sistem (misal kondisi perkerasan) X_{t+1} saat $t+1$ tergantung pada kondisi system X_t saat t tapi tidak tergantung pada bagaimana kondisi system X_{t+1} diperoleh. (Anonim)

Rumus matematikanya dapat dilihat sebagai berikut (Anonim) :

$$P(X_{t+1} = j | X_t = i) \quad (2.1)$$

Dimana, P adalah probabilitas kondisi saat t+1 yaitu j ditentukan oleh kondisi saat t yaitu i, dengan asumsi probabilitas independen waktu. (Anonim)

Menurut Panthi (2009) dalam metode *Markov Chain*, *state* kondisi perkerasan saat t, PCS (t), dari perkerasan saat umur berapapun, t, dapat diperhitungkan dari vektor kondisi awal PCS (0) seperti berikut :

$$PCS (1) = P_1 \times PCS (0) \quad (2.2)$$

$$PCS (2) = P_2 \times PCS (1) = P_2 \times P_1 \times PCS (0) \quad (2.3)$$

$$PCS (t) = P_t \times PCS (t-1) = P_t \times P_{t-1} \dots P_1 \times PCS (0) \quad (2.4)$$

Dimana, P_t adalah *transition probability matrix* saat t dan PCS (t) adalah *vector* kondisi saat t. PCS mengacu kepada kondisi perkerasan, seperti *service ability index*, *pavement condition index*, dan lain-lain.

Salah satu tantangan dalam menghadapi model probabilitas yaitu kesulitan dalam membuat *Transition Probabilities Matrices* (TPM). TPM adalah matriks $s \times s$ dimana s adalah angka yang menunjukkan kondisi dalam suatu system. Matriks tersebut mengandung probabilitas perubahan dari kondisi i ke kondisi j, misal probabilitas sesuatu berada dalam kondisi awal kemudian berubah menjadi kondisi lain dalam interval waktu yang tetap. TPM dapat dibuat menggunakan data historis atau opini subyektif dari insinyur berpengalaman melalui wawancara langsung dan kuesioner, yang memakan waktu dan biaya yang banyak. (Anonim)

Transitional Probabilities di dalam pemodelan *Markov* dapat diperkirakan menggunakan bermacam-macam metode, antara lain *Weibul Distribution* menurut Kleiner (dalam Ens, 2012), optimasi non linear untuk mencocokkan model regresi eksponensial terhadap data historis menurut Wirahadikusumah, dkk (dalam Ens, 2012), *Bayesian Inference* dengan kombinasi algoritma *Metropolis-Hastings* menurut Micevski, dkk (dalam Ens, 2012), model *Ordered Probit* menurut Baik, dkk (dalam Ens, 2012) dan juga model *Gompit*, lanjutan dari model *Probit* menurut Le Gat (dalam Ens, 2012). Opini para ahli juga dapat digunakan untuk memperkirakan nilai-nilai dari parameter yang dibutuhkan untuk membuat model jika data historis tidak mencukupi menurut Kleiner (dalam Ens, 2012).

2.5.2. Model Rantai Markov

Teori Rantai Markov pertama kali diperkenalkan oleh Profesor Andrei A. Markov pada tahun 1906, yang merupakan seorang matematikawan terkemuka asal

Rusia. Rantai Markov merupakan suatu pendekatan matematis yang digunakan untuk memodelkan berbagai sistem dinamis dan proses yang berkembang seiring waktu. Model ini didasarkan pada prinsip bahwa probabilitas suatu keadaan di masa mendatang hanya bergantung pada keadaan saat ini, tanpa memperhitungkan jejak keadaan sebelumnya. Karakteristik ini dikenal sebagai sifat Markovian atau memori nol (*memoryless*).

Prediksi kondisi sistem di masa mendatang menggunakan Rantai Markov merupakan suatu proses stokastik yang dibangun berdasarkan tiga batasan utama sebagaimana dijelaskan oleh Ortiz-García et al. (2006). Ketiga batasan tersebut meliputi:

1. Batasan pertama adalah prosesnya diskrit terhadap waktu.
2. Proses harus memiliki kondisi yang dapat dihitung atau terhingga.
3. Proses tersebut harus memenuhi *property* Markov.

Dalam konteks prediksi kinerja perkerasan jalan menggunakan model stokastik, suatu sistem dikatakan memenuhi properti Markov apabila kondisi perkerasan pada periode waktu mendatang hanya bergantung pada kondisi perkerasan saat ini, tanpa mempertimbangkan kondisi pada periode sebelumnya. Dengan kata lain, proses transisi antar kondisi bersifat memori nol (*memoryless*). Berdasarkan pendekatan ini, kondisi perkerasan di masa depan dapat diprediksi melalui model matematis sebagaimana dijelaskan oleh Ortiz-García et al. (2006) dan Panthi (2009), yang dirumuskan dalam Persamaan 2.5

$$a_t = a_{t-1} \times P = a_0 \times P^t \quad (2.5)$$

Keterangan :

a_t : distribusi kondisi pada waktu t

a_0 : distribusi kondisi pada waktu ke-0, yang merupakan vektor awal (a_{t-1})

P^t : MPT yang ditingkatkan dengan control waktu t

t : waktu yang berlalu dalam satuan tahun

Dengan memanfaatkan vektor distribusi kondisi awal dan matriks probabilitas transisi Markov, kondisi perkerasan jalan di masa mendatang dapat diprediksi untuk setiap waktu (t) yang diinginkan. Pendekatan ini memungkinkan estimasi probabilistik terhadap perkembangan kondisi perkerasan seiring waktu (Panthi 2009).

2.5.3. Matrix Probabilitas Transisi (MPT)

Matriks Probabilitas Transisi (MPT), sering disebut sebagai *Transition Probability Matrix* (TPM) dalam model Markov merepresentasikan kemungkinan bahwa sekelompok segmen perkerasan, yang memiliki karakteristik umur dan tingkat lalu lintas yang serupa, akan mengalami transisi dari satu kondisi kerusakan ke kondisi kerusakan lainnya dalam suatu periode waktu tertentu (Lytton, 1987). MPT merupakan komponen penting dalam proses Markov yang berfungsi untuk menggambarkan bagaimana kondisi awal perkerasan berubah seiring waktu. Selain itu, MPT juga berperan dalam memodelkan dinamika perubahan status kondisi perkerasan menuju kondisi yang berbeda di masa mendatang, berdasarkan probabilitas transisi antar kondisi.

Pemodelan perubahan kondisi perkerasan seiring waktu dalam penyusunan Matriks Probabilitas Transisi (MPT) dilambangkan dengan simbol P . Matriks ini mencerminkan probabilitas transisi dari suatu kondisi perkerasan ke kondisi lainnya dalam satu periode waktu. Bentuk umum dari matriks P ditunjukkan pada Persamaan 2.6 sebagaimana dijelaskan oleh Ortiz-García et al. (2006) dan Pérez-Acebo et al. (2017).

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Matriks Probabilitas Transisi (MPT) memuat seluruh informasi yang diperlukan untuk memodelkan perubahan kondisi segmen perkerasan dari waktu ke waktu. Perilaku sistem yang mengikuti proses Markovian dimodelkan melalui nilai probabilitas transisi P_{ij} , yang menyatakan kemungkinan suatu bagian dari segmen jalan berpindah dari kondisi i ke kondisi j dalam satu siklus waktu. Agar MPT dapat digunakan secara valid dalam model Markov, matriks tersebut harus memenuhi dua ketentuan utama (Ortiz-García et al., 2006), yaitu:

1. Jumlah seluruh elemen dalam setiap baris harus sama dengan 1, yang mencerminkan total probabilitas transisi dari suatu kondisi ke semua kemungkinan kondisi lainnya.
2. Setiap elemen dalam matriks harus bernilai non-negatif ($P_{ij} \geq 0$), karena nilai probabilitas tidak dapat bernilai negatif.

Sebuah model Markov dengan matriks transisi berukuran 5×5 menggunakan lima kondisi yang merepresentasikan tingkat kerusakan perkerasan. Matriks ini mencakup gabungan probabilitas penurunan (deteriorasi) maupun peningkatan (perbaikan) kondisi perkerasan jalan. Bentuk umum dari matriks tersebut ditampilkan pada Persamaan 2.7, sebagaimana dikemukakan oleh Abaza et al. (2004).

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & & & \\ f_{21} & P_{22} & P_{23} & & \\ f_{31} & f_{32} & P_{33} & P_{34} & \\ f_{41} & & f_{43} & P_{44} & P_{45} \\ f_{51} & & & f_{54} & P_{55} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Keterangan :

$P_{i,i}$: probabilitas sisa dalam *state* kondisi yang sama setelah berlalu satu transisi

$P_{i,j}$: probabilitas penurunan kondisi dari i ke j setelah satu siklus transisi,
 $j = i + 1$

$f_{i,j}$: probabilitas akibat tindakan M&R, $j < i$

Entri-entri di atas diagonal utama dari matriks transisi ($P_{i,j}$ dengan $j > i$) merepresentasikan probabilitas transisi perkerasan ke kondisi yang lebih buruk dalam satu siklus transisi. Probabilitas ini menggambarkan kemungkinan terjadinya deteriorasi pada segmen perkerasan jalan, sehingga dikenal sebagai probabilitas transisi kerusakan (Abaza, 2016).

Namun demikian, apabila tindakan penanganan dan pemeliharaan terhadap kerusakan perkerasan dilakukan secara berkelanjutan dan tepat waktu, maka kondisi jalan tidak akan mengalami penurunan lebih lanjut. Dengan kata lain, pelaksanaan program perbaikan dan perawatan secara efektif dapat mengurangi atau bahkan mencegah peralihan ke kondisi yang lebih buruk.

Entri-entri di bawah diagonal utama dalam matriks transisi (F_{ij} , dengan $j < i$) mencerminkan probabilitas peningkatan kondisi perkerasan sebagai hasil dari pelaksanaan kegiatan pemeliharaan dan rehabilitasi (*Maintenance & Rehabilitation / M&R*). Probabilitas ini dikenal sebagai probabilitas transisi peningkatan, yang menunjukkan kemungkinan transisi perkerasan dari kondisi yang lebih buruk ke kondisi yang lebih baik dalam satu siklus waktu (Abaza, 2016).

Variabel F_{ij} merepresentasikan probabilitas bahwa suatu segmen perkerasan akan meningkat dari kondisi i ke kondisi j sebagai akibat dari intervensi M&R yang

sedang diterapkan. Menurut Abaza dan Ashur (1999), kegiatan pemeliharaan rutin umumnya diterapkan pada kondisi 2 hingga 5, yang menghasilkan satu langkah peningkatan kondisi, yaitu F_{21} , F_{32} , F_{43} , dan F_{54} . Tidak ada tindakan pemeliharaan yang diterapkan untuk kondisi 1, yang diasumsikan sebagai kondisi perkerasan terbaik atau baru.

Pemeliharaan dalam konteks ini mencakup pekerjaan rutin seperti pengisian retakan, penambalan lubang, serta teknik pemeliharaan permukaan lainnya seperti *chip seal* dan *slurry seal*.

Sementara itu, rehabilitasi didefinisikan sebagai tindakan perbaikan struktural mayor yang diterapkan pada kondisi 3, 4, dan 5. Tindakan ini meliputi pelapisan ulang (*overlay*), rekonstruksi parsial, maupun rekonstruksi penuh, yang memungkinkan beberapa langkah peningkatan kondisi, seperti pada F_{31} , F_{41} , dan F_{51} , yaitu transisi langsung ke kondisi 1 sebagai representasi kondisi terbaik.

Penting untuk dicatat bahwa nilai-nilai F_{ij} dalam matriks akan menjadi nol apabila tidak ada program pemeliharaan dan rehabilitasi yang diterapkan (Abaza et al. 2004). Hal ini menekankan pentingnya perencanaan dan pelaksanaan M&R dalam menjaga dan meningkatkan kondisi perkerasan jalan secara berkelanjutan.

2.5.4. Vektor Kondisi Awal

Setiap proses dalam model Markov memerlukan kondisi awal yang direpresentasikan dalam bentuk vektor awal. Vektor ini menunjukkan distribusi probabilitas segmen perkerasan terhadap berbagai *state* atau kondisi pada saat awal pengamatan. Vektor awal tersebut mencerminkan proporsi atau kemungkinan segmen perkerasan berada dalam setiap level kondisi tertentu sebelum proses transisi berlangsung. Representasi matematis dari vektor awal ini ditampilkan pada Persamaan 2.8 (Ortiz-García et al., 2006).

$$a_0 = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (2.8)$$

Keterangan :

α_i : nilai kondisi *state* i pada tahun dasar ($t = 0$)

Dalam konteks analogi perubahan kondisi perkerasan, vektor awal menggambarkan kondisi awal segmen perkerasan yang dinyatakan sebagai proporsi dari masing-masing rentang kondisi pada waktu awal pengamatan. Vektor ini berperan penting dalam memulai proses prediksi berbasis model Markov, karena

menjadi dasar perhitungan distribusi kondisi pada waktu-waktu selanjutnya. Sama seperti probabilitas transisi pada Matriks Probabilitas Transisi (MPT), vektor awal juga harus memenuhi dua syarat utama agar dapat digunakan secara sah dalam pemodelan stokastik (Ortiz-García et al., 2006), yaitu:

1. Jumlah dari keseluruhan α_i harus sama dengan 1.
2. Semua nilai masukan tidak boleh negatif

2.5.5. Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) merupakan salah satu ukuran akurasi yang paling umum digunakan dalam evaluasi kinerja model prediksi. MEPA didefinisikan sebagai nilai rata-rata dari selisih absolut antara nilai aktual dan nilai hasil prediksi yang dinyatakan dalam bentuk persentase terhadap nilai aktual. Secara matematis, MAPE dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right| \times 100\% \quad (2.8)$$

di mana:

n adalah ukuran sampel

A_i adalah nilai data aktual

F_i adalah nilai data prediksi

Untuk mengklasifikasikan hasil MAPE, nilai MAPE diinterpretasikan ke dalam kategori tingkat akurasi prediksi. Tidak ada standar tunggal yang universal, tetapi salah satu klasifikasi yang umum digunakan (Lewis, 1982) dalam tabel 2.3

Tabel 2.3 klasifikasi tingkat akurasi MAPE (Lewis, 1982)

Nilai MAPE	Kategori Akurasi	Interpretasi
< 10%	Sangat Akurat	Prediksi sangat baik
10% – 20%	Akurat Baik	Prediksi dapat diandalkan
20% – 50%	Akurasi Wajar	Masih bisa diterima, tapi perlu ditingkatkan
> 50%	Tidak Akurat	Prediksi kurang dapat digunakan

2.6. Penelitian Terdahulu

Penerapan model Markov dalam pengelolaan perkerasan jalan di Indonesia telah menunjukkan potensi signifikan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas program pemeliharaan. Berikut ini adalah penelitian terdahulu yang dilakukan :

2.6.1. Aplikasi Model Rantai Markov Dalam Pengelolaan Jalan di Kabupaten Bangka Barat oleh Ahmad Sazali, dkk(2019)

Penelitian di Kabupaten Bangka Barat berfokus pada prediksi kondisi perkerasan jalan di masa mendatang untuk mengoptimalkan pengelolaan jaringan jalan. Model Rantai Markov diterapkan dengan mengalikan Matriks Probabilitas Transisi (MPT) dengan vektor kondisi awal. MPT dikembangkan menggunakan data historis kondisi perkerasan dan penanganan jalan dari tahun 2016-2017.1 Kondisi perkerasan dikategorikan, dengan penekanan pada kondisi "Baik (B)" dan "Rusak Berat (RB)".

Hasil simulasi untuk periode 2018-2022 menunjukkan peningkatan substansial pada kondisi "Baik," dari 62.9% pada tahun 2017 menjadi 96.8% pada akhir tahun 2022. Sebaliknya, nilai kondisi "Rusak Berat" menurun drastis hingga 0.2%. Hasil ini mengindikasikan bahwa program pengelolaan jalan kabupaten dalam simulasi ini cukup optimal, dengan asumsi bahwa tindakan penanganan untuk seluruh jaringan jalan dilakukan setiap tahun tanpa penundaan. Model ini juga memprediksi pergeseran yang menguntungkan dari pekerjaan pemeliharaan berat (rekonstruksi) ke pekerjaan yang lebih ringan (pemeliharaan rutin) seiring dengan membaiknya kondisi jaringan secara keseluruhan.

Keberhasilan yang dilaporkan dari model ini sangat bergantung pada asumsi "penanganan tahunan yang konsisten tanpa penundaan." Asumsi ini adalah kualifikasi penting yang menunjukkan bahwa model ini menunjukkan apa yang dapat dicapai dalam kondisi intervensi yang ideal. Namun, dampak di dunia nyata secara fundamental bergantung pada kelayakan praktis untuk menerapkan program pemeliharaan yang ketat dan tepat waktu tersebut, yang seringkali dibatasi oleh anggaran dan sumber daya. Ini secara implisit menimbulkan pertanyaan tentang tantangan praktis alokasi anggaran, ketersediaan sumber daya, dan kendala logistik yang mungkin menghalangi implementasi ideal tersebut dalam kenyataan, sehingga memengaruhi kinerja perkerasan yang sebenarnya diamati.

2.6.2. Pemodelan Kerusakan Perkerasan Jalan Pada Ruas Jalan Piru-Kairatu, Provinsi Maluku oleh Billy Christ Mual,dkk (2023)

Ruas jalan Piru-Kairatu di Provinsi Maluku sering mengalami kerusakan, dengan data historis dari 2019-2021 menunjukkan peningkatan kondisi kerusakan yang konsisten. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi model kerusakan perkerasan yang kuat dan rencana pemeliharaan yang optimal untuk segmen jalan tersebut.

Metode Rantai Markov diterapkan, dengan probabilitas transisi ditentukan dari perubahan kondisi yang diamati antara tahun 2020 dan 2021. Studi ini menggunakan data sekunder dari tahun 2020-2021, dengan *International Roughness Index* (IRI) sebagai variabel utama untuk menilai kondisi perkerasan. Prediksi kerusakan di masa depan diperoleh dengan mengalikan Matriks Probabilitas Transisi (MPT) dengan vektor kondisi awal. Degradasi perkerasan dimodelkan menggunakan garis tren Polinomial dan Eksponensial.

Hasil prediksi menunjukkan peningkatan konsisten dalam nilai kerusakan rata-rata selama periode lima tahun (dari 1.698 menjadi 3.771). Model regresi Eksponensial ($y = 1.9394e^{(0.1535x)}$ dengan $R^2=0.897$) ditemukan paling sesuai untuk kurva degradasi, menunjukkan bahwa tingkat kerusakan perkerasan meningkat secara eksponensial seiring waktu. Skenario Pertama, yang melibatkan pemeliharaan rutin untuk setiap kondisi kerusakan setiap tahun, diidentifikasi sebagai strategi yang paling optimal dari segi biaya, dengan total biaya pemeliharaan sebesar Rp14.168.883.014 selama lima tahun.

Penemuan bahwa garis tren eksponensial paling baik menggambarkan degradasi perkerasan di Piru-Kairatu sangat signifikan. Ini menyiratkan bahwa kerusakan tidak bersifat linear tetapi dipercepat, yang berarti penundaan dalam pemeliharaan dapat menyebabkan biaya yang jauh lebih tinggi dan penurunan keseluruhan yang lebih cepat. Hal ini menggarisbawahi nilai ekonomi krusial dari intervensi yang tepat waktu dan proaktif. Jika model degradasi linear akan menunjukkan tingkat kerusakan yang konstan, model eksponensial menunjukkan bahwa seiring memburuknya kondisi perkerasan, laju kerusakan itu sendiri meningkat. Ini adalah pemahaman penting untuk manajemen aset: penundaan kecil dalam mengatasi kerusakan minor dapat dengan cepat meningkat menjadi

kerusakan parah yang membutuhkan intervensi yang jauh lebih mahal. Temuan ini memberikan argumen kuantitatif yang kuat untuk memprioritaskan pemeliharaan dini dan konsisten, karena menunda perbaikan akan menyebabkan biaya di masa depan yang secara eksponensial lebih tinggi.

2.6.3. *Pavement Performance Prediction of Semarang – Solo Toll Road, Indonesia, using Markov Chain Model* oleh Istikomah, dkk (2024)

Studi ini menganalisis penerapan model Rantai Markov untuk memprediksi kinerja perkerasan pada lima ruas Jalan Tol Semarang – Solo selama lima tahun. Model ini menggunakan data historis dari tahun 2020 – 2022 untuk menyusun Matriks Probabilitas Transisi (TPM), dengan tahun 2022 sebagai tahun dasar. Kondisi perkerasan dikategorikan menjadi empat status diskrit berdasarkan rentang IRI spesifik. Dua skenario simulasi dianalisis: "tanpa program penanganan" (mencerminkan degradasi alami atau hanya pemeliharaan rutin) dan "dengan program penanganan" (menggabungkan upaya rehabilitasi).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa data historis yang digunakan untuk menyusun TPM sangat memengaruhi hasil simulasi pada kedua skenario. "Jalur dalam" (*inner lane*) untuk semua segmen arah Semarang – Solo diidentifikasi sebagai yang paling krusial, menunjukkan tingkat penurunan yang relatif tinggi dan memerlukan waktu siklus pemeliharaan yang lebih pendek. Simulasi menunjukkan penurunan yang jelas dalam kondisi baik (Status 1 dan 2) pada skenario "tanpa penanganan," sementara skenario "dengan penanganan" menunjukkan peningkatan signifikan dalam kondisi ini. Model ini juga memprediksi waktu siklus pemeliharaan yang bervariasi; misalnya, segmen Bawen – Salatiga membutuhkan program penanganan berikutnya dalam dua tahun, sedangkan Salatiga – Boyolali membutuhkan tiga tahun. Jalan yang dimulai dalam kondisi awal yang lebih baik umumnya mempertahankan stabilitas lebih lama. Selain itu, volume lalu lintas tahunan yang tinggi (terutama truk) dan kemiringan longitudinal yang curam diidentifikasi sebagai faktor yang berkontribusi terhadap stabilitas perkerasan yang lebih rendah.

Kemampuan model Rantai Markov untuk mengidentifikasi segmen "krusial" tertentu seperti "jalur dalam" dan memprediksi waktu siklus pemeliharaan spesifik segmen menunjukkan kemampuan canggihnya untuk prioritas yang granular dan

spesifik lokasi dalam jaringan jalan yang besar. Hal ini melampaui rekomendasi tingkat jaringan umum untuk memberikan wawasan yang dapat ditindaklanjuti dan tepat untuk alokasi sumber daya yang ditargetkan. Tingkat detail ini sangat berharga untuk mengoptimalkan anggaran pemeliharaan, memastikan bahwa intervensi diterapkan secara tepat di mana dan kapan akan memberikan manfaat terbesar, sehingga memaksimalkan efisiensi dan efektivitas manajemen aset jalan.

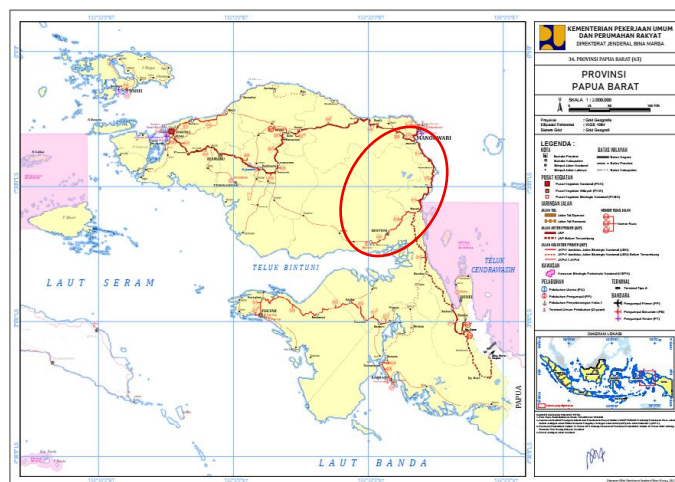
BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada Ruas Jalan Trans Papua segmen Manokwari – Bintuni yang merupakan bagian dari jaringan jalan nasional di Provinsi Papua Barat. Segmen ini terdiri atas enam (6) ruas jalan nasional di bawah kewenangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Kementerian PUPR, 2022). Rincian ruas jalan disajikan dalam Tabel 3.1, sedangkan lokasi penelitian ditampilkan pada Gambar 3.1.

Tabel 3.1 Daftar Ruas Jalan Trans Papua Segmen Manokwari – Bintuni

No	Nama Ruas	Status Jalan	Fungsi Jalan	Panjang (Km)
1	Jln. Drs. Esau Sesa (Manokwari)	Nasional	Arteri Primer	3,91
2	Maruni - Bts. Kota Manokwari	Nasional	Arteri Primer	17,52
3	Maruni - Oransbari	Nasional	Arteri Primer	53,316
4	Oransbari - Ransiki	Nasional	Arteri Primer	40,29
5	Ransiki - Mameh	Nasional	Arteri Primer	63,43
6	Mameh - Bintuni	Nasional	Arteri Primer	59,445
Total Panjang				237,911



Gambar 3.1 Peta Lokasi Ruas Jalan Nasional Segmen Manokwari – Bintuni
(Kementerian PUPR, 2022)

3.2. Data dan Sumber Data

Pengumpulan data merupakan tahap krusial dalam pembangunan model prediksi kondisi perkerasan jalan menggunakan Rantai Markov, karena kualitas dan kelengkapannya sangat memengaruhi akurasi serta keandalan model yang dihasilkan. Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari Bidang Keterpaduan Pembangunan Infrastruktur Jalan, Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Papua Barat – Papua Barat Daya. Data tersebut berupa data historis kondisi perkerasan jalan—khususnya nilai International Roughness Index (IRI)—yang berperan sebagai variabel utama dalam proses pemodelan.

3.3. Tahapan Pemodelan Rantai Markov

Secara garis besar, proses pemodelan Rantai Markov dalam prediksi kondisi perkerasan jalan melibatkan empat langkah utama seperti di ditunjukkan pada gambar 3.2:



Gambar 3.2 Bagan Alir Pemodelan Rantai Markov

3.3.1. Penentuan Kriteria State Kondisi Perkerasan

Tahap awal analisis dilakukan dengan mengklasifikasikan kondisi perkerasan jalan ke dalam sejumlah keadaan diskrit (*discrete states*). Kondisi perkerasan dibagi menjadi empat kategori utama, yaitu: Baik (B), Sedang (S), Rusak Ringan (RR), dan Rusak Berat (RB). Pembagian ini bertujuan untuk mendiferensiasi setiap tingkat layanan jalan secara spesifik berdasarkan parameter fisik yang terukur.

Pengelompokan tersebut didasarkan pada ambang batas nilai International Roughness Index (IRI) dengan ketentuan sebagai berikut:

- Baik : $IRI \leq 4$ m/km
- Sedang : $4 < IRI \leq 8$ m/km
- Rusak Ringan : $8 < IRI \leq 12$ m/km
- Rusak Berat : $IRI > 12$ m/km

Penetapan kriteria ini sepenuhnya merujuk pada standar yang tercantum dalam Tabel 2.2 mengenai Kriteria Kondisi Jalan Berdasarkan Nilai IRI.

3.3.2. Perhitungan Vektor Kondisi Awal

Setelah kriteria *state* kondisi ditetapkan, langkah selanjutnya adalah menghitung vektor kondisi awal (α_0). Vektor ini merepresentasikan proporsi atau persentase panjang segmen jalan yang berada dalam setiap *state* kondisi pada tahun dasar (tahun awal analisis). Vektor kondisi awal ditentukan dari total panjang jalan yang ditinjau adalah L , dan panjang jalan dalam *state* i pada tahun dasar adalah L_i , maka elemen $\alpha_0(i)$ dari vektor kondisi awal dihitung sebagai L_i / L .

3.3.3. Penyusunan Matrik Probabilitas Transisi (MPT)

Metode yang digunakan untuk mengestimasi nilai dalam Matriks Probabilitas Transisi (MPT) dilakukan dengan menghitung frekuensi transisi antar-kondisi (*state*) berdasarkan data historis yang tersedia. Jika N_{ij} merepresentasikan jumlah segmen jalan yang berpindah dari *state* i ke *state* j dalam kurun waktu satu tahun, dan N_i merupakan total keseluruhan segmen yang berada pada *state* i di awal siklus analisis, maka probabilitas transisi P_{ij} dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (3.1)$$

Berdasarkan prinsip probabilitas, jumlah seluruh peluang transisi pada setiap baris matriks harus memenuhi syarat $\sum P_{ij} = 1$. Hal ini menunjukkan bahwa setiap segmen jalan pada akhir siklus pasti akan terdistribusi ke dalam salah satu kategori kondisi yang telah ditetapkan.

3.3.4. Model Prediksi Kondisi Perkerasan

Setelah Matriks Probabilitas Transisi (MPT) berhasil disusun, model Rantai Markov dapat diimplementasikan untuk memproyeksikan distribusi kondisi perkerasan jalan pada periode mendatang. Proses prediksi ini dilakukan dengan mengalikan vektor kondisi awal terhadap MPT secara iteratif untuk setiap siklus tahunan. Melalui pendekatan rekursif ini, hasil keluaran (output) pada tahun berjalan akan menjadi masukan (input) untuk memprediksi kondisi pada tahun berikutnya, sehingga diperoleh tren performa jalan sepanjang rentang waktu analisis.

Untuk memprediksi distribusi kondisi perkerasan pada tahun ke- t_5 (α_t), dilakukan perkalian antara vektor kondisi awal (α_0) dengan Matriks Probabilitas Transisi (P) sebanyak t kali.

$$\alpha_t = \alpha_0 \times P \quad (3.2)$$

Keterangan :

α_t : Vektor distribusi kondisi pada tahun ke-n

α_0 : Vektor distribusi kondisi awal (tahun dasar)

P : Matriks Probabilitas Transisi

Secara iteratif, persamaan ini dapat dijabarkan menjadi:

$$\alpha_1 = \alpha_0 \times P \quad (3.3)$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 \times P \quad (3.4)$$

$$\alpha_t = \alpha_{t-1} \times P \quad (3.5)$$

3.4. Validasi Model

Validasi model merupakan langkah krusial untuk memastikan akurasi dan keandalan model prediksi yang dikembangkan. Akurasi model akan divalidasi dengan membandingkan hasil prediksi dengan data kondisi aktual yang tersedia untuk periode yang sama.

Metode yang umum digunakan untuk mengukur akurasi ini adalah *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Nilai MAPE yang rendah mengindikasikan akurasi model yang baik.

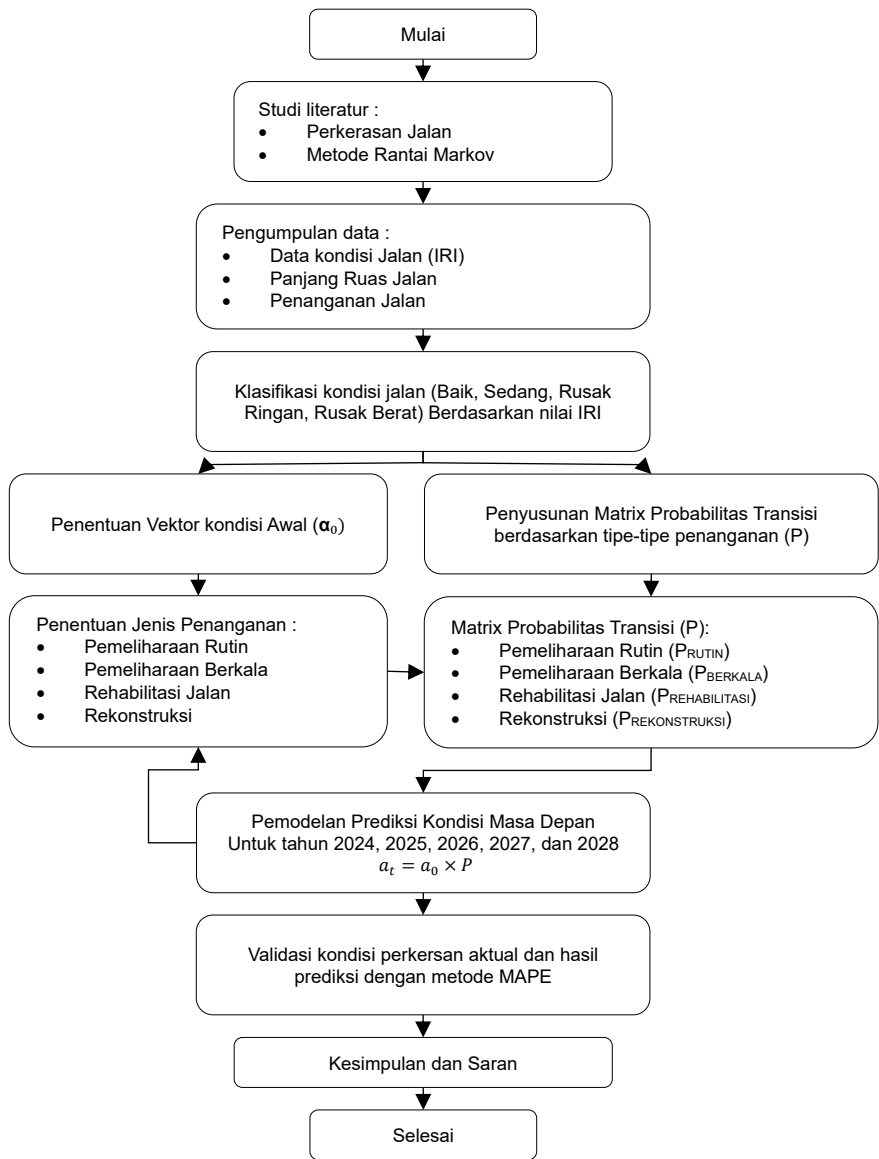
3.5. Alat Analisis dan Software

Menganalisis model prediksi perkerasan jalan dengan metode Markov melibatkan beberapa tahap, mulai dari pengumpulan data hingga interpretasi hasil. Dalam penelitian ini model rantai Markov ditentukan dengan 4 keadaan (*states*), Microsoft Excel masih sangat cukup dan merupakan pilihan yang baik. Skala ini masih tergolong kecil dan mudah dikelola di dalam *spreadsheet*.

3.6. Bagan Alir Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk membangun landasan teoritis yang komprehensif mengenai karakteristik perkerasan jalan serta prinsip pemodelan stokastik menggunakan metode Rantai Markov. Tahap selanjutnya adalah pengumpulan data sekunder pada ruas Jalan Nasional Manokwari–Bintuni, yang mencakup data kondisi jalan periode 2022 dan 2023, panjang ruas, serta rekam jejak penanganan yang telah diimplementasikan. Data tersebut kemudian

diklasifikasikan ke dalam empat kategori kondisi, yaitu Baik, Sedang, Rusak Ringan, dan Rusak Berat, yang didefinisikan sebagai *state* dalam model Rantai Markov.



Gambar 3.3 Bagan Alir Penelitian

Berdasarkan hasil klasifikasi tersebut, disusun vektor kondisi awal (α_0) yang merepresentasikan proporsi panjang jalan pada setiap kategori kondisi pada awal periode analisis. Tahapan krusial berikutnya adalah penyusunan Matriks Probabilitas Transisi (P) yang diturunkan dari dinamika perubahan kondisi jalan antarperiode

berdasarkan data historis penanganan (Pemeliharaan Rutin, Pemeliharaan Berkala, Rehabilitasi Jalan dan Rekonstruksi). Mengacu pada teori Rantai Markov, prediksi kondisi perkerasan jalan untuk periode mendatang dilakukan menggunakan hubungan matematis $a_t = a_0 \times P$, yang menggambarkan proyeksi distribusi probabilistik kondisi jalan pada tahun ke- t .

Hasil prediksi tersebut kemudian divalidasi dengan membandingkan distribusi kondisi hasil model terhadap data aktual melalui perhitungan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) guna mengukur tingkat akurasi dan keandalan model. Berdasarkan hasil analisis dan validasi tersebut, ditarik kesimpulan serta rekomendasi strategis sebagai dasar pertimbangan dalam perencanaan penanganan dan pengelolaan Jalan Nasional Manokwari–Bintuni secara berkelanjutan. Alur penelitian ini disajikan secara sistematis dalam bagan alir pada Gambar 3.3.