



PERENCANAAN DAN OPERASI TRANSPORTASI JALAN RAYA

Muhammad Arsyil Datau, S.T., M.T.
Zainun Datau, S.T., M.T.
Ir. Andi Butsainah Tumaadir, S.T., M.T.
Ir. Sri Mulyani Muchtar, S.T., M.T.
Ir. Abd Basit Amir, S.T., M.T.
Iwan Cahyono, S.T., M.T.
Ir. Hervian Handika Sugasta, S.T., M.T.
Nur Alaina Darwis, S.T., M.T.
Faradhiya Jinan Bastini, S.T., M.T.
Ihwan Sabir, S.P.W.K., M.P.W.K.

Perencanaan dan Operasi Transportasi Jalan Raya

Muhammad Arsyil Datau, S.T., M.T.

Zainun Datau, S.T., M.T.

Ir. Andi Butsainah Tumaadir, S.T., M.T.

Ir. Sri Mulyani Muchtar, S.T., M.T.

Ir. Abd Basit Amir, S.T., M.T.

Iwan Cahyono, S.T., M.T.

Ir. Hervian Handika Sugasta, S.T., M.T.

Nur Alaina Darwis, S.T., M.T.

Faradhiya Jinan Bastini, S.T., M.T.

Ihwan Sabir, S.P.W.K., M.P.W.K.



Perencanaan dan Operasi Transportasi Jalan Raya

Penulis : Muhammad Arsyil Datau, S.T., M.T., Zainun Datau, S.T., M.T., Ir. Andi Butsainah Tumaadir, S.T., M.T., Ir. Sri Mulyani Muchtar, S.T., M.T., Ir. Abd Basit Amir, S.T., M.T., Iwan Cahyono, S.T., M.T., Ir. Hervian Handika Sugasta, S.T., M.T., Nur Alaina Darwis, S.T., M.T., Faradhiya Jinan Bastini, S.T., M.T., dan Ihwan Sabir, S.P.W.K., M.P.W.K.

ISBN : 978-634-7701-60-2 (PDF)

Penyunting Naskah : Ananda Salsa Sabila

Tata Letak : Ananda Salsa Sabila

Desain Sampul : Novikean Keysah Sanisri

Penerbit

PT Cipta Digital Edukasi

Jl. Wijaya Ii/Wijaya Grand Centre Blok G-15, Desa/Kelurahan Pulo, Kec. Kebayoran Baru, Kota Adm. Jakarta Selatan, Provinsi DKI Jakarta, Kode Pos: 1216

E-Mail : penerbitode@gmail.com

Website : cideka.com

© Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

Berlaku selama 50 (lima puluh) tahun sejak Ciptaan tersebut pertama kali dilakukan pengumuman.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit. Ketentuan Pidana Sanksi Pelanggaran Pasal 2 UU Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta.

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (Tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyerahkan, menyiarkan, memamerkan, mengedarkan atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya buku referensi berjudul ***Perencanaan dan Operasi Transportasi Jalan Raya*** ini dapat disusun dan diselesaikan. Buku ini disusun sebagai upaya untuk memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai perencanaan dan pengoperasian sistem transportasi jalan raya.

Dalam menghadapi perkembangan wilayah dan peningkatan kebutuhan mobilitas masyarakat, diperlukan perencanaan yang matang serta pengelolaan yang efektif agar sistem transportasi dapat berjalan secara optimal.

Semoga buku ini dapat memberikan manfaat, menambah wawasan, serta menjadi referensi yang berguna bagi para pembaca, khususnya dalam bidang perencanaan dan operasi transportasi jalan raya.

Jakarta, April 2026

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
Bab 1: Sistem Transportasi dan Karakteristik Pergerakan	1
1.1 <i>Fundamentals of Road Transportation System</i>	1
1.2 Karakteristik Aliran Lalu Lintas.....	4
1.3 Pergerakan dan <i>Trip Generation</i>	8
1.4 Teknologi dan Sistem Informasi dalam Manajemen Transportasi	11
1.5 <i>Sustainability</i> dan <i>Smart Mobility</i>	14
Bab 2: Data Transportasi dan Metode Pengumpulan	18
2.1 Konsep Dasar Data Transportasi	18
2.2 Metode Pengumpulan Data Transportasi Konvensional	21
2.3 Metode Pengumpulan Data Transportasi Berbasis Teknologi	25
2.4 Validasi, Kalibrasi, dan Jaminan Kualitas Data	29
2.5 Aplikasi Analitik Data dalam Perencanaan Transportasi.....	32
Bab 3: Arus Lalu Lintas dan Karakteristik Jalan	36
3.1 Definisi dan Parameter Dasar Arus Lalu Lintas.....	36
3.2 Model Hubungan Volume-Kecepatan-Kepadatan	39
3.3 Kapasitas Jalan dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhinya	42
3.4 Karakteristik Jalan dan Infrastruktur	45
Bab 4: Kapasitas Jalan dan Tingkat Pelayanan	48
4.1 Konsep Dasar Kapasitas Jalan.....	48

4.2 Tingkat Pelayanan Jalan	51
4.3 Analisis Tingkat Kejenuhan	53
4.4 Kecepatan dan Waktu Tempuh	56
4.5 Faktor-Faktor Penyesuaian Kapasitas	58
4.6 Evaluasi dan Peningkatan Kinerja Jalan	61
Bab 5: Perencanaan Geometrik Jalan	64
5.1 Konsep Dasar Perencanaan Geometrik Jalan	64
5.2 Alinyemen Horizontal dan Parameter Desain	66
5.3 Alinyemen Vertikal dan Lengkung Vertikal	69
5.4 Penampang Melintang Jalan dan Dimensi Standar	71
5.5 Aplikasi Teknologi dalam Perencanaan Geometrik	74
Bab 6: Perkerasan Jalan.....	77
6.1 Tipe-Tipe Perkerasan Jalan dan Karakteristiknya.....	77
6.2 Perencanaan dan Desain Perkerasan	80
6.3 Konstruksi dan Pelaksanaan Perkerasan	88
6.4 Pemeliharaan dan Rehabilitasi Perkerasan.....	90
6.5 Sistem Manajemen Perkerasan Jalan	93
Bab 7: Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas	96
7.1 Sistem Kontrol Lalu Lintas Adaptif.....	96
7.2 Manajemen Keselamatan Lalu Lintas	99
7.3 Manajemen Kemacetan dan Prediksi Lalu Lintas	103
7.4 Koordinasi Multi-Persimpangan dan Jaringan Jalan.....	106
7.5 Teknologi Komunikasi Kendaraan dan Otomasi	109
7.6 Keberlanjutan dan Dampak Lingkungan.....	113
Bab 8: Transportasi Perkotaan dan Angkutan Umum	117
8.1 Konsep dan Definisi Transportasi Perkotaan	117

8.2 Infrastruktur Transportasi dan Perencanaan Jaringan	121
8.3 Manajemen Operasional dan Kinerja Layanan	124
8.4 Angkutan Umum dan Layanan Transportasi Publik	128
8.5 Keberlanjutan dan Dampak Lingkungan Transportasi Perkotaan	132
Bab 9: Keselamatan Jalan dan Dampak Transportasi.....	136
9.1 Konsep dan Definisi Keselamatan Jalan	136
9.2 Strategi Pencegahan Kecelakaan Lalu Lintas	139
9.3 Dampak Lingkungan dari Transportasi Jalan.....	143
9.4 Manajemen Lalu Lintas dan Operasi Jalan	145
9.5 Implikasi Kebijakan dan Rekomendasi	148
Bab 10: Perencanaan Transportasi Darat	151
10.1 Konsep Dasar dan Prinsip Perencanaan Transportasi	151
10.2 Peramalan Permintaan Transportasi	155
10.3 Pengembangan Jaringan Transportasi	158
10.4 Implementasi Teknologi dan Inovasi	161
10.5 Kebijakan, Regulasi, dan Implementasi	164
DAFTAR PUSTAKA	168
PROFIL PENULIS	186

Bab 1: Sistem Transportasi dan Karakteristik Pergerakan

1.1 *Fundamentals of Road Transportation System*

1.1.1 Pengertian dan Definisi Sistem Transportasi Jalan Raya

Sistem transportasi jalan raya merupakan suatu keseluruhan infrastruktur, kendaraan, dan pengguna jalan yang terintegrasi untuk memfasilitasi pergerakan orang dan barang dari satu tempat ke tempat lain. Sistem transportasi jalan raya dapat didefinisikan sebagai suatu jaringan terkoordinasi yang melibatkan elemen-elemen fisik seperti jalan, jembatan, dan simpang, serta elemen non-fisik seperti regulasi, manajemen lalu lintas, dan perencanaan transportasi. Sistem ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan mobilitas masyarakat sambil meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, keselamatan, dan ekonomi (Wesley & Krishnakanth, 2025).

Dalam konteks transportasi jalan raya modern, sistem ini telah berkembang menjadi lebih kompleks dengan integrasi teknologi canggih seperti *Intelligent Transportation Systems* (ITS), sistem manajemen lalu lintas berbasis *artificial intelligence*, dan perangkat *Internet of Things* (IoT) untuk monitoring dan kontrol lalu lintas real-time. Definisi sistem transportasi jalan raya kontemporer juga mencakup konsep multimodal, di mana jalan raya menjadi

bagian dari ekosistem mobilitas yang lebih luas yang menghubungkan berbagai mode transportasi seperti transportasi publik, transportasi aktif (*cycling* dan *pedestrian*), serta transportasi berbagi (*shared mobility*).

1.1.2 Komponen-Komponen Utama Sistem Transportasi

Sistem transportasi jalan raya terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terhubung dan saling mempengaruhi. Komponen pertama adalah infrastruktur jalan, yang mencakup jalan raya, jalan lokal, jembatan, dan elemen-elemen pendukung lainnya yang membentuk jaringan transportasi. Infrastruktur ini harus dirancang dengan mempertimbangkan kapasitas, keselamatan, dan keberlanjutan lingkungan. Komponen kedua adalah kendaraan, yang mencakup berbagai jenis transportasi dari kendaraan pribadi, transportasi umum, hingga kendaraan otomatis (*autonomous vehicles*) yang sedang dikembangkan (Yusuf et al., 2025).

Komponen ketiga adalah penggerak atau pengguna jalan, yang mencakup pengemudi kendaraan, penumpang, pejalan kaki (*pedestrian*), dan pesepeda. Perilaku pengguna jalan sangat mempengaruhi karakteristik lalu lintas dan pergerakan pada jaringan jalan. Komponen keempat adalah sistem manajemen dan kontrol lalu lintas, yang meliputi sinyal lalu lintas, sistem pemantauan lalu lintas, pusat kontrol lalu lintas, dan kebijakan regulasi. Komponen kelima adalah perencanaan transportasi, yang merupakan kerangka kerja strategis untuk mengembangkan sistem transportasi yang berkelanjutan dan efisien. Semua komponen ini harus bekerja secara terkoordinasi untuk menciptakan sistem transportasi yang efektif.

1.1.3 Hirarki Jaringan Jalan

Jaringan jalan raya umumnya diklasifikasikan berdasarkan fungsi dan hirarkinya dalam sistem transportasi. Jalan arteri utama adalah jalan dengan volume lalu lintas tinggi, kecepatan operasi tinggi, dan menghubungkan pusat-pusat pertumbuhan ekonomi utama dalam suatu wilayah atau antar wilayah. Jalan ini dirancang untuk melayani perjalanan jarak jauh dengan hambatan akses minimal. Jalan kolektor adalah jalan yang menghubungkan jalan-jalan arteri dengan jalan-jalan lokal, melayani perjalanan menengah dengan volume lalu lintas sedang. Jalan lokal adalah jalan dengan volume lalu lintas rendah yang melayani akses ke properti dan perjalanan lokal dalam lingkungan perumahan atau komersial (Gheorghe & Oica, 2025).

Klasifikasi hirarki jaringan jalan ini penting dalam perencanaan dan desain transportasi karena setiap tingkat hirarki memiliki standar desain, kapasitas, dan fungsi yang berbeda. Pemahaman yang baik tentang hirarki jaringan membantu perencanaan dalam mengalokasikan investasi infrastruktur secara efisien dan memastikan bahwa jaringan jalan dapat berfungsi optimal dalam mengelola pergerakan lalu lintas.

1.1.4 Peran Sistem Transportasi dalam Pengembangan Perkotaan

Sistem transportasi jalan raya memainkan peran strategis dalam pengembangan perkotaan dan pembangunan ekonomi. Transportasi yang efisien menghubungkan pusat-pusat ekonomi, memfasilitasi akses ke lapangan kerja, pendidikan, kesehatan, dan

layanan sosial lainnya. Kualitas sistem transportasi secara langsung mempengaruhi produktivitas ekonomi, daya saing kota, dan kualitas hidup penduduk. Perkembangan transportasi yang baik juga mendukung pengembangan pola tata guna lahan yang lebih terencana, mengurangi *urban sprawl*, dan mempromosikan pembangunan yang lebih berkelanjutan (Udachan & Patil, 2025).

Di sisi lain, pertumbuhan transportasi jalan raya yang tidak terkelola dapat mengakibatkan kemacetan lalu lintas, polusi udara, ketergantungan berlebihan pada kendaraan pribadi, dan degradasi lingkungan. Oleh karena itu, perencanaan transportasi modern mengintegrasikan konsep keberlanjutan, dengan memprioritaskan transportasi publik, transportasi aktif, dan teknologi ramah lingkungan dalam pengembangan sistem transportasi perkotaan.

1.2 Karakteristik Aliran Lalu Lintas

1.2.1 Parameter Fundamental Lalu Lintas: Volume, Kecepatan, dan Kepadatan

Aliran lalu lintas (*traffic flow*) adalah pergerakan kendaraan pada jaringan jalan, dan karakteristiknya diukur menggunakan tiga parameter fundamental yaitu *volume*, *speed*, dan *density*. Volume lalu lintas adalah jumlah kendaraan yang melewati suatu potongan melintang jalan dalam satuan waktu tertentu, biasanya dinyatakan dalam kendaraan per jam (veh/h) atau kendaraan per hari (veh/day). Volume lalu lintas bervariasi sesuai dengan waktu, lokasi, dan kondisi sosial-ekonomi suatu daerah.

Kecepatan lalu lintas (*speed*) adalah jarak yang ditempuh kendaraan dalam satuan waktu tertentu, umumnya dinyatakan dalam kilometer per jam (km/h). Terdapat berbagai jenis kecepatan yang diukur dalam lalu lintas, termasuk kecepatan rata-rata ruang (*space mean speed*), kecepatan rata-rata waktu (*time mean speed*), dan kecepatan operasi (*operating speed*). Kepadatan lalu lintas (*density*) adalah jumlah kendaraan per satuan panjang jalan, biasanya dinyatakan dalam kendaraan per kilometer (veh/km). Kepadatan adalah ukuran konsentrasi kendaraan pada suatu potongan jalan (Wesley & Krishnakanth, 2025).

Ketiga parameter ini saling berkaitan dalam hubungan fundamental lalu lintas yang dapat dinyatakan sebagai: $\text{Volume} = \text{Kecepatan} \times \text{Kepadatan}$. Pemahaman tentang hubungan antara ketiga parameter ini penting untuk analisis kapasitas jalan, perencanaan manajemen lalu lintas, dan optimalisasi operasi jaringan jalan.

1.2.2 Kategori Lalu Lintas dan Heterogenitas Komposisi Kendaraan

Komposisi lalu lintas pada jaringan jalan raya bervariasi tergantung pada lokasi, jenis jalan, dan waktu. Dalam konteks negara berkembang, khususnya di Asia, lalu lintas sering kali bersifat heterogen dengan adanya berbagai jenis kendaraan yang berbagi ruang jalan yang sama tanpa pembagian jalur (*non-lane-based* atau *mixed traffic*). Kategori kendaraan yang umumnya ditemui meliputi kendaraan ringan seperti mobil penumpang, kendaraan berat seperti

truk dan bus, sepeda motor, dan kendaraan non-motorisasi seperti becak dan sepeda.

Heterogenitas komposisi kendaraan memiliki dampak signifikan terhadap karakteristik aliran lalu lintas. Konversi satuan kendaraan heterogen menjadi satuan kendaraan setara (*Passenger Car Units*, PCU) diperlukan untuk analisis lalu lintas yang akurat, karena setiap jenis kendaraan memiliki dimensi, akselerasi, dan perilaku operasi yang berbeda. Manajemen lalu lintas heterogen memerlukan pendekatan khusus yang berbeda dari manajemen lalu lintas homogen yang umumnya ditemui di negara-negara maju.

1.2.3 Perilaku Pengemudi dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Aliran Lalu Lintas

Perilaku pengemudi adalah faktor fundamental yang mempengaruhi karakteristik aliran lalu lintas. Setiap pengemudi membuat keputusan tentang kecepatan, keselamatan jarak dengan kendaraan lain (*following distance*), dan strategi penghindaran hambatan yang berdasarkan persepsi mereka tentang kondisi jalan, kendaraan, dan pengemudi lain. Faktor-faktor yang mempengaruhi perilaku pengemudi mencakup kondisi cuaca, geometri jalan, kepadatan lalu lintas, kehadiran penyeberang jalan tanpa sinyal, dan kondisi lingkungan sekitar (Kannur et al., 2024).

Selain perilaku pengemudi individual, karakteristik aliran lalu lintas juga dipengaruhi oleh faktor-faktor sistemik seperti kebijakan lalu lintas, sistem sinyal lalu lintas, kualitas infrastruktur jalan, dan kepatuhan terhadap aturan lalu lintas. Studi terhadap aliran lalu lintas menunjukkan bahwa dalam kondisi lalu lintas heterogen,

hubungan antara kecepatan dan volume sering kali nonlinear dan dapat dimodelkan menggunakan persamaan matematika yang lebih kompleks dibandingkan dengan model lalu lintas konvensional.

1.2.4 Kondisi Kapasitas Jalan dan *Level of Service*

Kapasitas jalan adalah volume maksimum arus lalu lintas yang dapat melewati suatu potongan jalan dalam kondisi tertentu. Kapasitas jalan bergantung pada faktor-faktor seperti geometri jalan (lebar lajur, jumlah lajur, median), komposisi lalu lintas, kondisi cuaca, kualitas permukaan jalan, dan faktor-faktor lingkungan lainnya. *Level of Service* (LOS) adalah ukuran kualitatif dari kondisi operasi jaringan jalan yang biasanya dikelompokkan dalam kategori A hingga F, di mana LOS A menunjukkan kondisi aliran bebas dan LOS F menunjukkan kondisi macet penuh.

Analisis kapasitas dan LOS penting dalam perencanaan transportasi untuk menentukan apakah suatu jaringan jalan dapat melayani volume lalu lintas yang ada dengan baik, atau apakah diperlukan peningkatan kapasitas atau intervensi manajemen lalu lintas. Dalam konteks lalu lintas heterogen, perhitungan kapasitas memerlukan pertimbangan khusus terhadap komposisi kendaraan dan perilaku lalu lintas lokal yang mungkin berbeda dari standar internasional.

1.3 Pergerakan dan *Trip Generation*

1.3.1 Pengertian Pergerakan Lalu Lintas dan Pola-Pola Pergerakan

Pergerakan lalu lintas (*movement* atau *flow*) dalam konteks perencanaan transportasi mengacu pada perpindahan orang dan barang dari satu lokasi ke lokasi lain menggunakan jaringan transportasi. Pola pergerakan tidak random tetapi mengikuti pola-pola tertentu yang dipengaruhi oleh keberadaan pusat-pusat aktivitas, sebaran populasi, fasilitas ekonomi, dan aksesibilitas lokasi. Pergerakan dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai kriteria seperti maksud perjalanan (*trip purpose*), waktu perjalanan (*time of day*), arah perjalanan, dan mode transportasi yang digunakan.

Dalam analisis perencanaan transportasi, pola pergerakan sering digambarkan menggunakan matriks *Origin-Destination* (OD) yang menunjukkan jumlah pergerakan dari setiap zona asal ke setiap zona tujuan. Pemahaman tentang pola pergerakan sangat penting untuk perencanaan infrastruktur transportasi, alokasi rute transportasi publik, dan manajemen lalu lintas yang efektif. Pola pergerakan juga digunakan dalam pengembangan model-model transportasi yang dapat memproyeksikan permintaan transportasi masa depan (Karimpour et al., 2025).

1.3.2 *Trip Generation* dan Faktor-Faktor Penentu Pergerakan

Trip generation adalah tahap awal dalam model transportasi empat tahap yang memperkirakan jumlah perjalanan yang dihasilkan

dari setiap zona dalam suatu wilayah studi. Trip generation dipengaruhi oleh faktor-faktor sosiodemografis dan ekonomis seperti jumlah populasi, tingkat kepemilikan kendaraan, tingkat pendapatan, tingkat ketenagakerjaan, dan kehadiran fasilitas-fasilitas menarik (*trip attraction*). Fasilitas-fasilitas yang menarik perjalanan meliputi pusat perbelanjaan, pusat pekerjaan, institusi pendidikan, fasilitas kesehatan, dan tempat rekreasi.

Analisis trip generation sering menggunakan model regresi linear atau model-model lainnya untuk menghubungkan karakteristik sosiodemografis dengan jumlah perjalanan yang dihasilkan. Dalam konteks perencanaan transportasi, estimasi trip generation yang akurat sangat penting karena menjadi dasar untuk proyeksi permintaan transportasi dan perencanaan kapasitas infrastruktur jalan. Untuk kasus khusus seperti transportasi kargo atau pergerakan pejalan kaki dan pesepeda, analisis trip generation memerlukan pendekatan dan faktor-faktor khusus yang berbeda dari model konvensional (Oliveira et al., 2017).

1.3.3 Distribusi Pergerakan dan *Trip Distribution*

Trip distribution adalah proses memperkirakan bagaimana perjalanan yang dihasilkan dari suatu zona akan didistribusikan ke berbagai zona tujuan. Model *gravity* adalah model yang paling umum digunakan dalam trip distribution, yang mengasumsikan bahwa perjalanan antara dua zona berbanding lurus dengan tarikan masing-masing zona dan berbanding terbalik dengan jarak atau waktu perjalanan antara zona. Faktor-faktor yang mempengaruhi

distribusi perjalanan mencakup aksesibilitas, biaya perjalanan, waktu perjalanan, dan karakteristik zona tujuan.

Dalam analisis distribusi perjalanan modern, peneliti juga menggunakan data dari aplikasi mobilitas (*ride-hailing*, berbagi sepeda, *e-scooter*) dan *Point of Interest* (POI) dari platform digital untuk memahami pola pergerakan yang lebih detail. Teknologi *machine learning* seperti *random forest* juga digunakan untuk meningkatkan akurasi model distribusi perjalanan dengan menangkap hubungan nonlinear antara variabel-variabel yang mempengaruhi distribusi perjalanan.

1.3.4 Pengaruh Waktu dan Musiman dalam Pola Pergerakan

Pola pergerakan lalu lintas menunjukkan variabilitas yang signifikan seiring waktu, baik dalam skala harian (*daily pattern*) maupun musiman (*seasonal pattern*). Dalam skala harian, lalu lintas cenderung menunjukkan puncak pagi (*morning peak*) ketika orang berangkat ke tempat kerja atau sekolah, puncak sore (*evening peak*) ketika kembali dari aktivitas sehari-hari, dan periode lembah (*off-peak*) di sela-sela periode puncak. Pola harian ini dapat berbeda signifikan untuk hari kerja dan akhir pekan.

Pada skala musiman, pergerakan dapat bervariasi berdasarkan musim, liburan publik, dan event-event khusus. Variabilitas temporal ini memiliki implikasi penting untuk manajemen lalu lintas, di mana sistem manajemen lalu lintas adaptif (*adaptive traffic management systems*) dirancang untuk menyesuaikan strategi kontrol lalu lintas dengan kondisi lalu lintas yang berubah seiring waktu. Pemahaman tentang pola temporal

pergerakan juga penting dalam perencanaan dan desain infrastruktur transportasi, perencanaan operasi transportasi publik, dan pengembangan strategi pengelolaan permintaan perjalanan (*demand management*).

1.4 Teknologi dan Sistem Informasi dalam Manajemen Transportasi

1.4.1 *Intelligent Transportation Systems dan Real-Time Traffic Management*

Intelligent Transportation Systems (ITS) mengintegrasikan teknologi informasi dan komunikasi dengan infrastruktur transportasi untuk meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan keberlanjutan sistem transportasi. Komponen utama ITS mencakup sistem deteksi lalu lintas (*traffic detection*), sistem komunikasi kendaraan (*vehicle-to-infrastructure* dan *vehicle-to-vehicle*), pusat kontrol lalu lintas (*traffic control center*), dan sistem informasi perjalanan pengguna (*traveler information system*).

Manajemen lalu lintas real-time (*real-time traffic management*) memanfaatkan data lalu lintas real-time yang dikumpulkan melalui sensor-sensor di lapangan (kamera, loop detector, radar) untuk memberikan respons dinamis terhadap kondisi lalu lintas yang berubah. Sistem sinyal lalu lintas adaptif (*adaptive traffic signal control*) adalah salah satu aplikasi ITS yang menggunakan algoritma kontrol untuk menyesuaikan waktu sinyal

berdasarkan kondisi lalu lintas aktual, sehingga dapat meningkatkan kapasitas jalan dan mengurangi kemacetan (Wang et al., 2025).

1.4.2 Prediksi Aliran Lalu Lintas Menggunakan *Machine Learning* dan *Deep Learning*

Prediksi aliran lalu lintas adalah komponen penting dalam sistem transportasi cerdas, yang memungkinkan perencanaan rute yang lebih baik, manajemen lalu lintas proaktif, dan penilaian dampak lingkungan. Metode prediksi konvensional seperti *Autoregressive Integrated Moving Average* (ARIMA) dan *Seasonal ARIMA* (SARIMA) telah digunakan selama bertahun-tahun, tetapi metode-metode ini memiliki keterbatasan dalam menangani pola lalu lintas yang kompleks dan nonlinear.

Perkembangan *machine learning* dan *deep learning* telah membuka kemungkinan untuk pengembangan model prediksi yang lebih akurat. Model-model seperti *Long Short-Term Memory* (LSTM), *Convolutional Neural Networks* (CNN), *Graph Convolutional Networks* (GCN), dan *Transformer* telah menunjukkan performa superior dalam memprediksi aliran lalu lintas dengan mempertimbangkan dependensi spasial dan temporal dalam data lalu lintas. Model-model ini dapat menangkap pola-pola kompleks dan nonlinear dalam data lalu lintas yang sulit ditangani oleh model statistik konvensional (Zhang et al., 2025).

1.4.3 *Digital Twin* dan Simulasi Transportasi

Digital Twin adalah replika digital dari sistem fisik transportasi yang digunakan untuk simulasi, analisis, dan optimalisasi sistem transportasi sebelum implementasi solusi di

dunia nyata. Dengan mengintegrasikan data real-time, model matematika, dan algoritma optimalisasi, digital twin dapat membantu pengambil keputusan dalam menguji berbagai skenario kebijakan dan intervensi transportasi tanpa mengganggu operasi sistem yang sedang berjalan.

Simulasi transportasi menggunakan software seperti *MATSim* (Multi-Agent Transport Simulation), *SUMO* (*Simulation of Urban MObility*), atau *PTV Vissim* memungkinkan analisis terperinci tentang dampak perubahan infrastruktur atau kebijakan transportasi terhadap aliran lalu lintas, emisi, dan kualitas hidup perkotaan. Teknologi digital twin memiliki potensi besar untuk mendukung perencanaan dan manajemen transportasi yang lebih berkelanjutan dan efisien di masa depan (Turcanu et al., 2025).

1.4.4 Integrasi IoT dan Analitik Data Besar dalam Transportasi

Internet of Things (IoT) dalam transportasi mencakup berbagai sensor dan perangkat yang dipasang pada infrastruktur jalan, kendaraan, dan perangkat pengguna untuk mengumpulkan data transportasi secara real-time. Data yang dikumpulkan melalui IoT devices mencakup volume lalu lintas, kecepatan kendaraan, pola pejalan kaki, penggunaan parkir, dan emisi kendaraan. Analisis data besar (*big data analytics*) terhadap data transportasi ini dapat mengungkap pola-pola tersembunyi, mengidentifikasi masalah transportasi, dan mendukung pengembangan solusi transportasi yang lebih efektif.

Integrasi IoT dengan teknologi *cloud computing* dan *edge computing* memungkinkan pemrosesan data transportasi secara

terdistribusi, mengurangi latensi dalam pengambilan keputusan manajemen lalu lintas, dan meningkatkan skalabilitas sistem. Platform analitik transportasi yang dibangun atas fondasi IoT dan big data dapat mendukung berbagai aplikasi mulai dari optimalisasi rute kendaraan, manajemen permintaan transportasi, hingga perencanaan infrastruktur jangka panjang (Yusuf et al., 2025).

1.5 Sustainability dan Smart Mobility

1.5.1 Konsep Keberlanjutan dalam Sistem Transportasi

Keberlanjutan transportasi mengacu pada pengembangan sistem transportasi yang memenuhi kebutuhan mobilitas saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka. Dimensi keberlanjutan transportasi mencakup aspek lingkungan (mengurangi emisi gas rumah kaca dan polutan udara), aspek sosial (memastikan aksesibilitas dan keadilan dalam akses transportasi), dan aspek ekonomi (efisiensi biaya dan viabilitas finansial).

Strategi untuk mencapai transportasi berkelanjutan mencakup promosi penggunaan transportasi publik dan transportasi aktif (*walking* dan *cycling*), elektrifikasi kendaraan, pengembangan bahan bakar alternatif dan terbarukan, optimalisasi aliran lalu lintas untuk mengurangi konsumsi bahan bakar, dan integrasi perencanaan transportasi dengan perencanaan tata guna lahan. Transisi menuju transportasi berkelanjutan memerlukan perubahan mendasar dalam paradigma transportasi, dari paradigma

berbasis kendaraan pribadi menuju paradigma mobilitas berbasis akses dan berbagi (Bilonoh et al., 2025).

1.5.2 Smart Mobility dan Mobility-as-a-Service

Smart mobility adalah konsep pengintegrasian teknologi digital, data, dan inovasi bisnis untuk menciptakan sistem transportasi yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan. Komponen utama smart mobility mencakup transportasi publik berbasis *app*, berbagi kendaraan (*car-sharing*, *bike-sharing*, *scooter-sharing*), *ride-hailing*, dan kendaraan otonom. Teknologi komunikasi V2X (*Vehicle-to-Everything*), sistem navigasi pintar, dan sistem pembayaran digital adalah enabler utama untuk smart mobility.

Mobility-as-a-Service (MaaS) adalah model bisnis yang mengintegrasikan berbagai mode transportasi dalam satu platform digital yang memungkinkan pengguna untuk merencanakan, membayar, dan menggunakan berbagai mode transportasi dengan mudah. MaaS dapat mengoptimalkan penggunaan infrastruktur transportasi yang ada, mengurangi kebutuhan akan infrastruktur baru, dan meningkatkan pengalaman pengguna dalam mobilitas perkotaan. Namun, implementasi MaaS memerlukan koordinasi antar pemangku kepentingan transportasi dan regulasi yang mendukung (Knig et al., 2016).

1.5.3 Kendaraan Otonom dan Implikasinya terhadap Sistem Transportasi

Kendaraan otonom atau *autonomous vehicles* (AVs) diproyeksikan akan mengubah secara fundamental lanskap transportasi dalam dekade mendatang. Dengan menghilangkan

kebutuhan akan pengemudi manusia, kendaraan otonom berpotensi meningkatkan keselamatan lalu lintas, mengurangi kemacetan melalui operasi yang lebih efisien, dan meningkatkan aksesibilitas untuk populasi yang tidak dapat mengemudi. Ketika dikombinasikan dengan model berbagi (*shared autonomous vehicles* atau SAVs), teknologi ini dapat mengurangi kebutuhan akan kendaraan pribadi dan mengurangi dampak lingkungan dari transportasi.

Namun, integrasi kendaraan otonom ke dalam sistem transportasi yang sudah ada menghadapi berbagai tantangan teknis, regulasi, dan sosial. Dari perspektif manajemen lalu lintas, kehadiran AVs dapat mengubah karakteristik aliran lalu lintas secara signifikan, dengan potensi untuk meningkatkan kapasitas jalan hingga 40% melalui peningkatan keselamatan jarak antar kendaraan dan operasi yang terkoordinasi. Namun, efisiensi ini hanya dapat dicapai jika penetrasi pasar AVs mencapai level tertentu dan jika sistem manajemen lalu lintas disesuaikan untuk beroperasi dalam lingkungan yang campuran antara kendaraan otonom dan konvensional (Alshabibi, 2025).

1.5.4 Tantangan dan Peluang dalam Transformasi Sistem Transportasi

Transformasi sistem transportasi menuju sustainability dan smart mobility menghadapi berbagai tantangan. Tantangan teknis mencakup keterbatasan teknologi saat ini (terutama untuk kendaraan otonom level 5 yang fully autonomous), keterbatasan infrastruktur komunikasi yang diperlukan untuk smart transportation, dan kesulitan dalam integrasi teknologi baru dengan sistem infrastruktur

yang sudah ada. Tantangan regulasi dan kelembagaan mencakup perlunya reformasi regulasi untuk mengakomodasi model bisnis baru seperti MaaS dan ride-hailing, serta perlunya koordinasi antar agensi pemerintah dan pemangku kepentingan transportasi.

Tantangan sosial dan finansial mencakup perlunya perubahan perilaku konsumen terhadap penggunaan transportasi, isu kesetaraan sosial dalam akses terhadap teknologi transportasi baru, dan perlunya investasi finansial yang signifikan untuk mengimplementasikan sistem transportasi baru. Namun, transformasi ini juga membuka peluang untuk pengembangan industri baru, penciptaan lapangan kerja di sektor transportasi dan teknologi, dan peningkatan kualitas hidup masyarakat melalui sistem transportasi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Bab 2: Data Transportasi dan Metode Pengumpulan

2.1 Konsep Dasar Data Transportasi

2.1.1 Definisi dan Pentingnya Data Transportasi

Data transportasi merupakan informasi sistematis yang dikumpulkan, dianalisis, dan diinterpretasikan untuk memahami karakteristik pergerakan orang dan barang dalam sistem transportasi jalan raya. Data ini menjadi fondasi utama dalam setiap keputusan perencanaan transportasi, dari pengembangan infrastruktur hingga manajemen operasional jaringan jalan (Son et al., 2025). Pentingnya data transportasi tidak dapat dipisahkan dari tujuan utama perencanaan transportasi, yaitu untuk menciptakan sistem transportasi yang efisien, aman, berkelanjutan, dan dapat melayani kebutuhan mobilitas penduduk dengan optimal.

Data transportasi jalan raya mencakup berbagai dimensi informasi yang saling terkait. Dimensi pertama adalah data tentang *demand* atau permintaan transportasi, yang meliputi volume kendaraan, komposisi jenis kendaraan, pola perjalanan, dan karakteristik pengguna jalan. Dimensi kedua adalah data tentang *supply* atau penyediaan infrastruktur transportasi, yang mencakup karakteristik geometri jalan, kapasitas jalan, kondisi permukaan jalan, dan fasilitas transportasi publik. Dimensi ketiga adalah data

operasional, seperti waktu perjalanan, kecepatan kendaraan, dan tingkat kecelakaan. Integrasi dari ketiga dimensi data ini memungkinkan perencanaan transportasi untuk mengembangkan strategi yang komprehensif dan berbasis bukti (*evidence-based*).

2.1.2 Klasifikasi dan Kategori Data Transportasi

Data transportasi dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai kriteria. Berdasarkan jenis informasi yang dikandung, data transportasi dapat dibedakan menjadi data kuantitatif dan data kualitatif. Data kuantitatif mencakup informasi yang dapat diukur secara numerik, seperti volume lalu lintas dalam kendaraan per jam, waktu perjalanan dalam menit, dan persentase komposisi kendaraan. Data kualitatif mencakup informasi deskriptif tentang kondisi jalan, perilaku pengguna jalan, dan persepsi pengguna terhadap sistem transportasi.

Berdasarkan frekuensi pengumpulannya, data transportasi dapat dibedakan menjadi data statis dan data dinamis. Data statis mencakup informasi yang relatif tidak berubah dalam periode waktu yang panjang, seperti lebar jalan, jumlah lajur, dan tata guna lahan sekitar jalan. Data dinamis mencakup informasi yang berubah secara kontinu atau berkala, seperti volume lalu lintas yang berfluktuasi, kecepatan kendaraan yang bervariasi, dan kondisi cuaca yang mempengaruhi kondisi operasional jalan. Berdasarkan cakupan geografis, data transportasi dapat dibedagi menjadi data makroskopis, yang melihat sistem transportasi secara keseluruhan, dan data mikroskopis, yang menganalisis interaksi individual antar kendaraan.

2.1.3 Karakteristik Kualitas Data Transportasi

Kualitas data transportasi sangat krusial karena akan mempengaruhi keandalan hasil analisis dan validitas rekomendasi kebijakan yang dihasilkan. Karakteristik kualitas data transportasi mencakup akurasi, presisi, kelengkapan, konsistensi, dan ketepatan waktu. Akurasi mengacu pada seberapa dekat nilai data yang tercatat dengan nilai sesungguhnya di lapangan. Presisi mengacu pada tingkat detail dan resolusi data yang dikumpulkan. Kelengkapan data mengacu pada sejauh mana data yang dikumpulkan mencakup semua dimensi dan periode waktu yang dibutuhkan untuk analisis.

Konsistensi data mengacu pada keselarasan antara data dari berbagai sumber dan metode pengumpulan yang berbeda. Ketepatan waktu (*timeliness*) mengacu pada seberapa cepat data dapat dikumpulkan, diproses, dan tersedia untuk digunakan dalam pengambilan keputusan. Dalam konteks transportasi modern yang semakin menuntut respons cepat terhadap kondisi lalu lintas yang dinamis, ketepatan waktu data menjadi semakin penting. Data yang ketinggalan jaman (*stale data*) dapat menghasilkan keputusan yang tidak sesuai dengan kondisi lapangan saat ini.

2.1.4 Aplikasi dan Kegunaan Data Transportasi

Data transportasi digunakan untuk berbagai keperluan dalam perencanaan dan operasi transportasi jalan raya. Pertama, data transportasi digunakan untuk perencanaan strategis jangka panjang, seperti pengembangan rencana induk transportasi (*master plan*) dan identifikasi prioritas investasi infrastruktur transportasi. Kedua, data transportasi digunakan untuk analisis operasional jangka pendek,

seperti evaluasi tingkat pelayanan jalan, identifikasi lokasi kemacetan, dan manajemen insiden lalu lintas. Ketiga, data transportasi digunakan untuk riset dan pengembangan, seperti pengembangan model transportasi, pengujian kebijakan baru, dan pemahaman perilaku pengguna transportasi.

Keempat, data transportasi digunakan untuk evaluasi dampak kebijakan dan proyek infrastruktur, seperti penilaian efektivitas program subsidi transportasi publik atau dampak pembukaan jalan baru terhadap pola perjalanan. Kelima, data transportasi digunakan untuk manajemen krisis dan kesiapsiagaan, seperti perencanaan evakuasi dalam situasi bencana dan pengalokasian sumber daya darurat. Dengan pemahaman yang jelas tentang aplikasi dan kegunaan data transportasi, stakeholder dapat menentukan jenis data apa yang paling penting untuk dikumpulkan dan bagaimana mengalokasikan sumber daya secara efisien.

2.2 Metode Pengumpulan Data Transportasi Konvensional

2.2.1 Survei Manual dan Pencacahan Lalu Lintas

Survei manual merupakan metode pengumpulan data transportasi yang paling tradisional dan masih banyak digunakan, terutama di negara-negara berkembang. Metode ini melibatkan pencacah yang berada di lokasi survei dan secara manual mencatat informasi tentang kendaraan yang melewati dalam periode waktu tertentu. Pengumpulan data volume lalu lintas dilakukan dengan

menggunakan lembaran pencatatan (*tally sheet*) yang telah dirancang khusus untuk mencatat berbagai kategori kendaraan, seperti sepeda motor, mobil penumpang, bus, truk ringan, dan truk berat (Okeke et al., 2021). Survei manual biasanya dilakukan selama periode waktu yang spesifik, seperti 12 jam atau 24 jam, dan pada hari-hari yang representatif untuk mendapatkan gambaran pola lalu lintas yang akurat.

Keunggulan survei manual adalah fleksibilitas dalam mengumpulkan informasi tambahan yang tidak dapat dikumpulkan dengan metode lain, seperti jenis muatan kendaraan, jumlah penumpang dalam kendaraan, atau perilaku pengemudi tertentu. Akan tetapi, survei manual memiliki keterbatasan signifikan yang tidak dapat diabaikan. Pertama, tingkat akurasi data sangat tergantung pada keahlian dan konsentrasi pencacah, dengan tingkat kesalahan yang dapat mencapai 5-20% tergantung pada kondisi lapangan. Kedua, biaya operasional survei manual sangat tinggi karena memerlukan tenaga kerja yang banyak dan terlatih untuk periode pengumpulan data yang cukup panjang. Ketiga, kontinuitas pengumpulan data terbatas karena survei manual biasanya hanya dilakukan pada periode waktu tertentu dan tidak dapat beroperasi 24 jam setiap hari.

2.2.2 Survei Wawancara dan Kuesioner Transportasi

Survei wawancara dan kuesioner merupakan metode pengumpulan data transportasi yang digunakan untuk mengumpulkan informasi tentang perilaku perjalanan, persepsi pengguna, dan preferensi modal transportasi. Survei ini biasanya

dilakukan dengan mewawancarai sampel dari populasi pengguna jalan di rumah mereka (*household survey*), di tepi jalan (*roadside interview*), atau di stasiun transportasi publik. Survei wawancara dapat mengumpulkan informasi detail tentang tujuan perjalanan, waktu perjalanan, biaya transportasi, dan faktor-faktor yang mempengaruhi pilihan moda transportasi.

Desain kuesioner yang baik adalah kunci untuk mendapatkan data berkualitas tinggi dari survei wawancara. Pertanyaan harus jelas, tidak ambigu, dan dirancang untuk meminimalkan bias respons. Jumlah sampel yang diwawancarai harus cukup besar dan representatif dari populasi yang diteliti untuk menghasilkan kesimpulan yang valid. Akan tetapi, survei wawancara menghadapi tantangan tingkat respons yang rendah, terutama untuk survei online, karena semakin banyak orang yang enggan atau tidak memiliki waktu untuk berpartisipasi dalam survei. Tingkat respons yang rendah dapat menghasilkan bias sampel yang signifikan, di mana responden memiliki karakteristik yang berbeda dari populasi keseluruhan.

2.2.3 Survei Matriks Asal-Tujuan (*Origin-Destination Survey*)

Survei matriks asal-tujuan (*Origin-Destination* atau OD) merupakan metode pengumpulan data yang dirancang khusus untuk mengumpulkan informasi tentang pola pergerakan lalu lintas antara berbagai zona dalam suatu area studi. Survei OD dilakukan dengan mewawancarai pengemudi atau penumpang tentang asal dan tujuan perjalanan mereka. Data ini sangat penting untuk pengembangan model transportasi empat-tahap (*four-step model*) yang digunakan

untuk perencanaan transportasi jangka panjang. Survei OD tradisional sering dilakukan dengan menghentikan kendaraan di tepi jalan dan mewawancarai pengemudi secara langsung, atau dengan menyebarkan kuesioner kepada sampel pengguna jalan.

Tantangan utama dalam survei OD tradisional adalah pengumpulan data yang time-consuming, biaya operasional yang tinggi, dan tingkat respons yang rendah. Selain itu, hasil survei OD tradisional sering kali tidak representatif karena bias sampel, dengan proporsi responden yang tidak sesuai dengan komposisi sebenarnya dari pengguna jalan di berbagai zona. Akibatnya, matriks OD yang dihasilkan mungkin tidak akurat dan dapat menghasilkan model transportasi yang tidak dapat diandalkan untuk perencanaan jangka panjang.

2.2.4 Survei Kondisi Geometri dan Lingkungan Jalan

Survei kondisi geometri dan lingkungan jalan dilakukan untuk mengumpulkan informasi tentang karakteristik fisik jalan dan kondisi sekitarnya. Survei ini meliputi pengukuran lebar jalan, jumlah lajur, lebar bahu jalan, jenis permukaan jalan, keadaan permukaan jalan (retak, lubang, pelepasan), ada tidaknya median, jarak pandang, dan fitur keselamatan lainnya seperti pembatas jalan atau dinding pembatas. Informasi tentang lingkungan jalan juga dikumpulkan, seperti tata guna lahan di sekitar jalan, tingkat kepadatan pemukiman, ketersediaan fasilitas pejalan kaki, dan ketersediaan fasilitas parkir.

Survei kondisi geometri dan lingkungan jalan biasanya dilakukan melalui observasi visual dan pengukuran langsung di

lapangan menggunakan peralatan surveyor konvensional seperti *measuring tape*, *level*, dan *theodolite*. Dalam era modern, pengukuran dapat juga dilakukan menggunakan teknologi GPS portabel dan perangkat pengukur jarak (*laser distance meter*). Data dari survei ini sangat penting karena karakteristik geometri jalan secara langsung mempengaruhi kapasitas jalan, keselamatan lalu lintas, dan kenyamanan pengguna jalan. Integrasi data geometri dan lingkungan dengan data lalu lintas dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang hubungan antara karakteristik jalan dan perilaku lalu lintas.

2.3 Metode Pengumpulan Data Transportasi Berbasis Teknologi

2.3.1 Sistem Deteksi Otomatis dan Sensor Lalu Lintas

Perkembangan teknologi telah membawa revolusi dalam cara pengumpulan data transportasi melalui sistem deteksi otomatis dan berbagai jenis sensor lalu lintas. *Inductive loop detector* merupakan salah satu teknologi yang paling matang dan banyak digunakan untuk penghitungan volume kendaraan dan pengukuran kecepatan. Sensor ini bekerja dengan menempatkan loop kabel di dalam permukaan jalan yang mendeteksi perubahan medan magnet ketika kendaraan melewati di atasnya (Son et al., 2025). Keuntungan dari *inductive loop detector* adalah akurasi yang tinggi (95-98%), kemampuan untuk mengoperasikan 24 jam tanpa henti, dan biaya operasional yang rendah setelah instalasi awal.

Akan tetapi, *inductive loop detector* memiliki keterbatasan, terutama ketika permukaan jalan sudah rusak atau memerlukan perbaikan yang mengakibatkan perlu pemasangan ulang. Jenis sensor lain yang semakin populer adalah *radar speed sensor* yang menggunakan gelombang elektromagnetik untuk mengukur kecepatan kendaraan secara akurat tanpa kontak fisik (Zhang et al., 2024). Sensor *infrared* atau *thermal* dapat mendeteksi panas yang dipancarkan oleh kendaraan dan dapat berfungsi dalam berbagai kondisi cuaca. Teknologi *video detection system* menggunakan kamera dan algoritma *computer vision* untuk mendeteksi kendaraan, mengukur kecepatan, dan bahkan melakukan klasifikasi otomatis jenis kendaraan dengan akurasi yang terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi *artificial intelligence*.

2.3.2 Teknologi GPS dan *Floating Car Data*

Teknologi *Global Positioning System* (GPS) dan data dari kendaraan yang bergerak (*floating car data* atau FCD) telah membuka dimensi baru dalam pengumpulan data transportasi. *Floating car data* mengacu pada informasi real-time tentang lokasi dan kecepatan kendaraan yang dikumpulkan melalui perangkat GPS yang tertanam dalam kendaraan atau aplikasi berbasis lokasi di *smartphone* pengguna (Zhu et al., 2024). Keuntungan dari FCD adalah bahwa data dikumpulkan dari sampel kendaraan yang tersebar di seluruh jaringan jalan tanpa memerlukan instalasi sensor infrastruktur yang mahal dan sulit. Dengan adanya ribuan kendaraan yang dilengkapi dengan GPS, dapat diperoleh gambaran real-time tentang kondisi lalu lintas yang sangat detail.

Data dari aplikasi navigasi seperti Google Maps, Waze, atau aplikasi transportasi online seperti Grab dan Gojek juga merupakan sumber FCD yang sangat berharga. Data dari aplikasi ini dapat memberikan informasi tentang waktu perjalanan, kecepatan rata-rata, dan pola pergerakan di berbagai ruas jalan. Akan tetapi, penggunaan FCD memiliki keterbatasan karena representativitas sampel yang tidak sempurna, mengingat tidak semua kendaraan dilengkapi dengan GPS atau pengguna aplikasi navigasi. Selain itu, masalah privasi pengguna dan keamanan data menjadi perhatian penting dalam penggunaan FCD, sehingga diperlukan protokol perlindungan data yang ketat.

2.3.3 Teknologi *Drone* dan *Remote Sensing*

Teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) atau drone telah menjadi alat yang semakin populer untuk pengumpulan data transportasi, terutama untuk survei lalu lintas dan analisis spasial. Drone dilengkapi dengan kamera beresolusi tinggi yang dapat merekam lalu lintas dari sudut pandang udara, memungkinkan analisis detail tentang trajektori kendaraan individu dan interaksi antar kendaraan (Anagnostopoulos & Kehagia, 2021). Data dari drone dapat digunakan untuk pengambilan informasi volume lalu lintas, kecepatan kendaraan, dan bahkan perilaku pengemudi dalam kondisi lalu lintas yang kompleks.

Keuntungan dari penggunaan drone adalah kemampuan untuk mencakup area yang luas dalam waktu singkat, mengakses lokasi yang sulit dijangkau dengan metode survei konvensional, dan menghasilkan data yang sangat detail dengan resolusi spasial yang

tinggi. Teknologi *remote sensing* satelit juga dapat digunakan untuk pengumpulan data transportasi dalam skala yang lebih luas, seperti analisis tata guna lahan dan identifikasi perubahan jaringan jalan. Akan tetapi, penggunaan drone menghadapi tantangan regulasi yang kompleks, masalah privasi terkait rekaman video di area publik, dan biaya operasional yang relatif tinggi untuk survei skala besar.

2.3.4 Integrasi Data Multi-Sumber dan *Big Data*

Perkembangan teknologi informasi telah memungkinkan integrasi data transportasi dari berbagai sumber yang heterogen menjadi satu sistem terpadu (*data fusion*) (Lammer & Fellendorf, 2025). Integrasi data multi-sumber mencakup data dari sensor infrastruktur seperti *inductive loop detector*, data dari *floating car data* GPS, data dari aplikasi transportasi online, data dari media sosial, dan data dari survei konvensional. Dengan mengintegrasikan berbagai sumber data ini, dapat diperoleh gambaran yang lebih komprehensif dan akurat tentang kondisi transportasi yang sebenarnya.

Konsep *big data* dalam transportasi mengacu pada volume data transportasi yang sangat besar yang dihasilkan setiap hari dari berbagai sumber. Pengelolaan dan analisis *big data* transportasi memerlukan infrastruktur teknologi informasi yang powerful, termasuk penyimpanan data (*cloud storage*), sistem basis data yang scalable, dan algoritma analisis data yang efisien (Son et al., 2025). Dengan *big data*, dapat dilakukan analisis yang lebih mendalam tentang pola transportasi yang kompleks, prediksi lalu lintas dengan

akurasi tinggi, dan identifikasi anomali atau insiden transportasi secara otomatis.

2.4 Validasi, Kalibrasi, dan Jaminan Kualitas Data

2.4.1 Proses Validasi Data Transportasi

Validasi data merupakan proses penting untuk memastikan bahwa data yang dikumpulkan adalah akurat dan representatif dari kondisi sesungguhnya di lapangan. Proses validasi data transportasi meliputi beberapa tahap, dimulai dari validasi pada saat pengumpulan data (*field validation*), validasi administratif (*administrative validation*), dan validasi logis (*logical validation*) (Zhang et al., 2024). Validasi lapangan dilakukan oleh pengumpul data untuk memastikan bahwa data yang dicatat konsisten dan masuk akal. Misalnya, pengumpul data harus memastikan bahwa jumlah kendaraan yang dicatat untuk setiap kategori jenis kendaraan konsisten dengan komposisi jenis kendaraan yang terlihat secara visual.

Validasi administratif meliputi pemeriksaan kelengkapan data, misalnya memastikan bahwa semua lajur dan periode waktu yang seharusnya dikumpulkan data benar-benar dikumpulkan. Validasi logis meliputi pemeriksaan konsistensi data dengan menggunakan berbagai kriteria logis. Misalnya, dalam data volume lalu lintas, total volume untuk setiap kategori jenis kendaraan harus sama pada setiap arah perjalanan (berdasarkan hukum konservasi

aliran). Jika ditemukan inkonsistensi, data tersebut perlu diperiksa ulang dan diperbaiki jika memungkinkan.

2.4.2 Kalibrasi dan Penyelarasan Data

Kalibrasi data merupakan proses untuk menyelaraskan data dari berbagai sumber agar konsisten dan dapat diintegrasikan. Dalam konteks data transportasi, kalibrasi meliputi penyelarasan data dari sensor yang berbeda, penyesuaian terhadap bias sampel dalam *floating car data*, dan penyesuaian terhadap perubahan musiman atau efek acara khusus. Misalnya, jika volume lalu lintas yang diukur oleh dua sensor berbeda menunjukkan perbedaan yang signifikan, perlu dilakukan investigasi untuk menentukan penyebab perbedaan tersebut dan melakukan kalibrasi jika diperlukan (Lammer & Fellendorf, 2025).

Kalibrasi data juga penting untuk mengatasi bias sampel dalam *floating car data*. Karena tidak semua kendaraan dilengkapi dengan GPS atau pengguna aplikasi navigasi, sampel kendaraan yang terwakili dalam FCD mungkin tidak representatif dari seluruh populasi kendaraan. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis untuk memahami karakteristik sampel yang terwakili dan melakukan penyesuaian (*weighting*) untuk memastikan bahwa hasil analisis representatif dari kondisi sesungguhnya.

2.4.3 Deteksi dan Penanganan Data Anomali

Data anomali atau *outlier* adalah nilai data yang sangat berbeda dari nilai-nilai lain dalam dataset dan mungkin mencerminkan kesalahan pengumpulan data, kondisi lapangan yang tidak normal, atau kesalahan dalam pengolahan data. Deteksi data

anomali sangat penting untuk memastikan kualitas dataset sebelum digunakan untuk analisis. Metode deteksi data anomali meliputi metode statistik sederhana seperti pemeriksaan nilai minimum dan maksimum, hingga metode yang lebih sophisticated seperti *isolation forest*, *local outlier factor*, dan *autoencoder* berbasis *neural network* (Zhang et al., 2024).

Setelah data anomali terdeteksi, langkah selanjutnya adalah menentukan bagaimana menangani data anomali tersebut. Pilihan penanganan meliputi menghapus data anomali jika diyakini merupakan kesalahan, mengoreksi data anomali jika penyebabnya dapat diidentifikasi, atau membiarkan data anomali tetap ada jika diyakini mencerminkan kondisi nyata yang ekstrem. Dokumentasi yang jelas tentang data anomali yang ditemukan dan bagaimana penanganannya sangat penting untuk transparansi dan dapat dipertanggungjawabkan.

2.4.4 Audit dan Monitoring Kualitas Data Berkelanjutan

Untuk memastikan bahwa data transportasi terus mempertahankan standar kualitas yang tinggi, perlu dilakukan audit dan monitoring kualitas data secara berkelanjutan (*continuous quality assurance*). Audit kualitas data meliputi pemeriksaan periodik terhadap akurasi sensor, verifikasi bahwa prosedur pengumpulan data diikuti dengan benar, dan evaluasi konsistensi data dari berbagai sumber. Monitoring berkelanjutan melibatkan penggunaan dashboard atau sistem peringatan otomatis yang dapat mengidentifikasi secara real-time jika terjadi masalah dengan

kualitas data, seperti sensor yang tidak berfungsi atau pola data yang tidak normal.

Dokumentasi lengkap dari proses audit dan monitoring kualitas data sangat penting untuk membangun kepercayaan pada kualitas data transportasi dan untuk memfasilitasi perbaikan berkelanjutan dalam sistem pengumpulan data. Organisasi yang bertanggung jawab atas pengumpulan data transportasi harus menetapkan standar kualitas yang jelas, melakukan audit berkala, dan melaporkan secara transparan tentang tingkat kualitas data yang dicapai.

2.5 Aplikasi Analitik Data dalam Perencanaan Transportasi

2.5.1 Analisis Volume dan Komposisi Lalu Lintas

Analisis volume dan komposisi lalu lintas merupakan aplikasi dasar dari data transportasi yang dikumpulkan. Analisis ini menghasilkan informasi tentang berapa banyak kendaraan yang melewati suatu ruas jalan pada periode waktu tertentu, serta komposisi jenis kendaraan yang tersusun dari berbagai kategori. Hasil analisis ini digunakan untuk mengevaluasi kapasitas jalan, merencanakan pemeliharaan jalan, mengidentifikasi ruas jalan yang memerlukan pelebaran, dan merencanakan investasi infrastruktur transportasi.

Data volume lalu lintas juga dianalisis untuk mengidentifikasi pola temporal, seperti variasi volume lalu lintas

menurut jam, hari dalam minggu, dan musim. Pola temporal ini sangat penting karena membantu dalam manajemen lalu lintas, seperti penyesuaian waktu sinyal lalu lintas atau penjadwalan operasi transportasi publik. Analisis komposisi lalu lintas memberikan wawasan tentang proporsi berbagai jenis kendaraan, informasi yang penting untuk perencanaan infrastruktur yang sesuai dengan tipe kendaraan yang mendominasi.

2.5.2 Pemodelan Transportasi dan Prediksi Permintaan

Data transportasi yang telah divalidasi dan dikalibrasi digunakan sebagai input utama dalam pengembangan model transportasi empat-tahap (*four-step transportation model*). Model transportasi ini digunakan untuk meramalkan permintaan transportasi di masa depan, mengidentifikasi kebutuhan infrastruktur baru, dan mengevaluasi dampak dari kebijakan transportasi alternatif. Setiap tahap dalam model empat-tahap menggunakan data transportasi yang berbeda: tahap pembangkitan perjalanan (*trip generation*) menggunakan data demografi dan tata guna lahan, tahap distribusi perjalanan (*trip distribution*) menggunakan data matriks OD, tahap pemilihan moda (*mode choice*) menggunakan data atribut perjalanan dan karakteristik individu, dan tahap penugasan rute (*route assignment*) menggunakan data jaringan jalan.

Dengan perkembangan teknologi *machine learning* dan *artificial intelligence*, analisis data transportasi semakin menggunakan teknik prediktif yang advanced seperti *neural networks*, *random forest*, dan *gradient boosting* untuk meningkatkan akurasi prediksi permintaan transportasi (Son et al., 2025).

2.5.3 Analisis Spasial dan Identifikasi Hotspot Masalah Transportasi

Analisis spasial menggunakan sistem informasi geografis (*Geographic Information System* atau GIS) memungkinkan identifikasi pola spasial dalam data transportasi dan lokalisasi masalah transportasi. Analisis spasial dapat mengidentifikasi ruas jalan dengan tingkat kecelakaan tinggi, lokasi kemacetan kronis, area dengan aksesibilitas transportasi rendah, dan pusat-pusat perjalanan penting. Teknik analisis spasial seperti *kernel density estimation*, *hot spot analysis*, dan *spatial clustering* dapat mengidentifikasi area dengan konsentrasi tinggi dari suatu masalah transportasi.

Hasil analisis spasial ini sangat membantu dalam menargetkan intervensi transportasi secara lebih efisien dan mengalokasikan sumber daya yang terbatas ke area yang paling membutuhkan. Visualisasi data transportasi dalam format peta tematik juga memfasilitasi komunikasi hasil analisis kepada stakeholder yang kurang familiar dengan metode analisis statistik yang kompleks.

2.5.4 Monitoring Kinerja dan Evaluasi Dampak Kebijakan

Data transportasi yang dikumpulkan secara berkelanjutan dapat digunakan untuk monitoring kinerja sistem transportasi dan evaluasi dampak dari kebijakan atau proyek infrastruktur yang telah diimplementasikan. Indikator kinerja transportasi (*key performance indicators* atau KPI) seperti tingkat kemacetan, waktu perjalanan rata-rata, kapasitas jalan yang digunakan, dan tingkat kecelakaan

dapat dimonitor secara real-time menggunakan data transportasi yang terintegrasi. Monitoring berkelanjutan ini memungkinkan identifikasi cepat jika ada penurunan kinerja dan memfasilitasi pengambilan tindakan korektif yang tepat waktu.

Evaluasi dampak kebijakan dilakukan dengan membandingkan indikator kinerja sebelum dan sesudah implementasi kebijakan, sambil mempertimbangkan faktor-faktor eksternal yang dapat mempengaruhi hasil. Metode evaluasi dapat menggunakan analisis *before-after*, analisis perbandingan dengan area kontrol, atau analisis regresi yang lebih sophisticated untuk memisahkan efek kebijakan dari efek faktor eksternal lainnya.

Bab 3: Arus Lalu Lintas dan Karakteristik Jalan

3.1 Definisi dan Parameter Dasar Arus Lalu Lintas

3.1.1 Pengertian arus lalu lintas dan komponen dasarnya

Arus lalu lintas (*traffic flow*) adalah pergerakan kendaraan yang melewati suatu lokasi atau ruas jalan tertentu dalam periode waktu tertentu. Arus lalu lintas merupakan hasil dari interaksi kompleks antara kendaraan, pengemudi, dan infrastruktur jalan yang menciptakan pola gerakan dinamis. Pemahaman tentang arus lalu lintas menjadi fundamental dalam perencanaan dan operasi transportasi jalan raya modern. Arus lalu lintas dapat dikarakterisasi melalui tiga parameter utama yang saling terkait yaitu volume (*volume*), kecepatan (*speed*), dan kepadatan (*density*). Parameter-parameter ini bersama-sama menggambarkan kondisi operasional suatu ruas jalan dan memberikan indikasi tentang tingkat pelayanan yang disediakan kepada pengguna jalan. Volume lalu lintas mengukur jumlah kendaraan yang melewati suatu titik atau ruas jalan per satuan waktu, biasanya dinyatakan dalam satuan kendaraan per jam (*vehicles per hour*) atau satuan mobil penumpang per jam (*passenger car units per hour/pcu/hour*). Kecepatan mengacu pada

laju perjalanan kendaraan, sementara kepadatan menunjukkan jumlah kendaraan per satuan panjang jalan.

3.1.2 Volume lalu lintas dan pengukurannya

Volume lalu lintas merepresentasikan jumlah total kendaraan yang melintasi suatu titik atau penampang melintang jalan selama periode waktu tertentu. Perhitungan volume lalu lintas dapat dilakukan untuk berbagai interval waktu mulai dari 15 menit, 1 jam, hingga 24 jam tergantung tujuan analisis. Satuan standar yang digunakan adalah kendaraan per jam atau satuan mobil penumpang (*pcu*) yang menormalisasi berbagai jenis kendaraan ke dalam unit yang dapat dibandingkan. Metode pengukuran volume lalu lintas dapat dilakukan melalui survei lapangan menggunakan pencatat lalu lintas manual, video counter otomatis, atau sensor loop yang tertanam di perkerasan jalan. Data volume lalu lintas yang akurat sangat penting untuk berbagai analisis seperti penentuan tingkat pelayanan, proyeksi pertumbuhan lalu lintas, dan perencanaan pengembangan infrastruktur (Pratama et al., 2025). Volume lalu lintas juga bervariasi menurut waktu, dengan pola harian yang menunjukkan *peak hour* (jam-jam sibuk) dan *off-peak hour* (jam-jam sepi). Pemahaman tentang variasi temporal volume lalu lintas memungkinkan manajemen lalu lintas yang lebih efisien dan optimalisasi penggunaan kapasitas jalan.

3.1.3 Kecepatan lalu lintas: pengertian dan jenis-jenisnya

Kecepatan lalu lintas (*traffic speed*) didefinisikan sebagai laju perjalanan kendaraan yang dapat diukur melalui berbagai metode. Dalam analisis arus lalu lintas, terdapat beberapa jenis

kecepatan yang relevan: kecepatan rata-rata ruang (*space-mean speed*) yang merepresentasikan rata-rata kecepatan semua kendaraan dalam segmen jalan tertentu, kecepatan rata-rata waktu (*time-mean speed*) yang merupakan rata-rata aritmetik kecepatan kendaraan yang diamati pada satu titik, dan kecepatan aliran bebas (*free flow speed*) yang merupakan kecepatan rata-rata kendaraan ketika tidak terhambat oleh kendaraan lain di depannya. Kecepatan aliran bebas sangat berguna untuk menentukan kapasitas jalan dan mengidentifikasi kondisi di mana mulai terjadi kemacetan. Pengukuran kecepatan lalu lintas dapat dilakukan menggunakan kamera video dengan analisis frame-by-frame, radar speed gun, atau sensor yang tertanam di jalan (Hulchak et al., 2025). Kecepatan lalu lintas sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor termasuk kondisi geometri jalan, kualitas perkerasan, komposisi kendaraan (*vehicle mix*), dan kondisi cuaca yang sedang berlangsung.

3.1.4 Kepadatan lalu lintas dan hubungannya dengan parameter lain

Kepadatan lalu lintas (*traffic density*) mengukur jumlah kendaraan per satuan panjang jalan, biasanya dinyatakan dalam satuan kendaraan per kilometer (*vehicles per km*) atau satuan mobil penumpang per kilometer (*pcu/km*). Kepadatan merepresentasikan ruang yang dihuni oleh kendaraan pada suatu ruas jalan pada waktu tertentu dan tidak dapat diukur langsung seperti volume atau kecepatan, tetapi dihitung dari hubungan fundamental antara volume, kecepatan, dan kepadatan: $Q = V \times D$, di mana Q adalah volume, V adalah kecepatan rata-rata ruang, dan D adalah

kepadatan. Kepadatan yang tinggi mengindikasikan bahwa jalan sedang dalam kondisi jenuh atau mendekati kapasitasnya. Sebagai kepadatan meningkat, kecepatan biasanya menurun secara sistematis, mencerminkan pengaruh interaksi antar kendaraan dalam mendorong satu sama lain. Hubungan antara kepadatan dan kecepatan dapat dimodelkan menggunakan model matematika seperti model Greenshield, Greenberg, atau Underwood yang masing-masing mengasumsikan bentuk hubungan yang berbeda (Rohani & Hasyim, 2023).

3.2 Model Hubungan Volume-Kecepatan-Kepadatan

3.2.1 Model Greenshield dan karakteristiknya

Model Greenshield adalah model paling sederhana yang menjelaskan hubungan antara kecepatan dan kepadatan dengan asumsi hubungan linear. Dalam model ini, kecepatan menurun secara linear dengan meningkatnya kepadatan, diekspresikan melalui persamaan: $u = u_f - (u_f / k_j) \times k$, di mana u adalah kecepatan rata-rata, u_f adalah kecepatan aliran bebas, k adalah kepadatan, dan k_j adalah kepadatan pada saat kemacetan total (*jam density*). Model Greenshield kemudian dapat digunakan untuk mendapatkan hubungan antara volume dan kepadatan serta volume dan kecepatan. Hubungan volume-kepadatan berbentuk parabola dengan puncak kurva menunjukkan volume maksimum (*capacity*) pada kepadatan yang optimum. Keuntungan model Greenshield

adalah kesederhanaannya dan mudah dipahami, namun kelemahannya adalah asumsi linear yang tidak selalu akurat dalam menggambarkan realitas kondisi lalu lintas, terutama pada kondisi-kondisi ekstrem (Akbaridin et al., 2023). Model ini telah luas diterapkan dalam berbagai studi untuk menganalisis karakteristik arus lalu lintas di berbagai negara termasuk Indonesia.

3.2.2 Model Greenberg dan model eksponensial lainnya

Model Greenberg mengusulkan hubungan logaritmik antara kecepatan dan kepadatan, diekspresikan melalui persamaan: $u = u_m \times \ln(k_j/k)$, di mana u_m adalah kecepatan pada kepadatan optimum. Model ini berasumsi bahwa saat kepadatan meningkat, kecepatan menurun secara eksponensial daripada linear seperti pada model Greenshield. Penelitian menunjukkan bahwa model Greenberg sering memberikan nilai koefisien determinasi (R^2) yang lebih tinggi dibandingkan Greenshield untuk kondisi kemacetan yang lebih parah (Naibaho et al., 2021). Model Greenberg juga menghasilkan hubungan volume-kepadatan yang parabola tetapi dengan bentuk kurva yang berbeda dari Greenshield. Model Underwood yang juga berbentuk eksponensial, $u = u_f \times \exp(-k / k_{opt})$, menawarkan alternatif lain dengan karakteristik yang mirip Greenberg. Pemilihan model yang tepat untuk kondisi lalu lintas tertentu memerlukan analisis data lapangan dan evaluasi statistik yang cermat.

3.2.3 Diagram fundamental lalu lintas (*Macroscopic Fundamental Diagram*)

Diagram fundamental lalu lintas (*Macroscopic Fundamental Diagram/MFD*) adalah representasi grafis yang menunjukkan

hubungan antara ketiga parameter arus lalu lintas (volume, kecepatan, kepadatan). MFD memberikan gambaran komprehensif tentang operasi jalan dan dapat digunakan untuk identifikasi titik-titik kritis dalam jaringan jalan. Kurva MFD menunjukkan bagaimana sistem jalan beroperasi di berbagai kondisi kemacetan, dari aliran bebas hingga kondisi saturasi penuh. Analisis MFD sangat berguna untuk evaluasi strategi manajemen lalu lintas regional dan identifikasi kondisi-kondisi di mana jalan mencapai kapasitas maksimalnya (Lu et al., 2020). MFD juga dapat digunakan untuk merencanakan batas akumulasi kendaraan (*occupancy*) yang dapat diterima dalam suatu zona atau kawasan urban untuk mempertahankan mobilitas yang akseptabel.

3.2.4 Aplikasi model pada berbagai kondisi lalu lintas

Penerapan model hubungan volume-kecepatan-kepadatan harus mempertimbangkan kondisi spesifik lokasi yang dianalisis. Di jalan arteri urban dengan banyak gangguan samping (*side friction*), karakteristik arus lalu lintas akan berbeda dengan jalan tol yang terisolasi dari aktivitas samping. Komposisi kendaraan juga mempengaruhi parameter arus lalu lintas; jalan dengan proporsi kendaraan berat (*heavy vehicles*) yang tinggi akan menunjukkan kapasitas yang lebih rendah dibandingkan jalan dengan dominasi kendaraan ringan. Penelitian pada berbagai lokasi menunjukkan bahwa model Greenshield, Greenberg, atau Underwood dapat dipilih berdasarkan data lapangan yang dikumpulkan melalui survei volume dan kecepatan yang sistematis (Nugroho & Puspito, 2025).

Pemilihan model yang tepat memastikan akurasi dalam perhitungan kapasitas jalan dan estimasi tingkat pelayanan.

3.3 Kapasitas Jalan dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhinya

3.3.1 Definisi kapasitas jalan dan nilai-nilai tipikal

Kapasitas jalan (*road capacity*) didefinisikan sebagai jumlah maksimum kendaraan yang dapat melewati suatu titik atau penampang melintang jalan per satuan waktu, biasanya per jam, di bawah kondisi lalu lintas, geometri jalan, dan lingkungan yang berlaku. Kapasitas jalan merupakan ukuran fundamental dari kemampuan infrastruktur jalan untuk melayani arus lalu lintas. Nilai kapasitas sangat bervariasi tergantung pada karakteristik jalan, mulai dari kapasitas jalan perkotaan dua arah tanpa pemisah dengan kapasitas sekitar 1000-1200 *pcu/hour* per lajur, hingga jalan tol enam lajur yang dapat memiliki kapasitas total lebih dari 8000 *pcu/hour*. Nilai tipikal kapasitas pada berbagai kondisi telah dikembangkan dalam manual kapasitas seperti *Highway Capacity Manual (HCM)* atau panduan kapasitas nasional setiap negara. Namun, perlu diperhatikan bahwa nilai-nilai standar ini harus disesuaikan dengan kondisi lokal yang spesifik karena karakteristik pengemudi, komposisi lalu lintas, dan kondisi infrastruktur dapat berbeda signifikan antar negara atau bahkan antar kota (Korbuakaew et al., 2025).

3.3.2 Pengaruh geometri jalan terhadap kapasitas

Karakteristik geometri jalan seperti lebar lajur, bahu jalan (*shoulder*), keberadaan pembatas (*median*), serta lengkung dan kemiringan jalan memiliki pengaruh signifikan terhadap kapasitas. Lajur yang lebih lebar memungkinkan kendaraan untuk bergerak dengan lebih nyaman dan aman, sehingga mendukung kapasitas yang lebih tinggi. Keberadaan bahu jalan yang cukup lebar memungkinkan pengurangan gangguan samping dan memberikan ruang bagi kendaraan yang mogok. Geometri jalan yang melibatkan kurva tajam atau tanjakan curam akan mengurangi kecepatan operasi kendaraan, terutama kendaraan berat, sehingga menurunkan kapasitas jalan. Analisis hubungan antara karakteristik geometri dan kapasitas memerlukan pengumpulan data lapangan dan pengembangan model regresi yang menghubungkan parameter geometri dengan kapasitas terukur (Drliiak et al., 2024). Upaya peningkatan kapasitas jalan dapat dilakukan melalui perbaikan geometri jalan sambil mempertahankan atau mengurangi biaya lingkungan dan sosial dari proyek perbaikan tersebut.

3.3.3 Pengaruh komposisi kendaraan dan gangguan samping

Komposisi lalu lintas yang terdiri dari berbagai jenis kendaraan (mobil penumpang, bus, truk, sepeda motor) mempengaruhi karakteristik arus lalu lintas karena perbedaan dalam akselerasi, dimensi, dan perilaku pengemudi. Kendaraan berat memerlukan ruang yang lebih besar dan memiliki akselerasi yang lebih lambat, sehingga kehadiran mereka dalam lalu lintas mengurangi kapasitas jalan. Gangguan samping yang mencakup

aktivitas parkir, pedagang di tepi jalan, aktivitas pejalan kaki, dan kendaraan tidak bermotor juga mengurangi efektivitas lajur dan meningkatkan ketidakstabilan arus lalu lintas, terutama di jalan-jalan perkotaan. Penelitian menunjukkan bahwa gangguan samping dapat mengurangi kapasitas jalan hingga 15-30% tergantung pada intensitasnya (Pratama et al., 2025). Manajemen gangguan samping melalui zonasi parkir, pengaturan aktivitas perdagangan, dan kontrol pergerakan pejalan kaki dapat meningkatkan kapasitas efektif tanpa memerlukan investasi infrastruktur yang besar.

3.3.4 Tingkat pelayanan jalan dan indeks aksesibilitas

Tingkat pelayanan (*level of service/LOS*) adalah ukuran kualitatif yang menggambarkan kondisi operasional arus lalu lintas dan dampaknya terhadap pengguna jalan. LOS umumnya diklasifikasikan dari A hingga F, dengan LOS A menunjukkan kondisi aliran bebas yang sempurna dan LOS F menunjukkan kemacetan dengan aliran yang berhenti-henti. Indikator utama untuk menentukan LOS adalah kecepatan operasi rata-rata, rasio volume terhadap kapasitas (*volume-to-capacity ratio/V/C*), dan densitas kendaraan. Jalan dengan LOS C atau lebih baik umumnya dianggap dapat memberikan pelayanan yang memuaskan kepada pengguna, sementara LOS D atau lebih buruk mengindikasikan perlunya tindakan manajemen atau perbaikan infrastruktur. Evaluasi tingkat pelayanan yang komprehensif mempertimbangkan tidak hanya kondisi fisik jalan tetapi juga faktor-faktor seperti keselamatan, kenyamanan pengemudi, dan aksesibilitas (Wibisono & Hernanda, 2025).

3.4 Karakteristik Jalan dan Infrastruktur

3.4.1 Klasifikasi jalan berdasarkan fungsi dan geometri

Jalan dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai kriteria, termasuk fungsi, volume lalu lintas yang dilayani, dan karakteristik geometri. Klasifikasi fungsional membagi jalan menjadi arteri, kolektor, dan lokal, di mana arteri melayani perjalanan jarak jauh dengan volume tinggi, kolektor melayani perjalanan tingkat menengah dengan volume sedang, dan lokal melayani perjalanan jarak pendek dengan volume rendah. Klasifikasi geometri mempertimbangkan lebar lajur, jumlah lajur, kehadiran median, dan karakteristik perpotongan jalan. Jalan tol (*expressway* atau *toll road*) adalah jenis khusus arteri dengan kontrol akses penuh yang memungkinkan operasi dengan kecepatan tinggi dan kapasitas besar. Klasifikasi yang tepat sangat penting untuk perencanaan dan desain yang sesuai, serta untuk memperkirakan nilai-nilai kapasitas dan tingkat pelayanan yang realistis (Urokov et al., 2025). Setiap klasifikasi jalan memiliki standar geometri dan karakteristik operasional yang telah ditetapkan dalam manual teknis transportasi untuk memastikan konsistensi dalam perencanaan dan desain.

3.4.2 Karakteristik perkerasan jalan dan pengaruhnya terhadap operasi

Jenis perkerasan jalan (*pavement type*) yang digunakan mempengaruhi kualitas permukaan jalan, daya cengkeram kendaraan, kenyamanan berkendara, dan biaya pemeliharaan. Perkerasan aspal (*asphalt pavement*) adalah jenis yang paling umum

digunakan, sementara perkerasan beton (*concrete pavement*) digunakan untuk jalan-jalan dengan volume lalu lintas sangat tinggi. Kondisi perkerasan jalan yang baik dengan permukaan halus, kering, dan bersih mendukung kecepatan operasi yang lebih tinggi dan operasi yang lebih aman. Sebaliknya, perkerasan yang rusak dengan lubang (*pothole*), retak, atau permukaan kasar akan mengurangi kecepatan operasi dan meningkatkan risiko kecelakaan (Braunfelds et al., 2021). Pemeliharaan perkerasan yang rutin dan perbaikan yang tepat waktu sangat penting untuk mempertahankan kapasitas dan keselamatan jalan. Teknologi monitoring perkerasan yang memanfaatkan sensor dan analisis gambar komputer semakin banyak digunakan untuk deteksi kerusakan dan perencanaan pemeliharaan yang lebih efisien.

3.4.3 Sistem penandaan dan pengendalian lalu lintas

Sistem penandaan jalan (*road marking*) dan rambu lalu lintas (*traffic signs*) merupakan komponen penting dari infrastruktur jalan yang memberikan informasi kepada pengemudi tentang aturan lalu lintas, kondisi jalan, dan petunjuk arah. Penanda garis jalan yang jelas membantu pengemudi mempertahankan posisi kendaraan di lajur, terutama pada kondisi visibilitas rendah atau cuaca buruk. Rambu lalu lintas yang tepat dan mudah dipahami mengurangi waktu respons pengemudi dan mendukung arus lalu lintas yang lebih lancar. Sistem pengendalian lalu lintas menggunakan sinyal lalu lintas (*traffic signals*) yang dapat diatur secara tetap (*fixed-time*), responsif (*actuated*), atau adaptif (*adaptive*) bergantung pada karakteristik lalu lintas lokal. Sinyal lalu lintas adaptif dapat

menyesuaikan waktu hijau berdasarkan kondisi lalu lintas real-time, memungkinkan penggunaan kapasitas jalan yang lebih efisien dan pengurangan kemacetan (Shepelev et al., 2025). Investasi dalam sistem pengendalian lalu lintas yang canggih, termasuk sistem manajemen lalu lintas terintegrasi, dapat menghasilkan peningkatan signifikan dalam mobilitas dan keselamatan lalu lintas.

3.4.4 Fasilitas pendukung dan keselamatan jalan

Fasilitas pendukung seperti trotoar (*sidewalk*), jalur sepeda (*bicycle lane*), tempat pemberhentian bus (*bus stop*), dan area parkir dirancang untuk melayani berbagai moda transportasi dan pengguna jalan. Keberadaan trotoar yang lebar dan aman mendorong aktivitas pejalan kaki, sementara jalur sepeda yang terpisah meningkatkan keselamatan pesepeda. Penempatan tempat pemberhentian bus yang strategis mengurangi gangguan samping dan memfasilitasi perpindahan moda (*mode transfer*) yang lancar. Fasilitas keselamatan seperti pagar pembatas (*guardrail*), area penyangga (*buffer zone*), dan pencahayaan jalan berkontribusi pada pengurangan kecelakaan dan meningkatkan persepsi keselamatan pengguna jalan. Desain geometri jalan yang inklusif dan ramah terhadap semua pengguna, termasuk kelompok rentan seperti anak-anak dan lansia, mencerminkan pendekatan holistik terhadap perencanaan dan operasi jalan raya modern (Safyari et al., 2024). Investasi dalam fasilitas pendukung berkualitas tinggi tidak hanya meningkatkan keselamatan tetapi juga mendukung mobilitas berkelanjutan dan perubahan perilaku pengguna jalan ke moda yang lebih ramah lingkungan.

Bab 4: Kapasitas Jalan dan Tingkat Pelayanan

4.1 Konsep Dasar Kapasitas Jalan

4.1.1 Pengertian Kapasitas Jalan

Kapasitas jalan (*road capacity*) didefinisikan sebagai arus lalu lintas maksimum yang dapat melewati suatu ruas jalan pada kondisi tertentu, dinyatakan dalam satuan kendaraan per jam atau satuan mobil penumpang (SMP) per jam (Siagian et al., 2025). Kapasitas jalan merupakan parameter fundamental dalam perencanaan dan operasi transportasi jalan, karena menentukan kemampuan suatu ruas jalan untuk menampung volume lalu lintas yang ada. Konsep kapasitas ini tidak bersifat absolut, melainkan tergantung pada berbagai faktor fisik, operasional, dan lingkungan yang mempengaruhi aliran kendaraan melalui ruas jalan tersebut.

Kapasitas jalan dipengaruhi oleh karakteristik geometrik jalan seperti lebar jalur, jumlah lajur, dan kelandaian, serta kondisi lalu lintas seperti komposisi kendaraan dan kecepatan arus bebas (Fery et al., 2025). Pemahaman yang mendalam tentang kapasitas jalan sangat penting untuk insinyur transportasi dalam mengevaluasi kinerja jalan, merencanakan perbaikan infrastruktur, dan mengalokasikan investasi transportasi secara efisien.

4.1.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kapasitas Jalan

Kapasitas jalan dipengaruhi oleh berbagai faktor yang dapat dikelompokkan menjadi faktor geometrik dan faktor operasional. Faktor geometrik mencakup lebar jalur lalu lintas, jumlah lajur, median, dan bahu jalan yang mempengaruhi kemudahan pergerakan kendaraan (Wibisono & Hernanda, 2025). Semakin lebar jalur lalu lintas dan semakin banyak jumlah lajur, umumnya kapasitas jalan akan meningkat, meskipun dengan pola yang tidak linear karena meningkatnya aktivitas perpindahan lajur (*lane changing*).

Faktor operasional meliputi komposisi lalu lintas (persentase kendaraan berat, sepeda motor), kecepatan arus bebas, kondisi cuaca, dan karakteristik pengemudi (Bondarenko et al., 2024). Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan persentase kendaraan berat dalam arus lalu lintas akan mengurangi kapasitas jalan karena memerlukan ruang dan waktu yang lebih besar untuk bergerak. Komposisi lalu lintas yang heterogen, seperti kondisi di negara berkembang, memerlukan pendekatan khusus dalam penentuan kapasitas jalan.

4.1.3 Metode Penentuan Kapasitas Jalan

Penentuan kapasitas jalan dapat dilakukan dengan menggunakan pedoman kapasitas yang telah diterbitkan oleh berbagai negara, seperti Highway Capacity Manual (HCM) di Amerika Serikat dan Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) (Siagian et al., 2025). Pedoman-pedoman ini memberikan metode sistematis untuk menghitung kapasitas dasar (*basic capacity*) dan

faktor-faktor penyesuai (*adjustment factors*) yang merefleksikan kondisi spesifik setempat.

Proses penentuan kapasitas melibatkan pengumpulan data lapangan, identifikasi kondisi ideal, dan penerapan faktor-faktor penyesuai. Data yang diperlukan mencakup volume lalu lintas, kecepatan arus bebas, komposisi kendaraan, dan karakteristik geometrik jalan. Hasil perhitungan kapasitas kemudian digunakan untuk evaluasi tingkat kejenuhan (*degree of saturation*) dan penentuan tingkat pelayanan jalan.

4.1.4 Variasi Kapasitas Menurut Kondisi Jalan

Kapasitas jalan bervariasi menurut kondisi dan tipe jalan. Untuk jalan raya dua lajur dua arah (*two-lane highway*), kapasitas per lajur umumnya lebih rendah dibandingkan jalan berlajur banyak karena adanya pengaruh kendaraan dari arah berlawanan (Hadi et al., 2025). Untuk jalan perkotaan dengan persimpangan bersinyal, kapasitas ditentukan oleh kapasitas setiap kelompok lajur pada simpangan, yang dipengaruhi oleh waktu hijau sinyal dan pola kedatangan kendaraan.

Penelitian menunjukkan bahwa kapasitas per lajur menurun seiring meningkatnya jumlah lajur pada jalan yang sama, fenomena yang dikenal sebagai *marginal capacity decrease* (Yang & Zhang, 2007). Hal ini disebabkan oleh peningkatan aktivitas perpindahan lajur dan interaksi yang lebih kompleks antar kendaraan pada jalan dengan banyak lajur.

4.2 Tingkat Pelayanan Jalan

4.2.1 Definisi dan Konsep Tingkat Pelayanan

Tingkat Pelayanan (*Level of Service*, LOS) adalah ukuran kualitatif yang menggambarkan kondisi operasional aliran lalu lintas dan persepsi pengguna jalan terhadap kualitas layanan (Siagian et al., 2025). Tingkat pelayanan diukur dari aspek-aspek seperti kecepatan perjalanan, waktu tempuh, gangguan dalam aliran lalu lintas, dan kenyamanan berkendara. Sistem klasifikasi tingkat pelayanan menggunakan huruf-huruf dari A hingga F, di mana LOS A mewakili kondisi ideal dengan aliran lalu lintas lancar dan arus bebas, sementara LOS F mewakili kondisi jenuh dengan kemacetan berat.

Konsep tingkat pelayanan ini sangat penting dalam perencanaan transportasi karena memberikan gambaran kualitatif tentang seberapa baik jalan melayani lalu lintas yang melewatinya. Tingkat pelayanan yang baik (A-C) menunjukkan bahwa jalan masih memiliki kapasitas yang cukup, sementara tingkat pelayanan yang buruk (D-F) mengindikasikan perlunya tindakan perbaikan atau peningkatan kapasitas.

4.2.2 Kriteria Tingkat Pelayanan untuk Jalan Luar Kota

Untuk jalan luar kota (*rural highway*), kriteria tingkat pelayanan umumnya didasarkan pada kecepatan arus bebas dan derajat kejenuhan (Hadi et al., 2025). LOS A ditandai dengan kecepatan mendekati kecepatan arus bebas dengan hampir tidak ada hambatan. LOS B mencerminkan pengaruh lalu lintas mulai terasa

namun kecepatan masih tinggi. LOS C menunjukkan aliran stabil dengan kecepatan mulai menurun akibat pengaruh lalu lintas. LOS D karakteristik aliran tidak stabil dengan kecepatan yang terus menurun. LOS E adalah kondisi aliran pada kapasitas dengan kecepatan sangat rendah. LOS F adalah kondisi kemacetan di mana volume melebihi kapasitas.

Untuk jalan dua lajur dua arah, kriteria tingkat pelayanan juga mempertimbangkan persentase waktu mengikuti (*percent time-spent-following*), yang menggambarkan fraksi waktu di mana pengemudi tidak dapat melewati kendaraan di depannya (Luttinen, 2001). Parameter ini mencerminkan kebebasan bergerak dan tingkat frustrasi pengemudi dalam kondisi lalu lintas heterogen.

4.2.3 Kriteria Tingkat Pelayanan untuk Jalan Perkotaan

Untuk jalan perkotaan, kriteria tingkat pelayanan difokuskan pada waktu tempuh atau waktu menunggu (*control delay*) yang dialami pengguna jalan (Fery et al., 2025). Waktu menunggu ini mencakup penundaan akibat sinyal lalu lintas, konflik dengan lalu lintas lain, dan gangguan dari aktivitas samping jalan. Semakin tinggi nilai delay, semakin rendah tingkat pelayanan yang disediakan oleh ruas jalan.

Untuk simpang bersinyal, tingkat pelayanan ditentukan oleh hubungan antara volume lalu lintas dan kapasitas simpang, yang dipengaruhi oleh waktu siklus, waktu hijau setiap fase, dan arus jenuh. Penelitian menunjukkan bahwa pengoptimalan waktu sinyal dapat secara signifikan meningkatkan tingkat pelayanan simpang

bersinyal, bahkan pada kondisi lalu lintas yang padat (Saldivar-Carranza et al., 2022).

4.2.4 Aplikasi Tingkat Pelayanan dalam Perencanaan

Tingkat pelayanan digunakan dalam berbagai aplikasi perencanaan transportasi. Dalam tahap perencanaan jangka panjang, tingkat pelayanan target ditetapkan sebagai standar kinerja yang ingin dicapai oleh suatu ruas jalan atau simpang. Target LOS ini kemudian digunakan untuk menentukan kapasitas yang diperlukan dan ukuran geometrik jalan yang harus disediakan untuk melayani lalu lintas pada tahun-tahun mendatang (Siagian et al., 2025).

Dalam operasi harian, analisis tingkat pelayanan membantu identifikasi lokasi-lokasi dengan kinerja buruk yang memerlukan intervensi segera. Dengan demikian, tingkat pelayanan berfungsi sebagai alat untuk monitoring dan evaluasi kinerja sistem transportasi secara berkala.

4.3 Analisis Tingkat Kejenuhan

4.3.1 Konsep Derajat Kejenuhan

Derajat kejenuhan (*degree of saturation*) atau rasio volume kapasitas (*volume-to-capacity ratio*, V/C ratio) adalah perbandingan antara volume lalu lintas yang ada dengan kapasitas jalan, dinyatakan dalam bentuk desimal atau persentase (Afiah & Almakassari, 2025). Nilai derajat kejenuhan 1.0 atau 100% menunjukkan bahwa volume lalu lintas tepat sama dengan kapasitas

jalan, sedangkan nilai lebih dari 1.0 menunjukkan kondisi jenuh di mana volume melebihi kapasitas.

Derajat kejenuhan merupakan indikator penting untuk menilai kinerja ruas jalan karena memiliki hubungan langsung dengan tingkat pelayanan. Umumnya, derajat kejenuhan yang baik untuk operasi stabil adalah di bawah 0.75-0.85, tergantung pada tipe jalan dan kondisi lokal. Nilai di bawah ambang batas ini menunjukkan bahwa jalan masih memiliki kapasitas cadangan untuk menampung fluktuasi volume lalu lintas.

4.3.2 Hubungan antara Derajat Kejenuhan dan Tingkat Pelayanan

Hubungan antara derajat kejenuhan dan tingkat pelayanan tidak selalu linear, tergantung pada karakteristik ruas jalan dan pola lalu lintas (Wibisono & Hernanda, 2025). Untuk jalan dua lajur dua arah, tingkat pelayanan dapat menurun secara tiba-tiba ketika derajat kejenuhan mencapai nilai kritis karena pengaruh kendaraan dari arah berlawanan. Untuk jalan berlajur banyak, penurunan tingkat pelayanan umumnya lebih gradual seiring peningkatan derajat kejenuhan.

Penelitian menunjukkan bahwa pada derajat kejenuhan di atas 0.85, aliran lalu lintas menjadi tidak stabil dan rentan terhadap gangguan yang dapat menyebabkan kemacetan (Fery et al., 2025). Oleh karena itu, dalam perencanaan kapasitas, target derajat kejenuhan ditetapkan secara konservatif untuk menjaga stabilitas aliran lalu lintas.

4.3.3 Metode Perhitungan Derajat Kejenuhan

Perhitungan derajat kejenuhan secara umum mengikuti formula: $V/C = Q/C$, di mana Q adalah volume lalu lintas pada periode puncak (pcu/jam) dan C adalah kapasitas ruas jalan (pcu/jam) (Assyifa & Tjendani, 2025). Volume diperoleh dari survei lalu lintas lapangan, sementara kapasitas dihitung menggunakan metode yang direkomendasikan oleh pedoman nasional atau internasional.

Untuk mendapatkan hasil yang akurat, survei volume lalu lintas sebaiknya dilakukan minimal selama 24 jam atau setidaknya mencakup periode puncak pagi, siang, dan sore. Komposisi lalu lintas yang diperoleh dari survei juga harus dicatat karena digunakan untuk konversi menjadi satuan mobil penumpang (SMP) dengan faktor konversi yang tepat.

4.3.4 Interpretasi dan Aplikasi Hasil Analisis Kejenuhan

Hasil analisis derajat kejenuhan diinterpretasikan sebagai indikator kondisi operasional ruas jalan. Nilai derajat kejenuhan yang rendah ($< 0,50$) menunjukkan bahwa jalan sangat jarang digunakan dan terdapat peluang untuk meningkatkan volume lalu lintas tanpa degradasi kinerja. Nilai derajat kejenuhan sedang ($0,50-0,75$) menunjukkan aliran yang stabil dengan kapasitas cadangan yang cukup. Nilai derajat kejenuhan tinggi ($0,75-1,00$) menunjukkan aliran yang mulai mengalami gangguan dan rawan terhadap kemacetan (Afiah & Almakassari, 2025).

Untuk keperluan perencanaan, hasil analisis kejenuhan digunakan untuk menentukan tindakan yang diperlukan. Jika derajat

kejenuhan sudah melampaui standar yang ditetapkan, dapat dilakukan peningkatan kapasitas melalui perbaikan geometrik jalan, optimasi sinyal lalu lintas, atau manajemen lalu lintas yang lebih baik.

4.4 Kecepatan dan Waktu Tempuh

4.4.1 Jenis-Jenis Kecepatan pada Jalan Raya

Dalam analisis lalu lintas, dikenal beberapa jenis kecepatan yang memiliki makna berbeda (Siagian et al., 2025). Kecepatan arus bebas (*free-flow speed*) adalah kecepatan rata-rata kendaraan ketika lalu lintas sangat ringan dan pengemudi dapat memilih kecepatan sesuai keinginan mereka. Kecepatan operasional (*operating speed*) adalah kecepatan aktual yang dihasilkan dari pengamatan lapangan pada kondisi lalu lintas tertentu. Kecepatan perjalanan (*travel speed*) mencakup waktu henti (berhenti pada persimpangan atau hambatan) dan bukan hanya waktu perjalanan aktif di jalan.

Kecepatan arus bebas dipengaruhi oleh karakteristik geometrik jalan seperti lebar jalur dan kelandaian, serta batasan hukum kecepatan maksimum. Pengurangan kecepatan dari nilai arus bebas menunjukkan pengaruh lalu lintas terhadap kecepatan perjalanan, yang merupakan indikasi penurunan tingkat pelayanan jalan.

4.4.2 Waktu Tempuh dan Penundaan

Waktu tempuh (*travel time*) adalah waktu yang diperlukan untuk melintasi suatu ruas jalan, dihitung dari jarak dibagi kecepatan

rata-rata. Penundaan (*delay*) adalah selisih antara waktu tempuh aktual dan waktu tempuh minimum yang seharusnya dicapai pada kecepatan bebas (Fery et al., 2025). Penundaan dapat terjadi akibat berbagai faktor seperti sinyal lalu lintas, konflik dengan kendaraan lain, dan hambatan samping jalan.

Untuk ruas jalan perkotaan dengan simpang bersinyal, penundaan ditentukan terutama oleh waktu menunggu di sinyal lalu lintas yang dikenal sebagai *control delay*. Penundaan ini bervariasi dengan waktu siklus sinyal, fase, dan volume lalu lintas yang ada di setiap pendekatan simpang.

4.4.3 Pengukuran Kecepatan dan Waktu Tempuh Lapangan

Pengukuran kecepatan dan waktu tempuh lapangan dapat dilakukan dengan berbagai metode, mulai dari metode manual hingga menggunakan teknologi modern seperti GPS dan sensor lalu lintas (Saldivar-Carranza et al., 2022). Metode spot speed melibatkan pengukuran kecepatan kendaraan pada lokasi tertentu, sementara metode travel time melibatkan pengukuran waktu yang diperlukan untuk melintasi ruas jalan tertentu menggunakan kendaraan uji atau probe vehicles.

Penggunaan data probe dari kendaraan yang dilengkapi dengan GPS (seperti aplikasi pemetaan dan ride-sharing) memberikan informasi real-time tentang kondisi lalu lintas dan waktu tempuh, memungkinkan monitoring kontinyu terhadap kinerja jalan. Data-data ini sangat berharga untuk analisis tingkat pelayanan dan identifikasi lokasi dengan masalah kemacetan.

4.4.4 Hubungan Kecepatan dengan Kapasitas dan Tingkat Pelayanan

Kecepatan memiliki hubungan erat dengan kapasitas dan tingkat pelayanan jalan. Pada volume lalu lintas yang rendah, kecepatan mendekati kecepatan arus bebas dan kapasitas belum digunakan secara penuh. Seiring peningkatan volume, kecepatan menurun dan kapasitas mulai mendekati batasnya. Pada kondisi dekat kapasitas (LOS E), kecepatan sangat rendah dan aliran lalu lintas tidak stabil rentan terhadap kemacetan.

Hubungan fundamental antara volume, kecepatan, dan kepadatan dikenal sebagai *fundamental diagram* lalu lintas. Diagram ini menunjukkan bahwa kapasitas tercapai pada kombinasi volume dan kepadatan tertentu, dan setelah itu peningkatan kepadatan tidak akan meningkatkan volume melainkan menurunkan kecepatan dan menciptakan kemacetan.

4.5 Faktor-Faktor Penyesuai Kapasitas

4.5.1 Penyesuaian berdasarkan Geometrik Jalan

Kapasitas dasar yang diperoleh dari acuan harus disesuaikan berdasarkan kondisi geometrik spesifik jalan yang dikaji (Hadi et al., 2025). Faktor penyesuai lebar jalur (*lane width adjustment factor*) menunjukkan bahwa jalan dengan lebar jalur kurang dari standar akan memiliki kapasitas yang lebih rendah. Demikian juga faktor penyesuai bahu jalan (*shoulder width adjustment factor*) dan faktor

penyesuaian kelandaian (*grade adjustment factor*) yang menunjukkan pengaruh karakteristik geometrik terhadap kapasitas.

Jalan dengan median yang memisahkan arah lalu lintas umumnya memiliki kapasitas yang lebih tinggi dibandingkan jalan tanpa median karena mengurangi konflik antar arah. Kehadiran persimpangan samping juga mengurangi kapasitas ruas jalan karena menciptakan gangguan pada aliran lalu lintas utama.

4.5.2 Penyesuaian berdasarkan Komposisi Lalu Lintas

Komposisi lalu lintas yang heterogen, khususnya dengan persentase kendaraan berat atau sepeda motor yang tinggi, akan mengurangi kapasitas jalan dalam satuan kendaraan actual (pcu/jam kurang dari kendaraan fisik) (Bondarenko et al., 2024). Faktor konversi kendaraan berat ke satuan mobil penumpang umumnya berada di antara 1,5 hingga 3,0, tergantung pada tipe jalan dan kondisi operasional. Faktor konversi sepeda motor biasanya lebih rendah, berkisar antara 0,25 hingga 0,75.

Untuk negara berkembang dengan komposisi lalu lintas yang berbeda dari negara maju tempat pedoman kapasitas diterbitkan, perlu dilakukan kalibrasi faktor konversi berdasarkan data lapangan lokal untuk mendapatkan estimasi kapasitas yang akurat.

4.5.3 Penyesuaian berdasarkan Kondisi Lingkungan

Kondisi lingkungan seperti cuaca, pencahayaan, dan aktivitas samping jalan juga mempengaruhi kapasitas jalan (Fery et al., 2025). Pada kondisi cuaca buruk atau malam hari dengan pencahayaan kurang, pengemudi cenderung mengurangi kecepatan dan meningkatkan jarak aman antar kendaraan, yang berakibat pada

pengurangan kapasitas. Aktivitas samping jalan seperti pejalan kaki yang menyeberang atau pedagang kaki lima juga menciptakan hambatan pada aliran lalu lintas.

Faktor penyesuai lingkungan biasanya tercakup dalam faktor penyesuai kondisi pavement atau hambatan samping yang digunakan dalam perhitungan kapasitas. Untuk lokasi dengan hambatan samping yang tinggi, faktor penyesuai dapat mencapai nilai yang signifikan, menurunkan kapasitas jalan hingga 20-30% dari kapasitas dasar.

4.5.4 Penyesuaian berdasarkan Kontrol Lalu Lintas

Untuk ruas jalan yang dilengkapi dengan sinyal lalu lintas, kapasitas tidak hanya ditentukan oleh karakteristik fisik jalan tetapi juga oleh parameter sinyal seperti waktu siklus, waktu hijau, dan pola kontrol sinyal (Afiah & Almakassari, 2025). Kapasitas dengan sinyal dihitung berdasarkan arus jenuh dan waktu hijau yang tersedia untuk setiap gerakan lalu lintas.

Pengoptimalan waktu sinyal dapat meningkatkan kapasitas simpang tanpa perlu perubahan geometrik, menjadikan timing sinyal sebagai alat manajemen lalu lintas yang ekonomis dan efektif, terutama untuk jangka pendek sebelum dilakukan peningkatan kapasitas jangka panjang.

4.6 Evaluasi dan Peningkatan Kinerja Jalan

4.6.1 Prosedur Evaluasi Kinerja Jalan

Evaluasi kinerja jalan mengikuti prosedur sistematis yang meliputi beberapa tahap: pengumpulan data lapangan, perhitungan kapasitas dan derajat kejenuhan, penentuan tingkat pelayanan, dan interpretasi hasil (Siagian et al., 2025). Data lapangan yang diperlukan mencakup geometrik jalan, volume lalu lintas, kecepatan, komposisi kendaraan, dan waktu perjalanan. Survei sebaiknya dilakukan pada hari kerja untuk mendapatkan gambaran kondisi operasional rata-rata atau pada hari libur untuk membandingkan kondisi puncak dengan luar puncak.

Perhitungan kapasitas menggunakan metode yang ditetapkan dalam pedoman nasional, dengan penerapan faktor-faktor penyesuaian yang sesuai dengan kondisi lokal. Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan volume lalu lintas yang ada untuk mendapatkan derajat kejenuhan dan tingkat pelayanan.

4.6.2 Identifikasi Masalah dan Penyebab Utama

Dari hasil evaluasi kinerja jalan, dapat diidentifikasi lokasi-lokasi dengan masalah kemacetan atau kinerja buruk. Untuk setiap lokasi dengan masalah, perlu dilakukan analisis mendalam untuk mengidentifikasi penyebab utama masalah tersebut (Fery et al., 2025). Penyebab dapat berupa kapasitas yang kurang memadai (*demand exceeds capacity*), pengoperasian sinyal yang tidak optimal, hambatan samping yang tinggi, atau kombinasi dari beberapa faktor.

Pemahaman terhadap penyebab utama masalah sangat penting untuk menentukan solusi yang tepat dan efektif. Solusi yang diterapkan harus disesuaikan dengan penyebab masalah untuk memastikan efektivitas investasi yang dilakukan.

4.6.3 Strategi Peningkatan Kapasitas

Strategi peningkatan kapasitas jalan dapat dibagi menjadi dua kategori utama: peningkatan kapasitas fisik dan manajemen lalu lintas (Hadi et al., 2025). Peningkatan kapasitas fisik meliputi pelebaran jalan, penambahan lajur, atau perbaikan geometrik lainnya. Strategi ini umumnya memerlukan investasi yang besar dan waktu implementasi yang lama.

Manajemen lalu lintas yang efektif meliputi optimasi sinyal, kontrol akses, sistem informasi lalu lintas, dan manajemen parkir untuk mengurangi gangguan pada aliran lalu lintas utama. Strategi ini umumnya lebih ekonomis dan dapat diimplementasikan dalam waktu yang lebih singkat, menjadikannya prioritas dalam jangka pendek sebelum dilakukan peningkatan kapasitas fisik.

4.6.4 Monitoring dan Evaluasi Berkelanjutan

Setelah dilakukan tindakan perbaikan, perlu dilakukan monitoring dan evaluasi berkelanjutan untuk memastikan bahwa tujuan peningkatan kinerja tercapai (Saldivar-Carranza et al., 2022). Monitoring dapat dilakukan secara berkala atau kontinyu tergantung pada pentingnya ruas jalan dan ketersediaan sumber daya. Data monitoring dianalisis untuk mengidentifikasi apakah ada perubahan signifikan dalam kinerja jalan atau apakah diperlukan penyesuaian pada strategi yang telah diterapkan.

Evaluasi hasil tindakan perbaikan juga bermanfaat untuk pembelajaran dalam menangani masalah serupa di lokasi lain. Dengan demikian, pengalaman dari evaluasi satu proyek dapat digunakan untuk meningkatkan efektivitas proyek-proyek selanjutnya.

Bab 5: Perencanaan Geometrik Jalan

5.1 Konsep Dasar Perencanaan Geometrik Jalan

5.1.1 Pengertian dan Tujuan Perencanaan Geometrik

Perencanaan geometrik jalan adalah suatu proses perencanaan yang fokus pada aspek bentuk fisik jalan agar dapat memenuhi fungsi dasarnya sebagai sarana transportasi yang aman, nyaman, dan efisien. Geometrik jalan merupakan bagian integral dari rekayasa jalan yang menentukan karakteristik fisik jalan dan mempengaruhi kualitas layanan bagi pengguna jalan (Milla et al., 2024). Tujuan utama perencanaan geometrik adalah untuk menciptakan ruas jalan yang memenuhi standar keselamatan dan kenyamanan berkendara sesuai dengan kecepatan rencana yang telah ditetapkan. Perencanaan geometrik mencakup penentuan dimensi dan bentuk fisik jalan, termasuk alinyemen horizontal, alinyemen vertikal, dan penampang melintang jalan yang disesuaikan dengan topografi dan fungsi jalan (Fika et al., 2025).

5.1.2 Komponen Utama Geometrik Jalan

Geometrik jalan terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terintegrasi untuk menghasilkan desain jalan yang optimal. Alinyemen horizontal merupakan proyeksi sumbu jalan pada bidang

horizontal, yang terdiri dari garis-garis lurus dan lengkung-lengkung yang menghubungkan titik-titik penting dalam rencana jalan (Wicaksono et al., 2025). Alinyemen vertikal adalah proyeksi sumbu jalan pada bidang vertikal, yang menunjukkan perubahan elevasi sepanjang jalan, mencakup tanjakan, penurunan, dan lengkung vertikal (Fika et al., 2025). Penampang melintang jalan adalah potongan tegak lurus terhadap sumbu jalan, yang menunjukkan susunan lapis perkerasan, lebar lajur, bahu jalan, dan fasilitas pendamping lainnya. Koordinasi antara ketiga komponen ini sangat penting untuk menghasilkan desain geometrik yang harmonis dan aman (Balqis et al., 2023).

5.1.3 Standar dan Regulasi Perencanaan Geometrik

Perencanaan geometrik di Indonesia mengacu pada standar dan regulasi yang ditetapkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga. Standar yang paling banyak digunakan adalah Tata Cara Perencanaan Geometrik Jalan Antar Kota Nomor 038/TBM/1997 dan Pedoman Desain Geometrik Jalan 2021 (*Pedoman Desain Geometrik Jalan/PDGJ 2021*), yang merupakan versi terbaru yang menggantikan panduan tahun 1997 (Wicaksono et al., 2025). Kedua standar ini menetapkan parameter-parameter teknis minimum yang harus dipenuhi dalam perencanaan geometrik jalan, termasuk nilai radius minimum untuk tikungan, jarak pandang henti, panjang lengkung peralihan, dan superelevasi (Fika et al., 2025). Pemahaman mendalam tentang standar ini sangat penting bagi setiap perencana jalan untuk memastikan bahwa desain yang dihasilkan memenuhi persyaratan teknis dan keselamatan (Aditya & Cahyono, 2023).

5.1.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Perencanaan Geometrik

Berbagai faktor mempengaruhi perencanaan geometrik jalan, termasuk klasifikasi jalan, kecepatan rencana, volume dan komposisi lalu lintas, topografi medan, dan kondisi lingkungan setempat. Klasifikasi jalan menentukan standar desain yang harus diterapkan, dengan jalan arteri memerlukan standar yang lebih ketat dibandingkan jalan kolektor atau jalan lokal (Balqis et al., 2023). Kecepatan rencana adalah kecepatan maksimum yang aman untuk dilakukan di ruas jalan tersebut, dan menjadi dasar untuk menentukan nilai-nilai parameter desain seperti radius tikungan dan jarak pandang (Fika et al., 2025). Topografi medan menentukan kemudahan atau kesulitan dalam menyesuaikan garis jalan dengan kondisi lapangan, dengan medan datar memungkinkan desain yang lebih fleksibel dibandingkan medan berbukit atau pegunungan (Pebrian & Mahendra, 2025).

5.2 Alinyemen Horizontal dan Parameter Desain

5.2.1 Definisi dan Komponen Alinyemen Horizontal

Alinyemen horizontal adalah susunan garis-garis lengkung dan lurus yang menghubungkan sumbu jalan dalam proyeksi horizontal. Alinyemen horizontal terdiri dari dua komponen utama, yaitu bagian lurus (*tangent*) dan bagian lengkung (*curve*) (Wicaksono et al., 2025). Bagian lurus memungkinkan kendaraan

untuk bergerak dengan kecepatan konstan tanpa perubahan arah, sementara bagian lengkung menampilkan perubahan arah yang bertahap. Efektivitas alinyemen horizontal dalam memfasilitasi pergerakan lalu lintas dan keselamatan berkendara sangat bergantung pada bagaimana bagian-bagian ini dirancang dan dikombinasikan (Hikmansyah et al., 2025). Desain alinyemen horizontal yang baik harus mempertimbangkan aspek keselamatan, kenyamanan, estetika, dan ekonomi dalam satu kesatuan yang harmonis (Balqis et al., 2023).

5.2.2 Jenis-Jenis Tikungan dan Geometri

Tikungan horizontal dapat dibagi menjadi beberapa jenis berdasarkan bentuk geometrinya. Tikungan *Full Circle* (FC) adalah tikungan sederhana dengan hanya satu lengkung lingkaran tanpa lengkung peralihan, dan biasanya digunakan untuk tikungan dengan radius besar (Wicaksono et al., 2025). Tikungan *Spiral-Circle-Spiral* (SCS) terdiri dari tiga bagian, yaitu lengkung spiral awal, bagian lingkaran, dan lengkung spiral akhir, yang memberikan peralihan yang lebih halus dan kenyamanan yang lebih baik bagi pengemudi (Fika et al., 2025). Tikungan *Spiral-Spiral* (SS) terdiri dari dua lengkung spiral yang bertemu di tengah, tanpa bagian lingkaran di tengahnya, dan sering digunakan untuk tikungan dengan sudut defleksi besar (Wicaksono et al., 2025). Pemilihan jenis tikungan harus didasarkan pada kondisi spesifik lokasi, kecepatan rencana, dan persyaratan teknis yang berlaku (Hikmansyah et al., 2025).

5.2.3 Parameter Desain Horizontal: Radius dan Superelevasi

Radius tikungan adalah parameter kritis yang menentukan tingkat keamanan dan kenyamanan berkendara di tikungan. Radius minimum untuk tikungan ditentukan berdasarkan kecepatan rencana dan koefisien gesekan lateral yang diizinkan, dengan rumus yang telah ditetapkan dalam standar perencanaan geometrik (Wicaksono et al., 2025). Superelevasi adalah kemiringan melintang jalan pada tikungan yang dirancang untuk membantu kendaraan dalam melewati tikungan dengan aman dan nyaman. Nilai superelevasi minimum dan maksimum ditetapkan dalam standar, dengan nilai tipikal berkisar antara 2 hingga 10 persen tergantung pada kondisi lokal (Fika et al., 2025). Koordinasi yang tepat antara radius dan superelevasi sangat penting untuk menciptakan tikungan yang aman dan nyaman (Aditya & Cahyono, 2023).

5.2.4 Jarak Pandang dan Keselamatan Horizontal

Jarak pandang henti (*Jarak Pandang Henti/JPH*) adalah jarak minimum yang diperlukan oleh pengemudi untuk melihat suatu halangan pada jalan dan mampu menghentikan kendaraannya dengan aman (Adnan et al., 2020). JPH dipengaruhi oleh kecepatan kendaraan, waktu reaksi pengemudi, dan kemampuan pengereman kendaraan. Standar perencanaan geometrik menetapkan nilai JPH minimum untuk setiap kecepatan rencana, dan desain alinyemen horizontal harus memastikan bahwa jarak pandang di semua tikungan memenuhi nilai minimum tersebut (Wicaksono et al., 2025). Jarak pandang menyiap (*Jarak Pandang Menyiap/JPM*) adalah jarak yang diperlukan untuk melakukan manuver mendahului

kendaraan lain dengan aman, dan umumnya lebih panjang dibandingkan JPH (Fika et al., 2025). Evaluasi jarak pandang pada tikungan memerlukan perhitungan khusus yang mempertimbangkan geometri tikungan dan kebebasan samping yang diperlukan (Adnan et al., 2020).

5.3 Alinyemen Vertikal dan Lengkung Vertikal

5.3.1 Konsep Alinyemen Vertikal dan Profil Memanjang

Alinyemen vertikal adalah gambaran dari perubahan elevasi sumbu jalan sepanjang ruas jalan, yang ditampilkan dalam bentuk profil memanjang (*longitudinal profile*) (Wicaksono et al., 2025). Alinyemen vertikal terdiri dari garis-garis lurus yang menunjukkan tanjakan atau penurunan (kemiringan) dan lengkung vertikal yang menghubungkan dua garis dengan kemiringan berbeda (Fika et al., 2025). Perencanaan alinyemen vertikal mempertimbangkan topografi medan, fungsi jalan, kecepatan rencana, dan kondisi drainase untuk menciptakan profil jalan yang aman, nyaman, dan ekonomis (Balqis et al., 2023). Desain alinyemen vertikal yang buruk dapat mengakibatkan masalah seperti pengurangan jarak pandang, ketidaknyamanan pengemudi, kesulitan drainase, dan bahkan masalah keselamatan seperti rem blong pada kendaraan berat pada tanjakan panjang (Hikmansyah et al., 2025).

5.3.2 Kemiringan Jalan dan Klasifikasi Medan

Kemiringan jalan atau gradien adalah persentase perubahan elevasi per satuan jarak horizontal, dan merupakan parameter

penting dalam alinyemen vertikal. Nilai kemiringan maksimum ditetapkan berdasarkan kecepatan rencana dan klasifikasi medan, dengan medan datar memungkinkan kemiringan yang lebih curam dibandingkan medan berbukit (Wicaksono et al., 2025). Klasifikasi medan dibagi menjadi tiga kategori: daerah datar dengan kemiringan kurang dari 10 persen, daerah bukit dengan kemiringan antara 10 hingga 25 persen, dan daerah pegunungan dengan kemiringan lebih dari 25 persen (Fika et al., 2025). Pemilihan route yang tepat dalam perencanaan alinyemen vertikal harus mempertimbangkan karakteristik medan dan upaya meminimalkan volume pekerjaan tanah sambil mempertahankan standar keselamatan (Pebrian & Mahendra, 2025).

5.3.3 Lengkung Vertikal Cembung dan Cekung

Lengkung vertikal cembung (*convex vertical curve*) adalah lengkung yang menghubungkan kemiringan positif dengan kemiringan negatif atau sebaliknya, menciptakan bentuk bukit pada profil jalan (Wicaksono et al., 2025). Lengkung vertikal cekung (*concave vertical curve*) adalah lengkung yang menghubungkan kemiringan negatif dengan kemiringan positif atau sebaliknya, menciptakan bentuk lembah pada profil jalan (Fika et al., 2025). Desain lengkung vertikal harus memastikan bahwa jarak pandang henti tercukupi pada titik terendah atau tertinggi lengkung, dan perubahan elevasi berlangsung secara bertahap untuk menghindari dampak shock pada kendaraan (Aditya & Cahyono, 2023). Panjang lengkung vertikal minimum ditentukan berdasarkan kecepatan

rencana dan perbedaan kemiringan untuk memastikan kenyamanan berkendara dan jarak pandang yang memadai (Fika et al., 2025).

5.3.4 Koordinasi Alinyemen Horizontal dan Vertikal

Koordinasi antara alinyemen horizontal dan vertikal sangat penting untuk menghasilkan desain jalan yang harmonis dan aman. Kondisi buruk terjadi ketika tikungan horizontal bertepatan dengan lengkung vertikal cembung, yang dapat mengakibatkan pengurangan jarak pandang dan potensi kecelakaan (Wicaksono et al., 2025). Standar perencanaan geometrik merekomendasikan untuk menghindari perpaduan ini atau memastikan bahwa jarak pandang tetap terjaga meskipun terjadi perpaduan (Balqis et al., 2023). Koordinasi yang baik juga mempertimbangkan kenyamanan pengemudi, dengan menghindari perpaduan tikungan tajam dengan kemiringan curam yang dapat meningkatkan beban lateral pada kendaraan (Hikmansyah et al., 2025).

5.4 Penampang Melintang Jalan dan Dimensi Standar

5.4.1 Komponen-Komponen Penampang Melintang

Penampang melintang jalan merupakan potongan tegak lurus terhadap sumbu jalan yang menunjukkan susunan lengkap dari semua elemen jalan dalam arah melintang (Fika et al., 2025). Penampang melintang terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu lajur lalu lintas (*traffic lanes*), bahu jalan (*shoulders*), median (jika ada), dan trotoar atau jalur pejalan kaki (Balqis et al., 2023). Lajur

lalu lintas adalah bagian jalan yang diperuntukkan untuk pergerakan kendaraan, dengan lebar yang ditentukan berdasarkan klasifikasi jalan dan standar desain (Wicaksono et al., 2025). Bahu jalan adalah jalur di tepi lajur lalu lintas yang berfungsi untuk parkir darurat, pejalan kaki, dan drainase, dengan lebar minimum yang ditetapkan dalam standar (Fika et al., 2025). Median adalah jalur pemisah di antara lajur-lajur kendaraan yang bergerak dalam arah berlawanan, yang dapat berupa median tertutup (rigid) atau terbuka dengan bukaan untuk manuver belok kiri (Aditya & Cahyono, 2023).

5.4.2 Lebar Lajur dan Lebar Jalan Total

Lebar lajur lalu lintas ditentukan berdasarkan klasifikasi jalan dan volume kendaraan yang diharapkan melewati jalan. Standar umum lebar lajur untuk jalan arteri dan kolektor adalah 3,5 meter per lajur, sementara jalan lokal dapat memiliki lajur yang lebih sempit (Fika et al., 2025). Lebar bahu jalan minimum biasanya ditetapkan sebesar 2 meter untuk jalan arteri dan 1,5 meter untuk jalan kolektor, meskipun kondisi lokal dapat memerlukan penyesuaian (Wicaksono et al., 2025). Lebar jalan total merupakan penjumlahan dari semua elemen penampang melintang, termasuk lajur lalu lintas, bahu jalan, median (jika ada), dan trotoar (Balqis et al., 2023). Dalam beberapa kasus, jalan yang ada memerlukan pelebaran untuk memenuhi standar kapasitas yang diperlukan guna mengakomodasi pertumbuhan lalu lintas (Aditya & Cahyono, 2023).

5.4.3 Pelebaran Jalan pada Tikungan

Pelebaran jalan pada tikungan diperlukan untuk mengakomodasi jejak kendaraan (terutama kendaraan berat) yang

lebih lebar pada tikungan dibandingkan pada bagian lurus (Wicaksono et al., 2025). Pelebaran ini dilakukan secara bertahap dari bagian lurus ke tikungan melalui lengkung peralihan, dengan nilai pelebaran dihitung berdasarkan radius tikungan, lebar kendaraan desain, dan kecepatannya (Fika et al., 2025). Penelitian menunjukkan bahwa ketidaksesuaian pelebaran dengan standar dapat meningkatkan risiko kecelakaan lalu lintas pada tikungan (Adnan et al., 2020). Perhitungan pelebaran yang akurat memerlukan pemahaman tentang karakteristik kendaraan yang digunakan dan prinsip geometri tikungan (Hikmansyah et al., 2025).

5.4.4 Kemiringan Melintang dan Drainase

Kemiringan melintang jalan adalah kemiringan lajur lalu lintas dalam arah tegak lurus terhadap sumbu jalan, yang memiliki dua fungsi utama: memfasilitasi drainase air hujan dan memberikan stabilitas kendaraan pada tikungan (Fika et al., 2025). Pada bagian lurus, kemiringan melintang biasanya ditetapkan sebesar 2 hingga 3 persen, cukup untuk mengarahkan air hujan keluar dari jalan tanpa menimbulkan ketidaknyamanan berkendara (Wicaksono et al., 2025). Pada tikungan, kemiringan melintang ditingkatkan dengan nilai superelevasi yang telah dihitung, menciptakan profil melintang yang miring ke arah dalam tikungan (Balqis et al., 2023). Desain drainase yang buruk dapat mengakibatkan genangan air yang mengurangi traksi kendaraan dan meningkatkan risiko aquaplaning pada saat hujan (Hikmansyah et al., 2025).

5.5 Aplikasi Teknologi dalam Perencanaan Geometrik

5.5.1 Perangkat Lunak Desain Geometrik

Perkembangan teknologi telah merevolusi proses perencanaan geometrik jalan melalui penggunaan perangkat lunak khusus yang memungkinkan perencana untuk dengan cepat menghasilkan desain yang akurat dan efisien (Balqis et al., 2023). Perangkat lunak seperti Autodesk Civil 3D telah menjadi standar industri untuk perencanaan geometrik jalan, menyediakan fitur-fitur canggih untuk pemodelan alinyemen horizontal dan vertikal, perhitungan volume tanah, dan visualisasi tiga dimensi (Balqis et al., 2023). Penggunaan perangkat lunak ini memungkinkan perencana untuk mengevaluasi berbagai alternatif desain dengan cepat dan membuat keputusan desain yang lebih baik berdasarkan data yang akurat (Pebrian & Mahendra, 2025). Perangkat lunak juga mempermudah proses koordinasi dengan berbagai stakeholder dengan menyediakan dokumentasi visual yang jelas dan profesional (Hikmansyah et al., 2025).

5.5.2 Aplikasi Mobile dan Sistem Informasi Geografis

Selain perangkat lunak desktop yang canggih, aplikasi mobile berbasis Android telah dikembangkan untuk memfasilitasi perhitungan alinyemen horizontal dan vertikal di lapangan secara real-time (Milla et al., 2024). Aplikasi ini memungkinkan surveyor dan perencana untuk melakukan perhitungan geometrik dengan cepat tanpa perlu membawa komputer ke lapangan, meningkatkan

produktivitas dan akurasi pengumpulan data (Milla et al., 2024). Sistem Informasi Geografis (*Geographic Information System/GIS*) juga telah diintegrasikan dengan perencanaan geometrik jalan untuk memberikan analisis spasial yang lebih komprehensif, mempertimbangkan aspek-aspek geografis dan lingkungan dalam proses desain (Pebrian & Mahendra, 2025). Integrasi berbagai teknologi ini menciptakan ekosistem digital yang mendukung proses perencanaan geometrik yang lebih efisien dan berbasis data (Hikmansyah et al., 2025).

5.5.3 Visualisasi Tiga Dimensi dan Simulasi Lalu Lintas

Visualisasi tiga dimensi (*3D visualization*) memungkinkan perencana dan stakeholder untuk memvisualisasikan hasil desain geometrik dengan perspektif yang realistis, membantu dalam komunikasi desain dan identifikasi potensi masalah desain sebelum pembangunan (Balqis et al., 2023). Model tiga dimensi juga dapat digunakan untuk analisis line of sight dan verifikasi jarak pandang pada berbagai kondisi geometrik (Hikmansyah et al., 2025). Simulasi lalu lintas menggunakan perangkat lunak seperti VISSIM memungkinkan perencana untuk mengevaluasi dampak desain geometrik terhadap kinerja lalu lintas, mengidentifikasi potensi bottleneck, dan mengoptimalkan desain untuk kapasitas yang lebih baik (Pebrian & Mahendra, 2025). Kombinasi visualisasi 3D dan simulasi lalu lintas memberikan alat yang kuat untuk validasi desain dan optimisasi sebelum implementasi (Fika et al., 2025).

5.5.4 Data dan Validasi Desain

Salah satu tantangan dalam perencanaan geometrik adalah memastikan bahwa data yang digunakan sebagai basis desain akurat dan up-to-date. Survey lapangan menggunakan peralatan modern seperti *Total Station* dan *GPS* memberikan data yang akurat untuk koordinat dan elevasi, yang menjadi fondasi perhitungan geometrik (Balqis et al., 2023). Validasi desain melibatkan perbandingan antara desain rencana (DED - *Detailed Engineering Design*) dengan kondisi lapangan dan hasil pelaksanaan pembangunan (As Built Drawing), untuk memastikan bahwa desain yang direncanakan sesuai dengan kondisi di lapangan (Aditya & Cahyono, 2023). Diskrepansi antara desain rencana dan pelaksanaan dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk ketidaksesuaian koordinat, kesalahan survey, atau kendala lapangan yang memerlukan penyesuaian desain selama pembangunan (Aditya & Cahyono, 2023).

Bab 6: Perkerasan Jalan

6.1 Tipe-Tipe Perkerasan Jalan dan Karakteristiknya

6.1.1 Perkerasan Fleksibel (*Flexible Pavement*)

Perkerasan fleksibel merupakan salah satu jenis perkerasan jalan yang paling banyak digunakan di seluruh dunia, terutama di Indonesia. Perkerasan fleksibel terdiri dari beberapa lapisan, yaitu lapisan permukaan (*wearing course*), lapisan pondasi bawah (*base course*), lapisan pondasi atas (*sub-base*), dan lapisan tanah dasar (*subgrade*). Karakteristik utama perkerasan fleksibel adalah kemampuannya untuk mendistribusikan beban kendaraan ke lapisan-lapisan di bawahnya secara bertahap, sehingga dapat menyerap beban tersebut dengan lebih efektif (Aisyah & Kusumaningsih, 2025).

Perkerasan fleksibel menggunakan bahan pengikat aspal (*bitumen*) untuk mengikat butiran agregat menjadi satu kesatuan yang kokoh. Material utama yang digunakan adalah *Hot Mix Asphalt* (HMA) atau campuran panas aspal yang diproduksi dengan suhu tinggi dan kemudian dipadatkan di lapangan. Keuntungan dari perkerasan fleksibel adalah biaya konstruksi awal yang lebih rendah dibandingkan dengan perkerasan kaku, waktu pelaksanaan yang lebih singkat, dan mudah untuk melakukan perbaikan atau overlay (Aisyah & Kusumaningsih, 2025). Namun, perkerasan fleksibel

memiliki beberapa kelemahan, antara lain memerlukan pemeliharaan rutin yang lebih sering, rentan terhadap deformasi permanen (*rutting*) pada suhu tinggi, dan memiliki umur rencana yang lebih pendek, umumnya 15-20 tahun.

6.1.2 Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Perkerasan kaku atau perkerasan beton adalah jenis perkerasan yang menggunakan slab beton semen sebagai lapisan permukaan. Beton memiliki modulus elastisitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan aspal, sehingga mampu mendistribusikan beban secara lebih luas pada lapisan-lapisan di bawahnya. Struktur perkerasan kaku terdiri dari slab beton bertulang atau tanpa tulang yang diletakkan di atas lapisan pondasi berupa *lean concrete base* atau material granular (Margareta et al., 2025).

Keuntungan utama perkerasan kaku adalah daya tahan yang jauh lebih tinggi dengan umur rencana dapat mencapai 30-40 tahun atau bahkan lebih, memerlukan pemeliharaan rutin yang minimal, dan mampu menahan lalu lintas berat dengan konsistensi yang baik (Aisyah & Kusumaningsih, 2025). Kelemahan perkerasan kaku adalah biaya konstruksi awal yang lebih tinggi, waktu pelaksanaan yang lebih lama, dan ketika terjadi kerusakan biasanya memerlukan perbaikan yang lebih kompleks. Selain itu, perkerasan kaku dapat mengalami kerusakan akibat perbedaan suhu (*thermal cracking*) dan pengikisan (*erosion*) pada lapisan pondasi di bawah beton.

6.1.3 Perkerasan Semi-Kaku (*Semi-Rigid Pavement*)

Perkerasan semi-kaku merupakan jenis perkerasan yang menggabungkan karakteristik dari perkerasan fleksibel dan

perkerasan kaku. Pada perkerasan semi-kaku, lapisan pondasi menggunakan material yang sudah distabilisasi dengan semen (*cement stabilized*) atau kapur, sementara lapisan permukaan masih menggunakan aspal (Margareta et al., 2025). Material pondasi yang distabilisasi memiliki rigiditas lebih tinggi daripada material granular murni, namun masih lebih fleksibel dibandingkan dengan beton murni.

Perkerasan semi-kaku dirancang untuk memanfaatkan keuntungan dari keduanya, yaitu daya tahan yang lebih baik dari perkerasan fleksibel tetapi dengan biaya yang masih lebih terjangkau daripada perkerasan kaku. Namun, perkerasan semi-kaku juga memiliki kelemahan yaitu rentan terhadap *reflective cracking* (retak memantul) pada lapisan aspal akibat retak pada lapisan pondasi bawahnya, serta memerlukan desain dan konstruksi yang lebih teliti untuk mencegah masalah-masalah tersebut.

6.1.4 Perkerasan Komposit (*Composite Pavement*)

Perkerasan komposit adalah perkerasan yang dirancang dengan menggabungkan lapisan perkerasan kaku (beton) di bawah dengan lapisan perkerasan fleksibel (aspal) di atasnya, atau sebaliknya. Jenis perkerasan ini dirancang untuk memanfaatkan keunggulan kedua jenis perkerasan sesuai dengan kondisi spesifik dan kebutuhan jalan (Margareta et al., 2025).

Salah satu aplikasi umum perkerasan komposit adalah penggunaan overlay aspal di atas perkerasan beton yang sudah ada (*asphalt over concrete*), yang memungkinkan rehabilitasi perkerasan kaku yang sudah mengalami kerusakan dengan cara menutupinya

dengan aspal baru. Keuntungan perkerasan komposit adalah fleksibilitas dalam desain dan kemampuan adaptasi terhadap berbagai kondisi lapangan. Namun, tantangan utama adalah mengelola interface antara kedua jenis material yang berbeda karakteristiknya dan mencegah terjadinya pemisahan antar lapisan.

6.2 Perencanaan dan Desain Perkerasan

6.2.1 Metode Desain Perkerasan

Desain perkerasan jalan didasarkan pada berbagai teori dan metodologi yang telah dikembangkan selama bertahun-tahun. Terdapat beberapa metode desain yang umum digunakan, antara lain metode AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) (Aisyah & Kusumaningsih, 2025; Sukirman, 2010), metode empiris lokal, dan metode mekanis-empiris (*mechanistic-empirical*) yang lebih canggih.

Metode AASHTO 1993 adalah metode desain yang paling banyak digunakan, khususnya di negara-negara berkembang, karena prosedurnya relatif sederhana dan mudah dipahami. Metode ini menggunakan parameter seperti *Structural Number* (SN) untuk perkerasan fleksibel, yang merupakan indeks yang merepresentasikan kekuatan struktural perkerasan. Parameter desain utama dalam metode AASHTO meliputi lalu lintas (dinyatakan dalam *Equivalent Single Axle Load* atau ESAL), kekuatan tanah dasar (dinyatakan dalam nilai *California Bearing Ratio* atau CBR), tingkat kepercayaan desain (*reliability*), dan standar deviasi

(*standard deviation*) (Mallela et al., 2013). Rumus dasar AASHTO 1993 sebagai berikut :

$$\log(W_{18}) = Z_R \times S_o + 9,36 \times \log(SN + 1) - 0,20 \\ + \frac{\log \left\{ \frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right\}}{4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log(M_R) - 8,07$$

Keterangan :

W_{18} = ESAL yang diperkirakan

Z_R = simpangan baku normal

S_0 = deviasi standar keseluruhan, bernilai antara 0,4 -0,5

SN = Structural Number, angka struktural relatif perkerasan, inci

ΔPSI = Perbedaan serviceability index di awal dan akhir umur rencana

M_R = modulus resilient tanah dasar (psi)

Nilai beban repetisi lintasan sumbu standar selama umur rencana (W_{18}) digunakan persamaan sebagai berikut :

$$W_{18} = \sum LHRT_i \times E_i \times DA \times DL \times 365 \times N$$

Keterangan:

W_{18} = repetisi beban lalu lintas selama umur rencana, lss/lajur/umur rencana

LHR = Lalu lintas Harian Rata-rata, kendaraan/hari/2 arah

LHRT = Lalu lintas Harian Rata-rata Tahunan, kendaraan/hari/2 arah

Ei = angka ekivalen jenis kendaraan i

DA = faktor distribusi arah, digunakan untuk menunjukkan distribusi kendaraan ke masing-masing arah. Jika data lalu lintas yang digunakan adalah data untuk satu arah, maka DA = 1

DL = faktor distribusi lajur, digunakan untuk menunjukkan distribusi kendaraan ke lajur rencana.

365 = jumlah hari dalam satu tahun

N = faktor umur rencana

Sedangkan SNI 1732-1989-F (Sukirman, 2010) yang dikenal dengan nama metode analisis komponen, mengacu kepada metode AASHTO 1972, beban lalu lintas berdasarkan dinyatakan dalam Lintas Ekivalen Rencana (LER) yang langkah-langkah perhitungan angka ekivalen menggunakan rumus berikut :

$$E_{sumbu\ tunggal} = \left(\frac{\text{beban sumbu tunggal, kg}}{8,160} \right)^4$$

$$E_{sumbu\ ganda} = 0,0886 \left(\frac{\text{beban sumbu ganda, kg}}{8,160} \right)^4$$

LHR (Lalu lintas Harian Rata-rata) dihitung diawal umur rencana untuk masing-masing kelompok jenis kendaraan dengan rumus :

$$LHR_{awal\ umur\ rencana} = (1 + a)^n \times LHR_s$$

Keterangan :

LHRs = LHR hasil pengumpulan data

- a = faktor pertumbuhan lalu lintas dari saat pengumpulan data sampai awal umur rencana, persen/tahun
- n = lama waktu dari saat pengumpulan data sampai awal umur rencana, tahun.

Lintas Ekivalen Permulaan (LEP) sebagai lintas ekivalen di awal umur rencana dihitung dengan menggunakan rumus : $LEP = \sum_{i=1}^n LHR_i \times E_i \times C_i$

Keterangan :

LEP = Lintas ekivalen di awal umur rencana, lss/hari/lajur rencana

LHR_i = LHR jenis kendaraan i di awal umur rencana, ditentukan dengan menggunakan rumus

$$LHR_{\text{awal umur rencana}}$$

LHRT_i = LHRT jenis kendaraan i di awal umur rencana

E_i = angka ekivalen untuk jenis kendaraan i

C_i = koefisien distribusi jenis kendaraan i

Lintas Ekivalen Akhir (LEA) sebagai lintas ekivalen di akhir umur rencana dengan menggunakan rumus :

$$LEA = LEP (1+i)^{UR}$$

Keterangan :

LEA = Lintas ekivalen di akhir umur rencana, lss/hari/lajur rencana

LEP = Lintas Ekivalen di awal umur rencana

i = faktor pertumbuhan lalu lintas, %/tahun

UR = umur rencana, tahun

Lintas Ekvivalen Rencana (LER) sebagai lintas ekvivalen rencana dengan menggunakan rumus :

$$LER = \frac{LEP + LEA}{2} \times FP$$

Keterangan:

LER = Lintas Ekvivalen Rencana

FP = Faktor Penyesuaian Untuk Umur Rencana

= UR/10

UR = Umur Rencana, tahun

Rumus dasar Metode SNI 1732-1989-F mengacu kepada rumus AASHTO'72 seperti rumus :

$\log(LER \times 3650)$

$$= 9,36 \times \log \left(\frac{ITP}{2,54} + 1 \right) - 0,20 \\ + \frac{G_t}{0,4 + \frac{1094}{\left(\frac{ITP}{2,54} + 1 \right)^{5,19}}} + \log \frac{1}{FR} + 0,372 (DDT \\ - 3,0)$$

Keterangan:

LER = Lintas Ekvivalen Rencana, dinyatakan dalam lss/hari/lajur rencana

3650 = jumlah hari dalam 10 tahun (karena nomogram disediakan untuk umur rencana 10 tahun)

ITP = Indeks Tebal Perkerasan untuk keadaan lingkungan dan daya dukung sesuai lokasi jalan dan Indeks Permukaan di akhir

umur rencana (nama ITP berasal dari thickness index versi AASHTO pra '72)

DDT = Daya Dukung Tanah Dasar

FR = Faktor Regional

$$Gt = \log \frac{(IP_0 - IP_t)}{(4,2 - 1,5)}$$

Secara grafis rumus dasar Metode SNI 1732-1989-F digambarkan dalam bentuk nomogram.

Indonesia memiliki berbagai nilai IP_0 dan IP_t , maka nomogram yang dihasilkan dari rumus dasar Metode SNI 1732-1989-F ada 9 buah, berdasarkan nilai IP_0 dan IP_t .

Dengan menggunakan nomogram tersebut, diperoleh Indeks Tebal Perkerasan (ITP) Jalan (Sukirman, 2010).

$\overline{ITP}$ adalah angka yang menunjukkan nilai struktural perkerasan jalan yang terdiri dari beberapa lapisan dengan mutu yang berbeda. Oleh karena itu untuk menentukan ITP diperlukan koefisien relatif sehingga tebal perkerasan setiap lapisan setelah dikalikan dengan koefisien *relative* dapat dijumlahkan. Jadi ITP dihitung seperti pada rumus:

$$\overline{ITP} = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3$$

Keterangan :

$\overline{ITP}$ = Indeks Tebal Perkerasan

a_1 = koefisien kekuatan relatif lapis permukaan

a_2 = koefisien kekuatan relatif lapis pondasi

a_3 = koefisien kekuatan relatif lapis pondasi bawah

D_1 = tebal lapis permukaan

D_2 = tebal lapis pondasi

D_3 = tebal lapis pondasi bawah

Metode mekanis-empiris (*MEPDG* atau *AASHTOWare ME*) adalah metode desain yang lebih canggih yang mempertimbangkan sifat material, kondisi iklim, dan pola lalu lintas secara lebih detail (Mallela et al., 2013). Metode ini menggunakan model-model prediksi untuk memperkirakan kerusakan perkerasan berdasarkan mekanika material dan empiris dari performa lapangan.

6.2.2 Parameter-Parameter Desain Perkerasan

Parameter-parameter yang dipertimbangkan dalam desain perkerasan meliputi beberapa aspek penting. Pertama adalah data lalu lintas, yang mencakup volume lalu lintas harian rata-rata (*Average Daily Traffic* atau ADT), komposisi kendaraan, dan beban poros kendaraan. Data lalu lintas ini dikonversi menjadi beban ekuivalen (*ESAL* atau *cumulative equivalent single axle load* atau CESAL) untuk memperhitungkan pengaruh beban kendaraan terhadap perkerasan (Margareta et al., 2025).

Kedua adalah karakteristik tanah dasar, yang dievaluasi melalui pengujian CBR, Modulus Resilien (*Resilient Modulus* atau MR), dan parameter geoteknik lainnya. Ketiga adalah iklim dan lingkungan, yang mempengaruhi performa perkerasan melalui suhu, curah hujan, dan fenomena lainnya. Keempat adalah material

perkerasan, yang harus memenuhi spesifikasi teknis dan memiliki karakteristik performa yang sesuai (Mallela et al., 2013).

6.2.3 Analisis Tegangan dan Regangan

Dalam perencanaan perkerasan, analisis tegangan dan regangan (*stress-strain analysis*) memiliki peran penting untuk memahami perilaku perkerasan di bawah pembebanan kendaraan. Untuk perkerasan fleksibel, analisis ini biasanya dilakukan menggunakan teori elastisitas linear berlapis (*layered elastic theory*) untuk menghitung distribusi tegangan dan regangan di berbagai lapisan (Albayati, 2025).

Tegangan dan regangan kritis yang perlu dipertimbangkan dalam desain perkerasan fleksibel antara lain regangan tarik horizontal pada bagian bawah lapisan aspal (yang menentukan umur lelah atau *fatigue life*) dan tegangan kompresif vertikal pada lapisan tanah dasar (yang menentukan kemampuan menahan deformasi permanen atau *rutting*) (Albayati, 2025). Untuk perkerasan kaku, analisis difokuskan pada tegangan lentur (*flexural stress*) pada slab beton, yang dianalisis menggunakan teori pelat (*plate theory*) atau metode elemen hingga (*finite element method* atau FEM).

6.2.4 Pemilihan Tebal Lapisan

Penentuan tebal setiap lapisan perkerasan dilakukan berdasarkan hasil desain menggunakan metode yang dipilih. Untuk perkerasan fleksibel dengan metode AASHTO 1993, *Structural Number* (SN) yang diperoleh dari perhitungan dirancang ulang menjadi tebal lapisan aspal (*asphalt concrete*), base, dan sub-base

dengan menggunakan koefisien lapisan (*layer coefficient*) untuk setiap jenis material (Aisyah & Kusumaningsih, 2025).

Penentuan tebal harus mempertimbangkan ketersediaan material, ekonomi konstruksi, dan kemudahan pelaksanaan di lapangan. Dalam banyak kasus, tebal lapisan ditentukan berdasarkan keseimbangan antara kekuatan struktural yang diperlukan dan biaya material (Aisyah & Kusumaningsih, 2025).

6.3 Konstruksi dan Pelaksanaan Perkerasan

6.3.1 Persiapan Tanah Dasar dan Pondasi

Sebelum pelaksanaan konstruksi lapisan perkerasan, tanah dasar harus dipersiapkan dengan baik. Persiapan ini meliputi pembersihan area dari material yang tidak diinginkan, *grading* untuk mendapatkan geometri yang sesuai, dan pemadatan tanah dasar hingga kepadatan optimal sesuai spesifikasi (A. et al., 2025).

Kualitas tanah dasar sangat mempengaruhi performa perkerasan jangka panjang. Tanah dasar yang lemah atau tidak stabil dapat menyebabkan *settlement* yang tidak merata, yang akan mengakibatkan deformasi dan kerusakan perkerasan di atasnya (A. et al., 2025). Oleh karena itu, pengujian tanah dasar untuk menentukan nilai CBR dan parameter geoteknik lainnya merupakan langkah penting dalam proses konstruksi.

6.3.2 Konstruksi Lapisan Pondasi

Lapisan pondasi dapat berupa material granular murni atau material yang sudah distabilisasi. Untuk material granular, proses

konstruksi meliputi penyebaran material, penempatan, dan pemadatan. Tingkat pemadatan harus mencapai minimal 95% dari kepadatan maksimum yang diperoleh dari pengujian Proctor standar (A. et al., 2025).

Untuk material yang distabilisasi dengan semen atau aspal, proses konstruksi lebih kompleks dan memerlukan kontrol kualitas yang lebih ketat. Material harus dicampur dengan binder (semen atau aspal emulsi) di tempat (*in-situ mixing*) atau di *batching plant*, kemudian diangkut dan dipadatkan segera sebelum binder mengeras atau mengalami setting.

6.3.3 Konstruksi Lapisan Perkerasan Aspal

Konstruksi lapisan aspal meliputi beberapa tahap: pencampuran aspal dengan agregat di *hot mix plant*, pengangkutan campuran ke lokasi konstruksi, penyebaran di lapangan menggunakan *asphalt paver*, dan pemadatan menggunakan *roller*. Suhu campuran aspal pada saat penyebaran dan pemadatan sangat penting untuk memastikan hasil yang baik (Zheng et al., 2023).

Kontrol kualitas selama konstruksi meliputi pengujian temperatur campuran, pemadatan (*compaction*), dan pengambilan sampel untuk pengujian laboratorium. Pemadatan yang tidak sempurna akan menghasilkan perkerasan dengan kadar rongga udara yang tinggi, yang akan mempercepat proses oksidasi aspal dan penurunan performa perkerasan (Zheng et al., 2023).

6.3.4 Konstruksi Lapisan Perkerasan Beton

Konstruksi perkerasan beton meliputi persiapan bekisting, pencampuran beton, penyebaran, pengecoran, dan curing. Pekerjaan

konstruksi perkerasan beton biasanya memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan aspal, tetapi hasil akhirnya adalah perkerasan yang lebih tahan lama (Jain et al., 2025).

Kualitas beton yang dihasilkan sangat tergantung pada proporsi campuran (*mix design*), kualitas material (semen, agregat, air), proses pencampuran, dan pengawetan (*curing*). Pengawetan yang tepat sangat penting untuk memastikan beton mencapai kekuatan yang direncanakan.

6.4 Pemeliharaan dan Rehabilitasi Perkerasan

6.4.1 Jenis-Jenis Kerusakan Perkerasan

Perkerasan jalan mengalami berbagai jenis kerusakan akibat beban lalu lintas, pengaruh iklim, dan proses penuaan material. Untuk perkerasan fleksibel, jenis-jenis kerusakan yang umum terjadi meliputi *fatigue cracking* (retak lelah), *rutting* (deformasi permanen), dan *bleeding* (perkolasi aspal). Untuk perkerasan kaku, jenis kerusakan meliputi *transverse cracking*, *faulting*, dan *spalling* (Rajak et al., 2026).

Retak lelah (*fatigue cracking*) atau *alligator cracking* terjadi akibat repetisi beban yang melebihi kapasitas material. Kerusakan ini dimulai dari bagian bawah lapisan aspal dan merambat ke permukaan, membentuk pola seperti kulit buaya (*alligator skin*) (Rajak et al., 2026). Deformasi permanen (*rutting*) adalah penurunan permukaan jalan yang mengikuti jejak roda kendaraan, yang terjadi

akibat deformasi plastis pada lapisan-lapisan perkerasan, terutama pada suhu tinggi.

6.4.2 Evaluasi Kondisi Perkerasan

Evaluasi kondisi perkerasan dilakukan secara periodik untuk menentukan jenis dan tingkat kerusakan yang terjadi serta merencanakan tindakan pemeliharaan yang tepat. Metode evaluasi yang paling umum adalah visual survey dengan menghitung jenis, luas, dan tingkat keparahan kerusakan untuk menghitung *Pavement Condition Index* (PCI) atau indikator kondisi lainnya (Rajak et al., 2026).

Selain visual survey, evaluasi dapat dilakukan menggunakan peralatan canggih seperti *Falling Weight Deflectometer* (FWD) untuk mengukur defleksi perkerasan, *Laser Crack Measurement System* untuk mengukur kerusakan dengan presisi tinggi, dan *International Roughness Index* (IRI) untuk mengukur kerataan permukaan (Rajak et al., 2026).

6.4.3 Program Pemeliharaan Rutin dan Preventif

Pemeliharaan rutin (*routine maintenance*) adalah pekerjaan-pekerjaan sederhana yang dilakukan secara berkala untuk menjaga kondisi perkerasan dan mencegah kerusakan yang lebih berat. Jenis pekerjaan pemeliharaan rutin meliputi pembersihan saluran drainase, perbaikan lubang kecil (*patching*), dan penyegelan retak (*crack sealing*) (Abaza, 2024).

Pemeliharaan preventif (*preventive maintenance*) adalah tindakan yang dilakukan untuk mencegah atau menunda terjadinya kerusakan yang lebih signifikan. Jenis pekerjaan pemeliharaan

preventif meliputi *seal coating* (pelapisan ulang tipis), *slurry sealing*, dan overlay tipis (*thin overlay*). Program pemeliharaan yang efektif dan tepat waktu dapat memperpanjang umur perkerasan secara signifikan dan mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang (Abaza, 2024).

6.4.4 Rehabilitasi dan Rekonstruksi Perkerasan

Ketika perkerasan sudah mengalami kerusakan yang signifikan dan tidak dapat diperbaiki dengan pemeliharaan biasa, diperlukan tindakan rehabilitasi atau rekonstruksi. Rehabilitasi (*rehabilitation*) adalah pekerjaan yang dilakukan untuk mengembalikan kondisi perkerasan yang sudah mengalami kerusakan struktural atau fungsional menjadi dalam kondisi yang baik, tetapi tanpa mengubah struktur dasar secara fundamental (Moss & Liang, 2021).

Jenis-jenis rehabilitasi meliputi *major rehabilitation* seperti *full-depth asphalt replacement*, *asphalt concrete overlay*, atau *recycled asphalt pavement (RAP) rehabilitation*. Rekonstruksi dilakukan ketika perkerasan sudah mencapai akhir umur rencanaannya atau kerusakan sudah terlalu parah sehingga rehabilitasi tidak lagi ekonomis. Rekonstruksi meliputi pengangkatan material perkerasan lama, penyiapan tanah dasar, dan konstruksi perkerasan baru sesuai desain (Moss & Liang, 2021).

6.5 Sistem Manajemen Perkerasan Jalan

6.5.1 Konsep dan Komponen Sistem Manajemen Perkerasan

Sistem Manajemen Perkerasan (*Pavement Management System* atau PMS) adalah suatu sistem yang dirancang untuk mengumpulkan, menganalisis, dan menggunakan data kondisi perkerasan untuk membuat keputusan pemeliharaan dan rehabilitasi yang optimal dengan biaya minimum (Ali & Lafta, 2023). Komponen utama PMS meliputi basis data perkerasan, model prediksi kondisi perkerasan, analisis biaya-manfaat, dan sistem pendukung keputusan.

Basis data perkerasan berisi informasi tentang karakteristik fisik perkerasan (tebal lapisan, jenis material, umur), kondisi perkerasan (hasil survei berkala), riwayat pemeliharaan, dan data lalu lintas. Data ini dikumpulkan melalui survei visual dan pengukuran instrumen di lapangan, kemudian disimpan dalam sistem basis data yang terstruktur dengan baik (Ali & Lafta, 2023).

6.5.2 Model Prediksi Performa Perkerasan

Model prediksi performa perkerasan adalah alat matematis yang digunakan untuk memperkirakan kondisi perkerasan di masa depan berdasarkan kondisi saat ini dan faktor-faktor yang mempengaruhi. Model ini sangat penting dalam PMS karena digunakan untuk merencanakan intervensi pada waktu yang tepat dan memilih alternatif pemeliharaan yang optimal (Koh et al., 2025).

Terdapat berbagai jenis model prediksi, mulai dari model empiris sederhana yang didasarkan pada data historis, hingga model

mekanis-empiris yang lebih kompleks. Dengan perkembangan teknologi, model berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence* atau AI) dan *machine learning* semakin banyak digunakan untuk meningkatkan akurasi prediksi (Kang et al., 2024). Model-model ini dapat menangkap hubungan non-linear antara variabel-variabel input dan output yang mungkin sulit ditangkap oleh model linier sederhana.

6.5.3 Optimasi Pemeliharaan dan Rehabilitasi

Optimasi pemeliharaan dan rehabilitasi adalah proses untuk menentukan kombinasi tindakan pemeliharaan yang optimal yang harus dilakukan pada berbagai segmen perkerasan dalam periode perencanaan tertentu dengan tujuan memaksimalkan kondisi jaringan perkerasan sambil meminimalkan biaya (Rejani et al., 2025).

Proses optimasi mempertimbangkan berbagai kendala, seperti anggaran tahunan yang terbatas, ketersediaan bahan dan peralatan, dan prioritas yang ditentukan oleh pembuat keputusan. Metode optimasi yang digunakan dapat berupa program linear, program dinamis, atau algoritma heuristik seperti *genetic algorithm* atau *particle swarm optimization*. Hasil dari optimasi adalah rencana pemeliharaan jangka menengah atau panjang yang realistis dan dapat dilaksanakan (Rejani et al., 2025).

6.5.4 Analisis Biaya Siklus Hidup (*Life Cycle Cost Analysis*)

Analisis biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost Analysis* atau LCCA) adalah metode untuk mengevaluasi alternatif perkerasan dengan mempertimbangkan semua biaya yang terjadi sepanjang

umur perkerasan, mulai dari konstruksi awal hingga akhir umur rencana. LCCA membantu pembuat keputusan untuk memilih alternatif yang paling ekonomis dalam jangka panjang, bukan hanya mempertimbangkan biaya konstruksi awal (Tiwari et al., 2025).

Biaya yang dipertimbangkan dalam LCCA meliputi biaya konstruksi awal, biaya pemeliharaan rutin, biaya rehabilitasi, biaya kerusakan lingkungan (jika diperhitungkan), dan nilai sisa perkerasan pada akhir periode analisis. Analisis ini sangat membantu dalam menunjukkan bahwa meskipun perkerasan kaku memiliki biaya konstruksi awal yang lebih tinggi, biaya siklus hidupnya mungkin lebih rendah daripada perkerasan fleksibel karena kebutuhan pemeliharaan yang lebih rendah (Tiwari et al., 2025).

Bab 7: Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas

7.1 Sistem Kontrol Lalu Lintas Adaptif

7.1.1 Prinsip Dasar Kontrol Lalu Lintas Adaptif

Sistem kontrol lalu lintas adaptif (*adaptive traffic control system*, ATCS) merupakan pendekatan modern dalam mengelola aliran kendaraan di persimpangan jalan raya dengan menyesuaikan waktu sinyal lampu lalu lintas berdasarkan kondisi lalu lintas real-time. Berbeda dengan sistem sinyal lalu lintas konvensional yang menggunakan waktu tetap (*fixed-time*), sistem adaptif mampu merespons perubahan volume lalu lintas secara dinamis, sehingga dapat mengurangi waktu tunggu kendaraan dan meningkatkan kapasitas jalan. Penelitian menunjukkan bahwa implementasi ATCS dapat mengurangi waktu tunda kendaraan hingga 50% dibandingkan dengan sistem sinyal waktu tetap (Kim et al., 2025).

Prinsip kerja ATCS melibatkan pengumpulan data lalu lintas real-time melalui sensor deteksi kendaraan, pemrosesan data untuk menentukan volume dan komposisi kendaraan di setiap lengan persimpangan, dan pengambilan keputusan otomatis mengenai durasi sinyal hijau. Sistem ini menggunakan algoritma optimasi untuk memastikan alokasi waktu hijau yang efisien, dengan memberikan durasi lebih panjang pada lengan dengan volume

kendaraan yang lebih tinggi. Dengan pendekatan ini, sistem dapat menyesuaikan diri dengan pola perjalanan yang berubah-ubah sepanjang hari dan meningkatkan efisiensi persimpangan.

7.1.2 Teknologi Deteksi Kendaraan dan Sensor

Teknologi deteksi kendaraan merupakan fondasi dari sistem kontrol lalu lintas adaptif yang efektif. Berbagai jenis sensor digunakan untuk mengumpulkan data tentang kehadiran, kepadatan, dan kecepatan kendaraan di setiap lengan persimpangan. Sensor inframerah (*infrared*, IR) merupakan salah satu teknologi yang paling umum digunakan karena kemampuannya mendeteksi kehadiran kendaraan dengan akurat dan biaya instalasi yang relatif terjangkau. Selain sensor IR, sistem modern juga menggunakan kamera berbasis visi komputer dengan algoritma deteksi berbasis kecerdasan buatan untuk menghitung kepadatan kendaraan (S. et al., 2025).

Penggunaan kamera dengan algoritma *You Only Look Once* (YOLO) telah terbukti efektif dalam mendeteksi dan menghitung kendaraan secara real-time dengan akurasi tinggi. Teknologi ini memungkinkan sistem untuk membedakan berbagai jenis kendaraan (*motorcycles, cars, trucks*) dan mengklasifikasi tingkat kepadatan lalu lintas. Data yang dikumpulkan oleh sensor ini ditransmisikan ke unit pemrosesan pusat yang kemudian mengambil keputusan tentang pengaturan sinyal lampu lalu lintas. Integrasi sensor yang baik dengan sistem pengolahan data memastikan informasi yang akurat dan responsif terhadap perubahan kondisi lalu lintas.

7.1.3 Algoritma Optimasi Sinyal Lalu Lintas

Algoritma optimasi merupakan komponen kritis dalam menentukan durasi sinyal lampu lalu lintas yang optimal. Berbagai pendekatan algoritma telah dikembangkan untuk tujuan ini, mulai dari metode tradisional hingga pendekatan berbasis kecerdasan buatan. Metode *Greenshield* merupakan model klasik yang menghubungkan kecepatan dan kepadatan kendaraan untuk memprediksi kapasitas jalan. Selain itu, algoritma *Frank-Wolfe* digunakan untuk mengoptimalkan rute perjalanan dengan mengurangi waktu perjalanan total di seluruh jaringan jalan (Singh & Thanikella, 2023).

Pendekatan modern menggunakan *Deep Reinforcement Learning* (DRL) dan khususnya *Deep Q-Network* (DQN) untuk mengoptimalkan waktu sinyal. Sistem DRL memungkinkan model untuk belajar dari pengalaman interaksi dengan lingkungan lalu lintas dan secara bertahap meningkatkan keputusan kontrol sinyal. Penelitian menunjukkan bahwa sistem berbasis DQN dapat mengurangi panjang antrian kendaraan hingga 9,7% dan meningkatkan *throughput* persimpangan secara signifikan (Swapno et al., 2023). Algoritma *Proximal Policy Optimization* (PPO) dan *Soft Actor-Critic* (SAC) juga telah terbukti efektif dalam mengoptimalkan kontrol sinyal multi-persimpangan.

7.1.4 Integrasi dengan Sistem Transportasi Cerdas

Integrasi sistem kontrol lalu lintas adaptif dengan infrastruktur transportasi cerdas yang lebih luas membuka peluang untuk manajemen lalu lintas yang lebih komprehensif. Teknologi

Internet of Things (IoT) memungkinkan komunikasi real-time antara kendaraan, infrastruktur jalan, dan pusat kontrol lalu lintas. Sistem ini dapat mengintegrasikan informasi dari berbagai sumber, termasuk data GPS dari kendaraan, status sinyal lalu lintas, kondisi cuaca, dan insiden lalu lintas, untuk memberikan rekomendasi rute yang optimal kepada pengemudi (Duan et al., 2025).

Penggunaan *cloud computing* dan analitik data besar (*big data analytics*) memungkinkan sistem untuk menyimpan dan menganalisis data lalu lintas dalam volume besar untuk mengidentifikasi pola dan tren jangka panjang. Sistem dapat menggunakan prediksi berbasis pembelajaran mesin untuk mengantisipasi perubahan kondisi lalu lintas dan melakukan penyesuaian proaktif pada strategi kontrol sinyal. Dengan integrasi ini, sistem transportasi cerdas dapat memberikan layanan yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan kepada pengguna jalan.

7.2 Manajemen Keselamatan Lalu Lintas

7.2.1 Analisis Kecelakaan dan Pemetaan Hotspot

Analisis kecelakaan lalu lintas merupakan aspek penting dalam pengembangan strategi keselamatan jalan yang efektif. Sistem *Geographic Information System* (GIS) telah menjadi alat yang sangat berguna dalam mengidentifikasi lokasi-lokasi dengan tingkat kecelakaan tinggi, yang dikenal sebagai *accident hotspots*. Dengan mengintegrasikan data kecelakaan, geometri jalan, kondisi lalu lintas, dan faktor lingkungan lainnya, GIS memungkinkan analisis

untuk visualisasi pola kecelakaan secara spasial dan mengidentifikasi faktor-faktor risiko (Nayak & Goyal, 2024).

Penelitian menunjukkan bahwa kehadiran jalan nasional, batas kecepatan tinggi, dan sistem drainase yang memadai dapat meningkatkan frekuensi kecelakaan, sedangkan kehadiran tanda vertikal dan horizontal yang jelas, serta larangan parkir, dapat mengurangi kecelakaan (Ines et al., 2021). Melalui analisis GIS yang terperinci, otoritas lalu lintas dapat mengidentifikasi area-area yang memerlukan intervensi keselamatan khusus dan mengalokasikan sumber daya dengan lebih efektif. Integrasi analisis temporal dan spasial memungkinkan identifikasi pola kecelakaan berdasarkan waktu, musim, dan kondisi cuaca tertentu.

7.2.2 Deteksi Dini Kecelakaan dan Manajemen Insiden

Deteksi dini kecelakaan dan manajemen insiden yang cepat merupakan kunci untuk mengurangi dampak kecelakaan terhadap aliran lalu lintas dan korban jiwa. Sistem berbasis visi komputer dapat mendeteksi kecelakaan dengan mengidentifikasi perubahan tiba-tiba dalam pola lalu lintas, seperti perlambatan kendaraan yang signifikan atau berhentinya kendaraan di jalur cepat. Algoritma deteksi kecelakaan otomatis dapat menggunakan kamera lalu lintas yang sudah ada untuk mengidentifikasi insiden dalam hitungan detik (Kadam et al., 2024).

Setelah kecelakaan terdeteksi, sistem manajemen insiden harus dengan cepat mengaktifkan respons yang sesuai, termasuk penyampaian informasi kepada pengguna jalan melalui papan peringatan dinamis atau aplikasi navigasi, pengalihan lalu lintas

alternatif, dan koordinasi dengan layanan darurat. Penelitian menunjukkan bahwa dengan sistem deteksi dini dan respons manajemen insiden yang cepat, waktu respons dapat dikurangi hingga 47%, yang secara signifikan mengurangi kemacetan dan risiko kecelakaan sekunder (Singh & Thanikella, 2023).

7.2.3 Prioritas Kendaraan Darurat

Sistem prioritas kendaraan darurat (*emergency vehicle preemption*, EVP) memungkinkan ambulans, mobil pemadam kebakaran, dan kendaraan polisi untuk melewati persimpangan dengan sinyal lampu lalu lintas lebih cepat, sehingga mengurangi waktu respons dalam situasi darurat. Teknologi deteksi kendaraan darurat menggunakan sirene, cahaya, atau komunikasi kendaraan-ke-infrastruktur (*vehicle-to-infrastructure*, V2I) untuk mengidentifikasi kehadiran kendaraan darurat. Setelah terdeteksi, sistem secara otomatis menyesuaikan sinyal lampu lalu lintas untuk memberikan jalan yang jelas kepada kendaraan darurat (Anitha et al., 2025).

Implementasi EVP yang efektif dapat mengurangi waktu perjalanan kendaraan darurat secara signifikan, yang pada gilirannya dapat menyelamatkan nyawa dalam situasi medis darurat. Penelitian menunjukkan bahwa sistem AVP yang terintegrasi dengan komunikasi V2I dan IoT dapat meningkatkan efisiensi respons darurat sambil tetap mempertahankan keselamatan pengguna jalan lain. Sistem EVP modern juga dapat memberikan prioritas kepada kendaraan transportasi umum untuk meningkatkan efisiensi layanan transportasi massal.

7.2.4 Keselamatan Pejalan Kaki dan Pesepeda

Keselamatan pejalan kaki dan pesepeda merupakan dimensi penting dari manajemen lalu lintas yang sering kali terabaikan dalam sistem yang fokus pada aliran kendaraan. Sistem kontrol lalu lintas harus dirancang untuk mengakomodasi kebutuhan pejalan kaki dan pesepeda dengan memberikan waktu persimpangan yang cukup untuk mereka menyeberang jalan dengan aman. Penelitian menunjukkan bahwa sistem kontrol sinyal yang mengoptimalkan kebutuhan kendaraan saja sering kali mengakibatkan waktu tunggu yang lama bagi pejalan kaki (Niels et al., 2023).

Teknologi deteksi pejalan kaki dan pesepeda menggunakan sensor dan kamera untuk mengidentifikasi kehadiran mereka di area persimpangan dan memastikan sinyal memberikan waktu yang cukup untuk menyeberang. Fitur keselamatan tambahan seperti zona perlambatan kecepatan (*speed reduction zones*) di area dengan volume pejalan kaki tinggi dan jalur pesepeda yang terlindungi dapat mengurangi kecelakaan melibatkan pejalan kaki dan pesepeda. Dengan pendekatan holistik yang mempertimbangkan semua pengguna jalan, sistem manajemen lalu lintas dapat menciptakan lingkungan transportasi yang lebih aman dan inklusif.

7.3 Manajemen Kemacetan dan Prediksi Lalu Lintas

7.3.1 Pemodelan Aliran Lalu Lintas

Pemodelan aliran lalu lintas merupakan dasar dari pemahaman bagaimana kendaraan bergerak melalui jaringan jalan dan membantu dalam perancangan sistem manajemen lalu lintas yang efektif. Model makroskopik, seperti model gelombang kinematik dan model transmisi sel (*cell transmission model*, CTM), menggambarkan aliran lalu lintas pada tingkat agregat dengan menghubungkan kepadatan kendaraan, aliran, dan kecepatan rata-rata. Model mikroskopik, sebaliknya, mensimulasikan perilaku individual kendaraan dan interaksi antar kendaraan, memberikan detail yang lebih rinci tentang dinamika lalu lintas (Garca & Hernandez, 2021).

Penggunaan perangkat lunak simulasi lalu lintas seperti *Simulation of Urban Mobility* (SUMO) memungkinkan analisis untuk membangun model jaringan jalan yang kompleks dan mensimulasikan berbagai skenario manajemen lalu lintas sebelum implementasi di lapangan. Validasi model dengan data lapangan memastikan bahwa model mencerminkan kondisi lalu lintas yang sebenarnya. Dengan model yang valid, analisis dapat memprediksi dampak dari perubahan infrastruktur atau strategi manajemen lalu lintas, seperti penambahan jalur atau perubahan waktu sinyal, terhadap aliran lalu lintas secara keseluruhan.

7.3.2 Prediksi Lalu Lintas dengan Pembelajaran Mesin

Prediksi lalu lintas yang akurat memungkinkan sistem manajemen lalu lintas untuk mengambil tindakan proaktif untuk mencegah atau mengurangi kemacetan. Algoritma pembelajaran mesin dan pembelajaran mendalam (*deep learning*) telah terbukti efektif dalam memprediksi kondisi lalu lintas berdasarkan data historis dan real-time. Jaringan saraf konvolusional (*convolutional neural networks*, CNN) dapat menganalisis gambar dari kamera lalu lintas untuk memprediksi kepadatan kendaraan, sedangkan jaringan saraf berulang (*recurrent neural networks*, RNN) dapat memprediksi aliran lalu lintas berdasarkan deret waktu data historis (Pravin & S, 2025).

Pendekatan model ensemble yang menggabungkan multiple algoritma pembelajaran mesin telah menunjukkan akurasi prediksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan model tunggal. Data dari berbagai sumber, termasuk sensor lalu lintas, data GPS dari kendaraan, media sosial, dan informasi cuaca, dapat diintegrasikan untuk meningkatkan akurasi prediksi. Dengan prediksi lalu lintas yang akurat, sistem dapat memberikan informasi perjalanan yang lebih baik kepada pengemudi dan mengoptimalkan rute perjalanan untuk mengurangi waktu perjalanan total.

7.3.3 Strategi Manajemen Permintaan Lalu Lintas

Strategi manajemen permintaan lalu lintas (*demand management*, TDM) fokus pada pengurangan jumlah perjalanan dengan kendaraan pribadi pada jam-jam puncak melalui berbagai insentif dan disinsentif. Salah satu strategi TDM yang paling umum

adalah penetapan harga jalan dinamis (*dynamic road pricing*), di mana harga untuk menggunakan jalan atau area tertentu bervariasi berdasarkan tingkat kemacetan. Penelitian menunjukkan bahwa sistem penetapan harga dinamis dapat mengurangi waktu perjalanan total dan emisi karbon dari sistem transportasi (Zhao & Lv, 2025).

Strategi TDM lainnya termasuk promosi penggunaan transportasi umum, program kerja fleksibel atau *telecommuting*, pengembangan pusat-pusat pekerjaan alternatif di lokasi yang lebih dekat ke tempat tinggal karyawan, dan insentif untuk penggunaan kendaraan bersama. Integrasi berbagai strategi TDM dalam pendekatan manajemen lalu lintas yang komprehensif telah terbukti lebih efektif dalam mengurangi kemacetan dibandingkan dengan strategi tunggal. Dengan mengurangi permintaan kendaraan pribadi, sistem transportasi dapat mencapai efisiensi yang lebih tinggi dengan infrastruktur yang ada.

7.3.4 Monitoring Real-Time dan Visualisasi Data

Sistem monitoring lalu lintas real-time memungkinkan petugas lalu lintas untuk memantau kondisi jaringan jalan dan mengidentifikasi masalah dengan cepat. Dashboard lalu lintas yang menampilkan informasi tentang aliran kendaraan, kepadatan, waktu perjalanan, dan insiden memungkinkan pengambilan keputusan yang cepat dan tepat. Teknologi *Internet of Things* (IoT) dan komunikasi kendaraan-ke-infrastruktur (V2I) memungkinkan pengumpulan data yang lebih rinci dan real-time tentang kondisi lalu lintas (Blinova et al., 2024).

Visualisasi data lalu lintas menggunakan peta interaktif dan grafik real-time membantu petugas dan pengguna jalan untuk memahami kondisi lalu lintas dengan cepat. Integrasi data dari berbagai sumber seperti kamera, sensor, aplikasi navigasi, dan media sosial memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang kondisi lalu lintas. Dengan sistem monitoring yang baik, otoritas lalu lintas dapat memberikan respons yang cepat dan efektif terhadap situasi kemacetan atau insiden lalu lintas yang terjadi.

7.4 Koordinasi Multi-Persimpangan dan Jaringan Jalan

7.4.1 Kontrol Sinyal Terkoordinasi Antar-Persimpangan

Kontrol sinyal lalu lintas yang terkoordinasi antar-persimpangan bertujuan untuk mempertahankan aliran kendaraan yang lancar di sepanjang koridor jalan dengan mengkoordinasikan waktu sinyal di persimpangan yang berdekatan. Pendekatan ini lebih efektif dibandingkan dengan kontrol sinyal independen di setiap persimpangan karena dapat mengurangi berhentinya kendaraan (*stops*) dan meningkatkan kecepatan rata-rata perjalanan di koridor. Algoritma kontrol terkoordinasi menggunakan informasi tentang aliran kendaraan di antara persimpangan untuk menentukan *offset* waktu sinyal yang optimal (Feng et al., 2025).

Penelitian menunjukkan bahwa sistem kontrol sinyal terkoordinasi dapat mengurangi total waktu tunggu kendaraan di koridor jalan dan meningkatkan kapasitas koridor secara

keseluruhan. Pendekatan berbasis multi-agen (*multi-agent*) memungkinkan setiap persimpangan untuk bernegosiasi dengan persimpangan tetangga untuk mencapai solusi kontrol yang optimal untuk seluruh koridor. Dengan koordinasi yang baik, sistem dapat mengalokasikan aliran kendaraan dari persimpangan upstream ke downstream dengan lebih efisien (Graves et al., 2021).

7.4.2 Komunikasi Infrastruktur Kendaraan dan Pertukaran Informasi

Komunikasi antar persimpangan dan antara infrastruktur dengan kendaraan memungkinkan sistem manajemen lalu lintas untuk berbagi informasi dan mengkoordinasikan tindakan secara real-time. Teknologi Vehicle-to-Infrastructure (V2I) dan Vehicle-to-Vehicle (V2V) memungkinkan kendaraan untuk menerima informasi tentang kondisi lalu lintas di ahead dan menyesuaikan rute perjalanan mereka. Teknologi Visible Light Communication (VLC) menggunakan cahaya terlihat untuk komunikasi, yang dapat terintegrasi dengan sistem sinyal lalu lintas yang sudah ada (Vieira et al., 2024).

Pertukaran informasi real-time antara persimpangan memungkinkan sistem untuk mendeteksi dan merespons perubahan kondisi lalu lintas dengan cepat. Informasi tentang kemacetan, insiden, atau perubahan permintaan lalu lintas dapat dibagikan antar persimpangan sehingga setiap persimpangan dapat menyesuaikan strategi kontrolnya. Komunikasi yang efektif juga memungkinkan sistem untuk memberikan rekomendasi rute alternatif kepada

pengemudi untuk menghindari area yang mengalami kemacetan (Ali & Mohammed, 2025).

7.4.3 Optimasi Jaringan Lalu Lintas Berskala Besar

Optimasi jaringan lalu lintas pada skala besar, yang mencakup ratusan atau ribuan persimpangan, memerlukan pendekatan yang lebih canggih daripada optimasi di tingkat persimpangan atau koridor. Algoritma pembelajaran mesin dan pembelajaran penguatan multi-agen (*multi-agent reinforcement learning*, MARL) telah terbukti efektif dalam mengatasi kompleksitas optimasi jaringan berskala besar. Pendekatan MARL memungkinkan setiap agen (persimpangan) untuk belajar strategi kontrol yang optimal sambil berkoordinasi dengan agen-agen lain (Olusanya et al., 2025).

Penelitian menunjukkan bahwa sistem MARL dapat meningkatkan efisiensi jaringan lalu lintas sebesar 64,5% dalam hal manajemen antrian dan 70% dalam hal aliran lalu lintas. Penggunaan *graph neural networks* (GNN) untuk menangkap hubungan spasial antar persimpangan dapat meningkatkan performa sistem kontrol. Dengan pendekatan ini, sistem dapat menangani kondisi lalu lintas yang kompleks dan dinamis di jaringan jalan yang besar (Wang et al., 2024).

7.4.4 Integrasi dengan Transportasi Umum dan Transportasi Alternatif

Integrasi manajemen lalu lintas kendaraan pribadi dengan sistem transportasi umum dan transportasi alternatif seperti transportasi berbagi (*ride-sharing*) dan pesepeda (*cycling*)

merupakan aspek penting dari perencanaan transportasi yang berkelanjutan. Sistem sinyal lalu lintas dapat memberikan prioritas kepada kendaraan transportasi umum untuk meningkatkan kecepatan dan keandalan layanan. Jalur bus khusus dan sinyal hijau prioritas untuk bus dapat meningkatkan kecepatan perjalanan bus hingga 20-30% (Rivadeneira et al., 2024).

Manajemen lalu lintas yang terintegrasi juga harus mempertimbangkan kebutuhan pengguna transportasi non-motorized seperti pesepeda dan pejalan kaki. Sistem harus mengalokasikan waktu sinyal yang cukup untuk penyeberangan pejalan kaki yang aman dan memastikan jalur pesepeda yang terlindungi. Dengan pendekatan yang terintegrasi, sistem transportasi dapat memberikan pilihan mobilitas yang beragam dan menciptakan lingkungan transportasi yang lebih berkelanjutan dan inklusif.

7.5 Teknologi Komunikasi Kendaraan dan Otomasi

7.5.1 Sistem Komunikasi *Vehicle-to-Everything* (V2X)

Sistem komunikasi *Vehicle-to-Everything* (V2X) memungkinkan kendaraan untuk berkomunikasi dengan kendaraan lain (V2V), infrastruktur jalan (V2I), jaringan (V2N), dan pejalan kaki (V2P). Teknologi ini membuka peluang baru untuk meningkatkan keselamatan lalu lintas, efisiensi jaringan jalan, dan pengalaman pengguna. Dengan V2X, kendaraan dapat menerima

informasi tentang kondisi jalan di depan, memperingatkan tentang potensi bahaya, dan mengkoordinasikan gerakan dengan kendaraan lain (Ali & Mohammed, 2025).

Implementasi V2X memerlukan infrastruktur komunikasi yang andal dan standar komunikasi yang disepakati secara universal. Teknologi 5G menyediakan bandwidth dan latensi rendah yang diperlukan untuk komunikasi V2X real-time. Dengan V2X, sistem manajemen lalu lintas dapat mencapai tingkat koordinasi dan keselamatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem berbasis infrastruktur saja. Namun, tantangan dalam keamanan data, privasi, dan interoperabilitas antar operator masih perlu diatasi untuk implementasi V2X yang sukses.

7.5.2 Kendaraan Otomatis dan Manajemen Persimpangan Otonomi

Munculnya kendaraan otomatis (*autonomous vehicles*, AVs) membuka kemungkinan untuk merancang ulang sistem manajemen lalu lintas di persimpangan. Dengan kendaraan yang dapat berkomunikasi dengan sistem manajemen persimpangan dan dengan kendaraan lain, persimpangan dapat dikelola tanpa memerlukan sinyal lampu lalu lintas tradisional. Sistem manajemen persimpangan otonomi (*autonomous intersection management*, AIM) yang berbasis reservasi memungkinkan kendaraan untuk memesan waktu slot untuk melewati persimpangan, dan sistem mengalokasikan slot dengan cara yang memaksimalkan throughput dan meminimalkan delay (Dresner & Stone, 2008).

Penelitian menunjukkan bahwa AIM berbasis optimasi dapat meningkatkan kapasitas persimpangan dan mengurangi delay dibandingkan dengan kontrol sinyal konvensional, bahkan di hadapan lalu lintas campuran yang mencakup kendaraan otomatis dan kendaraan berpengemudi manusia. Dengan teknologi trajectory optimization, kendaraan dapat melewati persimpangan dengan akselerasi dan deselerasi yang minimal, menghemat energi dan mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 80%. Namun, implementasi AIM memerlukan penetrasi kendaraan otomatis yang tinggi dan komunikasi yang dapat diandalkan antara kendaraan dan infrastruktur.

7.5.3 Sistem Transportasi Cerdas dan Integrasi Mobilitas

Sistem Transportasi Cerdas (*Intelligent Transportation Systems*, ITS) mengintegrasikan teknologi informasi dan komunikasi untuk meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan keberlanjutan transportasi. ITS mencakup berbagai aplikasi seperti informasi perjalanan real-time, sistem reservasi parkir pintar, dan sistem pembayaran transportasi terintegrasi. Dengan mengintegrasikan berbagai mode transportasi dalam satu platform, pengguna dapat merencanakan perjalanan yang efisien dengan mempertimbangkan semua opsi transportasi yang tersedia (Khan et al., 2022).

Aplikasi transportasi berbagi (*ride-sharing*) dan pembagian kendaraan (*car-sharing*) yang terintegrasi dengan sistem manajemen lalu lintas dapat mengurangi jumlah kendaraan pribadi di jalan dan meningkatkan efisiensi penggunaan jalan. Platform mobilitas

sebagai layanan (*Mobility as a Service*, MaaS) menyediakan interface tunggal untuk pengguna untuk mengakses berbagai mode transportasi, membuat perjalanan multimoda lebih mudah dan menarik. Dengan integrasi yang baik, sistem transportasi dapat memberikan layanan yang lebih efisien dan berkelanjutan kepada pengguna.

7.5.4 Keamanan Data dan Privasi dalam Sistem Transportasi Cerdas

Implementasi sistem transportasi cerdas yang ekstensif menghasilkan jumlah data besar tentang pergerakan kendaraan dan pengguna jalan. Keamanan dan privasi data ini merupakan aspek kritis yang harus dipertimbangkan dalam desain sistem. Sistem harus melindungi informasi pribadi pengguna dari akses tidak sah dan memastikan bahwa data hanya digunakan untuk tujuan yang diizinkan. Enkripsi data dan protokol keamanan komunikasi yang kuat harus diterapkan di seluruh sistem.

Regulasi seperti Peraturan Perlindungan Data Umum (*General Data Protection Regulation*, GDPR) di Eropa telah menetapkan standar tinggi untuk perlindungan data pribadi. Sistem transportasi cerdas harus mematuhi regulasi ini dan memberikan transparansi kepada pengguna tentang bagaimana data mereka dikumpulkan, digunakan, dan disimpan. Dengan menerapkan standar keamanan dan privasi yang ketat, sistem transportasi cerdas dapat membangun kepercayaan pengguna dan mendorong adopsi teknologi yang lebih luas.

7.6 Keberlanjutan dan Dampak Lingkungan

7.6.1 Pengurangan Emisi dan Efisiensi Bahan Bakar

Sistem manajemen lalu lintas yang efektif dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan konsumsi bahan bakar dengan mengurangi kemacetan dan optimalisasi pola berkendara. Kemacetan menyebabkan peningkatan berhentinya kendaraan dan akselerasi berlebihan, yang mengakibatkan konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi dan emisi yang lebih besar. Penelitian menunjukkan bahwa optimasi sinyal lalu lintas dapat mengurangi emisi karbon hingga 20-30% di area urban (Miharja & Rahayu, 2025).

Integrasi sistem manajemen lalu lintas dengan promosi kendaraan listrik dan transportasi umum dapat memberikan pengurangan emisi yang lebih signifikan. Sistem sinyal lalu lintas yang dirancang untuk mendukung aliran transportasi umum dapat meningkatkan penggunaan layanan transportasi umum, yang memiliki emisi per penumpang yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan kendaraan pribadi. Dengan pendekatan holistik yang menggabungkan manajemen lalu lintas, promosi transportasi berkelanjutan, dan teknologi kendaraan bersih, sistem transportasi dapat mencapai pengurangan emisi yang substansial.

7.6.2 Perencanaan Penggunaan Lahan dan Aksesibilitas

Perencanaan penggunaan lahan yang terintegrasi dengan manajemen lalu lintas dapat mengurangi kebutuhan perjalanan jarak jauh dan mendorong pola perjalanan yang lebih berkelanjutan. Konsep *Transit-Oriented Development* (TOD) menggabungkan

pengembangan perumahan dan komersial dengan tingkat kepadatan tinggi di sekitar stasiun transportasi umum, mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi (Perera & Abeysooriya, 2025). Dengan menempatkan tempat kerja, tempat tinggal, dan layanan dalam jarak yang dapat ditempuh dengan berjalan kaki atau bersepeda, sistem transportasi dapat mencapai efisiensi yang lebih tinggi.

Aksesibilitas yang baik ke transportasi umum dan layanan penting juga penting untuk memastikan bahwa semua segmen masyarakat dapat mengakses peluang ekonomi dan sosial. Perencanaan transportasi yang adil harus mempertimbangkan kebutuhan kelompok yang kurang mampu secara ekonomi dan memastikan bahwa mereka memiliki akses ke transportasi yang terjangkau. Dengan pendekatan perencanaan lahan penggunaan dan transportasi yang terintegrasi, sistem dapat menciptakan komunitas yang lebih berkelanjutan dan inklusif.

7.6.3 Monitoring Kualitas Udara dan Dampak Lingkungan

Monitoring kualitas udara secara real-time memungkinkan untuk mengidentifikasi area dengan polusi udara tinggi dan mengambil tindakan manajemen lalu lintas yang ditargetkan untuk mengurangi emisi. Sistem dapat menggunakan data dari sensor kualitas udara untuk menyesuaikan strategi manajemen lalu lintas, seperti membatasi akses kendaraan berbahan bakar fosil atau memberikan prioritas kepada kendaraan listrik. Integrasi monitoring kualitas udara dengan sistem informasi perjalanan dapat membantu

pengguna membuat keputusan yang lebih berkelanjutan (Perera & Abeysooriya, 2025).

Analisis dampak lingkungan dari berbagai strategi manajemen lalu lintas dapat membantu pemilihan intervensi yang paling efektif dalam mengurangi emisi dan polusi udara. Model transportasi yang mengintegrasikan aspek lingkungan dapat mengevaluasi trade-off antara berbagai tujuan, seperti efisiensi lalu lintas dan kualitas udara. Dengan pendekatan yang komprehensif, sistem transportasi dapat mencapai berbagai tujuan keberlanjutan secara bersamaan.

7.6.4 Perencanaan Jangka Panjang dan Adaptasi Perubahan Iklim

Perencanaan transportasi jangka panjang harus mempertimbangkan dampak perubahan iklim dan mengembangkan strategi adaptasi yang dapat meningkatkan ketahanan sistem transportasi terhadap dampak iklim. Infrastruktur jalan yang terendam air akibat curah hujan tinggi atau banjir dapat mengganggu operasi jaringan jalan. Perencanaan adaptasi dapat mencakup pengangkatan jalan di area yang rentan banjir, peningkatan sistem drainase, dan diversifikasi rute untuk mengurangi ketergantungan pada jalan tunggal (Delbosc et al., 2018).

Transisi ke transportasi rendah karbon (*low-carbon transport*) adalah aspek penting dari strategi adaptasi perubahan iklim transportasi. Investasi dalam transportasi umum, infrastruktur pesepeda, dan kendaraan listrik dapat mengurangi emisi transportasi sambil meningkatkan ketahanan sistem. Dengan perencanaan jangka

panjang yang mempertimbangkan perubahan iklim, sistem transportasi dapat berkontribusi pada target mitigasi iklim global sambil memastikan bahwa kebutuhan mobilitas masyarakat tetap terpenuhi.

Bab 8: Transportasi Perkotaan dan Angkutan Umum

8.1 Konsep dan Definisi Transportasi Perkotaan

8.1.1 Pengertian Transportasi Perkotaan

Transportasi perkotaan merupakan sistem terintegrasi yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan mobilitas penduduk kota melalui berbagai moda transportasi yang tersedia. Transportasi perkotaan mencakup kendaraan pribadi, angkutan umum (*public transport*), kendaraan *light rail*, dan moda transportasi non-motorisasi seperti sepeda dan jalan kaki. Sebagai bagian penting dari infrastruktur perkotaan, sistem transportasi perkotaan memiliki fungsi kritis dalam mendukung aktivitas ekonomi, sosial, dan kehidupan sehari-hari masyarakat kota (Han et al., 2022). Perkembangan transportasi perkotaan sangat dipengaruhi oleh pertumbuhan populasi urban, intensifikasi aktivitas kota, dan tekanan lingkungan yang meningkat.

Transportasi perkotaan modern dihadapkan pada tantangan kompleks, termasuk pertumbuhan jumlah kendaraan pribadi yang tidak terkontrol, kemacetan lalu lintas yang kronis, dan degradasi kualitas udara perkotaan. Sistem transportasi yang efisien dan berkelanjutan menjadi kebutuhan mendesak dalam konteks transisi menuju kota pintar (*smart cities*) dan pembangunan berkelanjutan

(Babu, 2025). Penelitian menunjukkan bahwa kota-kota dengan sistem transportasi perkotaan yang terencana dengan baik mengalami efisiensi operasional yang lebih tinggi, berkurangnya kemacetan, dan peningkatan kualitas hidup penduduk.

8.1.2 Peran Transportasi Perkotaan dalam Pembangunan Kota

Transportasi perkotaan memainkan peran fundamental dalam membentuk karakter dan dinamika kota. Sistem transportasi yang baik memberikan aksesibilitas tinggi kepada berbagai pusat aktivitas, seperti pusat bisnis, institusi pendidikan, fasilitas kesehatan, dan ruang hiburan. Aksesibilitas yang baik ini mendorong pertumbuhan ekonomi, meningkatkan produktivitas masyarakat, dan menciptakan peluang kerja baru (Babu, 2025). Lebih dari itu, transportasi perkotaan yang efisien berkontribusi pada pengurangan emisi karbon, peningkatan kualitas udara, dan pemertahanan keberlanjutan lingkungan kota.

Peranan strategis transportasi perkotaan juga tercermin dalam kapasitasnya untuk membentuk pola penggunaan lahan (*urban form*) dan struktur spasial kota. Investasi dalam sistem transportasi publik berkualitas tinggi mendorong pengembangan intensif di sekitar stasiun dan halte, mempromosikan kepadatan penduduk yang optimal, dan mengurangi sprawl urban (*urban sprawl*). Penelitian menunjukkan bahwa pengembangan berorientasi transit (*transit-oriented development* - TOD) menghasilkan penggunaan lahan yang lebih efisien, berkurangnya ketergantungan pada kendaraan pribadi, dan peningkatan kualitas hidup masyarakat urban (Udachan & Patil, 2025). Dengan demikian, perencanaan

transportasi perkotaan harus terintegrasi dengan perencanaan penggunaan lahan untuk mencapai hasil optimal.

8.1.3 Hierarki dan Tipologi Moda Transportasi Perkotaan

Sistem transportasi perkotaan terdiri dari berbagai moda transportasi yang dapat dihierarkisasikan berdasarkan kapasitas, kecepatan, dan fungsi dalam sistem transportasi. Moda transportasi dapat dibagi menjadi beberapa kategori utama: transportasi massal cepat seperti *light rail transit* (LRT) dan *mass rapid transit* (MRT), transportasi massal kapasitas sedang seperti *bus rapid transit* (BRT), transportasi kolektif konvensional seperti bus reguler, transportasi pribadi, dan transportasi non-motorisasi (Bilonoh et al., 2025). Setiap moda memiliki karakteristik unik dalam hal kapasitas, kecepatan operasional, biaya operasional, dan dampak lingkungan.

Pemilihan moda transportasi dalam suatu kota harus mempertimbangkan demografi penduduk, pola permintaan perjalanan (*travel demand*), ketersediaan infrastruktur, dan keberlanjutan lingkungan. Penelitian menunjukkan bahwa sistem transportasi perkotaan yang optimal mengintegrasikan berbagai moda transportasi dalam satu jaringan terkoordinasi, memungkinkan penumpang untuk melakukan perjalanan multi-modal dengan mudah (Ceder, 2020). Integrasi moda transportasi ini mencakup koordinasi jadwal, informasi perjalanan terintegrasi, sistem pembayaran terpadu, dan desain stasiun/halte yang memfasilitasi perpindahan antar moda (*intermodal transfer*).

8.1.4 Aspek Keberlanjutan dalam Transportasi Perkotaan

Keberlanjutan transportasi perkotaan menjadi prioritas utama dalam perencanaan kota modern, mengingat dampak signifikan sektor transportasi terhadap lingkungan dan perubahan iklim. Transportasi perkotaan yang berkelanjutan (*sustainable urban mobility*) bertujuan untuk memenuhi kebutuhan mobilitas masyarakat sambil meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, ekonomi, dan sosial (Bokolo, 2025). Aspek keberlanjutan mencakup pengurangan emisi karbon, efisiensi penggunaan energi, dan perkembangan transportasi ramah lingkungan seperti kendaraan listrik (*electric vehicles* - EV) dan bahan bakar alternatif.

Konsep *Sustainable Urban Mobility Plan* (SUMP) telah diadopsi oleh berbagai kota di seluruh dunia sebagai kerangka kerja untuk merencanakan sistem transportasi berkelanjutan (Shevchuk et al., 2024). SUMP menekankan pendekatan holistik yang mengintegrasikan transportasi dengan perencanaan penggunaan lahan, kebijakan perekonomian kota, dan pembangunan sosial. Implementasi SUMP yang efektif memerlukan keterlibatan berbagai stakeholder, termasuk pemerintah, operator transportasi, komunitas lokal, dan sektor swasta, dalam proses perencanaan dan pengambilan keputusan.

8.2 Infrastruktur Transportasi dan Perencanaan Jaringan

8.2.1 Perencanaan Jaringan Transportasi Perkotaan

Perencanaan jaringan transportasi perkotaan merupakan proses kompleks yang melibatkan analisis mendalam terhadap pola permintaan perjalanan, identifikasi koridor prioritas, dan optimalisasi rute transportasi. Tahap pertama dalam proses perencanaan adalah melakukan studi kebutuhan mobilitas yang komprehensif melalui survei *origin-destination* (OD), analisis data *smart card*, dan pemodelan perjalanan (*travel demand modeling*) (Meng, 2024). Data ini memberikan wawasan tentang pola perjalanan, volume penumpang per rute, dan waktu-waktu puncak, yang menjadi dasar untuk keputusan perencanaan strategis.

Pengembangan jaringan transportasi harus mempertimbangkan prinsip-prinsip aksesibilitas, efisiensi, dan kesetaraan sosial. Penelitian menunjukkan bahwa jaringan transportasi yang baik dirancang dengan memperhatikan jangkauan layanan (*coverage*) yang luas untuk melayani semua segmen masyarakat, termasuk kelompok rentan seperti lansia, penyandang disabilitas, dan kelompok berpenghasilan rendah (Elorduy et al., 2025). Perencanaan harus juga mempertimbangkan ketersediaan infrastruktur pendukung, seperti area parkir, halte yang terintegrasi, dan fasilitas *first-mile/last-mile* yang memudahkan akses ke sistem transportasi utama.

8.2.2 Infrastruktur Jaringan Jalan dan Fasilitas Pendukung

Infrastruktur jalan raya merupakan fondasi dari sistem transportasi perkotaan, menyediakan ruang untuk berbagai moda transportasi termasuk kendaraan pribadi, angkutan umum, sepeda, dan pejalan kaki. Perancangan jaringan jalan yang berkelanjutan memerlukan pendekatan multi-moda yang mengalokasikan ruang jalan secara adil kepada berbagai pengguna jalan. Penelitian menunjukkan bahwa implementasi *complete streets* atau jalan lengkap (*jalan yang melayani semua pengguna*) meningkatkan keamanan lalu lintas, mengurangi emisi, dan meningkatkan kualitas hidup perkotaan (Paiva et al., 2024). Infrastruktur jalan yang baik mencakup jalur bus *dedicated*, jalur sepeda yang aman, trotoar yang luas, dan ruang publik hijau yang terintegrasi.

Fasilitas pendukung, seperti halte angkutan umum, stasiun transfer, area parkir, dan pusat informasi mobilitas, merupakan komponen penting dari infrastruktur transportasi perkotaan. Desain halte dan stasiun yang baik harus mempertimbangkan kenyamanan penumpang, keamanan, aksesibilitas untuk penyandang disabilitas, dan integrasi dengan sistem transportasi lainnya (Pudji et al., 2024). Infrastruktur digital, seperti sistem informasi perjalanan real-time, *intelligent transportation systems* (ITS), dan aplikasi mobilitas terintegrasi (*Mobility-as-a-Service* - MaaS), menjadi semakin penting untuk meningkatkan efisiensi dan pengalaman pengguna layanan transportasi perkotaan.

8.2.3 Optimalisasi dan Efisiensi Operasional Jaringan

Optimalisasi jaringan transportasi melibatkan penyesuaian rute, frekuensi, dan alokasi kendaraan untuk memaksimalkan efisiensi operasional dan kepuasan pengguna. Teknologi analitik data dan pembelajaran mesin (*machine learning*) memungkinkan operator transportasi untuk memprediksi permintaan perjalanan dengan akurasi tinggi dan menyesuaikan penawaran layanan secara dinamis (Hernandez et al., 2025). Sistem *real-time crowding monitoring* menggunakan data *Google Popular Times* dan sensor IoT untuk memantau kepadatan penumpang di berbagai halte dan memandu distribusi kendaraan yang lebih efisien.

Penelitian pada sistem transportasi perkotaan menunjukkan bahwa implementasi strategi pengelolaan permintaan (*demand management*), seperti *congestion pricing*, *parking policy*, dan promosi transportasi publik, dapat mengurangi kemacetan sebesar 15-28% (Morency et al., 2020). Penggunaan alat optimalisasi operasional, seperti perencanaan jadwal dinamis (*dynamic scheduling*), dispatching berbasis algoritma, dan manajemen armada real-time, meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi biaya operasional secara signifikan.

8.2.4 Integrasi Moda dan Sistem Pembayaran

Integrasi moda transportasi memungkinkan penumpang melakukan perjalanan multi-moda dengan transisi yang mulus antar moda. Sistem pembayaran terpadu (*unified payment system*) menggunakan kartu pintar (*smart card*) atau dompet digital memfasilitasi integrasi moda dengan menghilangkan kebutuhan

untuk membeli tiket terpisah di setiap moda (Bwigenge et al., 2020). Penelitian menunjukkan bahwa adopsi sistem pembayaran cashless meningkatkan efisiensi pengumpulan tarif, mengurangi waktu tunggu penumpang, dan menghasilkan data berharga untuk analisis pola perjalanan.

Integrasi jaringan transportasi juga memerlukan koordinasi jadwal (*schedule coordination*) antar moda untuk meminimalkan waktu tunggu transfer (*transfer waiting time*). Penggunaan *schedule synchronization* dan *timed transfer* meningkatkan kemudahan perjalanan multi-moda dan mendorong penggunaan kombinasi moda yang optimal (Bauchinger et al., 2021). Sistem informasi terintegrasi memberikan informasi perjalanan komprehensif kepada penumpang, termasuk rute optimal, waktu perjalanan, dan estimasi biaya, memfasilitasi pengambilan keputusan penumpang yang informed.

8.3 Manajemen Operasional dan Kinerja Layanan

8.3.1 Sistem Perencanaan dan Penjadwalan

Perencanaan dan penjadwalan operasional merupakan aspek kritis dalam manajemen sistem transportasi perkotaan. Perencanaan meliputi penentuan rute, frekuensi layanan, alokasi kendaraan, dan penjadwalan operator untuk memenuhi permintaan perjalanan dengan biaya operasional yang efisien. Metodologi perencanaan modern menggunakan pendekatan berbasis data, memanfaatkan

analitik historis, model prediktif, dan simulasi untuk mengoptimalkan keputusan perencanaan (Soares et al., 2020). Algoritma optimalisasi canggih, seperti *genetic algorithm* dan *constraint programming*, digunakan untuk menyelesaikan masalah kompleks penjadwalan dengan ribuan variabel keputusan.

Penelitian pada sistem *bus rapid transit* (BRT) menunjukkan bahwa perencanaan rute yang efisien dapat meningkatkan kecepatan operasional dan mengurangi waktu perjalanan penumpang secara signifikan. Penggunaan jalur khusus (*dedicated lanes*) untuk BRT, dikombinasikan dengan sistem pembayaran pratunas (*pre-board payment*) dan halte tingkat tinggi, dapat mengurangi waktu perjalanan hingga 30% dibandingkan dengan bus konvensional (Fadhilah et al., 2025). Sistem perencanaan real-time memungkinkan operator untuk menyesuaikan jadwal dan keputusan operasional berdasarkan kondisi lalu lintas aktual, kejadian darurat, dan perubahan permintaan mendadak.

8.3.2 Manajemen Armada dan Pemeliharaan Kendaraan

Manajemen armada (*fleet management*) merupakan fungsi operasional yang bertanggung jawab atas perencanaan investasi kendaraan, pemeliharaan, dan penghapusan kendaraan untuk memastikan ketersediaan kapasitas yang optimal. Keputusan investasi armada harus mempertimbangkan umur ekonomis kendaraan, teknologi emisi terbaru, dan kebutuhan kapasitas jangka panjang. Modernisasi armada dengan kendaraan yang lebih ramah lingkungan, seperti bus listrik (*electric bus*) dan bus gas alam terkompresi (*compressed natural gas* - CNG), merupakan strategi

penting untuk mencapai target pengurangan emisi (Tiahunova et al., 2024).

Pemeliharaan preventif (*preventive maintenance*) dan pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) menggunakan teknologi IoT dan analitik data membantu mengurangi waktu henti kendaraan (*downtime*) dan memperpanjang umur operasional armada. Penelitian menunjukkan bahwa implementasi sistem pemeliharaan prediktif berbasis data dapat mengurangi biaya pemeliharaan hingga 25% dan meningkatkan ketersediaan kendaraan (Liu et al., 2021). Manajemen armada yang efisien juga mencakup optimalisasi rute untuk mengurangi konsumsi bahan bakar, training operator yang berkelanjutan untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional, dan sistem pelacakan kendaraan real-time untuk visibilitas operasional yang lebih baik.

8.3.3 Monitoring dan Pengukuran Kinerja

Monitoring dan pengukuran kinerja transportasi perkotaan sangat penting untuk mengidentifikasi area yang perlu perbaikan dan mengevaluasi efektivitas kebijakan yang telah diimplementasikan. Indikator kinerja utama (*key performance indicators* - KPI) yang umum digunakan meliputi waktu perjalanan rata-rata, keandalan layanan, tingkat okupansi kendaraan (*occupancy rate*), kepuasan pelanggan, dan biaya operasional per penumpang (Liu et al., 2021). Penggunaan data otomatis dari sistem Automatic Vehicle Location (AVL), Automatic Passenger Counter (APC), dan sistem *smart card* memungkinkan monitoring real-time dan analisis tren kinerja.

Penelitian pada sistem transportasi publik menunjukkan bahwa transparansi data kinerja dan komunikasi hasil monitoring kepada stakeholder meningkatkan akuntabilitas dan mendorong perbaikan berkelanjutan (Metz et al., 2024). Analisis causal dari penyimpangan kinerja, seperti mengidentifikasi faktor-faktor penyebab keterlambatan atau rendahnya tingkat okupansi, membantu manajemen dalam mengambil tindakan korektif yang tepat. Benchmarking kinerja dengan sistem transportasi sejenis di kota lain memberikan perspektif komparatif dan mendorong pembelajaran organisasi.

8.3.4 Sistem Informasi dan Teknologi Transportasi

Sistem informasi transportasi modern mengintegrasikan berbagai teknologi untuk meningkatkan efisiensi operasional dan pengalaman pengguna. Intelligent Transportation Systems (ITS) mencakup sistem manajemen lalu lintas, sistem informasi perjalanan real-time, sistem pembayaran elektronik, dan sistem monitoring armada (Hoang, 2024). Penggunaan Artificial Intelligence (AI) dan *big data analytics* memungkinkan prediksi pola perjalanan, optimalisasi rute dinamis, dan deteksi anomali operasional secara otomatis.

Aplikasi berbasis seluler (*mobile applications*) memberikan pengguna informasi komprehensif tentang opsi perjalanan, termasuk berbagai moda, waktu perjalanan, tarif, dan rating kepuasan pengguna. *Platform Mobility-as-a-Service* (MaaS) mengintegrasikan berbagai moda transportasi dalam satu aplikasi, memungkinkan pengguna untuk merencanakan, memesan, dan

membayar perjalanan multi-moda secara seamless (An & Shen, 2025). Implementasi teknologi transportasi harus mempertimbangkan aksesibilitas bagi semua kelompok pengguna, termasuk mereka yang tidak memiliki akses atau kemampuan menggunakan teknologi digital.

8.4 Angkutan Umum dan Layanan Transportasi Publik

8.4.1 Tipologi dan Karakteristik Angkutan Umum

Angkutan umum (*public transport*) merupakan layanan transportasi yang diakses oleh publik, dengan tarif yang ditentukan secara resmi dan disediakan sesuai dengan jadwal reguler. Angkutan umum mencakup berbagai moda, mulai dari bus reguler, BRT, LRT, MRT, hingga layanan transportasi on-demand seperti *ride-hailing* dan *shared mobility* (Ceder, 2020). Karakteristik utama angkutan umum adalah kapasitas tinggi, biaya per penumpang rendah, dan kemampuan untuk melayani volume penumpang besar dengan efisien, sehingga membuatnya ideal untuk mendukung mobilitas penduduk di area urban yang padat.

Pemilihan moda angkutan umum yang tepat untuk suatu kota bergantung pada faktor-faktor seperti kepadatan penduduk, pola permintaan perjalanan, topografi urban, dan ketersediaan lahan untuk infrastruktur transportasi. Penelitian menunjukkan bahwa sistem transportasi publik multi-moda yang terintegrasi dengan baik dapat mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi dan

menciptakan sistem mobilitas yang lebih berkelanjutan (Otalvaro & Watson, 2024). Layanan transportasi on-demand dan shared mobility, meskipun berkontribusi pada fleksibilitas, dapat menjadi komplemen atau pengganti layanan transportasi publik tradisional tergantung pada desain dan regulasi layanan.

8.4.2 Kualitas Layanan dan Kepuasan Pengguna

Kualitas layanan angkutan umum adalah faktor kritis yang menentukan tingkat penggunaan dan dampak sosial dari sistem transportasi publik. Dimensi utama kualitas layanan mencakup keandalan (*reliability*), yang diukur melalui ketepatan waktu dan konsistensi layanan; kenyamanan, yang meliputi aspek fisik seperti tempat duduk, ventilasi, dan kebersihan; dan keamanan pengguna baik dari aspek keselamatan operasional maupun keamanan dari gangguan sosial (Wang et al., 2020). Penelitian menunjukkan bahwa pengguna angkutan umum lebih puas dengan layanan yang memiliki frekuensi tinggi, waktu perjalanan pendek, dan harga yang terjangkau.

Kepuasan pengguna juga dipengaruhi oleh faktor-faktor sekunder seperti informasi perjalanan yang jelas, fasilitas yang bersih dan terawat, dan ketersediaan layanan pelanggan yang responsif (Moslem et al., 2020). Penelitian pada sistem transportasi perkotaan menunjukkan bahwa peningkatan kualitas layanan dapat meningkatkan ridership hingga 20% dan mendorong perubahan mode dari kendaraan pribadi ke angkutan publik. Pengukuran kepuasan pengguna melalui survei berkala dan feedback pengguna real-time membantu operator dalam mengidentifikasi area yang

perlu perbaikan dan mengukur efektivitas inisiatif peningkatan kualitas.

8.4.3 Masalah Pembiayaan dan Subsidi Transportasi

Keberlanjutan finansial sistem transportasi publik merupakan tantangan utama yang dihadapi banyak kota, terutama di negara berkembang. Tarif yang relatif rendah dan volume penumpang yang seringkali tidak mencukupi untuk menutupi biaya operasional penuh menyebabkan defisit finansial yang memerlukan subsidi dari pemerintah (Meza, 2023). Penelitian menunjukkan bahwa rata-rata tarif pengguna hanya menutupi 30-40% dari biaya operasional sistem transportasi publik di kota-kota berkembang, sementara di kota-kota maju subsidi mencapai 50-70% dari biaya operasional.

Strategi pembiayaan yang sustainable meliputi diversifikasi sumber revenue melalui advertising, real estate development di sekitar stasiun, dan layanan transit-oriented commerce. Penelitian pada sistem transportasi publik di berbagai kota menunjukkan bahwa model pembiayaan yang sehat memerlukan kombinasi tarif pengguna yang terjangkau, subsidi pemerintah yang kompeten, dan revenue tambahan dari sumber-sumber alternatif (Hrcher & Tirachini, 2020). Pemerintah juga dapat mengimplementasikan kebijakan seperti *congestion pricing* atau parking fee untuk menghasilkan revenue yang didedikasikan untuk transportasi publik, sekaligus mendorong pengurangan penggunaan kendaraan pribadi.

8.4.4 Inovasi dalam Layanan Transportasi Publik

Inovasi dalam layanan transportasi publik mencakup pengembangan moda transportasi baru, implementasi teknologi canggih, dan model operasional yang lebih fleksibel. Transportasi autonomous (kendaraan tanpa pengemudi) dan electric vehicles merupakan inovasi teknologi yang sedang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi sistem transportasi publik (Iclodean et al., 2020). Ride-sharing dan bike-sharing telah muncul sebagai layanan transportasi inovatif yang melengkapi sistem transportasi publik tradisional, terutama untuk memenuhi kebutuhan first-mile/last-mile connectivity.

Pengembangan layanan transportasi on-demand dan *mobility-as-a-service* platforms mencerminkan pergeseran paradigma dari kepemilikan kendaraan individual menuju akses mobilitas yang lebih fleksibel dan berkelanjutan (An & Shen, 2025). Penelitian menunjukkan bahwa integrasi berbagai moda transportasi dalam platform MaaS yang single dapat meningkatkan efisiensi perjalanan dan mendorong penggunaan moda transportasi yang lebih berkelanjutan. Inovasi dalam desain layanan, seperti demand-responsive transit dan customized transport services, menawarkan solusi yang lebih fleksibel untuk memenuhi kebutuhan mobilitas yang beragam dalam kota modern.

8.5 Keberlanjutan dan Dampak Lingkungan Transportasi Perkotaan

8.5.1 Emisi Transportasi dan Kontribusi terhadap Perubahan Iklim

Sektor transportasi, khususnya transportasi jalan raya, merupakan kontributor signifikan terhadap emisi gas rumah kaca global dan perubahan iklim. Di tingkat perkotaan, transportasi jalan raya menghasilkan sekitar 70-80% dari total emisi transportasi, dengan kendaraan pribadi menjadi kontributor utama (Toledo & Rovere, 2018). Pengurangan emisi transportasi menjadi prioritas dalam strategi mitigasi perubahan iklim kota, terutama mengingat target pengurangan emisi yang ditetapkan dalam Perjanjian Paris dan tujuan pembangunan berkelanjutan.

Transisi menuju sistem transportasi dengan emisi rendah memerlukan kombinasi strategi, termasuk pengembangan kendaraan bertenaga alternatif (listrik, hidrogen, biogas), peningkatan efisiensi konsumsi bahan bakar, dan pengurangan volume perjalanan melalui perubahan perilaku dan struktur spasial kota (Bokolo, 2025). Penelitian menunjukkan bahwa implementasi bus listrik dalam sistem transportasi publik dapat mengurangi emisi karbon per penumpang hingga 60% dibandingkan dengan bus berbahan bakar diesel konvensional.

8.5.2 Kualitas Udara dan Kesehatan Perkotaan

Transportasi perkotaan merupakan sumber utama polutan udara di kota-kota besar, berkontribusi terhadap masalah kesehatan

publik yang serius. Polutan utama dari transportasi termasuk partikel halus (PM_{2.5}), nitrogen oksida (NO_x), dan volatile organic compounds (VOCs), yang terkait dengan berbagai penyakit pernapasan, kardiovaskular, dan kanker (Oyebamiji et al., 2025). Data menunjukkan bahwa paparan polusi udara dari transportasi berkaitan dengan sekitar 7 juta kematian prematur per tahun secara global, dengan konsentrasi tertinggi di negara-negara berkembang dengan sistem transportasi yang didominasi oleh kendaraan berbahan bakar fosil.

Strategi untuk meningkatkan kualitas udara perkotaan melalui transportasi berkelanjutan mencakup promosi transportasi publik dan non-motorisasi, kontrol emisi kendaraan, dan penataan lalu lintas untuk mengurangi kemacetan dan konsumsi bahan bakar (Paiva et al., 2024). Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan share transportasi publik dari 20% menjadi 40% dari total perjalanan dapat mengurangi emisi polutan udara hingga 30% dan meningkatkan kesehatan rata-rata populasi urban secara signifikan.

8.5.3 Penggunaan Lahan dan Ruang Perkotaan

Sistem transportasi perkotaan memiliki pengaruh besar terhadap penggunaan lahan dan struktur spasial kota. Investasi dalam infrastruktur jalan untuk kendaraan pribadi cenderung mendorong urban sprawl dan fragmentasi lahan, sementara pengembangan transportasi publik yang baik mendorong penggunaan lahan yang lebih intensif dan efisien di sekitar stasiun/halte (*transit-oriented development*) (Monteiro et al., 2024). Penelitian menunjukkan bahwa pengurangan ruang jalan yang

didedikasikan untuk parkir dan jalur kendaraan pribadi dapat menghasilkan ruang publik hijau tambahan, jalur pedestrian yang lebih luas, dan peningkatan keberlanjutan lingkungan perkotaan.

Implementasi *complete streets* dan redesign ruang publik untuk memberikan prioritas kepada transportasi publik, sepeda, dan pejalan kaki menciptakan lingkungan perkotaan yang lebih hidup, aman, dan menyenangkan (Lttman & Otsuka, 2024). Ruang publik berkualitas dengan aktivitas sosial yang tinggi meningkatkan kohesi sosial, mengurangi kejahatan, dan berkontribusi pada kualitas hidup yang lebih baik bagi penduduk urban.

8.5.4 Ekonomi Transportasi Berkelanjutan

Manfaat ekonomi dari sistem transportasi berkelanjutan melampaui sektor transportasi itu sendiri, memberikan dampak positif terhadap kesehatan publik, produktivitas ekonomi, dan pengurangan biaya eksternal transportasi. Analisis ekonomi menunjukkan bahwa investasi dalam sistem transportasi publik yang baik menghasilkan return investasi (*return on investment* - ROI) yang tinggi melalui peningkatan produktivitas, pengurangan biaya kesehatan, dan efisiensi penggunaan sumber daya alam (Meza, 2023). Setiap dolar yang diinvestasikan dalam sistem transportasi publik menghasilkan return ekonomi berkisar antara USD 3-5 melalui berbagai saluran manfaat ekonomi.

Transisi menuju kendaraan listrik dan bahan bakar alternatif menciptakan peluang ekonomi baru dalam industri otomotif, manufaktur baterai, dan teknologi clean energy. Penelitian menunjukkan bahwa sektor mobilitas berkelanjutan memiliki

potensi untuk menciptakan jutaan lapangan kerja baru dalam dekade mendatang, terutama di bidang-bidang manufacturing, teknologi, dan layanan operasional (Saigal, 2025). Kebijakan transportasi berkelanjutan juga dapat mengurangi expenditure pemerintah dalam penanganan dampak kesehatan dari polusi transportasi dan kemacetan lalu lintas.

Bab 9: Keselamatan Jalan dan Dampak Transportasi

9.1 Konsep dan Definisi Keselamatan Jalan

9.1.1 Pengertian Keselamatan Jalan dan Transportasi

Keselamatan jalan merupakan aspek fundamental dalam sistem transportasi modern yang mencakup upaya pencegahan kecelakaan, pengurangan keparahan cedera, dan perlindungan bagi semua pengguna jalan. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) mendefinisikan keselamatan jalan sebagai suatu kondisi di mana risiko kecelakaan dan cedera pada pengguna jalan diminimalkan melalui berbagai intervensi. Setiap tahun, kecelakaan lalu lintas (*Road Traffic Accidents/RTA*) menyebabkan sekitar 1,3 juta kematian di seluruh dunia dan melukai antara 20 hingga 50 juta orang (St et al., 2024). Transportasi jalan raya memiliki peran kritis dalam memfasilitasi mobilitas manusia dan barang, namun juga membawa risiko signifikan yang memerlukan perhatian serius.

Keselamatan jalan bukan hanya tanggung jawab pemerintah atau otoritas transportasi, tetapi merupakan tanggung jawab bersama semua pemangku kepentingan termasuk pengguna jalan, produsen kendaraan, dan desainer infrastruktur. Pendekatan holistik terhadap keselamatan jalan mempertimbangkan tiga elemen utama: pengguna jalan (*road users*), kendaraan, dan sistem jalan itu sendiri.

Pemahaman komprehensif tentang faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kecelakaan adalah prasyarat untuk mengembangkan strategi pencegahan yang efektif.

9.1.2 Faktor-Faktor Penyebab Kecelakaan Lalu Lintas

Kecelakaan lalu lintas umumnya disebabkan oleh kombinasi kompleks dari berbagai faktor yang saling berinteraksi. Penelitian sistematis menunjukkan bahwa faktor manusia merupakan penyebab utama dalam mayoritas kecelakaan, mencakup perilaku tidak aman seperti kecepatan berlebihan, mengemudi dalam pengaruh alkohol, penggunaan ponsel saat mengemudi, dan kelelahan pengemudi (Bhele et al., 2024). Kondisi cuaca ekstrem seperti hujan lebat, badai salju, dan kabut dapat secara signifikan meningkatkan risiko kecelakaan dengan mengurangi visibilitas dan traksi roda (Lu et al., 2024).

Faktor infrastruktur jalan juga memainkan peran penting dalam keselamatan. Desain jalan yang buruk, penandaan jalan yang tidak jelas, pencahayaan yang tidak memadai, dan pemeliharaan jalan yang tidak baik semuanya berkontribusi terhadap peningkatan risiko kecelakaan. Kondisi mekanis kendaraan, termasuk ban yang cacat, sistem pengereman yang tidak berfungsi baik, dan pencahayaan kendaraan yang tidak memadai, juga merupakan faktor penting yang dapat menyebabkan kecelakaan. Penelitian pada kecelakaan lalu lintas di berbagai negara mengidentifikasi bahwa pelanggaran lalu lintas seperti speeding, kegagalan memberikan prioritas, dan manuver yang tidak tepat adalah penyebab paling umum dari kecelakaan (. et al., 2024).

9.1.3 Epidemiologi Cedera Lalu Lintas

Cedera lalu lintas memiliki pola epidemiologi yang jelas dan terukur. Studi pada berbagai populasi menunjukkan bahwa laki-laki mengalami tingkat kecelakaan yang lebih tinggi dibandingkan perempuan, dengan rasio kejadian laki-laki terhadap perempuan sekitar 2-3:1 (Sharma et al., 2023). Kelompok usia tertentu, terutama usia muda (18-35 tahun) dan usia lanjut (60 tahun ke atas), menunjukkan tingkat kecelakaan dan kematian yang lebih tinggi. Pengguna jalan yang rentan (*vulnerable road users*) seperti pejalan kaki, pesepeda, dan pengguna kendaraan roda dua mengalami cedera yang lebih parah relatif terhadap pengemudi dan penumpang kendaraan roda empat.

Lokasi kecelakaan juga menunjukkan pola yang konsisten, dengan konsentrasi tinggi kecelakaan di area perkotaan, persimpangan, dan jalan raya nasional. Analisis spasial dan temporal menunjukkan bahwa kecelakaan paling sering terjadi pada jam-jam tertentu, seperti antara pukul 18:00 dan 00:00, terutama pada akhir pekan (Tippayanate et al., 2024). Penelitian di berbagai negara konsisten menunjukkan bahwa cedera kepala, terutama fraktur tengkorak, merupakan penyebab utama kematian dalam kecelakaan lalu lintas, diikuti oleh cedera dada dan cedera ekstremitas bawah.

9.1.4 Dampak Sosial dan Ekonomi Kecelakaan Jalan

Dampak sosial dan ekonomi dari kecelakaan lalu lintas sangat besar dan melampaui korban langsung. Beban keuangan kecelakaan lalu lintas diperkirakan mencapai 3% dari produk domestik bruto (*Gross Domestic Product/GDP*) di negara-negara

berkembang dan hingga 2% di negara-negara maju. Biaya langsung mencakup perawatan medis, rehabilitasi, dan klaim asuransi, sementara biaya tidak langsung mencakup hilangnya produktivitas, kehilangan pendapatan, dan beban psikologis bagi korban dan keluarga mereka.

Selain dampak ekonomi, kecelakaan lalu lintas memiliki dampak psikologis yang signifikan, termasuk gangguan stres pasca-trauma, depresi, dan kecemasan yang dialami oleh korban dan keluarga mereka. Kecacatan jangka panjang akibat kecelakaan lalu lintas sering mengakibatkan pengurangan kualitas hidup, keterbatasan fungsional, dan kebutuhan akan layanan kesehatan jangka panjang. Penelitian menunjukkan bahwa individu-individu yang mengalami kecacatan akibat kecelakaan lalu lintas mengalami isolasi sosial, kesulitan dalam pekerjaan, dan tekanan finansial yang signifikan (Ingabire et al., 2024).

9.2 Strategi Pencegahan Kecelakaan Lalu Lintas

9.2.1 Pendekatan Berbasis Infrastruktur

Peningkatan infrastruktur jalan merupakan salah satu strategi paling efektif untuk mencegah kecelakaan lalu lintas. Desain jalan yang aman mencakup penentuan kecepatan rencana yang sesuai, radius kurva horizontal yang cukup besar, jarak pandang penghenti yang memadai, dan kemiringan vertikal yang aman. Penelitian menunjukkan bahwa perbaikan desain geometrik jalan, termasuk

peningkatan lebar bahu jalan, pemasangan pembatas jalan, dan perbaikan pencahayaan, dapat mengurangi kecelakaan sebesar 20-50% (Majstorovi et al., 2024).

Implementasi infrastruktur cerdas (*smart infrastructure*) telah menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan keselamatan jalan. Sistem informasi dinamis yang memberikan informasi real-time tentang kondisi jalan, cuaca, dan kemacetan lalu lintas dapat membantu pengemudi membuat keputusan yang lebih baik. Teknologi Vehicle-to-Infrastructure (V2I) memungkinkan komunikasi dua arah antara kendaraan dan infrastruktur jalan, meningkatkan kesadaran situasional dan memungkinkan intervensi keselamatan yang proaktif (Son et al., 2025).

Penandaan jalan yang jelas, termasuk garis jalan, rambu lalu lintas, dan penanda persimpangan, adalah elemen penting dari infrastruktur keselamatan. Penelitian menunjukkan bahwa penandaan yang tidak cukup atau tidak tepat berkontribusi terhadap peningkatan kecelakaan, terutama pada malam hari atau dalam kondisi cuaca buruk. Perbaikan pencahayaan jalan, termasuk penggunaan pencahayaan LED yang lebih efisien, dapat meningkatkan visibilitas dan mengurangi kecelakaan pada malam hari.

9.2.2 Pendekatan Berbasis Perilaku Pengguna Jalan

Perilaku pengguna jalan merupakan faktor utama dalam keselamatan jalan, karena mayoritas kecelakaan disebabkan oleh perilaku tidak aman. Program edukasi keselamatan jalan yang komprehensif dapat meningkatkan kesadaran tentang risiko

kecelakaan dan mempromosikan perilaku berkendara yang aman. Edukasi dimulai dari tingkat sekolah dasar melalui program keselamatan jalan di sekolah, yang telah terbukti meningkatkan pengetahuan dan kesadaran keselamatan jalan pada anak-anak (Sharma, 2024).

Penegakan hukum lalu lintas melalui sistem pemantauan otomatis seperti *Electronic Traffic Law Enforcement* (ETLE) telah terbukti efektif dalam mengurangi pelanggaran lalu lintas. Penelitian menunjukkan bahwa implementasi hukum yang lebih ketat, termasuk peningkatan denda, dapat mengurangi tingkat kecelakaan secara signifikan, terutama untuk pelanggaran seperti mengemudi dalam pengaruh alkohol dan kecepatan berlebihan (Foroutaghe et al., 2020).

Program intervensi berbasis komunitas juga telah menunjukkan efektivitas dalam meningkatkan keselamatan jalan. Program-program seperti pelatihan mengemudi defensif, kampanye kesadaran publik, dan pembentukan kelompok advokasi keselamatan jalan dapat meningkatkan kesadaran komunitas tentang pentingnya keselamatan jalan dan mendorong perubahan perilaku.

9.2.3 Peraturan dan Kebijakan Keselamatan Jalan

Kebijakan dan peraturan keselamatan jalan yang komprehensif adalah dasar untuk program keselamatan yang efektif. Peraturan tentang penggunaan sabuk pengaman, helm sepeda motor, dan sistem penahan anak-anak telah terbukti sangat efektif dalam mengurangi cedera dan kematian. Penelitian sistematis menunjukkan bahwa hukum penggunaan helm yang komprehensif

dan inklusif dapat meningkatkan penggunaan helm dan mengurangi cedera kepala sebesar 40-60% (Du et al., 2020).

Batas kecepatan yang sesuai dengan jenis jalan dan kondisi lalu lintas adalah elemen penting dari kebijakan keselamatan jalan. Penelitian menunjukkan bahwa pengurangan kecepatan rata-rata sebesar 1 km/jam dapat mengurangi kecelakaan fatal sebesar 2-3%. Kebijakan tentang usia minimum pengemudi, persyaratan lisensi, dan program terapi pengemudi yang melanggar hukum juga berkontribusi pada peningkatan keselamatan jalan.

9.2.4 Identifikasi dan Manajemen Lokasi Rawan Kecelakaan

Identifikasi lokasi-lokasi yang rawan kecelakaan (*accident black spots*) merupakan langkah penting dalam strategi pencegahan kecelakaan yang berbasis bukti. Analisis spasial menggunakan teknologi Sistem Informasi Geografis (*Geographic Information System/GIS*) dapat mengidentifikasi lokasi dengan tingkat kecelakaan yang lebih tinggi daripada yang diharapkan secara statistik. Setelah lokasi-lokasi rawan ini diidentifikasi, intervensi keselamatan yang ditargetkan dapat diimplementasikan dengan lebih efisien (Karamanlis et al., 2023).

Audit keselamatan jalan yang menyeluruh dilakukan di lokasi-lokasi rawan kecelakaan untuk mengidentifikasi cacat infrastruktur spesifik yang berkontribusi terhadap kecelakaan. Intervensi dapat mencakup perbaikan desain geometrik, peningkatan penandaan jalan, pemasangan pembatas kecelakaan, dan peningkatan pencahayaan. Evaluasi dampak dari intervensi ini

sangat penting untuk memastikan bahwa tindakan-tindakan yang diambil benar-benar efektif dalam mengurangi kecelakaan.

9.3 Dampak Lingkungan dari Transportasi Jalan

9.3.1 Emisi dan Polusi Udara

Transportasi jalan adalah sumber utama emisi gas rumah kaca dan polutan udara di area perkotaan. Kendaraan bermotor mengeluarkan berbagai polutan termasuk karbon monoksida, nitrogen oksida, partikel halus, dan volatile organic compounds (VOC) yang berdampak negatif terhadap kualitas udara dan kesehatan manusia. Polusi udara dari transportasi jalan diperkirakan menyebabkan lebih dari 1 juta kematian prematur setiap tahun di seluruh dunia. Penelitian menunjukkan bahwa paparan polusi udara berkepanjangan meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular, penyakit pernapasan, dan kanker paru-paru.

Konsentrasi polutan udara lebih tinggi di dekat sumber emisi, seperti jalan-jalan besar dan persimpangan yang ramai, sehingga penduduk di area-area ini mengalami paparan yang lebih tinggi. Anak-anak dan orang tua lebih rentan terhadap efek kesehatan dari polusi udara karena sistem pernapasan dan kekebalan mereka yang lebih lemah. Upaya untuk mengurangi emisi dari transportasi jalan mencakup promosi kendaraan listrik, peningkatan efisiensi bahan bakar, dan pengembangan sistem transportasi publik yang lebih efisien.

9.3.2 Kebisingan dan Getaran Lalu Lintas

Kebisingan lalu lintas merupakan masalah lingkungan yang serius di area perkotaan yang dapat menyebabkan efek kesehatan yang merugikan. Paparan kebisingan lalu lintas yang berkepanjangan dapat menyebabkan gangguan pendengaran, gangguan tidur, dan peningkatan tingkat stres. Penelitian epidemiologi menunjukkan hubungan antara paparan kebisingan lalu lintas dan peningkatan risiko penyakit kardiovaskular, termasuk hipertensi dan infark miokard.

Getaran dari lalu lintas juga dapat menyebabkan ketidaknyamanan dan, dalam kasus-kasus ekstrem, kerusakan pada bangunan. Kontrol kebisingan lalu lintas dapat dilakukan melalui berbagai cara termasuk peningkatan desain perkerasan yang mengurangi kebisingan, pemasangan dinding penghalang kebisingan, dan pembatasan kecepatan lalu lintas di area perumahan.

9.3.3 Degradasi Lahan dan Fragmentasi Habitat

Pembangunan infrastruktur transportasi jalan telah menyebabkan fragmentasi habitat alami dan kehilangan keanekaragaman hayati. Jalan-jalan besar memisahkan populasi satwa liar, mengganggu pola migrasi alami, dan meningkatkan tingkat kematian satwa liar karena tabrakan kendaraan. Konstruksi jalan juga dapat menyebabkan erosi tanah, perubahan pola drainase air, dan kontaminasi tanah dan air tanah dengan bahan kimia dari kendaraan.

Penelitian menunjukkan bahwa fragmentasi habitat akibat pembangunan jalan memiliki efek kaskade pada ekosistem,

termasuk perubahan struktur komunitas, penurunan keanekaragaman genetik, dan perubahan dinamika predator-mangsa. Mitigasi dampak lingkungan dari pembangunan jalan dapat mencakup perencanaan rute yang menghindari area-area ekosistem yang sensitif, pembangunan terowongan atau jembatan untuk satwa liar, dan restorasi habitat.

9.3.4 Konsumsi Energi dan Perubahan Iklim

Sektor transportasi adalah penghasil emisi karbon dioksida terbesar, menyumbang sekitar 25% dari total emisi gas rumah kaca global. Transportasi jalan menyumbang mayoritas emisi dari sektor transportasi. Meningkatnya penggunaan kendaraan, terutama di negara-negara berkembang dengan pertumbuhan ekonomi cepat, diproyeksikan akan meningkatkan emisi transportasi secara signifikan dalam dekade mendatang. Transisi ke transportasi berkelanjutan, termasuk promosi kendaraan listrik, pengembangan biofuel, dan pergeseran modal transportasi ke moda publik dan non-motorisasi, adalah langkah-langkah penting untuk mengurangi dampak iklim dari transportasi jalan.

9.4 Manajemen Lalu Lintas dan Operasi Jalan

9.4.1 Sistem Manajemen Lalu Lintas Cerdas

Sistem manajemen lalu lintas cerdas (*Intelligent Transportation System/ITS*) menggunakan teknologi canggih seperti sensor real-time, data analytics, dan otomasi untuk mengoptimalkan aliran lalu lintas dan meningkatkan keselamatan. Sistem ini dapat

mendeteksi kemacetan, kecelakaan, dan kondisi jalan yang bermasalah secara real-time dan menginformasikan pengemudi serta otoritas transportasi. Platform transportasi cerdas yang mengintegrasikan data dari berbagai sumber dapat memberikan gambaran holistik tentang sistem transportasi dan memungkinkan optimisasi dinamis dari aliran lalu lintas (Le, 2024).

Teknologi seperti adaptive signal control dapat meningkatkan efisiensi persimpangan dengan menyesuaikan waktu lampu lalu lintas berdasarkan volume lalu lintas real-time. Sistem *emergency vehicle pre-emption* memastikan kendaraan darurat dapat melewati persimpangan dengan aman dan cepat. Sistem informasi dinamis, termasuk papan pesan variabel, dapat menginformasikan pengemudi tentang kondisi lalu lintas dan keselamatan jalan.

9.4.2 Perencanaan dan Desain Persimpangan

Persimpangan merupakan lokasi dengan risiko kecelakaan yang tinggi, sehingga desain yang baik adalah kritis untuk keselamatan. Penelitian menunjukkan bahwa jenis persimpangan memiliki tingkat kecelakaan yang berbeda, dengan bundaran (*roundabout*) umumnya memiliki tingkat kecelakaan yang lebih rendah daripada persimpangan dengan lampu lalu lintas standar (Erol & Baskan, 2025). Desain persimpangan yang baik mempertimbangkan visibility, separation of conflicting traffic streams, dan kecepatan operasi yang sesuai.

Manajemen persimpangan harus mempertimbangkan kebutuhan semua pengguna jalan, termasuk pejalan kaki, pesepeda, dan pengguna transportasi publik. Penyeberang jalan yang aman,

jalur khusus untuk sepeda, dan akses transportasi publik yang mudah adalah elemen penting dari desain persimpangan yang inklusif. Audit keselamatan persimpangan secara berkala dapat mengidentifikasi kelemahan desain dan risiko keselamatan yang perlu ditangani.

9.4.3 Sistem Transportasi Publik Terintegrasi

Sistem transportasi publik yang efisien dan aman dapat mengurangi lalu lintas kendaraan pribadi dan meningkatkan keselamatan jalan secara keseluruhan. Transportasi publik yang terintegrasi dengan moda non-motorisasi seperti bersepeda dan berjalan kaki menciptakan sistem mobilitas yang lebih berkelanjutan dan aman. Perencanaan rute transportasi publik yang baik memastikan aksesibilitas yang tinggi dan waktu perjalanan yang kompetitif dengan kendaraan pribadi.

Keselamatan dalam transportasi publik mencakup keselamatan pengemudi dan penumpang. Pelatihan pengemudi yang komprehensif, pemeliharaan kendaraan yang baik, dan sistem manajemen keselamatan yang kuat adalah elemen-elemen penting. Dalam konteks kendaraan transportasi publik yang melibatkan volume pengguna yang besar, kecelakaan dapat memiliki dampak yang sangat besar, sehingga keselamatan harus menjadi prioritas utama.

9.4.4 Teknologi Kendaraan Otomatis dan Kendaraan Listrik

Perkembangan kendaraan otomatis (*autonomous vehicles*) dan kendaraan listrik diharapkan mengubah lanskap transportasi jalan dalam dekade-dekade mendatang. Kendaraan otomatis

berpotensi mengurangi kecelakaan yang disebabkan oleh kesalahan manusia, yang merupakan faktor dalam mayoritas kecelakaan lalu lintas (Chougule et al., 2023). Namun, masih ada tantangan signifikan dalam mengintegrasikan kendaraan otomatis ke dalam sistem transportasi campuran dengan kendaraan tradisional dan pengguna jalan lainnya.

Kendaraan listrik, sementara mengurangi emisi lokal dan polusi udara, juga memiliki implikasi keselamatan yang perlu dipertimbangkan, seperti suara yang lebih rendah yang mungkin membuat pejalan kaki dan pesepeda sulit mendeteksi kehadiran kendaraan. Infrastruktur jalan akan perlu beradaptasi dengan perkembangan teknologi kendaraan ini, yang mungkin memerlukan perubahan dalam desain jalan, signalisasi, dan manajemen lalu lintas.

9.5 Implikasi Kebijakan dan Rekomendasi

9.5.1 Kerangka Kerja Keselamatan Jalan yang Komprehensif

Pendekatan keselamatan jalan yang paling efektif adalah yang mengadopsi kerangka kerja komprehensif yang mencakup semua aspek sistem transportasi: pengguna jalan, kendaraan, dan infrastruktur jalan. Kerangka kerja ini, sering dirujuk sebagai "Safe Systems", mengakui bahwa manusia membuat kesalahan dan sistem harus dirancang untuk meminimalkan konsekuensi kesalahan ini. Implementasi kerangka kerja yang komprehensif memerlukan

koordinasi antara berbagai sektor pemerintah, termasuk transportasi, kesehatan, pendidikan, dan penegakan hukum.

Rencana aksi keselamatan jalan nasional yang jelas, dengan tujuan yang terukur dan indikator kemajuan, adalah elemen penting dari komitmen pemerintah terhadap keselamatan jalan. Target pengurangan kecelakaan yang ambisius, didukung oleh alokasi sumber daya yang memadai dan sistem monitoring yang kuat, dapat mendorong tindakan nyata dalam peningkatan keselamatan jalan.

9.5.2 Investasi Infrastruktur dan Pemeliharaan Jalan

Investasi dalam infrastruktur jalan yang aman memerlukan alokasi sumber daya yang signifikan, terutama di negara-negara berkembang di mana infrastruktur transportasi sering kurang dirawat. Pemeliharaan jalan yang baik, perbaikan jalan yang cepat, dan peningkatan desain jalan adalah investasi yang menghasilkan tingkat pengembalian yang tinggi dalam bentuk pengurangan kecelakaan dan peningkatan efisiensi transportasi. Analisis biaya-manfaat dari investasi infrastruktur keselamatan jalan sering menunjukkan bahwa manfaat yang diperoleh jauh melebihi biaya investasi.

9.5.3 Penelitian dan Pengembangan dalam Keselamatan Jalan

Penelitian berkelanjutan dalam keselamatan jalan adalah penting untuk mengidentifikasi strategi pencegahan yang baru dan lebih efektif. Investasi dalam penelitian tentang pengembangan teknologi keselamatan baru, pemahaman perilaku pengemudi, dan evaluasi intervensi keselamatan dapat memberikan bukti yang

diperlukan untuk pengambilan keputusan yang lebih baik dalam kebijakan transportasi.

9.5.4 Kerjasama Internasional dan Pertukaran Pengetahuan

Kerjasama internasional dalam keselamatan jalan, termasuk pertukaran pengetahuan dan praktik terbaik, dapat mempercepat peningkatan keselamatan jalan secara global. Organisasi internasional seperti WHO dan UNECE telah mengembangkan panduan dan rekomendasi untuk keselamatan jalan yang dapat diadaptasi oleh negara-negara untuk konteks lokal mereka. Deklarasi PBB tentang Dekade Aksi untuk Keselamatan Jalan merupakan upaya penting untuk meningkatkan kesadaran dan komitmen global terhadap keselamatan jalan.

Bab 10: Perencanaan

Transportasi Darat

10.1 Konsep Dasar dan Prinsip Perencanaan Transportasi

10.1.1 Definisi dan Pentingnya Perencanaan Transportasi Darat

Perencanaan transportasi darat merupakan proses sistematis yang mengintegrasikan aspek-aspek teknis, ekonomis, sosial, dan lingkungan dalam pengembangan sistem transportasi untuk memenuhi kebutuhan mobilitas masyarakat. Transportasi darat mencakup berbagai moda seperti kendaraan pribadi, angkutan umum (*public transport*), dan sistem multimodal yang dirancang untuk mengoptimalkan pergerakan orang dan barang di wilayah perkotaan maupun regional. Pentingnya perencanaan transportasi terletak pada kemampuannya untuk mengintegrasikan penggunaan lahan (*land use*) dengan sistem transportasi, menciptakan aksesibilitas yang berkelanjutan dan mengurangi kemacetan lalu lintas (Al-Mosherefawi & Jwad, 2025).

Perencanaan transportasi yang efektif memerlukan pemahaman mendalam tentang pola pergerakan penduduk, distribusi aktivitas ekonomi, dan karakteristik geografis wilayah. Melalui pendekatan perencanaan yang komprehensif, pemerintah dan pemangku kepentingan dapat mengidentifikasi kebutuhan

transportasi yang sebenarnya dan mengalokasikan sumber daya secara optimal. Perencanaan ini juga mempertimbangkan dampak lingkungan, seperti emisi karbon dan polusi udara, yang semakin menjadi fokus dalam konteks pembangunan berkelanjutan. Dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip keberlanjutan, perencanaan transportasi darat dapat berkontribusi pada pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*) (Bokolo, 2025).

10.1.2 Prinsip-Prinsip Perencanaan Berkelanjutan

Perencanaan transportasi darat yang berkelanjutan didasarkan pada beberapa prinsip fundamental yang mengarahkan pengembangan sistem transportasi menuju masa depan yang lebih baik. Pertama, prinsip aksesibilitas menekankan bahwa setiap individu, tanpa memandang status sosial ekonomi, harus memiliki akses yang sama terhadap layanan transportasi dan kesempatan untuk mencapai berbagai kegiatan. Kedua, prinsip efisiensi menuntut penggunaan sumber daya yang optimal untuk memaksimalkan pergerakan orang dan barang dengan biaya dan dampak lingkungan yang minimal (Cihan, 2025).

Ketiga, prinsip keadilan sosial memastikan bahwa sistem transportasi tidak hanya melayani kelompok pengguna tertentu tetapi juga memperhatikan kebutuhan kelompok rentan seperti wanita, lansia, dan masyarakat berpenghasilan rendah. Keempat, prinsip keberlanjutan lingkungan mendorong pengurangan emisi dan penggunaan energi terbarukan dalam operasi transportasi. Kelima, prinsip integrasi menekankan koordinasi yang erat antara

perencanaan transportasi dan penggunaan lahan untuk menciptakan pola pembangunan yang kompak dan mengurangi perjalanan yang tidak perlu (Monteiro et al., 2024). Prinsip-prinsip ini saling terkait dan harus diterapkan secara sinergis untuk mencapai sistem transportasi yang benar-benar berkelanjutan.

10.1.3 Metodologi Perencanaan Transportasi

Metodologi perencanaan transportasi darat mengikuti proses yang terstruktur dan sistematis yang melibatkan pengumpulan data, analisis, peramalan (*forecasting*), dan pengembangan strategi. Tahap pertama adalah pengumpulan data yang komprehensif mengenai kondisi transportasi saat ini, termasuk pola pergerakan, karakteristik demografis, aktivitas ekonomi, dan infrastruktur yang ada. Data ini dapat dikumpulkan melalui survei *origin-destination* (OD), survei preferensi pernyataan (*stated preference survey*), dan analisis data sekunder dari berbagai sumber (Olak & Bayrak, 2025).

Tahap kedua melibatkan analisis data untuk memahami pola pergerakan yang ada dan faktor-faktor yang mempengaruhi permintaan transportasi. Analisis ini mencakup pemodelan permintaan perjalanan (*travel demand modeling*) yang menggunakan berbagai teknik dari yang sederhana hingga yang kompleks dengan memanfaatkan *machine learning* dan *deep learning*. Tahap ketiga adalah peramalan permintaan transportasi di masa depan berdasarkan proyeksi demografis, ekonomis, dan perkembangan penggunaan lahan (Gonzales et al., 2025). Tahap keempat melibatkan pengembangan skenario alternatif dan evaluasi

dampak masing-masing skenario terhadap sistem transportasi dan lingkungan.

10.1.4 Tantangan Kontemporer dalam Perencanaan Transportasi

Perencanaan transportasi darat menghadapi berbagai tantangan yang semakin kompleks di era modern. Tantangan pertama adalah pertumbuhan permintaan transportasi yang pesat akibat urbanisasi dan pertumbuhan ekonomi, terutama di negara-negara berkembang. Pertumbuhan ini seringkali melampaui kapasitas infrastruktur yang ada, menyebabkan kemacetan yang parah dan penurunan kualitas hidup penduduk. Tantangan kedua adalah perubahan iklim dan tekanan untuk mengurangi emisi karbon dari sektor transportasi (Monteiro et al., 2024).

Tantangan ketiga adalah integrasi antara perencanaan transportasi dan perencanaan penggunaan lahan (*land use planning*), yang sering kali kurang terkoordinasi di banyak kota di negara berkembang. Tantangan keempat adalah keterlibatan publik dan penerimaan sosial terhadap keputusan perencanaan yang mungkin merugikan kelompok tertentu. Tantangan kelima adalah keterbatasan anggaran dan sumber daya, yang membatasi kemampuan pemerintah untuk mengimplementasikan semua proyek transportasi yang dirancang (Mudawu & Musara, 2024). Menghadapi tantangan-tantangan ini memerlukan pendekatan yang inovatif, kolaboratif, dan berbasis data.

10.2 Peramalan Permintaan Transportasi

10.2.1 Teknik Peramalan Klasik dan Modern

Peramalan permintaan transportasi (*traffic demand forecasting*) merupakan komponen penting dalam perencanaan transportasi yang membantu memprediksi volume kendaraan dan penumpang di masa depan. Teknik peramalan klasik mencakup metode regresi linier, model gravitasi (*gravity model*), dan analisis waktu deret (*time series analysis*) yang telah digunakan selama puluhan tahun. Metode-metode ini memiliki kelebihan dalam kesederhanaan dan interpretabilitas, namun sering kali terbatas dalam menangkap hubungan nonlinear yang kompleks dalam sistem transportasi modern (Olak & Bayrak, 2025).

Teknik peramalan modern mengintegrasikan *machine learning* dan *deep learning* untuk meningkatkan akurasi prediksi. Jaringan saraf tiruan (*artificial neural networks* atau ANN), *long short-term memory* (LSTM), *graph convolutional networks* (GCN), dan berbagai arsitektur *deep learning* lainnya telah menunjukkan performa yang superior dalam memprediksi pola perjalanan yang kompleks dan dinamis (Sherfenaz et al., 2025). Teknik-teknik ini mampu menangkap ketergantungan temporal dan spasial dalam data transportasi, menghasilkan prediksi yang lebih akurat untuk berbagai horizon waktu.

10.2.2 Integrasi Data Multisumber dalam Peramalan

Peramalan permintaan transportasi modern memanfaatkan data dari berbagai sumber untuk meningkatkan akurasi dan relevansi

prediksi. Data tradisional seperti survei *origin-destination* dan data lalu lintas dari detektor loop (*loop detector*) digabungkan dengan data inovatif seperti GPS dari perangkat seluler, data media sosial, dan informasi cuaca real-time. Integrasi data multisumber ini memungkinkan pemodelan yang lebih komprehensif dari faktor-faktor yang mempengaruhi permintaan transportasi (Xiong et al., 2025).

Teknologi *Internet of Things* (IoT) dan sensor transportasi cerdas (*smart sensors*) menghasilkan aliran data yang kontinyu tentang kondisi lalu lintas real-time. Data drone dan teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) juga memberikan informasi spasial yang kaya tentang aktivitas manusia dan penggunaan lahan. Pengolahan data besar (*big data analytics*) dan komputasi awan (*cloud computing*) memungkinkan analisis data yang cepat dan efisien untuk mendukung pengambilan keputusan transportasi yang berbasis bukti (Aswinto et al., 2025).

10.2.3 Model Pemilihan Moda dan Perilaku Pengguna

Model pemilihan moda (*mode choice model*) merupakan bagian penting dari peramalan permintaan transportasi yang memprediksi keputusan pengguna dalam memilih moda transportasi. Model diskrit pilihan (*discrete choice model*) seperti *logit model* dan *nested logit* telah menjadi standar dalam transportasi untuk memodelkan keputusan pemilihan moda. Variabel-variabel yang mempengaruhi pemilihan moda mencakup waktu perjalanan, biaya perjalanan, kenyamanan, keandalan, dan faktor-faktor sosial-ekonomi (Ghorbani et al., 2025).

Pendekatan terbaru dalam memodelkan perilaku pengguna mengintegrasikan konsep ekonomi perilaku (*behavioral economics*) yang mengakui bahwa pengguna tidak selalu membuat keputusan yang sepenuhnya rasional. Model-model ini juga mempertimbangkan ketidakpastian dalam preferensi dan keputusan pengguna, memberikan estimasi interval prediksi yang lebih informatif dibandingkan prediksi titik tunggal (Wu et al., 2023). Pemahaman mendalam tentang perilaku pengguna membantu perencana transportasi merancang sistem yang lebih menarik dan efektif.

10.2.4 Validasi dan Kaliberasi Model Peramalan

Validasi dan kalibrasi model peramalan permintaan transportasi adalah proses kritis untuk memastikan bahwa model menghasilkan prediksi yang akurat dan dapat diandalkan. Proses kalibrasi melibatkan penyesuaian parameter model menggunakan data observasi untuk meminimalkan kesalahan antara prediksi model dan data aktual. Berbagai metode optimasi, seperti algoritma genetik (*genetic algorithm*) dan *simultaneous perturbation stochastic approximation* (SPSA), digunakan untuk menemukan parameter optimal (Lee et al., 2025).

Validasi dilakukan dengan membagi data historis menjadi set pelatihan dan set pengujian, kemudian mengevaluasi performa model pada data yang belum pernah dilihat sebelumnya. Metrik evaluasi mencakup *root mean square error* (RMSE), *mean absolute error* (MAE), dan koefisien determinasi (R^2). Proses validasi lintas lokasi (*cross-validation*) dan lintas waktu (*temporal validation*)

membantu memastikan bahwa model generalisasi dengan baik ke kondisi yang berbeda. Analisis sensitivitas parameter juga dilakukan untuk memahami bagaimana perubahan parameter mempengaruhi output model (Gibbons & Macfarlane, 2025).

10.3 Pengembangan Jaringan Transportasi

10.3.1 Desain dan Optimasi Rute Transportasi Publik

Desain jaringan rute transportasi publik yang efektif merupakan tantangan kompleks yang memerlukan keseimbangan antara cakupan layanan, efisiensi operasi, dan aksesibilitas pengguna. Pendekatan tradisional dalam desain rute transportasi publik berbasis pada pengalaman dan intuisi perencana, namun pendekatan modern menggunakan algoritma optimasi dan alat berbasis data untuk merancang jaringan yang lebih efisien. Algoritma optimasi dapat menemukan konfigurasi rute yang meminimalkan waktu perjalanan keseluruhan sambil memastikan bahwa lebih banyak penduduk memiliki akses ke layanan transportasi publik (Sakhno et al., 2025).

Desain jaringan rute yang optimal harus mempertimbangkan berbagai faktor seperti konsentrasi permintaan, konektivitas antar rute, dan integrasi dengan moda transportasi lainnya. Jaringan radial-konsentris (*radial-concentric*) cocok untuk kota monosentrik dengan pusat bisnis yang jelas, sementara jaringan grid cocok untuk kota dengan penggunaan lahan yang lebih merata. Jaringan hibrida menggabungkan elemen-elemen dari berbagai konfigurasi untuk

menciptakan sistem yang lebih fleksibel dan responsif terhadap kondisi lokal (Caldern-Ramrez et al., 2025).

10.3.2 *Transit-Oriented Development* dalam Perencanaan Penggunaan Lahan

Transit-Oriented Development (TOD) adalah pendekatan perencanaan yang mengintegrasikan pengembangan penggunaan lahan dengan sistem transportasi publik untuk menciptakan komunitas yang berkelanjutan dan mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi. TOD menekankan pengembangan di sekitar stasiun transportasi publik dengan kepadatan penduduk dan aktivitas ekonomi yang tinggi, mendorong pengguna untuk menggunakan transportasi publik sebagai pilihan utama (Saputra et al., 2025).

Implementasi TOD memerlukan koordinasi erat antara berbagai pemerintah (pusat, provinsi, kota) dan sektor swasta untuk memastikan pengembangan properti sejalan dengan infrastruktur transportasi publik. Penelitian menunjukkan bahwa TOD yang berhasil dapat meningkatkan aksesibilitas pekerjaan dan layanan publik secara signifikan, meningkatkan nilai properti di sekitar stasiun, dan mengurangi emisi transportasi (Shen & Ma, 2023). Namun, implementasi TOD di banyak negara berkembang menghadapi tantangan seperti kurangnya koordinasi antar sektor, keterbatasan anggaran, dan resistensi sosial terhadap perubahan pola penggunaan lahan.

10.3.3 Konektivitas Multimodal dan Integrasi Moda Transportasi

Integrasi multimodal transportasi menciptakan sistem transportasi yang kohesif di mana berbagai moda transportasi (kereta cepat, bus, angkot, sepeda, berjalan kaki) bekerja bersama untuk menyediakan perjalanan yang mulus dan efisien. Integrasi ini memerlukan koordinasi fisik seperti terminal multimodal (*multimodal hub*) dan koordinasi operasional seperti sinkronisasi jadwal keberangkatan dan tarif terintegrasi (Benenson et al., 2024).

Konektivitas moda transportasi yang baik sangat penting untuk memastikan aksesibilitas *last-mile* (perjalanan terakhir dari stasiun transportasi publik ke tujuan akhir). Penelitian menunjukkan bahwa konektivitas yang buruk antara moda transportasi merupakan salah satu hambatan utama dalam penggunaan transportasi publik (Choudhary et al., 2025). Pengembangan infrastruktur untuk moda transportasi non-motorisasi seperti sepeda dan jalur pejalan kaki (*pedestrian pathway*) adalah bagian integral dari strategi integrasi multimodal. Sistem *bike-sharing* dan *car-sharing* juga berkontribusi pada ekosistem mobilitas yang lebih lengkap dan berkelanjutan (Weinreich et al., 2023).

10.3.4 Ketahanan dan Adaptabilitas Jaringan Transportasi

Ketahanan jaringan transportasi merujuk pada kemampuan sistem untuk terus berfungsi dan pulih dengan cepat dari gangguan atau bencana. Perencanaan jaringan transportasi yang tahan terhadap berbagai jenis gangguan—baik yang alami maupun manusia—menjadi semakin penting di era perubahan iklim dan

ketidakpastian. Analisis topologi jaringan menggunakan teori jaringan kompleks dapat mengidentifikasi titik lemah dalam jaringan dan merancang redundansi yang tepat (Ren et al., 2025).

Adaptabilitas jaringan transportasi mengacu pada kemampuan sistem untuk menyesuaikan diri dengan perubahan kondisi dan kebutuhan transportasi yang dinamis. Sistem transportasi adaptif menggunakan teknologi real-time dan analitik prediktif untuk menyesuaikan operasi secara dinamis berdasarkan kondisi lalu lintas dan permintaan perjalanan saat ini (Vujadinovic et al., 2024). Pengembangan jaringan transportasi yang resilient dan adaptable memerlukan pendekatan holistik yang mempertimbangkan berbagai skenario masa depan dan membangun kapasitas organisasi untuk belajar dan beradaptasi.

10.4 Implementasi Teknologi dan Inovasi

10.4.1 *Intelligent Transportation Systems* dan *Smart Mobility*

Intelligent Transportation Systems (ITS) memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi untuk meningkatkan efisiensi, keamanan, dan kualitas layanan transportasi. ITS mencakup berbagai aplikasi seperti sistem manajemen lalu lintas yang adaptif (*adaptive traffic signal control*), sistem informasi perjalanan real-time, sistem keselamatan transportasi cerdas (*smart safety systems*), dan sistem pembayaran transportasi tanpa kontak. Implementasi ITS dapat mengurangi kemacetan lalu lintas, memperbaiki keselamatan jalan, dan meningkatkan kepuasan pengguna (Sheng, 2024).

Konsep *smart mobility* meluas lebih jauh dengan mengintegrasikan berbagai moda transportasi dan layanan mobilitas dalam satu platform digital yang memberikan pengguna opsi perjalanan yang optimal. Platform *smart mobility* menggunakan aplikasi seluler untuk memfasilitasi perencanaan perjalanan yang komprehensif, pemesanan kendaraan *on-demand*, dan pembayaran yang terkoneksi (Liyanage & Dia, 2025). Adopsi teknologi ini memerlukan investasi infrastruktur yang signifikan dan perubahan kebijakan yang mendukung untuk memaksimalkan manfaatnya.

10.4.2 Analitik Data Transportasi dan Pengambilan Keputusan Berbasis Data

Kemajuan dalam pengumpulan dan analisis data transportasi memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih berbasis bukti dan efisien. Data besar dari berbagai sumber sensor, GPS, survei, media sosial dapat dianalisis menggunakan teknik statistik lanjutan dan *machine learning* untuk mengungkap pola dan wawasan yang tersembunyi. Analitik prediktif membantu perencana mengantisipasi masalah transportasi dan mengambil tindakan pencegahan sebelum masalah menjadi parah (Zhang et al., 2024).

Sistem pendukung keputusan (*decision support system* atau DSS) berbasis data membantu perencana mengevaluasi alternatif kebijakan transportasi dan memilih opsi yang paling sesuai dengan tujuan dan kendala yang ada. DSS dapat mengintegrasikan berbagai jenis data dan model untuk memberikan analisis komprehensif tentang dampak potensial dari berbagai kebijakan transportasi (Kazak et al., 2019). Penggunaan visualisasi data yang canggih juga

membantu dalam mengkomunikasikan hasil analisis kepada pengambil keputusan dan publik.

10.4.3 Kendaraan Listrik dan Transportasi Berkelanjutan

Transisi menuju transportasi berkelanjutan memerlukan adopsi luas kendaraan listrik (*electric vehicles* atau EV) dan bahan bakar alternatif lainnya. Perencanaan infrastruktur pengisian daya EV (*EV charging infrastructure*) merupakan tantangan yang kompleks karena memerlukan prediksi permintaan pengisian daya yang akurat dan penempatan stasiun pengisian yang strategis (Raja et al., 2024). Integrasi sistem pengisian daya EV dengan jaringan energi dan sistem energi terbarukan memerlukan koordinasi yang erat antara sektor transportasi dan energi (Luo et al., 2024).

Pengembangan *hydrogen fuel cell vehicles* dan transportasi publik yang didukung energi terbarukan merupakan bagian dari strategi menyeluruh untuk mengurangi emisi transportasi. Perencanaan infrastruktur untuk teknologi-teknologi baru ini memerlukan analisis biaya-manfaat yang cermat dan skenario perencanaan jangka panjang yang mempertimbangkan evolusi teknologi dan pasar energi (Hudenko et al., 2025).

10.4.4 Transformasi Digital dan Sistem Informasi Transportasi

Transformasi digital dalam manajemen transportasi melibatkan adopsi teknologi cloud computing, *edge computing*, dan *Internet of Things* untuk menciptakan sistem transportasi yang lebih responsif dan efisien. Platform digital terintegrasi dapat menghubungkan berbagai pemangku kepentingan—perencana transportasi, operator layanan, pengguna, penyedia teknologi—

dalam ekosistem informasi yang kohesif. Data terbuka (*open data*) dan standar data seperti *General Transit Feed Specification* (GTFS) memfasilitasi inovasi dan interoperabilitas sistem transportasi (Saddal et al., 2023).

Implementasi sistem informasi yang komprehensif memungkinkan monitoring real-time terhadap kinerja sistem transportasi dan identifikasi cepat terhadap masalah operasional. Sistem pelaporan standar dan dashboard kinerja membantu dalam memantau pencapaian target keberlanjutan dan efisiensi operasional. Investasi dalam kapasitas digital dan literasi teknologi di kalangan profesional transportasi sangat penting untuk memaksimalkan manfaat transformasi digital (. & Elovego, 2025).

10.5 Kebijakan, Regulasi, dan Implementasi

10.5.1 Kerangka Kebijakan dan Regulasi Transportasi

Keberhasilan perencanaan transportasi darat sangat bergantung pada kerangka kebijakan dan regulasi yang mendukung. Kebijakan transportasi yang komprehensif harus mencakup visi jangka panjang, target kuantitatif yang jelas, dan mekanisme implementasi yang efektif. Regulasi harus dirancang dengan fleksibilitas yang cukup untuk beradaptasi dengan perubahan kondisi dan teknologi, namun cukup ketat untuk memastikan standar minimum kualitas layanan dan keselamatan (Abdelhady, 2024).

Koordinasi antara berbagai tingkat pemerintah (pusat, provinsi, lokal) dan antara sektor transportasi dengan sektor lainnya

(energi, lingkungan, pembangunan ekonomi) sangat penting untuk efektivitas kebijakan transportasi. Mekanisme transparansi dan partisipasi publik dalam proses perumusan kebijakan meningkatkan legitimasi kebijakan dan penerimaan masyarakat. Penggunaan mekanisme pasar dan insentif ekonomi—seperti pajak karbon, subsidi transportasi publik, dan *congestion pricing*—dapat mendorong perilaku yang lebih berkelanjutan (Luo et al., 2024).

10.5.2 Pembiayaan Infrastruktur dan Operasi Transportasi

Pembiayaan infrastruktur transportasi merupakan tantangan signifikan, terutama di negara-negara berkembang dengan keterbatasan anggaran publik. Sumber pembiayaan tradisional seperti anggaran pemerintah harus dilengkapi dengan sumber-sumber alternatif seperti kemitraan publik-swasta (*public-private partnership* atau PPP), obligasi transportasi, dan penargetan pendapatan transportasi. Analisis biaya-manfaat yang cermat membantu dalam mengalokasikan sumber daya terbatas ke proyek-proyek dengan dampak sosial dan ekonomi terbesar (Humaira et al., 2024).

Operasionalisasi layanan transportasi memerlukan model bisnis yang berkelanjutan yang mengintegrasikan pendapatan dari berbagai sumber—tarif pengguna, subsidi pemerintah, iklan, dan layanan nirlaba (*non-fare revenue*). Efisiensi operasional melalui optimasi rute, manajemen armada cerdas, dan teknologi otomasi dapat mengurangi biaya operasional dan meningkatkan viabilitas finansial layanan transportasi. Transparansi dalam keuangan dan akuntabilitas dalam penggunaan dana publik sangat penting untuk

mempertahankan dukungan masyarakat terhadap investasi transportasi (Aderibigbe, 2022).

10.5.3 Partisipasi Publik dan Tata Kelola Transportasi

Partisipasi publik dalam proses perencanaan dan pengambilan keputusan transportasi meningkatkan kualitas keputusan dan penerimaan sosial. Mekanisme partisipasi mencakup survei publik, fokus grup diskusi (*focus group discussion*), konsultasi publik, dan dialog deliberatif yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan. Partisipasi yang bermakna memerlukan informasi yang jelas dan mudah dipahami, waktu yang cukup untuk pertimbangan, dan kepastian bahwa masukan publik benar-benar mempengaruhi keputusan (Maaoui & Ray, 2022).

Tata kelola transportasi yang baik memerlukan institusi yang kuat dengan mandat yang jelas, kapasitas teknis dan manajerial yang memadai, dan akuntabilitas yang transparan. Koordinasi antar lembaga (*inter-agency coordination*) adalah penting untuk mengatasi fragmentasi yang sering terjadi dalam manajemen transportasi di kota-kota besar. Mekanisme resolusi konflik yang efektif membantu mengatasi perbedaan kepentingan antara berbagai pemangku kepentingan (Alourafi & Alrawi, 2020).

10.5.4 Monitoring, Evaluasi, dan Pembelajaran Berkelanjutan

Sistem monitoring dan evaluasi yang efektif memungkinkan pemerintah untuk melacak kemajuan menuju tujuan transportasi yang ditetapkan dan mengidentifikasi area yang memerlukan perbaikan. Indikator kinerja harus dirancang untuk mencerminkan berbagai dimensi keberlanjutan transportasi—aksesibilitas, efisiensi

ekonomi, dampak lingkungan, keselamatan, dan keadilan sosial. Pengumpulan data teratur tentang indikator-indikator ini memungkinkan evaluasi tren jangka panjang dan dampak kebijakan (Schlett & Loder, 2025).

Pembelajaran dari pengalaman implementasi kebijakan transportasi sangat penting untuk perbaikan berkelanjutan. Studi kasus dari kota-kota lain yang berhasil menerapkan strategi transportasi tertentu dapat memberikan pelajaran berharga dan inspirasi untuk adaptasi lokal. Mekanisme berbagi pengetahuan antara para profesional transportasi melalui konferensi, jurnal, dan platform digital memfasilitasi penyebaran praktik terbaik dan inovasi. Budaya pembelajaran organisasi yang kuat di lembaga transportasi mendorong eksperimen dengan pendekatan baru dan refleksi kritis terhadap hasil-hasilnya (Kii et al., 2021).

DAFTAR PUSTAKA

- A Comprehensive Survey on Traffic Missing Data Imputation. (2024, December 1). *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(12), 3478816. [**https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3478816**](https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3478816)
- Adenan St, S. R. H. Lubis, & D. Mardiana. (2024). Analysis of risk factor traffic crashes and implementation of road safety: A systematic literature review. *Jurnal Kesehatan*, 17(2), 5354. [**https://doi.org/10.23917/jk.v17i2.5354**](https://doi.org/10.23917/jk.v17i2.5354)
- Aditya, B., & Cahyono, B. (2023). Evaluasi geometrik jalan lintas selatan Tambakmulyo – Wawar Kabupaten Kebumen Provinsi Jawa Tengah berdasarkan gambar Detailed Engineering Design (DED) dan gambar hasil pekerjaan (As Built Drawing). *Jurnal Geografi dan Pendidikan Geografi*, 88429. [**https://doi.org/10.22146/jgise.88429**](https://doi.org/10.22146/jgise.88429)
- Ahmed, S. M., Rong, J., Zhou, C., & Gao, Y. (2020). Dynamic estimation of saturation flow rate at information-rich signalized intersections. *Information*, 11(4), 178. [**https://doi.org/10.3390/info11040178**](https://doi.org/10.3390/info11040178)
- Aisyah, P. D., & Kusumaningsih, D. (2025). Perencanaan overlay jalan Kedungringin-Kedungboto menggunakan rigid pavement dan flexible pavement. *Journal of Science and Technology in Transportation*, 5(3), 3484.

Alfasi, B. A., Mahmoud, K. R. M., Matar, A.-H., & Abdelati, M. H. (2025). Neural network-based prediction of traffic accidents and congestion levels using real-world urban road data. *Future Transportation*, 5(4), 138. [**https://doi.org/10.3390/futuretransp5040138**](https://doi.org/10.3390/futuretransp5040138)

Aliviani, R., Bahar, T., & Setiawan, A. (2025). The effect of heavy vehicles on road performance R.E. Martadinata Palu using a model of the relationship between volume, speed and traffic density. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 10(3), 870. [**https://doi.org/10.38124/ijisrt/25mar870**](https://doi.org/10.38124/ijisrt/25mar870)

Allam, Z., Nieuwenhuijsen, M., Chabaud, D., & Moreno, C. (2022). The 15-minute city offers a new framework for sustainability, liveability, and health. *The Lancet Planetary Health*, 6(3), e181-e188. [**https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00014-6**](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00014-6)

Anagnostopoulos, A., & Kehagia, F. (2021). Utilizing UAVs Technology on Microscopic Traffic Naturalistic Data Acquirement. *Infrastructures*, 6(6), 89. [**https://doi.org/10.3390/infrastructures6060089**](https://doi.org/10.3390/infrastructures6060089)

Anik, M. A. H., & Habib, M. A. (2023). COVID-19 and teleworking: Lessons, current issues and future directions for transport and land-use planning. *SAGE Open*, 13(2), 1-14. [**https://doi.org/10.1177/0739456X231166384**](https://doi.org/10.1177/0739456X231166384)

Apanpa, K. A., Adesope, O. A., & Apanpa, B. O. (2025). Assessment of soil index properties, asphalt thickness and

- drainage design as factors in pavement distress: A case study of Agbaje–Ijokodo residential road, southwestern Nigeria. *Journal of Global Environment and Earth Science*, 29(12), 2994.
- Baker, C., Martin, P., Wilson, M. H., Ghajari, M., & Sharp, D. (2022). The relationship between road traffic collision dynamics and traumatic brain injury pathology. *Brain Communications*, 4(1), fcac033. <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcac033>
- Balqis, T. A., Agustina, R., & Tumangger, R. (2023). Perencanaan geometrik menggunakan Autocad Civil 3D pada Jalan Akses Gedung Kuliah Bersama Politeknik Negeri Lampung. *Jurnal Teknik Geoteknik*, 12(01), 3184. <https://doi.org/10.36982/jtg.v12i01.3184>
- Bhele, R., Dhungana, S., Chimoriya, D., Sapkota, A., & Ghorasaini, S. (2024). Spatial and temporal analysis of road traffic accidents using GIS. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(1), 72464. <https://doi.org/10.3126/injet.v2i1.72464>
- Bokolo, A. J. (2023). Developing green urban mobility policies for sustainable public transportation in local communities: A Norwegian perspective. *Journal of Public Management & Social Policy*, 29(2), 45-62. <https://doi.org/10.1108/jpmd-05-2023-0051>
- Braunfelds, J., Sekns, U., Is, P., Janeliuktis, R., Salgals, T., Redka, D., ... & Bobrovs, V. (2021). FBG-based sensing for

- structural health monitoring of road infrastructure. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 8850368. **<https://doi.org/10.1155/2021/8850368>**
- Bryce, J. (2026). Classification algorithms for identifying unrecorded maintenance in pavement management systems. *Transportation Research Record*, 03611981251411242.
- Ceder, A. (2020). Urban mobility and public transport: Future perspectives and review. *Sustainable Cities and Society*, 54, 102018. **<https://doi.org/10.1080/12265934.2020.1799846>**
- Chalermpong, S., Sanghatawatana, P., Wongkaew, W., Thaithatkul, P., & Anuchitchanchai, O. (2025). Challenges in climate action planning and implementation in developing countries: A case study of low-carbon urban mobility governance in Thailand. *Transportation Research Record*, 3368329. **<https://doi.org/10.1177/03611981251368329>**
- Cihan, U. (2025). A sustainable accessibility approach in transportation planning: The case of Istanbul. *Journal of Planning*, 2025, 1-18. **<https://doi.org/10.14744/planlama.2025.90958>**
- Darwish, A., Khalil, M., & Badawi, K. (2020). Optimising public bus transit networks using deep reinforcement learning. In *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 1-6). IEEE. **<https://doi.org/10.1109/ITSC45102.2020.9294710>**
- De Bona, A. A., Fonseca, K. V. O., Rosa, M. O., Lders, R., & Delgado, M. R. (2016). Analysis of public bus transportation

- of a Brazilian city based on the theory of complex networks using the P-space. *Advances in Operations Research*, 2016, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2016/3898762>
- Drliak, M., Cingel, M., elko, J., & Pnikov, Z. (2024). Research on vehicle congestion group identification for evaluation of traffic flow parameters. *Sustainability*, 16(5), 1861. <https://doi.org/10.3390/su16051861>
- Du, Y. (2024). Analysis and countermeasures of several problems in urban road engineering design. *Frontiers of Transportation Technology and Engineering*, 4(1), 40113. <https://doi.org/10.23977/ftte.2024.040113>
- Elhassan, A. (2025). Adaptive pavement design for weak subgrade soils: A case study of the Almahata road in Sudan using AASHTO 1993 methodology. *Journal of Civil and Building Material Engineering*, 11(1), 004.
- Fawad, A., Ashfaq, F., Jarar, H., Farooq, D., & Mir, H. (2025). Evaluating traffic congestion at DHA Phase-I roundabout. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 69(4), 39443. <https://doi.org/10.3311/pptr.39443>
- Fery, G., Tapa, S., Putu, N. I., Yuliadewi, A., Luh, N., Candrawengi, I. K., ... & Zainordin, N. (2025). Performance analysis and traffic flow simulation of Tukad Pakerisan road segments using VISSIM in South Denpasar. *Transportation Engineering Reports*, 6(1), 6546. <https://doi.org/10.38043/tiers.v6i1.6546>

- Fika, N., Hakzah, & Andriyani. (2025). Analisis geometrik jalan menggunakan Pedoman Desain Geometrik Jalan 2021 (Studi Kasus: Jenderal Sudirman Kota Parepare). *Teknik Jalan Raya*, 15(2), 1270. <https://doi.org/10.29103/tj.v15i2.1270>
- Foroutaghe, M. D., Moghaddam, A. M., & Fakoor, V. (2020). Impact of law enforcement and increased traffic fines policy on road traffic fatality, injuries and offenses in Iran: Interrupted time series analysis. *PLOS ONE*, 15(4), e0231182. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231182>
- Gao, L., Yu, K., & Lu, P. (2023). Considering the spatial structure of the road network in pavement deterioration modeling. *Transportation Research Record*, 03611981231188373.
- Gheorghe, C., & Șoica, A. (2025). Revolutionizing urban mobility: A systematic review of AI, IoT, and predictive analytics in adaptive traffic control systems for road networks. *Electronics*, 14(4), 719. <https://doi.org/10.3390/electronics14040719>
- Gonzales, C. M., Salazar, D. R., Uy, S. N., & Lim, R. C. (2025). Hybrid deep learning and agent-based modeling for dynamic urban traffic forecasting in smart cities. *International Journal of Traffic and Transportation Management*, 4(1), 1-18. <https://doi.org/10.63876/ijtm.v4i1.129>
- Graves, R., Nelson, Z. E., & Chakraborty, S. (2021). A decentralized intersection management system through collaborative negotiation between smart signals. *Transportation Research*

Record, 2675(12), 1263-1273.

<https://doi.org/10.1080/15472450.2021.2016405>

Hadi, A., Ghazali, F., Jrew, B., Hassoon, A., & Ibrahim, S. (2025).

A comprehensive approach to evaluating and predicting level of service for two-lane rural highways. *AL-Azhar University Civil Engineering Journal*, 12(4), 704.

<https://doi.org/10.22306/al.v12i4.704>

Hizkia Davidson Adiradja Milla, Dolly W. Karels, & J. H. Frans.

(2024). Pengembangan perhitungan alinyemen horizontal dan alinyemen vertikal Antar Kota berbasis Android. *Jurnal Fortifikasi*, 4(1), 16080.

<https://doi.org/10.35508/forteks.v4i1.16080>

Hulchak, O., Popov, S., Nahrebelna, L., & Korchevska, A. (2025).

Distribution of vehicle speeds in traffic flow on multilane roads approaching major and metropolitan cities. *Transport and Logistics*, 1(25), 48-63.

<https://doi.org/10.23939/tt2025.01.048>

Impact of Landuse Morphology on Urban Transportation. (2021).

Civil Engineering Journal, 7(11), 1758.

<https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091758>

Islam, M. K., Reza, I., Gazder, U., Akter, R., Arifuzzaman, M., &

Rahman, M. M. (2022). Predicting road crash severity using classifier models and crash hotspots. *Applied Sciences*, 12(22), 11354. **<https://doi.org/10.3390/app122211354>**

Jia, X., Guo, M., Lyu, Y., Qu, J., Li, D., & Guo, F. (2024). Adaptive traffic signal control based on graph neural networks and

- dynamic entropy-constrained soft actor-critic. *Electronics*, 13(23), 4794. <https://doi.org/10.3390/electronics13234794>
- Kang, J., Tavassoti, P., Reza Chaudhry, M. N. A., Baaj, H., & Ghafurian, M. (2024). Artificial intelligence techniques for pavement performance prediction: A systematic review. *Road Materials and Pavement Design*, 14680629.2024.2373222.
- Karamanlis, I., Nikiforiadis, A., Botzoris, G., Kokkalis, A., & Basbas, S. (2023). Towards sustainable transportation: The role of black spot analysis in improving road safety. *Sustainability*, 15(19), 14478. <https://doi.org/10.3390/su151914478>
- Kashem, M. A., Shamsuddoha, M., & Nasir, T. (2025). Digitalization in sustainable transportation operations: A systematic review of AI, IoT, and blockchain applications for future mobility. *Future Transportation*, 5(4), 157. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5040157>
- Khalil, J., Yan, D., Yuan, L., Jafarzadehfadaki, M., Adhikari, S., Han, J., Sisiopiku, V., & Jiang, Z. (2024). Urban Traffic Simulation with Shared Mobility Services: An Approach Using Spatiotemporal Network Kernel Density Estimation and MATSim. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 8(3), 104. <https://doi.org/10.1145/3704918>
- Kim, M., Han, Y., & Kim, Y. (2025). Phase-free traffic signal control for balanced flow in sensor-limited environments.

<https://doi.org/10.1038/s41598-025-89626-5>

Koh, Y., Lu, Y., Wiggins, R., Kim, Y., Qamhia, I., Tutumluer, E., ... & Harrell, M. J. (2025). Performance prediction models for flexible and rigid pavements—State-of-the-practice review for implementation in North America. *Road Materials and Pavement Design*, 10298436.2025.2513454.

Korbuakaew, K., Phatchanakit, T., Luangon, C., Soe, T. N., Pathomsiri, S., & Srisurin, P. (2025). Determining the capacity of a major highway segment using an empirical method. *International Symposium on Emerging Challenges and Opportunities for Civil Engineering*, 12(1), 3.
[https://doi.org/10.14455/isec.2025.12\(1\).inf-03](https://doi.org/10.14455/isec.2025.12(1).inf-03)

Lammer, F., & Fellendorf, M. (2025). Integrating Multiple Data Sources for Enhanced Urban Commuter Traffic Monitoring: A Cordon-Based Data Fusion Approach. *Transportation Research Record*, 1359282.
<https://doi.org/10.1177/03611981251359282>

Leveraging Advanced Technologies for (Smart) Transportation Planning: A Systematic Review. (2025, March 5). *Sustainability*, 17(5), 2245.
<https://doi.org/10.3390/su17052245>

Lu, L. X., Li, C. J., Gao, L., Gao, S. J., & Liu, X. J. (2024). Research on meteorological impact and monitoring application of highway. *Proceedings of SPIE*, 12825, 3023993.
<https://doi.org/10.1117/12.3023993>

- Majstorović, I., Stancerić, I., Rigo, A., & Stepan. (2024). Enhancement of road safety: A proposed revision of the regulations for the design of public roads in Croatia. *Civil Engineering Journal*, 10(5), 1629.
<https://doi.org/10.5592/co/cetra.2024.1629>
- Maldonado, O. F., Núñez, L. I. S., & de la Cruz, L. O. V. (2026). The impact of shared autonomous vehicles on the urban mobility of the future. *TransMeD*, 2026, 301.
<https://doi.org/10.56294/tms2026301>
- Malekzadeh, A., & Chung, E. (2020). A review of transit accessibility models: Challenges in developing transit accessibility models. *Sustainable Transport*, 12(1), 28-42.
<https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1625087>
- Mallela, J., Titus-Glover, L., Sadasivam, S., Bhattacharya, B. B., Darter, M. I., & Von Quintus, H. (2013). Implementation of the AASHTO mechanistic-empirical pavement design guide for Colorado. *Transportation Research Record*, 2347, 28-38.
- Margareta, M., Oetomo, W., & Marleno, R. (2025). Comparative analysis of cost and time between rigid and flexible pavements on the Pilang–Sawocangkring road section, Sidoarjo Regency. *Asian Journal of Earth Sciences and Health*, 4(9), 677.
- Mesic, A., Damsere-Derry, J., Feldacker, C., Mooney, S. J., Gyedu, A., Mock, C., ... & Stewart, B. T. (2024). Identifying emerging hot spots of road traffic injury severity using spatiotemporal methods: Longitudinal analyses on major

- roads in Ghana from 2005 to 2020. *BMC Public Health*, 24, 18915. <https://doi.org/10.1186/s12889-024-18915-x>
- Monteiro, J., Sousa, N., Rodrigues, J. C., & Natividade-Jesus, E. (2024). Challenges ahead for sustainable cities: An urban form and transport system review. *Energies*, 17(2), 1-27. <https://doi.org/10.3390/en17020409>
- Morency, P., Plante, C., Dubé, A., Goudreau, S., Bourbonnais, P.-L., Eluru, N., & Hatzopoulou, M. (2020). The potential impacts of urban and transit planning scenarios for 2031 on car use and active transportation in a metropolitan area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14), 5061. <https://doi.org/10.3390/ijerph17145061>
- Nugroho, R. I., & Puspito, I. H. (2025). Analysis of mathematical and graphical relationships between volume, speed, and density of traffic with Greenshields and Underwood models (Case study: Ir. H. Juanda Street, Central Jakarta). *Rekayasa Sipil*, 19(1), 9. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2025.019.01.9>
- Olusanya, O., Owosho, Y., Daniyan, I., Elegbede, A., Sodipo, Q. B., Adeodu, A., ... & Katumba, M. G. K. (2025). Multi-agent reinforcement learning framework for autonomous traffic signal control in smart cities. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 11, 1650918. <https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1650918>

- Oyebamiji, S. I., Hayangah, R. A., Jimoh, M. Y., & Adisa, O. (2025). Sustainable urban mobility and infrastructure in Sub-Saharan Africa: Engineering pathways to climate mitigation and inclusive development. *Journal of Engineering, Technology and Applied Science*, 9(5), 5. <https://doi.org/10.54030/2788-564x/2025/is9v5a5>
- Pebrian, F. Y., & Mahendra, M. O. (2025). Perencanaan desain geometrik jalan untuk pariwisata di Desa Cipamekar Kabupaten Sumedang. *Gradasi: Jurnal Teknik Sipil*, 9(1), 14431. <https://doi.org/10.31961/gradasi.v9i1.14431>
- Perera, H. N., & Abeysooriya, G. (2025). Addressing the intercity traffic congestion through transit-oriented development (TOD) and smart traffic management: A case study of Gampaha, Sri Lanka. *Bhumi The Journal of Natural Resource Theory and Management*, 12(2), 138. <https://doi.org/10.4038/bhumi.v12i2.138>
- Philp, M., & Taylor, M. A. P. (2015). Research agenda for low-carbon mobility: Issues for new world cities. *Sustainable Cities and Society*, 19, 64-73. <https://doi.org/10.1080/15568318.2015.1106261>
- Pratama, A., Kharisma, G., Setiawan, T. P., Rijaluddin, A., & Taufik, M. (2025). Systematic review of the impact of side frictions on road service levels in urban roadways. *Riggs: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 4(2), 1337. <https://doi.org/10.31004/riggs.v4i2.1337>

- Rajak, I. A., Altarans, I., & Faruk, F. (2026). Flexible pavement distress analysis using the pavement condition index (PCI) method. *Scientia*, 4(2), 261.
- Ramadhani Nur Adnan, N., Pranoto, & Rahardjo, B. (2020). Analisis kondisi geometrik jalan terhadap potensi terjadinya kecelakaan lalu lintas. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 25(1), 20-32. <https://doi.org/10.17977/um071v25i12020p20-32>
- Rohani, R., & Hasyim, H. (2023). Tinjauan karakteristik arus lalu lintas dengan menggunakan 3 model pada jalan luar kota (Studi kasus ruas jalan Tgh Lopan Labuapi Kabupaten Lombok Barat). *Jurnal Gara*, 17(4), 680. <https://doi.org/10.35327/gara.v17i4.680>
- Sakhno, S., Liubiyi, Y., & Oleksandr, K. (2025). Analysis of strategies for developing urban route networks. *Blagoveshchensk State Pedagogical University Bulletin*, 12(43), 331-340. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.12\(43\).2.331-340](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.12(43).2.331-340)
- Saputra, I., Hatami, M. P., & Maharani, A. (2025). Transit-oriented development in emerging cities: A case study of railway station areas in Bandung, Indonesia. *Urban Studies*, 1-16. <https://doi.org/10.51557/zer8bm80>
- Sayed, S. A., Abdel-Hamid, Y., & Hefny, H. (2023). Artificial intelligence-based traffic flow prediction: A comprehensive review. *Journal of Engineering*, 43067, 00081-6. <https://doi.org/10.1186/s43067-023-00081-6>

- Shepelev, V. D., Glushkov, A. I., & Fadina, O. (2025). Improvement of traffic flow management at intersections using cluster analysis and fuzzy logic. *FME Transactions*, 25(3), 499-510. [**https://doi.org/10.5937/fme2503499s**](https://doi.org/10.5937/fme2503499s)
- Siagian, R. A., Said, S., & Sumiyattinah, S. (2025). Traffic performance analysis of Jalan Rahadi Usman and Jalan Khatulistiwa concerning the Garuda Bridge development plan in Pontianak. *Jurnal Transportasi*, 25(3), 90527. [**https://doi.org/10.26418/jts.v25i3.90527**](https://doi.org/10.26418/jts.v25i3.90527)
- Singh, S., & Thanikella, A. (2023). Innovative traffic optimization techniques: Integrating Braess' paradox and vision transformer architectures (ViT) for novel roadway modalities. In *Proceedings of the 2023 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-12). [**https://doi.org/10.1145/3639233.3639358**](https://doi.org/10.1145/3639233.3639358)
- Son, H., Jang, J., Park, J., Balog, A., Ballantyne, P., Kwon, H. R., Singleton, A., & Hwang, J. (2025). Leveraging Advanced Technologies for (Smart) Transportation Planning: A Systematic Review. *Sustainability*, 17(5), 2245. [**https://doi.org/10.3390/su17052245**](https://doi.org/10.3390/su17052245)
- Steiner, K., & Irnich, S. (2020). Strategic planning for integrated mobility-on-demand and urban public bus networks. *Transportation Science*, 54(6), 1431-1447. [**https://doi.org/10.1287/TRSC.2020.0987**](https://doi.org/10.1287/TRSC.2020.0987)
- Sukirman, Silvia (2010). Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Lentur, Nova Bandung.

- Syahrhun Hikmansyah, Tamrin Mallawangeng, & N. Yuniarti. (2025). Desain geometrik jalan pada Jalan Kebun Kopi – Toboli Sulawesi Tengah. *Jurnal Perencanaan Teknik Sipil dan Keberlanjutan*, 3(1), 4340. [**https://doi.org/10.56326/jptsk.v3i1.4340**](https://doi.org/10.56326/jptsk.v3i1.4340)
- Tamagusko, T., Correia, M. G., & Ferreira, A. (2024). Machine learning applications in road pavement management: A review, challenges and future directions. *Infrastructures*, 9(12), 213.
- Tan, L. H., Yuen, C. W., Zainol, R., & Pereira, A. S. (2025). A systems perspective on drive-through trip generation in transportation planning. *Sustainability*, 17(20), 1-28. [**https://doi.org/10.3390/su17209214**](https://doi.org/10.3390/su17209214)
- Tirachini, A., & Cats, O. (2020). COVID-19 and public transportation: Current assessment, prospects, and research needs. *Journal of Public Transportation*, 22(1), 1-21. [**https://doi.org/10.5038/2375-0901.22.1.1**](https://doi.org/10.5038/2375-0901.22.1.1)
- Traffic mode recognition based on optimized temporal convolutional neural network by using cell phone GPS data. (2024, February 14). *Proceedings of SPIE*, 12, 3024025. [**https://doi.org/10.1117/12.3024025**](https://doi.org/10.1117/12.3024025)
- Turcanu, I., Gharsallaoui, O., Gratz, P., Poncin, M., & Castignani, G. (2025). Towards planning digital twins for urban mobility. *Proceedings of the 2025 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 11223541. [**https://doi.org/10.1109/MT-ITS68460.2025.11223541**](https://doi.org/10.1109/MT-ITS68460.2025.11223541)

- Verma, A., Vajjarapu, H., & Subramanian, G. H. (2021). Evolution of Urban Transportation Policies in India: A Review and Analysis. *Urban Science*, 5(4), 136.
<https://doi.org/10.1007/s40890-021-00136-1>
- Wang, F., Cao, Y., Wang, Z., Li, J., & Xu, H. (2025). Investigation of the influence of urban compactness on transportation: A comparative analysis of average commuting duration and velocity. *Land*, 14(10), 1-26.
<https://doi.org/10.3390/land14102082>
- Wang, K., Shen, Z., Lei, Z., Liu, X., & Zhang, T. (2024). Toward multi-agent reinforcement learning based traffic signal control through spatio-temporal hypergraphs. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 24, 3556243.
<https://doi.org/10.1109/TMC.2025.3556243>
- Wang, X., Wang, P., Jiao, H., Wu, J., & Han, J. (2025). Research on smart city transportation planning strategy based on decision tree algorithm. *Proceedings of SPIE*, 12.3073464.
<https://doi.org/10.1117/12.3073464>
- Wesley, K. J., & Krishnakanth, P. (2025). Study on the relationship between speed and flow for highway traffic management. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 54633.
<https://doi.org/10.55041/ijsrem54633>
- Wibisono, R., & Hernanda, T. A. S. (2025). Analisis Level of Service (LOS) dalam mengantisipasi kemacetan lalu lintas di ruas Jalan Raya Soreang-Kopo Kabupaten Bandung. *Jurnal*

- Penelitian Rekayasa Sipil*, 8(1), 9673.
<https://doi.org/10.25139/jprs.v8i1.9673>
- Wicaksono, H. A., Utomo, N., & Fatikasari, A. D. (2025). Evaluasi alinyemen horizontal jalan raya ruas Jalan Situbondo-Bajulmati (Kabupaten Banyuwangi) STA 0+000 – STA 5+000. *RACIC: Riset dan Aplikasi Teknik Sipil*, 10(2), 5549.
<https://doi.org/10.36341/racic.v10i2.5549>
- Yan, H., & Lv, Z. (2024). A survey of sustainable development of intelligent transportation system based on urban travel demand. *Sustainable Social Development*, 2(1), 2399.
<https://doi.org/10.54517/ssd.v2i1.2399>
- Yusuf Pebrian, F., & Oka Mahendra, M. (2023). Perencanaan desain geometrik jalan untuk pariwisata di Desa Cipamekar Kabupaten Sumedang. *Jurnal Teknik Sipil*, 30(2), 88429.
<https://doi.org/10.22146/jgise.88429>
- Yusuf, O., Rasheed, A., & Lindseth, F. (2025). Leveraging big data and AI for sustainable urban mobility solutions. *Urban Science*, 9(8), 301.
<https://doi.org/10.3390/urbansci9080301>
- Zegras, C., Leape, J., Carrasco, J., Navas, C., Venter, C., & Vergel-Tovar, C. E. (2020). Scaling up innovative participatory design for public transportation planning: Lessons from experiments in the Global South. *Transportation Research Record*, 2674(10), 447-459.
<https://doi.org/10.1177/0361198120940998>

- Zhang, H., Ren, B., & He, C. (2025). A review of deep learning for traffic flow prediction. *Proceedings of SPIE*, 12.3050635. [**https://doi.org/10.1117/12.3050635**](https://doi.org/10.1117/12.3050635)
- Zhang, S., Wang, R., Tang, H., Zuo, K., Jiang, P., Hu, P., ... & Zhao, P. (2026). MTNet: A multi-task learning framework that integrates intra-task and task-specific dependencies for traffic forecasting. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 37, 3638147. [**https://doi.org/10.1109/TKDE.2025.3638147**](https://doi.org/10.1109/TKDE.2025.3638147)
- Zhang, Z., Lu, Z., Zheng, W., Chen, X., Dong, J., Ren, J., ... & Chu, J. (2025). Impact of drink-driving penalty enhancement policies on road traffic injury deaths among vulnerable road users in Shandong Province: An interrupted time series study. *BMC Public Health*, 25, 25966. [**https://doi.org/10.1186/s12889-025-25966-1**](https://doi.org/10.1186/s12889-025-25966-1)
- Zhao, Y., & Lv, Y. (2025). Urban congestion and carbon emission management: A road reservation cum incentive scheme. *Proceedings of SPIE*, 12635, 3078568. [**https://doi.org/10.1117/12.3078568**](https://doi.org/10.1117/12.3078568)

PROFIL PENULIS



Muhammad Arsyil Datau, S.T., M.T. lahir di Ujungpandang pada 21 Januari 1984. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana Arsitektur di Universitas Hasanuddin dan Magister Teknik Perencanaan Prasarana pada kampus yang sama di Makassar.

Saat ini, Penulis berkiprah sebagai Dosen Tetap pada Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sinjai. Dalam kegiatan akademik, penulis aktif mengajar dan mengembangkan pembelajaran yang berfokus pada Pengantar Program Studi Sarjana Perencanaan Wilayah dan Kota, Studio Perencanaan, Pengantar Transportasi, Perencanaan dan Pengembangan Kota Baru serta Sistem Perumahan dan Permukiman. Bidang keahlian penulis mencakup infrastruktur perkotaan dan pengembangan prasarana permukiman.

Aktivitas penelitian dan pengabdian kepada masyarakat penulis berfokus pada kajian perencanaan dan pengembangan infrastruktur wilayah, perencanaan transportasi serta perencanaan dan pengembangan kawasan permukiman berbasis potensi daerah dan mitigasi kebencanaan.



Zainun Datau, S.T., M.T. lahir di Bajo'E pada 29 Juni 1988. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik Sipil di Universitas Gorontalo dan Magister Teknik Perencanaan Prasarana di Universitas Hasanuddin.

Saat ini, Penulis berkiprah sebagai dosen tetap Yayasan pada Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota di Universitas Muhammadiyah Sinjai. Dalam kegiatan akademik, penulis aktif mengajar dan mengembangkan pembelajaran yang berfokus pada Prasarana Wilayah dan Kota, Struktur Tata Ruang, Manajemen Perkotaan, Perencanaan Kota Baru serta Sistem Perumahan dan Permukiman. Bidang keahlian penulis mencakup perencanaan tata ruang, manajemen infrastruktur perkotaan dan pengembangan kebijakan permukiman berkelanjutan.

Aktivitas penelitian dan pengabdian kepada masyarakat penulis berfokus pada kajian pengembangan wilayah, perencanaan infrastruktur serta rekayasa pengembangan kawasan permukiman dan kota baru berbasis potensi daerah.



Ir. Andi Butsainah Tumaadir, S.T., M.T. lahir di Kota Sinjai, Kabupaten Sinjai, Sulawesi Selatan, pada tanggal 12 Februari 1997. Saya memulai pendidikan tinggi pada tahun 2015 di Universitas Muslim Indonesia (UMI) Makassar dan berhasil meraih gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada tahun 2020. Pada tahun 2021, Saya melanjutkan studi Pascasarjana di Universitas Muslim Indonesia dan meraih gelar Magister Teknik (M.T.) dari Program Studi Teknik Sipil pada tahun 2022. Sejak tahun 2022, Saya bergabung dengan Universitas Muhammadiyah Sinjai dan sejak tahun 2022 hingga sekarang saya menjadi dosen Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik. Pada tahun 2022, Saya kembali melanjutkan pendidikan profesi meraih gelar Insinyur (Ir.) dari Program Studi Pendidikan Keinsinyuran pada Universitas Muslim Indonesia. Selain kegiatan akademik, Saya juga aktif dalam berbagai aktivitas profesional, baik sebagai konsultan, dan peneliti mandiri.



Ir. Sri Mulyani Muchtar, S.T., M.T. lahir di Sinjai pada 09 November 1998. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik Sipil dan Magister Teknik Sipil di Universitas Muslim Indonesia.

Saat ini, Penulis berkiprah sebagai dosen tetap pada Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota di Universitas Muhammadiyah Sinjai. Dalam kegiatan akademik, penulis aktif mengajar dan mengembangkan pembelajaran yang berfokus pada bidang pembangunan wilayah, sosial-ekonomi, dan keberlanjutan.



Ir. Abd Basit Amir, S.T., M.T. lahir di Bone pada 24 Februari 1974. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik Sipil dan Magister Teknik di Universitas Muslim Indonesia.

Saat ini, Penulis berkiprah sebagai dosen tetap Yayasan dan menjabat sebagai Penelitian dan pengabdian Masyarakat pada Program Studi Teknik Sipil di Universitas Cahaya Prima (UNCAPI) Kab Bone. Dalam kegiatan akademik, penulis aktif mengajar dan mengembangkan pembelajaran yang berfokus pada Praktek Laboratorium Alat Ukur Tanah, Lab Struktur Beton, Lab Mekanika Tanah dan Lab Perkerasan Jalan. Bidang keahlian penulis meliputi Ilmu Ukur Tanah, Mekanika Tanah, Analisa struktur, Perkerasan Jalan.

Penulis adalah Pendiri dan Direktur Perusahaan CV. Orient Engineering serta CV. Iyyanae Consultant yang bergerak di bidang Perencanaan dan Pengawasan

Cita-Citanya Membantu Negara ini terkhusus Kab. Bone dalam menumbuh semangat sumberdaya manusia (SDM) unggul menuju Indonesia menjadi Negara terkuat di dunia tahun 2035 berbasis Pancasila dan cinta tanah air.



Iwan Cahyono, S.T., M.T. lahir di Jombang pada 8 Februari 1969 dan saat ini berdomisili di Jombang, Jawa Timur. Ia menempuh pendidikan Sarjana (S-1) di bidang Teknik Sipil di Universitas Darul Ulum (Undar) dan lulus pada tahun 1993, kemudian melanjutkan studi Magister (S-2) Teknik Sipil di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dan lulus pada tahun 2002. Saat ini, ia berprofesi sebagai staf pengajar pada Program Studi Teknik Sipil di Universitas Darul Ulum Jombang.

Sebagai seorang pendidik, ia memiliki komitmen yang tinggi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan sumber daya manusia. Melalui karyanya, penulis mengajak para pembaca untuk tidak pernah lelah dalam menuntut ilmu, karena proses belajar merupakan kunci utama dalam mencapai kemajuan dan kesuksesan.



Ir. Hervian Handika Sugasta, S.T., M.T.

lahir di Pontianak pada 18 Juli 1991 dan saat ini berdomisili di Kota Pontianak. Ia memiliki ketertarikan yang besar dalam membaca buku-buku bertema humaniora dan keteknikan, yang menjadi sarana dalam memperluas wawasan serta memperdalam pemahaman keilmuan. Melalui karya ini, penulis ingin menyampaikan sebuah pemikiran bahwa teori memiliki peran penting dalam menjelaskan pengalaman secara sistematis dan bermakna. Sebagaimana diungkapkan oleh Karl Terzaghi, “Teori adalah bahasa yang dengannya pelajaran pengalaman dapat diungkapkan dengan jelas.”



Nur Alaina Darwis, S.T., M.T. lahir di Makassar pada 4 November 1986. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik Arsitektur dan Magister Teknik Perencanaan Prasarana di Universitas Hasanuddin

Makassar.

Saat ini, Penulis berkiprah sebagai dosen tetap Yayasan dan menjabat sebagai KaProdi pada Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota di Universitas Muhammadiyah Barru. Dalam kegiatan akademik, penulis aktif mengajar dan mengembangkan pembelajaran yang berfokus pada Teori Pengantar Perencanaan Wilayah dan Kota. Bidang keahlian penulis meliputi perencanaan lanskap muda.

Aktivitas penelitian dan pengabdian kepada masyarakat penulis berfokus pada penerapan ilmu perencanaan untuk menyelesaikan masalah spasial, sosial, dan ekonomi di masyarakat.



Faradhiya Jinan Bastini, S.T., M.T. lahir di Makassar pada 18 Desember 2000. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) dan Magister (S2) pada Program Studi Teknik Sipil di Universitas Muslim Indonesia, dengan

konsentrasi pada bidang keairan yang menjadi fokus utama pengembangan keilmuannya hingga saat ini.

Saat ini, Penulis mengemban amanah sebagai Dosen Tetap pada Program Studi Teknik Sipil di Universitas Cahaya Prima (UNCAPI) Bone. Dalam kapasitasnya sebagai akademisi, penulis aktif mengampu berbagai mata kuliah di bidang keairan, meliputi Mekanika Fluida, Hidrolika, Hidrologi, Sistem Drainase dan Pengendalian Banjir, Sistem Irigasi, Bangunan Tenaga Air, serta Pelabuhan Laut. Selain itu, penulis juga mengajar mata kuliah penunjang dan bidang teknik sipil lainnya seperti Statistika dan Probabilitas, Manajemen Alat Berat, Analisa Numerik, serta Dampak Rekayasa Lingkungan.

Sebagai bagian dari tridarma perguruan tinggi, penulis secara konsisten berfokus pada aktivitas penelitian dan pengabdian kepada masyarakat dan menaruh perhatian besar pada pengembangan konstruksi bangunan air yang adaptif, inovatif, dan berkelanjutan, khususnya dalam menjawab tantangan era teknologi dan perubahan iklim saat ini. Melalui pendekatan ilmiah yang terintegrasi dengan perkembangan teknologi konstruksi modern, penulis berupaya menghadirkan solusi rekayasa yang tidak hanya presisi secara teknis, tetapi juga memberikan manfaat nyata bagi masyarakat luas.

Bagi penulis, kemajuan teknologi di bidang konstruksi bukan sekadar transformasi alat dan metode, melainkan juga transformasi pola pikir. Inovasi harus dibangun di atas fondasi integritas, keilmuan yang kuat, serta kepedulian terhadap lingkungan dan kebutuhan sosial. Ia meyakini bahwa generasi insinyur masa depan memiliki peran strategis dalam menciptakan infrastruktur yang tangguh, efisien, dan berkelanjutan.



Ihwan Sabir, S.P.W.K., M.P.W.K. lahir di Sinjai pada 17 April 1998. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik Perencanaan Wilayah dan Kota di Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar dan Magister Perencanaan Wilayah dan

Kota di Universitas Hasanuddin Makassar.

Saat ini, Penulis berkiprah sebagai dosen tetap Yayasan pada Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota di Universitas Muhammadiyah Sinjai. Dalam kegiatan akademik, penulis aktif mengajar dan mengembangkan pembelajaran yang berfokus pada bidang perencanaan dan pengembangan infrastruktur wilayah, pengembangan Kawasan permukiman, serta pendampingan program Pembangunan berbasis masyarakat.

Aktivitas penelitian penulis berfokus pada kajian pemilihan Lokasi perumahan dan permukiman berbasis system informasi geografis, kebijakan spasial mitigasi bencana banjir.

Buku referensi berjudul **Perencanaan dan Operasi Transportasi Jalan Raya** membahas secara komprehensif konsep, prinsip, dan praktik dalam merancang serta mengelola sistem transportasi jalan yang efektif dan efisien. Seiring dengan meningkatnya mobilitas masyarakat dan pertumbuhan kendaraan, perencanaan transportasi yang tepat menjadi faktor krusial dalam mendukung kelancaran arus lalu lintas, keselamatan pengguna jalan, serta keberlanjutan lingkungan.

Buku ini menguraikan berbagai aspek penting, mulai dari perencanaan jaringan jalan, analisis kebutuhan transportasi, manajemen lalu lintas, hingga pengoperasian sistem transportasi jalan raya. Selain itu, dibahas pula pendekatan-pendekatan modern dalam pengelolaan transportasi, termasuk pemanfaatan teknologi dan sistem cerdas untuk meningkatkan kinerja layanan transportasi.

Dengan pendekatan yang sistematis dan mudah dipahami, buku ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi masyarakat umum dalam bidang transportasi. Kehadiran buku ini diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata dalam mendukung pengembangan sistem transportasi jalan raya yang aman, nyaman, dan berkelanjutan.