

BUKU REFERENSI



REKAYASA TRANSPORTASI

TEORI, MODEL, DAN APLIKASI PERKOTAAN

Ir. Taufikurrahman, ST., M.T.
Dr. Ir. Hasmar Halim, ST. MT., IPM.

BUKU REFERENSI

REKAYASA TRANSPORTASI

TEORI, MODEL, DAN APLIKASI PERKOTAAN

Ir. Taufikurrahman, ST., M.T.
Dr. Ir. Hasmar Halim, ST. MT., IPM.

REKAYASA TRANSPORTASI

TEORI, MODEL, DAN APLIKASI PERKOTAAN

Ditulis oleh:

Ir. Taufikkurrahman, ST., M.T.
Dr. Ir. Hasmar Halim, ST. MT., IPM.

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang keras memperbanyak, menerjemahkan atau mengutip baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku tanpa izin tertulis dari penerbit.



ISBN: 978-634-7457-92-9
IV + 237 hlm; 18,2 x 25,7 cm.
Cetakan I, Maret 2026

Desain Cover dan Tata Letak:
Melvin Mirsal

Diterbitkan, dicetak, dan didistribusikan oleh
PT Media Penerbit Indonesia
Royal Suite No. 6C, Jalan Sedap Malam IX, Sempakata
Kecamatan Medan Selayang, Kota Medan 20131
Telp: 081362150605
Email: ptmediapenerbitindonesia@gmail.com
Web: <https://mediapenerbitindonesia.com>
Anggota IKAPI No.088/SUT/2024



KATA PENGANTAR

Rekayasa transportasi adalah cabang teknik yang berfokus pada perencanaan dan pengelolaan sistem transportasi agar pergerakan orang dan barang berlangsung aman, efisien, dan berkelanjutan di tengah tantangan perkotaan seperti kemacetan, emisi, dan keselamatan jalan. Perkembangan teknologi mendorong sistem yang lebih berbasis data dan responsif, sementara perencanaan modern menekankan aksesibilitas, keberlanjutan, serta integrasi dengan tata guna lahan dan kebijakan publik.

Buku referensi ini membahas konsep dasar rekayasa transportasi, sistem dan infrastruktur transportasi, serta karakteristik lalu lintas dan tingkat pelayanan jalan dalam konteks perkotaan. Buku referensi ini membahas analisis simpang, perencanaan dan pemodelan transportasi, transportasi umum, manajemen lalu lintas, serta aspek keselamatan dan dampak lingkungan. Selain itu, buku referensi ini membahas penerapan teknologi modern seperti sistem transportasi cerdas (ITS) untuk mewujudkan mobilitas perkotaan yang efisien, aman, dan berkelanjutan.

Semoga buku referensi ini dapat memberikan manfaat, memperluas wawasan, serta menjadi kontribusi nyata dalam pengembangan ilmu dan praktik rekayasa transportasi yang lebih efisien, aman, inklusif, dan berkelanjutan.

Salam hangat.

PENULIS



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
BAB I PENGANTAR REKAYASA TRANSPORTASI	1
A. Ruang Lingkup dan Peran Rekayasa Transportasi	1
B. Sistem Transportasi Perkotaan dan Karakteristiknya	4
C. Hubungan Transportasi, Tata Guna Lahan, dan Lingkungan	8
D. Tantangan Transportasi Perkotaan	13
BAB II SISTEM TRANSPORTASI DAN INFRASTRUKTUR.....	21
A. Komponen Sistem Transportasi.....	21
B. Klasifikasi Moda Transportasi Perkotaan.....	26
C. Jaringan Jalan dan Fasilitas Pendukung	31
D. Standar dan Kebijakan Transportasi Perkotaan	36
BAB III KARAKTERISTIK LALU LINTAS	43
A. Arus, Kecepatan, dan Kepadatan Lalu Lintas	43
B. Hubungan Fundamental Lalu Lintas	47
C. Karakteristik Pengemudi dan Kendaraan	51
D. Metode Pengumpulan Data Lalu Lintas	56
BAB IV KAPASITAS DAN TINGKAT PELAYANAN JALAN.....	63
A. Konsep Kapasitas Jalan	63
B. Tingkat Pelayanan (<i>Level of Service</i>)	69
C. Faktor Penyesuaian Kapasitas Jalan	75
D. Analisis Kapasitas Berdasarkan Standar	80

BAB V	ANALISIS SIMPANG DAN MANAJEMEN LALU LINTAS	89
A.	Jenis Simpang dan Permasalahannya	89
B.	Analisis Simpang Tak Bersinyal	94
C.	Analisis Simpang Bersinyal.....	101
D.	Strategi Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas.....	108
BAB VI	PERENCANAAN TRANSPORTASI PERKOTAAN	115
A.	Konsep dan Tahapan Perencanaan Transportasi	115
B.	Model Empat Tahap Transportasi	120
C.	Analisis Permintaan dan Pola Perjalanan	124
D.	Integrasi Transportasi dan Tata Guna Lahan.....	129
BAB VII	PEMODELAN TRANSPORTASI.....	135
A.	Model Bangkitan dan Tarikan Perjalanan	135
B.	Model Distribusi Perjalanan	140
C.	Model Pemilihan Moda	145
D.	Model Pembebanan Jaringan.....	149
BAB VIII	TRANSPORTASI UMUM PERKOTAAN.....	157
A.	Sistem Angkutan Umum Perkotaan	157
B.	Perencanaan Rute dan Jadwal.....	163
C.	Kinerja dan Pelayanan Angkutan Umum	168
D.	Integrasi dan Pengembangan Transportasi Berkelanjutan.....	173
BAB IX	KESELAMATAN DAN DAMPAK TRANSPORTASI.....	179
A.	Keselamatan Lalu Lintas Jalan	179
B.	Analisis dan Manajemen Kecelakaan.....	183
C.	Dampak Lingkungan Transportasi	186
D.	Transportasi Berkelanjutan dan Ramah Lingkungan	190
BAB X	SISTEM TRANSPORTASI CERDAS (ITS)	195
A.	Konsep dan Komponen ITS	195
B.	Aplikasi ITS dalam Manajemen Lalu Lintas.....	198

C.	Teknologi Informasi dan <i>Big Data</i> Transportasi	202
D.	Kendaraan Otonom dan Masa Depan Transportasi	206
BAB XI	STUDI KASUS DAN APLIKASI PERKOTAAN	211
A.	Studi Kasus Rekayasa Lalu Lintas Perkotaan	211
B.	Aplikasi Model Transportasi pada Kota Nyata	214
C.	Evaluasi Kebijakan dan Kinerja Sistem Transportasi	217
DAFTAR PUSTAKA	.....	223
GLOSARIUM	.....	229
INDEKS	.....	231
BIOGRAFI PENULIS	.....	235
SINOPSIS	.....	237



BAB I

PENGANTAR REKAYASA

TRANSPORTASI

Rekayasa transportasi merupakan cabang ilmu teknik yang berfokus pada perencanaan, perancangan, pengoperasian, dan pengelolaan sistem transportasi guna menjamin pergerakan orang dan barang yang aman, efisien, dan berkelanjutan. Dalam konteks perkotaan modern, rekayasa transportasi tidak hanya berkaitan dengan penyediaan infrastruktur seperti jalan dan angkutan umum, tetapi juga mencakup pengaturan lalu lintas, keselamatan, integrasi dengan tata guna lahan, pemanfaatan teknologi, serta pengendalian dampak lingkungan. Seiring meningkatnya urbanisasi, kemacetan, dan tantangan perubahan iklim, rekayasa transportasi berperan strategis dalam mendukung aksesibilitas, produktivitas ekonomi, dan kualitas hidup masyarakat melalui pendekatan sistemik dan berkelanjutan.

A. Ruang Lingkup dan Peran Rekayasa Transportasi

Rekayasa transportasi merupakan salah satu cabang utama ilmu teknik sipil yang berfokus pada perencanaan, perancangan, pengoperasian, dan pengelolaan sistem transportasi untuk menjamin pergerakan orang dan barang yang aman, efisien, ekonomis, dan berkelanjutan. Menurut Garber dan Hoel (2018), rekayasa transportasi mengintegrasikan prinsip-prinsip teknik, ilmu perilaku, ekonomi, dan kebijakan publik untuk mengoptimalkan kinerja sistem transportasi dalam konteks sosial dan lingkungan yang dinamis. Dalam perkembangannya, rekayasa transportasi tidak lagi dipahami sebatas pembangunan jalan, tetapi sebagai disiplin sistemik yang mengelola mobilitas sebagai bagian dari pembangunan wilayah dan perkotaan.

1. Ruang Lingkup Rekayasa Transportasi

Ruang lingkup rekayasa transportasi sangat luas dan mencakup seluruh siklus penyelenggaraan sistem transportasi, mulai dari tahap konseptual hingga operasional. Secara umum, ruang lingkup tersebut dapat dikelompokkan ke dalam beberapa aspek utama berikut:

a. Perencanaan Transportasi

Perencanaan transportasi bertujuan untuk mengidentifikasi kebutuhan mobilitas masyarakat saat ini dan masa depan serta merumuskan solusi sistem transportasi yang paling sesuai. Proses ini melibatkan analisis permintaan perjalanan, proyeksi pertumbuhan lalu lintas, evaluasi alternatif sistem transportasi, dan penilaian dampak sosial-ekonomi serta lingkungan. Ortúzar dan Willumsen (2019) menekankan bahwa perencanaan transportasi modern harus berbasis data, menggunakan pemodelan kuantitatif, dan mempertimbangkan integrasi antar moda serta keterkaitan dengan tata guna lahan.

b. Perancangan dan Penyediaan Infrastruktur Transportasi

Aspek ini meliputi perancangan geometrik jalan, simpang, jembatan, terminal, fasilitas angkutan umum, serta prasarana pendukung seperti jalur pejalan kaki dan pesepeda. Rekayasa pada tahap ini bertujuan memastikan bahwa infrastruktur memenuhi standar keselamatan, kenyamanan, kapasitas, dan efisiensi biaya sepanjang umur layanannya. Dalam konteks Indonesia, perancangan infrastruktur transportasi juga harus mengacu pada standar nasional seperti PKJI dan pedoman teknis Kementerian PUPR.

c. Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas

Manajemen lalu lintas mencakup pengaturan arus kendaraan, pengendalian simpang, sistem persinyalan, manajemen parkir, serta penerapan kebijakan pengendalian permintaan perjalanan. Menurut Papageorgiou *et al.* (2022), tujuan utama manajemen lalu lintas adalah memaksimalkan kinerja jaringan yang ada tanpa selalu menambah kapasitas fisik, melalui pengaturan operasional yang lebih cerdas dan adaptif.

d. Keselamatan Transportasi

Rekayasa transportasi memiliki peran penting dalam menurunkan tingkat kecelakaan lalu lintas melalui pendekatan sistemik, yang dikenal sebagai *safe system approach*. Pendekatan

ini menekankan bahwa keselamatan bukan hanya tanggung jawab pengguna jalan, tetapi juga hasil dari desain jalan, kendaraan, regulasi, dan manajemen lalu lintas yang baik. WHO (2023) menegaskan bahwa intervensi berbasis rekayasa, seperti desain jalan yang berorientasi keselamatan, merupakan komponen kunci dalam upaya menurunkan fatalitas lalu lintas.

e. Evaluasi Dampak Lingkungan dan Keberlanjutan

Transportasi merupakan salah satu penyumbang utama emisi gas rumah kaca dan polusi udara di kawasan perkotaan. Oleh karena itu, rekayasa transportasi modern mencakup analisis dampak lingkungan, efisiensi energi, serta pengembangan sistem transportasi berkelanjutan. Banister (2018) menyatakan bahwa paradigma baru rekayasa transportasi harus bergeser dari peningkatan mobilitas semata menuju peningkatan aksesibilitas dengan dampak lingkungan yang minimal.

2. Peran Rekayasa Transportasi dalam Pembangunan Perkotaan

Peran rekayasa transportasi dalam pembangunan perkotaan sangat strategis karena sistem transportasi yang efektif dan efisien menjadi tulang punggung mobilitas dan interaksi sosial-ekonomi di kota. Sistem transportasi yang andal memungkinkan pergerakan manusia, barang, dan jasa secara lancar, sehingga mendukung produktivitas tenaga kerja, kelancaran distribusi komoditas, serta peningkatan daya saing wilayah perkotaan. Seperti yang dikemukakan oleh Rodrigue *et al.* (2023), efisiensi dan keteraturan transportasi tidak hanya memengaruhi kenyamanan dan waktu tempuh perjalanan, tetapi juga membentuk struktur ruang kota serta menentukan pola aktivitas masyarakat. Misalnya, kemudahan akses antar kawasan pusat kegiatan dengan pemukiman akan mendorong pertumbuhan ekonomi yang merata dan menurunkan tekanan pada pusat kota.

Rekayasa transportasi berperan penting dalam mewujudkan keadilan dan inklusivitas sosial. Akses terhadap transportasi yang terjangkau, aman, dan nyaman menentukan kemampuan masyarakat untuk memperoleh layanan pendidikan, kesehatan, dan kesempatan kerja. Litman (2022) menekankan bahwa perencanaan transportasi yang responsif harus mempertimbangkan kebutuhan kelompok rentan, termasuk lansia, penyandang disabilitas, dan masyarakat berpenghasilan rendah, sehingga mobilitas perkotaan tidak hanya menguntungkan

sebagian warga, tetapi juga mendukung pemerataan kesempatan sosial. Dengan demikian, rekayasa transportasi tidak semata-mata soal jalan raya atau moda transportasi, tetapi juga tentang pemberdayaan masyarakat melalui aksesibilitas yang adil dan merata.

3. Perkembangan Paradigma Rekayasa Transportasi

Perkembangan paradigma rekayasa transportasi mencerminkan perubahan signifikan dalam tujuan, pendekatan, dan ruang lingkup disiplin ini seiring dengan kemajuan teknologi dan kompleksitas tantangan perkotaan. Pada masa lalu, fokus utama rekayasa transportasi lebih banyak diarahkan pada peningkatan kapasitas jalan, percepatan arus lalu lintas, dan pengurangan kemacetan. Pendekatan ini cenderung bersifat teknis dan kuantitatif, dengan prioritas utama pada kelancaran pergerakan kendaraan. Namun, seiring meningkatnya kepadatan penduduk, urbanisasi pesat, dan kesadaran terhadap dampak lingkungan, paradigma rekayasa transportasi telah bergeser menuju pendekatan yang lebih holistik, menekankan keberlanjutan, keselamatan, kenyamanan, dan kualitas hidup warga kota.

Perubahan paradigma ini juga didorong oleh kemajuan teknologi yang pesat, terutama dalam bidang sistem transportasi cerdas (*Intelligent Transportation Systems/ITS*), *big data*, dan kecerdasan buatan. Teknologi-teknologi ini memungkinkan pengumpulan dan analisis data secara real-time, yang mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti dan prediktif dalam perencanaan, operasi, dan manajemen transportasi perkotaan. Vlahogianni dan Karlaftis (2023) menekankan bahwa integrasi teknologi digital dengan rekayasa transportasi memungkinkan pengelolaan arus lalu lintas yang lebih adaptif, perencanaan rute transportasi umum yang optimal, hingga pemodelan dampak kebijakan transportasi sebelum diterapkan. Dengan demikian, rekayasa transportasi tidak lagi hanya berkutat pada aspek fisik infrastruktur, tetapi juga melibatkan pengelolaan informasi, analisis perilaku pengguna, dan integrasi dengan sistem sosial-ekonomi perkotaan.

B. Sistem Transportasi Perkotaan dan Karakteristiknya

Sistem transportasi perkotaan merupakan suatu kesatuan terintegrasi yang berfungsi untuk melayani kebutuhan mobilitas penduduk dan pergerakan barang di dalam wilayah kota. Sistem ini

mencakup jaringan fisik, moda transportasi, pengguna, kelembagaan, serta aturan dan teknologi yang saling berinteraksi membentuk pola pergerakan perkotaan. Menurut Rodrigue, Comtois, dan Slack (2023), sistem transportasi perkotaan adalah elemen kunci yang membentuk struktur ruang kota dan menentukan efisiensi serta keberlanjutan aktivitas sosial-ekonomi perkotaan.

Pada konteks perkotaan, transportasi tidak hanya berperan sebagai sarana pergerakan, tetapi juga sebagai instrumen pembentuk pola kehidupan kota. Aksesibilitas yang disediakan oleh sistem transportasi menentukan lokasi permukiman, pusat kegiatan ekonomi, layanan publik, dan intensitas penggunaan lahan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik sistem transportasi perkotaan menjadi dasar penting dalam rekayasa dan perencanaan transportasi.

1. Komponen Sistem Transportasi Perkotaan

Sistem transportasi perkotaan merupakan suatu kesatuan yang kompleks, tersusun dari beberapa komponen utama yang saling berinteraksi untuk menjamin mobilitas yang efisien, aman, dan berkelanjutan. Komponen pertama adalah prasarana (*infrastructure*), yang mencakup jaringan jalan, jalur rel, terminal, halte, stasiun, pelabuhan, bandara kota, serta fasilitas pendukung seperti trotoar, jalur sepeda, dan area parkir. Prasarana ini menjadi fondasi fisik yang memungkinkan pergerakan kendaraan dan pengguna jalan, sekaligus menentukan kapasitas dan kualitas pelayanan transportasi.

Komponen kedua adalah sarana (*vehicles*), yaitu moda transportasi yang digunakan untuk memindahkan orang dan barang. Moda ini meliputi kendaraan pribadi seperti mobil dan sepeda motor, angkutan umum seperti bus, BRT, LRT, MRT, kereta komuter, moda tidak bermotor seperti sepeda, hingga pergerakan dengan berjalan kaki. Litman (2022) menekankan bahwa keseimbangan antar moda menjadi indikator penting dari sistem transportasi perkotaan yang berkelanjutan, karena mendukung efisiensi, aksesibilitas, dan pengurangan dampak lingkungan.

Komponen ketiga adalah pengguna (*users*), yang terdiri dari pengemudi, penumpang, pejalan kaki, pesepeda, serta pelaku distribusi barang. Perilaku pengguna memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja sistem transportasi, termasuk dalam pemilihan moda, waktu

perjalanan, respons terhadap kebijakan, dan adaptasi terhadap perubahan kondisi lalu lintas.

Komponen keempat adalah manajemen dan regulasi, yang mencakup kebijakan, peraturan, dan kelembagaan yang mengatur operasional sistem transportasi. Hal ini meliputi pengaturan lalu lintas, tarif angkutan umum, perizinan, standar keselamatan, serta kebijakan pengendalian permintaan perjalanan. Manajemen dan regulasi yang efektif menjamin integrasi sistem, kepatuhan pengguna, dan pencapaian tujuan mobilitas perkotaan.

Komponen kelima adalah teknologi dan informasi, yang berperan semakin penting dalam era transportasi modern. Sistem persinyalan adaptif, aplikasi navigasi, sistem tiket elektronik, dan pengelolaan lalu lintas berbasis *big data* memungkinkan pengambilan keputusan secara real-time, optimisasi arus lalu lintas, dan peningkatan kenyamanan serta keselamatan pengguna.

2. Karakteristik Utama Sistem Transportasi Perkotaan

Sistem transportasi perkotaan memiliki sejumlah karakteristik khas yang membedakannya dari sistem transportasi antar kota atau regional. Karakteristik pertama adalah tingginya intensitas dan kompleksitas pergerakan. Kota merupakan pusat konsentrasi penduduk dan aktivitas ekonomi, sehingga menghasilkan volume perjalanan yang besar dengan pola yang sangat beragam. Menurut Ortúzar dan Willumsen (2019), pergerakan di perkotaan ditandai oleh perjalanan pendek dengan frekuensi tinggi, terutama pada jam sibuk pagi dan sore hari.

Karakteristik kedua adalah keragaman moda dan pengguna. Dalam ruang kota yang terbatas, berbagai moda transportasi harus berbagi ruang yang sama, mulai dari kendaraan pribadi, angkutan umum, sepeda, hingga pejalan kaki. Kondisi ini sering menimbulkan konflik ruang dan memerlukan rekayasa lalu lintas yang cermat agar semua moda dapat beroperasi secara aman dan efisien.

Karakteristik ketiga adalah keterbatasan ruang dan kapasitas. Berbeda dengan wilayah non-perkotaan, ruang di kota sangat terbatas dan mahal. Pelebaran jalan atau pembangunan infrastruktur baru sering kali menghadapi kendala sosial, ekonomi, dan lingkungan. Oleh karena itu, peningkatan kinerja sistem transportasi perkotaan lebih banyak

bergantung pada optimalisasi jaringan yang ada dibandingkan penambahan kapasitas fisik (Papageorgiou *et al.*, 2022).

Karakteristik keempat adalah ketergantungan yang kuat terhadap tata guna lahan. Pola perjalanan perkotaan sangat dipengaruhi oleh distribusi permukiman, pusat kerja, kawasan pendidikan, dan pusat pelayanan. Sistem transportasi perkotaan tidak dapat dirancang secara terpisah dari struktur ruang kota. Rodrigue *et al.* (2023) menyatakan bahwa perubahan kecil pada pola tata guna lahan dapat menghasilkan dampak signifikan terhadap permintaan perjalanan dan kinerja sistem transportasi.

Karakteristik kelima adalah dampak sosial dan lingkungan yang besar. Aktivitas transportasi di perkotaan berkontribusi signifikan terhadap kemacetan, polusi udara, kebisingan, dan emisi gas rumah kaca. Selain itu, sistem transportasi yang tidak inklusif dapat memperlebar kesenjangan sosial karena membatasi akses kelompok tertentu terhadap peluang ekonomi dan layanan publik. Banister (2018) menegaskan bahwa transportasi perkotaan harus dipandang sebagai bagian dari sistem sosial-lingkungan yang lebih luas.

3. Tipologi Sistem Transportasi Perkotaan

Sistem transportasi perkotaan dapat diklasifikasikan ke dalam berbagai tipologi berdasarkan tingkat perkembangan, orientasi mobilitas, dan karakteristik penggunaan lahan di kota tersebut. Salah satu tipologi adalah kota yang berorientasi pada kendaraan pribadi, di mana jaringan jalan cenderung luas, kepemilikan mobil dan sepeda motor tinggi, serta penggunaan lahan tersebar secara luas (*urban sprawl*). Kota-kota ini umumnya menghadapi tantangan kemacetan yang signifikan, tingginya emisi, dan ketergantungan pada transportasi bermotor, yang berdampak pada kualitas hidup dan lingkungan perkotaan.

Terdapat kota yang berorientasi pada angkutan umum dan transportasi non-motorized, seperti berjalan kaki dan bersepeda. Kota-kota ini cenderung memiliki kepadatan penduduk yang lebih tinggi, penggunaan lahan campuran, serta aksesibilitas yang lebih baik ke berbagai fasilitas publik dan pusat kegiatan. Sistem transportasi yang menekankan moda umum dan aktif ini umumnya menghasilkan dampak lingkungan yang lebih rendah, efisiensi energi lebih tinggi, dan mendukung mobilitas yang inklusif bagi seluruh lapisan masyarakat.

4. Implikasi bagi Rekayasa Transportasi

Karakteristik sistem transportasi perkotaan yang kompleks memiliki implikasi langsung bagi praktik rekayasa transportasi, menuntut pendekatan yang komprehensif dan lintas disiplin. Insinyur transportasi tidak lagi hanya berfokus pada aspek teknis jaringan jalan, kapasitas, dan desain kendaraan, tetapi juga harus memahami perilaku pengguna, interaksi antar moda, serta kebijakan publik yang mengatur mobilitas perkotaan. Selain itu, dampak sosial dan lingkungan dari setiap intervensi transportasi menjadi pertimbangan penting dalam perencanaan dan pengelolaan sistem. Litman (2022) menekankan bahwa keberhasilan sistem transportasi perkotaan tidak dapat diukur semata-mata dari kelancaran arus lalu lintas, melainkan juga dari kemampuannya menyediakan aksesibilitas yang adil, aman, nyaman, dan berkelanjutan bagi seluruh lapisan masyarakat.

Implikasi ini mengharuskan rekayasa transportasi menjadi disiplin yang dinamis dan responsif terhadap perubahan demografi, teknologi, dan kebijakan. Misalnya, pertumbuhan penduduk, peningkatan kepemilikan kendaraan, serta perkembangan transportasi cerdas (ITS) dan *big data* menuntut desain dan manajemen sistem transportasi yang adaptif. Rekayasa transportasi modern harus mampu mengintegrasikan analisis teknis, prediksi perilaku pengguna, perencanaan berbasis kebijakan, serta evaluasi dampak lingkungan untuk menghasilkan solusi yang holistik.

C. Hubungan Transportasi, Tata Guna Lahan, dan Lingkungan

Hubungan antara transportasi, tata guna lahan, dan lingkungan merupakan salah satu konsep fundamental dalam rekayasa transportasi dan perencanaan perkotaan modern. Ketiga komponen ini membentuk suatu sistem yang saling memengaruhi secara dinamis, di mana perubahan pada satu komponen akan berdampak langsung maupun tidak langsung terhadap komponen lainnya. Menurut Rodrigue, Comtois, dan Slack (2023), sistem transportasi tidak hanya melayani aktivitas perkotaan, tetapi juga berperan aktif dalam membentuk struktur ruang kota dan kualitas lingkungan hidup.

1. Transportasi dan Tata Guna Lahan: Hubungan Dua Arah

Hubungan antara transportasi dan tata guna lahan merupakan interaksi dua arah yang saling memengaruhi dan membentuk dinamika perkotaan. Dari satu sisi, tata guna lahan menentukan pola, arah, dan intensitas perjalanan di suatu kota. Distribusi permukiman, kawasan kerja, pusat perdagangan, dan fasilitas publik menjadi sumber utama permintaan perjalanan, karena lokasi kegiatan memengaruhi jarak dan frekuensi pergerakan penduduk. Permukiman yang tersebar jauh dari pusat kegiatan ekonomi, terutama jika tidak didukung oleh angkutan umum yang memadai, akan menghasilkan perjalanan yang lebih panjang, peningkatan penggunaan kendaraan pribadi, serta tekanan pada kapasitas jaringan transportasi. Ortúzar dan Willumsen (2019) menekankan bahwa pola penggunaan lahan yang tersebar atau urban sprawl cenderung memperbesar ketergantungan masyarakat pada kendaraan pribadi dan menimbulkan beban tambahan bagi sistem transportasi perkotaan.

Sistem transportasi juga memengaruhi tata guna lahan melalui peningkatan aksesibilitas, yaitu kemudahan bagi individu atau barang untuk mencapai lokasi tertentu. Infrastruktur transportasi yang baik seperti jaringan jalan, angkutan massal, stasiun kereta, dan terminal bus dapat meningkatkan daya tarik suatu kawasan, mendorong kenaikan nilai lahan, serta menarik intensifikasi pembangunan di sekitarnya. Fenomena ini terlihat jelas pada kawasan yang terletak di sekitar simpul transportasi utama atau koridor transit, yang sering berkembang menjadi pusat aktivitas baru, baik untuk komersial, perkantoran, maupun permukiman.

2. Aksesibilitas sebagai Penghubung Utama

Konsep aksesibilitas menjadi penghubung utama antara transportasi dan tata guna lahan, karena menentukan sejauh mana sistem transportasi memungkinkan individu mencapai tujuan aktivitasnya dengan efisien. Aksesibilitas tidak semata-mata diukur dari kecepatan kendaraan atau kapasitas jaringan jalan, tetapi juga dipengaruhi oleh kedekatan lokasi aktivitas dan keragaman fungsi lahan. Dengan kata lain, meskipun arus lalu lintas lancar dan kendaraan bergerak cepat, jika jarak antara permukiman, pusat pekerjaan, pusat pendidikan, dan fasilitas publik tetap jauh, manfaat bagi masyarakat dalam bentuk kemudahan mencapai tujuan tetap terbatas. Litman (2022) menekankan bahwa peningkatan mobilitas teknis—misalnya melalui pelebaran jalan atau

percepatan arus lalu lintas—tidak selalu sejalan dengan peningkatan aksesibilitas jika pola penggunaan lahan tidak efisien.

Pendekatan modern dalam perencanaan transportasi perkotaan kini lebih menekankan pada strategi peningkatan aksesibilitas melalui integrasi antara transportasi dan tata guna lahan. Salah satu strategi utama adalah pengembangan penggunaan lahan campuran (*mixed-use development*), di mana permukiman, perkantoran, pusat perdagangan, dan fasilitas publik ditempatkan dalam jarak yang saling terhubung. Selain itu, perencanaan kepadatan terkelola memungkinkan distribusi aktivitas yang lebih merata dan mengurangi kebutuhan perjalanan jarak jauh, sementara integrasi dengan angkutan umum massal memfasilitasi mobilitas yang lebih berkelanjutan.

3. Dampak Transportasi terhadap Lingkungan

Sektor transportasi memiliki dampak yang signifikan terhadap lingkungan perkotaan, menjadikannya salah satu kontributor utama permasalahan lingkungan di kota-kota modern. Aktivitas transportasi, terutama berbasis kendaraan bermotor, menghasilkan berbagai konsekuensi negatif, termasuk emisi gas rumah kaca, polusi udara lokal, kebisingan, konsumsi energi fosil, serta fragmentasi ruang dan degradasi lahan. Menurut International Energy Agency (IEA, 2023), sektor transportasi menyumbang sekitar seperempat emisi CO₂ global yang berasal dari penggunaan energi, dengan porsi terbesar berasal dari transportasi jalan, menegaskan bahwa pola mobilitas perkotaan memiliki implikasi global dan lokal.

Di tingkat lokal, emisi kendaraan bermotor menghasilkan polutan berbahaya seperti nitrogen oksida (NO_x), partikulat halus (PM_{2.5}), dan karbon monoksida (CO), yang berdampak langsung terhadap kesehatan masyarakat. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO, 2023) melaporkan bahwa polusi udara yang bersumber dari transportasi merupakan salah satu faktor risiko utama penyakit pernapasan, kardiovaskular, dan menurunnya kualitas hidup di kota-kota besar. Dampak ini tidak hanya bersifat jangka pendek, tetapi juga dapat memperburuk kerentanan sosial dan ketidakadilan kesehatan, karena kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan masyarakat berpenghasilan rendah lebih terpapar risiko polusi.

Transportasi juga berdampak pada penggunaan lahan dan ekosistem. Pembangunan jaringan jalan, fasilitas parkir, dan

infrastruktur pendukung sering kali mengorbankan ruang terbuka hijau, lahan produktif, dan habitat alami, sehingga mengubah pola ekologis kota. Banister (2018) menekankan bahwa orientasi transportasi yang berfokus pada kendaraan pribadi tidak hanya meningkatkan emisi, tetapi juga mendorong urban sprawl, menciptakan pola kota yang tersebar, tidak efisien, dan sulit diakses oleh angkutan umum. Dampak ekologis ini memperburuk fragmentasi ruang, menurunkan kualitas lingkungan perkotaan, dan meningkatkan ketergantungan energi fosil.

4. Peran Tata Guna Lahan dalam Mengurangi Dampak Lingkungan

Tata guna lahan yang direncanakan secara strategis memiliki peran penting dalam mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh transportasi perkotaan. Dengan mengatur lokasi permukiman, pusat kegiatan, fasilitas publik, dan jaringan transportasi secara terintegrasi, kota dapat meminimalkan jarak perjalanan dan ketergantungan pada kendaraan pribadi. Salah satu pendekatan yang paling efektif adalah pengembangan kawasan berorientasi transit (*Transit Oriented Development/TOD*), yang mengintegrasikan permukiman, tempat kerja, dan layanan publik dalam jarak yang dapat ditempuh dengan berjalan kaki dari simpul transportasi massal. Cervero (2019) menunjukkan bahwa kawasan TOD mampu menurunkan penggunaan kendaraan pribadi secara signifikan, sehingga mengurangi emisi transportasi, kepadatan lalu lintas, dan konsumsi energi dibandingkan dengan kawasan konvensional yang tersebar.

Konsep kota kompak (*compact city*) dan kota 15 menit (*15-minute city*) semakin banyak diterapkan sebagai strategi untuk menciptakan perkotaan yang lebih berkelanjutan. Konsep kota kompak menekankan pemadatan penggunaan lahan, sehingga fungsi perumahan, pekerjaan, dan fasilitas publik lebih terkonsentrasi dan mudah diakses. Sementara itu, kota 15 menit menekankan kedekatan antara tempat tinggal dan aktivitas harian, sehingga perjalanan dapat dilakukan dengan moda transportasi yang ramah lingkungan, seperti berjalan kaki, bersepeda, atau angkutan umum jarak pendek. Moreno *et al.* (2021) menekankan bahwa implementasi prinsip kota 15 menit tidak hanya berpotensi menurunkan jejak karbon perkotaan, tetapi juga meningkatkan kualitas hidup, kenyamanan, dan keselamatan warga.

5. Integrasi Transportasi, Tata Guna Lahan, dan Lingkungan

Kesadaran akan keterkaitan yang erat antara transportasi, tata guna lahan, dan lingkungan telah mendorong munculnya pendekatan perencanaan terintegrasi dalam pembangunan perkotaan. Pendekatan ini menekankan perlunya koordinasi lintas sektor antara perencana transportasi, perencana tata ruang, pembuat kebijakan, dan pemangku kepentingan lainnya, sehingga keputusan yang diambil dapat mempertimbangkan aspek mobilitas, penggunaan lahan, dan dampak ekologis secara simultan. UN-Habitat (2022) menekankan bahwa keberhasilan pembangunan perkotaan berkelanjutan sangat bergantung pada kemampuan kota untuk mengintegrasikan kebijakan transportasi dan tata guna lahan dengan agenda perlindungan lingkungan, sehingga pertumbuhan kota tidak hanya efisien, tetapi juga ramah lingkungan dan inklusif secara sosial.

Pada konteks rekayasa transportasi, integrasi ini tercermin melalui penggunaan model terpadu transportasi–tata guna lahan–lingkungan, yang memungkinkan evaluasi dampak kebijakan dan intervensi transportasi terhadap perubahan penggunaan lahan, pola perjalanan, dan emisi lingkungan. Model-model ini membantu perencana dan pengambil keputusan memprediksi konsekuensi jangka panjang dari berbagai strategi, baik dalam hal efisiensi operasional, pengurangan kemacetan, maupun pengendalian dampak ekologis. Dengan demikian, perencanaan transportasi tidak lagi bersifat parsial atau sektoral, tetapi menjadi proses multidimensi yang menyeimbangkan tujuan teknis, sosial, dan lingkungan.

Pendekatan terintegrasi ini juga mendorong penerapan prinsip mobilitas berkelanjutan, di mana pengembangan angkutan umum massal, jalur pejalan kaki dan sepeda, serta pengendalian penggunaan kendaraan pribadi dihubungkan langsung dengan pola tata guna lahan yang padat dan berorientasi transit. Integrasi ini tidak hanya meningkatkan aksesibilitas dan kualitas mobilitas, tetapi juga mengurangi jejak karbon, memperlambat degradasi lahan, dan meminimalkan polusi udara dan kebisingan.

6. Implikasi bagi Rekayasa Transportasi Perkotaan

Hubungan yang erat antara transportasi, tata guna lahan, dan lingkungan menuntut pergeseran paradigma dalam praktik rekayasa transportasi perkotaan. Di masa lalu, fokus utama insinyur transportasi

biasanya terbatas pada peningkatan kapasitas jalan, percepatan arus lalu lintas, dan pengurangan kemacetan. Namun, tantangan perkotaan modern menekankan bahwa keberhasilan sistem transportasi tidak hanya ditentukan oleh kelancaran kendaraan, melainkan juga oleh kemampuan untuk mengelola permintaan perjalanan, meningkatkan aksesibilitas, dan meminimalkan dampak lingkungan. Litman (2022) menegaskan bahwa indikator keberhasilan transportasi perkotaan seharusnya mencakup aspek yang lebih luas, seperti efisiensi energi, kualitas udara, keselamatan pengguna, kenyamanan perjalanan, serta keadilan sosial, terutama bagi kelompok rentan seperti lansia, penyandang disabilitas, dan masyarakat berpenghasilan rendah.

Implikasi bagi rekayasa transportasi perkotaan adalah perlunya pendekatan yang multidimensional dan terintegrasi. Insinyur transportasi kini dituntut memiliki pemahaman tidak hanya terhadap aspek teknis jaringan jalan, kendaraan, dan arus lalu lintas, tetapi juga terhadap perilaku pengguna, kebijakan publik, tata guna lahan, dan dinamika lingkungan. Dengan memahami keterkaitan antara transportasi, tata guna lahan, dan lingkungan, rekayasa transportasi dapat menjadi alat strategis dalam mendukung pembangunan kota berkelanjutan, termasuk perencanaan kawasan berorientasi transit, pengembangan angkutan umum massal, dan promosi transportasi aktif seperti berjalan kaki dan bersepeda.

D. Tantangan Transportasi Perkotaan Modern

Transportasi perkotaan modern menghadapi tantangan yang semakin kompleks seiring dengan pesatnya urbanisasi, pertumbuhan penduduk, perkembangan ekonomi, serta perubahan teknologi dan gaya hidup masyarakat. Kota-kota di seluruh dunia, khususnya di negara berkembang, mengalami tekanan besar dalam menyediakan sistem transportasi yang mampu memenuhi kebutuhan mobilitas secara efisien, aman, inklusif, dan berkelanjutan. Menurut UN-Habitat (2022), lebih dari 55% penduduk dunia saat ini tinggal di kawasan perkotaan, dan angka ini diproyeksikan terus meningkat, sehingga menempatkan sistem transportasi sebagai salah satu isu strategis utama dalam pembangunan kota.

1. Kemacetan dan Ketidakefisienan Sistem Transportasi

Salah satu tantangan paling signifikan dalam transportasi perkotaan adalah kemacetan lalu lintas yang kronis, yang muncul akibat pertumbuhan kendaraan pribadi yang jauh lebih cepat dibandingkan kapasitas jaringan jalan yang tersedia. Ketidakseimbangan ini menyebabkan permintaan perjalanan melebihi kemampuan sistem transportasi untuk menyalurkan arus lalu lintas secara efisien. Menurut TomTom Traffic Index (2023), kemacetan di kota-kota besar dunia dapat meningkatkan waktu tempuh perjalanan harian hingga puluhan persen, yang berdampak langsung pada produktivitas ekonomi, efisiensi logistik, dan kualitas hidup masyarakat. Kemacetan juga menimbulkan konsekuensi lingkungan, seperti peningkatan emisi gas rumah kaca dan polusi udara, serta menurunkan kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan.

Fenomena kemacetan tidak semata-mata mencerminkan keterbatasan kapasitas fisik jalan, tetapi juga menunjukkan keterbatasan dalam manajemen lalu lintas dan kebijakan transportasi. Pendekatan tradisional yang berfokus pada pelebaran jalan atau penambahan infrastruktur sering kali bersifat sementara, karena memicu *induced demand*, yaitu peningkatan penggunaan kendaraan pribadi sebagai respons terhadap bertambahnya kapasitas jalan (Litman, 2022). Dengan kata lain, penambahan jalan tidak menyelesaikan masalah kemacetan jangka panjang, justru mendorong lebih banyak kendaraan untuk menggunakan jaringan yang sama, sehingga siklus kemacetan kembali terulang.

2. Ketergantungan pada Kendaraan Pribadi

Ketergantungan yang tinggi terhadap kendaraan pribadi merupakan tantangan struktural yang signifikan bagi mobilitas perkotaan di banyak kota, terutama di negara berkembang. Faktor-faktor seperti *urban sprawl*, di mana permukiman dan pusat kegiatan tersebar secara luas, rendahnya kualitas dan jangkauan angkutan umum, serta kebijakan transportasi yang cenderung mendukung kendaraan pribadi, mendorong masyarakat memilih mobil atau sepeda motor sebagai moda utama. Banister (2018) menegaskan bahwa dominasi kendaraan pribadi tidak hanya memperparah kemacetan, tetapi juga meningkatkan konsumsi energi, emisi karbon, dan kebutuhan ruang untuk jalan serta fasilitas

parkir, sehingga berdampak langsung pada kualitas lingkungan dan efisiensi perkotaan.

Di kota-kota berkembang, sepeda motor sering dianggap sebagai solusi mobilitas yang cepat, fleksibel, dan relatif terjangkau. Namun, penggunaan sepeda motor secara masif juga membawa konsekuensi negatif, seperti peningkatan risiko kecelakaan lalu lintas, tingginya tingkat polusi udara, serta konflik antar moda transportasi, terutama dengan pejalan kaki dan angkutan umum. Ketergantungan ini menciptakan tekanan tambahan pada jaringan jalan yang sudah padat, sekaligus menurunkan kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan.

Bagi rekayasa transportasi, tantangan utama adalah mengalihkan perilaku mobilitas masyarakat dari kendaraan pribadi ke moda yang lebih berkelanjutan, seperti angkutan umum massal, transportasi aktif (berjalan kaki dan bersepeda), atau kendaraan berbagi (*shared mobility*), tanpa mengurangi aksesibilitas dan fleksibilitas yang dibutuhkan masyarakat. Strategi ini mencakup pengembangan jaringan angkutan umum yang andal dan terjangkau, integrasi moda transportasi, penerapan kebijakan pengendalian penggunaan kendaraan pribadi, serta desain kota yang mendukung kepadatan terkelola dan *mixed-use development*.

3. Keselamatan Lalu Lintas Jalan

Keselamatan lalu lintas jalan merupakan tantangan utama dalam transportasi perkotaan modern, yang berdampak langsung pada kesehatan dan kesejahteraan masyarakat. Menurut WHO (2023), kecelakaan lalu lintas jalan tetap menjadi salah satu penyebab utama kematian di seluruh dunia, dengan korban terbanyak berasal dari kelompok usia produktif serta pengguna jalan yang rentan, seperti pejalan kaki, pesepeda, dan pengendara sepeda motor. Tingginya angka kecelakaan ini tidak hanya menimbulkan korban jiwa, tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi melalui hilangnya produktivitas, biaya medis, dan kerusakan infrastruktur.

Faktor penyebab kecelakaan di perkotaan bersifat multifaktor, meliputi faktor manusia, kendaraan, dan infrastruktur. Kesalahan manusia, seperti pelanggaran rambu lalu lintas, mengemudi dalam kondisi lelah, atau perilaku agresif, sering dikombinasikan dengan desain jalan yang kurang aman bagi pengguna rentan. Jalan yang tidak memiliki jalur pejalan kaki atau sepeda yang memadai, kecepatan kendaraan yang tinggi, persimpangan yang kompleks, serta penegakan

hukum yang lemah turut memperburuk risiko kecelakaan. Banister (2018) menekankan bahwa keselamatan tidak bisa ditangani hanya melalui pendidikan atau penegakan hukum saja, melainkan memerlukan pendekatan sistemik yang menyatukan desain, teknologi, dan manajemen lalu lintas.

4. Dampak Lingkungan dan Perubahan Iklim

Transportasi perkotaan memiliki dampak lingkungan yang signifikan dan menjadi salah satu kontributor utama terhadap perubahan iklim global. Menurut *International Energy Agency* (IEA, 2023), sektor transportasi menyumbang sekitar seperempat emisi CO₂ global yang berasal dari penggunaan energi, dengan sebagian besar kontribusi datang dari transportasi jalan di kawasan perkotaan. Aktivitas kendaraan bermotor, termasuk mobil, sepeda motor, dan angkutan barang, menghasilkan emisi gas rumah kaca serta polusi udara lokal, seperti nitrogen oksida (NO_x) dan partikulat halus (PM_{2.5}), yang berdampak langsung terhadap kesehatan masyarakat. Kota-kota dengan kepadatan tinggi menghadapi risiko lebih besar, karena polusi udara konsentrasinya tinggi dan menimbulkan penyakit pernapasan, kardiovaskular, serta menurunkan kualitas hidup warga.

Transportasi juga memperburuk perubahan iklim yang pada gilirannya menimbulkan tantangan baru bagi sistem transportasi perkotaan. Peningkatan frekuensi banjir, gelombang panas, badai, dan cuaca ekstrem dapat merusak infrastruktur jalan, jembatan, stasiun, dan jaringan transportasi massal, sehingga mengganggu mobilitas masyarakat dan operasi ekonomi kota. Fenomena ini menuntut pendekatan rekayasa transportasi yang lebih adaptif dan proaktif, dengan mempertimbangkan ketahanan (resilience) infrastruktur terhadap kondisi iklim yang semakin ekstrem (IPCC, 2022).

5. Keadilan Sosial dan Aksesibilitas

Salah satu tantangan utama dalam transportasi perkotaan modern adalah ketimpangan akses dan keadilan sosial. Sistem transportasi yang tidak merata dapat membatasi kemampuan sebagian kelompok masyarakat untuk mengakses pekerjaan, pendidikan, layanan kesehatan, dan fasilitas publik lainnya. Litman (2022) menekankan bahwa transportasi perkotaan yang terlalu berorientasi pada kendaraan pribadi cenderung menguntungkan kelompok berpendapatan tinggi yang

mampu memiliki dan mengoperasikan mobil, sementara kelompok berpendapatan rendah, lansia, penyandang disabilitas, dan warga di kawasan terpencil sering menghadapi keterbatasan mobilitas yang signifikan. Ketimpangan ini tidak hanya menurunkan kualitas hidup, tetapi juga memperkuat kesenjangan sosial dan ekonomi di kota-kota besar.

Untuk mewujudkan sistem transportasi yang inklusif dan adil, perencanaan dan rekayasa transportasi harus memperhatikan kebutuhan seluruh pengguna. Hal ini mencakup pengembangan angkutan umum yang terjangkau, andal, dan mudah diakses, sehingga semua warga dapat melakukan perjalanan tanpa tergantung pada kendaraan pribadi. Selain itu, penyediaan fasilitas pejalan kaki yang aman, jalur sepeda yang memadai, dan desain universal (*universal design*) untuk stasiun, halte, dan kendaraan publik menjadi aspek penting. Desain universal memastikan aksesibilitas bagi penyandang disabilitas, lansia, dan pengguna lain yang memiliki keterbatasan fisik atau mobilitas.

Pendekatan ini juga menekankan pentingnya integrasi antara transportasi dan tata guna lahan, seperti pengembangan kawasan mixed-use, *Transit Oriented Development* (TOD), dan kota 15 menit, sehingga fasilitas pendidikan, pekerjaan, dan layanan publik dapat dicapai dengan berjalan kaki, bersepeda, atau angkutan umum. Dengan mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi dan meningkatkan aksesibilitas, kota tidak hanya menjadi lebih ramah lingkungan, tetapi juga lebih adil dan inklusif bagi semua kelompok masyarakat.

6. Teknologi, Digitalisasi, dan Tata Kelola

Perkembangan teknologi dan digitalisasi menghadirkan peluang sekaligus tantangan yang signifikan dalam transportasi perkotaan modern. Implementasi *Intelligent Transportation Systems* (ITS), pemanfaatan *big data*, dan kecerdasan buatan memungkinkan pengelolaan lalu lintas yang lebih adaptif, prediktif, dan berbasis bukti. Sistem ini dapat memantau arus kendaraan secara real-time, mengoptimalkan sinyal lalu lintas, meningkatkan efisiensi jaringan transportasi, serta mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat. Vlahogianni & Karlaftis (2023) menekankan bahwa teknologi ini memungkinkan insinyur dan perencana transportasi untuk merespons perubahan kondisi lalu lintas, mengurangi kemacetan, dan meningkatkan keselamatan serta kualitas pelayanan angkutan umum.

Penerapan teknologi transportasi menghadapi berbagai tantangan. Biaya investasi yang tinggi, kesiapan kelembagaan, serta kapasitas sumber daya manusia yang terbatas sering menjadi hambatan utama. Selain itu, isu keamanan dan privasi data menjadi perhatian penting, karena pengumpulan dan analisis data perjalanan bersifat masif dan sensitif. Ketidakmerataan kemampuan teknis antara kota besar dan kota menengah juga dapat menimbulkan kesenjangan dalam pemanfaatan teknologi, sehingga tidak semua warga dapat merasakan manfaatnya secara setara.

Munculnya layanan mobilitas baru seperti *ride-hailing*, *micro-mobility* (sepeda listrik, skuter), dan kendaraan otonom menambah kompleksitas tata kelola transportasi perkotaan. Inovasi ini menuntut regulasi yang adaptif, integrasi dengan sistem transportasi yang sudah ada, serta perlindungan keselamatan pengguna. Pemerintah, regulator, dan insinyur transportasi harus mampu menyeimbangkan inovasi dengan keselamatan, keadilan sosial, dan keberlanjutan, agar teknologi tidak justru memperburuk kemacetan, ketimpangan akses, atau dampak lingkungan.

7. Implikasi bagi Rekayasa Transportasi

Berbagai tantangan dalam transportasi perkotaan modern mulai dari kemacetan, ketergantungan pada kendaraan pribadi, keselamatan jalan, dampak lingkungan, ketimpangan akses, hingga kompleksitas teknologi dan tata Kelola menunjukkan bahwa pendekatan rekayasa transportasi harus holistik, adaptif, dan multidimensional. Rekayasa transportasi tidak lagi sekadar berfokus pada peningkatan kapasitas jaringan jalan atau kecepatan arus lalu lintas, tetapi harus mampu mengelola sistem secara menyeluruh, mengintegrasikan aspek teknis, sosial, ekonomi, lingkungan, dan kebijakan publik secara seimbang. Pendekatan ini mencakup perencanaan jaringan transportasi yang efisien, desain moda angkutan umum yang andal, pengelolaan perilaku pengguna, integrasi tata guna lahan, serta pemanfaatan teknologi cerdas dan *big data* untuk pengambilan keputusan berbasis bukti.

Banister (2018) menekankan bahwa masa depan transportasi perkotaan sangat bergantung pada kemampuan kota untuk mengurangi kebutuhan perjalanan bermotor, meningkatkan kualitas angkutan umum massal, dan menciptakan lingkungan perkotaan yang lebih manusiawi. Hal ini menuntut insinyur transportasi untuk berpikir lebih luas, tidak

hanya sebagai penyedia solusi teknis, tetapi juga sebagai agen perubahan sosial dan lingkungan, yang dapat mendorong mobilitas berkelanjutan, keselamatan, dan inklusivitas. Misalnya, pengembangan kawasan berorientasi transit (TOD), kota 15 menit, serta desain universal untuk aksesibilitas merupakan strategi yang menggabungkan prinsip efisiensi, keberlanjutan, dan keadilan sosial.



BAB II

SISTEM TRANSPORTASI DAN INFRASTRUKTUR

Sistem transportasi dan infrastruktur merupakan fondasi utama dalam mendukung mobilitas, aksesibilitas, dan aktivitas ekonomi di wilayah perkotaan. Sistem ini terdiri dari berbagai komponen yang saling terintegrasi, meliputi prasarana fisik, sarana transportasi, pengguna, serta mekanisme pengelolaan dan kebijakan yang mengaturnya. Infrastruktur transportasi yang dirancang dan dikelola dengan baik akan meningkatkan efisiensi pergerakan, keselamatan pengguna jalan, serta kualitas lingkungan perkotaan. Dalam konteks rekayasa transportasi modern, sistem transportasi dan infrastruktur tidak hanya ditujukan untuk memenuhi kebutuhan pergerakan saat ini, tetapi juga diarahkan untuk mendukung pembangunan kota yang berkelanjutan, inklusif, dan adaptif terhadap perkembangan teknologi serta dinamika sosial-ekonomi masyarakat.

A. Komponen Sistem Transportasi

Sistem transportasi merupakan suatu kesatuan yang kompleks dan saling terkait, terdiri dari berbagai komponen yang bekerja secara terpadu untuk memungkinkan terjadinya pergerakan orang dan barang dari satu lokasi ke lokasi lain secara aman, efisien, dan berkelanjutan. Dalam perspektif rekayasa transportasi, sistem transportasi tidak hanya dipahami sebagai infrastruktur fisik semata, tetapi sebagai suatu sistem sosio-teknis yang melibatkan interaksi antara manusia, kendaraan, prasarana, operasi, regulasi, dan lingkungan. Menurut Rodrigue, Comtois, dan Slack (2023), sistem transportasi harus dianalisis sebagai jaringan terintegrasi yang dipengaruhi oleh faktor teknis, ekonomi, sosial, dan kelembagaan.

1. Pengertian Sistem Transportasi

Sistem transportasi dapat dipahami sebagai sekumpulan elemen yang saling berinteraksi dan bekerja secara terkoordinasi untuk menyediakan layanan mobilitas bagi masyarakat. Vuchic (2022) menjelaskan bahwa sistem transportasi terdiri dari tiga komponen utama yang saling terkait: komponen fisik, yang mencakup infrastruktur (jalan, rel, terminal, stasiun, dan fasilitas pendukung) serta kendaraan; komponen operasional, meliputi manajemen lalu lintas, pengendalian arus, jadwal angkutan umum, dan prosedur operasional; serta komponen institusional, yang mencakup kebijakan, regulasi, dan tata kelola yang mengatur keseluruhan sistem. Ketiga komponen ini tidak dapat dipisahkan, karena kinerja sistem transportasi sangat bergantung pada keseimbangan dan koordinasi antar elemen tersebut.

Pada konteks perkotaan, sistem transportasi memiliki tingkat kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan wilayah non-perkotaan. Kepadatan penduduk yang tinggi, keragaman aktivitas ekonomi, mobilitas masyarakat yang intens, serta keterbatasan ruang fisik menuntut sistem transportasi perkotaan dirancang secara efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Sistem transportasi perkotaan tidak hanya berfungsi sebagai sarana perpindahan orang dan barang, tetapi juga menjadi penggerak ekonomi, sosial, dan lingkungan kota, yang memengaruhi pola penggunaan lahan, nilai properti, dan kualitas hidup masyarakat.

2. Komponen Infrastruktur Transportasi

Infrastruktur transportasi merupakan komponen fisik utama dalam sistem transportasi yang berfungsi sebagai media pergerakan orang dan barang. Infrastruktur ini mencakup jaringan jalan, rel kereta api, terminal, pelabuhan, bandara, serta fasilitas pendukung lainnya, yang menjadi fondasi bagi mobilitas perkotaan maupun antarwilayah. Menurut World Bank (2021), kualitas dan ketersediaan infrastruktur transportasi secara langsung memengaruhi tingkat aksesibilitas, efisiensi mobilitas, dan daya saing suatu wilayah. Infrastruktur yang memadai memungkinkan pergerakan lebih cepat, aman, dan nyaman, sementara keterbatasan atau kondisi buruk dapat menghambat aktivitas ekonomi dan menurunkan kualitas hidup masyarakat.

Pada konteks sistem transportasi jalan perkotaan, infrastruktur mencakup berbagai jenis jalan, seperti jalan arteri, kolektor, lokal, dan lingkungan, yang masing-masing memiliki fungsi, kapasitas, dan standar

teknis berbeda. Selain badan jalan, komponen infrastruktur juga mencakup persimpangan, jembatan, terowongan, trotoar, jalur sepeda, serta fasilitas keselamatan seperti rambu lalu lintas, marka jalan, dan lampu lalu lintas. Papacostas dan Prevedouros (2021) menekankan bahwa desain infrastruktur harus mempertimbangkan kapasitas, keselamatan, kenyamanan, dan keberlanjutan, sehingga mampu mendukung berbagai moda transportasi dan kebutuhan pengguna yang beragam.

3. Komponen Kendaraan

Kendaraan merupakan sarana utama yang bergerak di atas infrastruktur transportasi dan menjadi komponen vital dalam sistem transportasi perkotaan. Kendaraan berfungsi untuk memindahkan orang dan barang, sehingga karakteristiknya secara langsung memengaruhi kinerja sistem transportasi, termasuk kapasitas jalan, tingkat pelayanan, keselamatan, dan dampak lingkungan. Dalam konteks perkotaan, kendaraan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis: kendaraan pribadi seperti mobil dan sepeda motor; angkutan umum seperti bus, BRT, MRT, dan LRT; kendaraan tidak bermotor seperti sepeda; serta kendaraan logistik untuk distribusi barang. Setiap jenis kendaraan memiliki karakteristik operasional yang berbeda, termasuk ukuran, kecepatan, kapasitas angkut, serta tingkat emisi dan konsumsi energi.

Litman (2023) membahas bahwa dominasi kendaraan pribadi di kota-kota besar sering menimbulkan inefisiensi sistem transportasi, seperti kemacetan, polusi udara, konsumsi energi tinggi, dan kebutuhan ruang yang besar untuk jalan serta parkir. Untuk itu, rekayasa transportasi modern mendorong pergeseran ke angkutan umum massal dan moda transportasi berkelanjutan, termasuk transportasi aktif (berjalan kaki dan bersepeda) serta sistem berbagi kendaraan (*shared mobility*). Selain itu, perkembangan teknologi mengubah karakteristik kendaraan, dengan munculnya kendaraan listrik, kendaraan otonom, dan solusi mobilitas cerdas yang meningkatkan efisiensi energi, keselamatan, dan kenyamanan perjalanan.

4. Komponen Pengguna Transportasi (Manusia)

Pengguna transportasi, yaitu manusia yang memanfaatkan sistem transportasi, merupakan komponen paling krusial dalam sistem transportasi perkotaan. Keputusan, perilaku, dan preferensinya secara

langsung memengaruhi kinerja jaringan transportasi, tingkat keselamatan, efisiensi perjalanan, dan dampak lingkungan. Pengguna transportasi meliputi pengemudi kendaraan pribadi, penumpang angkutan umum, pejalan kaki, dan pesepeda, yang masing-masing memiliki kebutuhan, tingkat kerentanan, dan pola perjalanan yang berbeda. Perbedaan karakteristik ini menuntut sistem transportasi yang fleksibel, aman, dan inklusif agar dapat melayani seluruh masyarakat secara adil.

Menurut Pucher dan Buehler (2021), perencanaan transportasi perkotaan modern harus berorientasi pada manusia (*people-centered transport*), dengan fokus pada keselamatan, aksesibilitas, kenyamanan, dan inklusivitas. Faktor sosial-ekonomi seperti pendapatan, usia, pendidikan, dan tujuan perjalanan sangat memengaruhi pilihan moda transportasi, frekuensi perjalanan, serta rute yang diambil. Misalnya, masyarakat berpendapatan rendah lebih bergantung pada angkutan umum, sedangkan kelompok berpendapatan tinggi lebih sering menggunakan kendaraan pribadi. Hal ini menunjukkan bahwa rekayasa transportasi tidak dapat dipisahkan dari pendekatan perilaku dan sosial, termasuk analisis preferensi pengguna, peramalan permintaan perjalanan, dan strategi intervensi kebijakan untuk mendorong penggunaan moda berkelanjutan.

5. Komponen Operasi dan Manajemen Transportasi

Komponen operasi dan manajemen transportasi mencakup seluruh kegiatan yang bertujuan untuk mengatur, mengendalikan, dan mengawasi sistem transportasi agar berfungsi secara optimal. Komponen ini meliputi manajemen lalu lintas, pengaturan sinyal, pengendalian parkir, pengelolaan angkutan umum, serta sistem informasi perjalanan yang mendukung pengambilan keputusan secara cepat dan tepat. Gartner dan Chen (2022) menekankan bahwa efektivitas sistem transportasi modern sangat bergantung pada kualitas manajemen operasional, karena infrastruktur dan kendaraan saja tidak cukup untuk memastikan mobilitas yang efisien, aman, dan berkelanjutan.

Pada konteks perkotaan, manajemen lalu lintas menjadi kunci untuk mengatasi kemacetan dan meningkatkan keselamatan. Strategi seperti pengaturan waktu sinyal adaptif, rekayasa simpang, pengaturan lalu lintas satu arah, dan pengendalian arus kendaraan berat merupakan contoh penerapan komponen operasional. Selain itu, kemajuan teknologi

seperti *Intelligent Transportation Systems* (ITS) memungkinkan pengelolaan arus lalu lintas secara real-time berbasis data, termasuk pemantauan kepadatan, prediksi kemacetan, dan respons otomatis terhadap kondisi dinamis di lapangan. Pendekatan berbasis teknologi ini membantu meningkatkan efisiensi sistem, mengurangi waktu tempuh, dan mengoptimalkan kapasitas jalan yang ada.

Manajemen angkutan umum juga menjadi bagian integral dari komponen operasi. Hal ini mencakup perencanaan rute, penjadwalan frekuensi, alokasi kendaraan, serta pemantauan kinerja layanan. Efektivitas manajemen angkutan umum menentukan sejauh mana sistem dapat melayani kebutuhan mobilitas masyarakat secara adil dan berkelanjutan. Tanpa manajemen yang baik, ketersediaan infrastruktur dan kendaraan yang memadai tetap tidak akan menghasilkan layanan transportasi yang optimal.

6. Komponen Kebijakan dan Kelembagaan

Komponen kebijakan dan kelembagaan merupakan elemen penting dalam sistem transportasi karena menentukan aturan, regulasi, dan kerangka institusional yang mengatur pengelolaan dan pengembangan sistem transportasi. Kebijakan transportasi menetapkan arah strategis, prioritas moda, standar pelayanan, pembiayaan, serta prinsip pengelolaan yang selaras dengan tujuan pembangunan berkelanjutan. Banister (2021) menekankan bahwa kebijakan yang efektif harus mengintegrasikan aspek transportasi dengan tata guna lahan, lingkungan, ekonomi, dan sosial, sehingga sistem transportasi tidak hanya efisien secara teknis tetapi juga mendukung kualitas hidup masyarakat.

Di tingkat perkotaan, pembuatan kebijakan dan koordinasi kelembagaan melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah pusat, pemerintah daerah, operator transportasi, lembaga perencanaan, dan masyarakat. Kompleksitas ini menjadi tantangan tersendiri, terutama di wilayah metropolitan dengan banyak yurisdiksi, karena tanpa koordinasi yang baik, pengembangan sistem transportasi cenderung parsial, tumpang tindih, dan tidak efisien. Integrasi kelembagaan menjadi kunci untuk memastikan bahwa rencana infrastruktur, manajemen lalu lintas, dan layanan angkutan umum berjalan harmonis dan mendukung tujuan strategis kota.

7. Integrasi Antar Komponen Sistem Transportasi

Integrasi antar komponen sistem transportasi merupakan faktor kunci dalam menentukan kinerja keseluruhan sistem transportasi perkotaan. Sebuah sistem transportasi tidak hanya bergantung pada kualitas infrastruktur atau jumlah kendaraan, tetapi pada keseimbangan dan koordinasi antara semua komponen: infrastruktur, kendaraan, pengguna, manajemen operasional, serta kebijakan dan kelembagaan. Vuchic (2022) menekankan bahwa kegagalan atau ketidaksesuaian satu komponen saja misalnya manajemen lalu lintas yang lemah atau kebijakan yang tidak konsisten dapat menurunkan efektivitas seluruh sistem, bahkan jika komponen lainnya sudah optimal.

Pendekatan rekayasa transportasi modern menekankan integrasi multimoda, di mana berbagai moda transportasi seperti angkutan umum massal, kendaraan pribadi, sepeda, dan pejalan kaki terhubung secara fisik, operasional, dan tarif. Integrasi fisik mencakup desain simpul transportasi dan stasiun yang memudahkan perpindahan antar moda; integrasi operasional meliputi penjadwalan, manajemen arus, dan koordinasi rute; sedangkan integrasi tarif memungkinkan pengguna berpindah moda dengan biaya yang efisien. Tujuan utama integrasi ini adalah meningkatkan efisiensi perjalanan, mengurangi waktu tempuh, dan meminimalkan ketergantungan pada kendaraan pribadi, sehingga mendukung mobilitas yang lebih berkelanjutan.

Contoh nyata penerapan integrasi antar komponen dapat ditemukan di kota-kota besar dunia, seperti Tokyo, Singapura, dan Seoul, di mana sistem transportasi terpadu memungkinkan pengguna berpindah moda dengan mudah, aman, dan cepat. Integrasi ini juga didukung oleh teknologi digital, seperti aplikasi tiket elektronik, sistem informasi perjalanan real-time, dan manajemen arus berbasis data, yang mempermudah perencanaan perjalanan dan meningkatkan kenyamanan pengguna.

B. Klasifikasi Moda Transportasi Perkotaan

Moda transportasi perkotaan merupakan sarana utama yang digunakan untuk memindahkan orang dan barang dalam wilayah kota. Klasifikasi moda transportasi menjadi aspek penting dalam rekayasa transportasi karena setiap moda memiliki karakteristik teknis, operasional, ekonomi, dan lingkungan yang berbeda. Pemahaman yang

baik mengenai klasifikasi moda transportasi membantu perencana dan insinyur transportasi dalam merancang sistem transportasi yang efisien, aman, inklusif, dan berkelanjutan. Menurut Rodrigue *et al.* (2023), klasifikasi moda transportasi tidak hanya didasarkan pada jenis sarana, tetapi juga pada fungsi, kapasitas, tingkat fleksibilitas, dan dampaknya terhadap sistem perkotaan.

1. Klasifikasi Berdasarkan Media atau Prasarana

Klasifikasi moda transportasi perkotaan berdasarkan media atau prasarana membagi sistem transportasi menjadi empat kelompok utama: transportasi jalan, rel, air, dan udara. Di kawasan perkotaan, dua moda yang paling dominan adalah transportasi jalan dan rel, karena keduanya paling sesuai dengan kebutuhan mobilitas sehari-hari dan kepadatan penduduk yang tinggi. Transportasi jalan mencakup kendaraan bermotor seperti mobil, sepeda motor, bus, dan kendaraan logistik, serta kendaraan tidak bermotor seperti sepeda dan becak. Moda ini fleksibel dan mudah diakses, tetapi memiliki keterbatasan dalam hal kapasitas angkut, kecepatan, dan dampak lingkungan, terutama di wilayah dengan kepadatan lalu lintas tinggi.

Transportasi rel mencakup kereta komuter (KRL), *Light Rail Transit* (LRT), dan *Mass Rapid Transit* (MRT) yang beroperasi di jalur rel khusus. Vuchic (2022) menekankan bahwa transportasi berbasis rel memiliki kapasitas angkut yang tinggi, keandalan lebih baik, dan efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan moda jalan, terutama pada koridor yang memiliki permintaan perjalanan tinggi. Kereta rel juga lebih ramah lingkungan karena dapat mengurangi emisi per penumpang dibandingkan kendaraan pribadi. Namun, pembangunan infrastruktur rel memerlukan investasi besar, perencanaan jangka panjang, dan koordinasi tata ruang yang matang, sehingga pemilihannya harus disesuaikan dengan kebutuhan mobilitas, keterbatasan lahan, dan kemampuan pendanaan kota.

Transportasi berbasis air dan udara meskipun relatif jarang digunakan dalam konteks perkotaan sehari-hari, tetap penting untuk mobilitas logistik dan konektivitas regional. Transportasi air bisa mencakup kapal feri atau transportasi sungai di kota yang memiliki jaringan perairan, sedangkan transportasi udara, seperti helikopter dan layanan bandara perkotaan, digunakan untuk perjalanan jarak jauh dan kebutuhan darurat.

2. Klasifikasi Berdasarkan Jenis Pelayanan

Klasifikasi moda transportasi perkotaan berdasarkan jenis pelayanan membagi sistem transportasi menjadi angkutan pribadi (*private transport*) dan angkutan umum (*public transport*). Angkutan pribadi mencakup kendaraan yang dimiliki dan dioperasikan secara individu, seperti mobil pribadi dan sepeda motor. Moda ini menawarkan fleksibilitas tinggi dalam hal waktu, rute, dan kenyamanan perjalanan, sehingga banyak diminati oleh pengguna perkotaan. Namun, efisiensi ruang dan energi angkutan pribadi relatif rendah, karena setiap kendaraan hanya mengangkut satu atau beberapa penumpang saja. Dominasi kendaraan pribadi juga menjadi salah satu penyebab utama kemacetan, polusi udara, dan degradasi lingkungan di kota-kota besar (Litman, 2023).

Angkutan umum dirancang untuk melayani masyarakat secara kolektif, dengan rute dan jadwal tertentu. Contoh moda angkutan umum meliputi bus kota, *Bus Rapid Transit* (BRT), *Mass Rapid Transit* (MRT), *Light Rail Transit* (LRT), trem, dan angkutan kota. Keunggulan utama angkutan umum adalah efisiensi penggunaan ruang jalan, kapasitas angkut yang lebih tinggi, dan pengurangan emisi per penumpang dibandingkan kendaraan pribadi. Angkutan umum juga dapat meningkatkan aksesibilitas bagi kelompok masyarakat yang tidak memiliki kendaraan pribadi, termasuk masyarakat berpendapatan rendah, lansia, dan penyandang disabilitas.

3. Klasifikasi Berdasarkan Kapasitas Angkut

Klasifikasi moda transportasi perkotaan berdasarkan kapasitas angkut membagi moda menjadi tiga kategori utama: berkapasitas rendah, sedang, dan tinggi. Moda berkapasitas rendah biasanya melayani perjalanan individual atau kelompok kecil, seperti sepeda, sepeda motor, dan mobil pribadi. Moda ini memiliki fleksibilitas tinggi dan cocok untuk perjalanan jarak pendek, namun tidak efisien dalam melayani permintaan perjalanan yang padat, sehingga berpotensi meningkatkan kemacetan jika digunakan secara dominan di koridor sibuk.

Moda berkapasitas sedang mencakup bus konvensional, bus sedang, dan angkutan kota, yang mampu mengangkut lebih banyak penumpang dibandingkan moda rendah. Moda ini ideal untuk koridor dengan permintaan menengah, di mana volume penumpang cukup besar untuk memaksimalkan efisiensi operasional, namun tidak memerlukan

infrastruktur rel khusus. Penggunaan moda berkapasitas sedang dapat membantu menyeimbangkan kebutuhan mobilitas dan ketersediaan ruang jalan, serta mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi.

Moda berkapasitas tinggi terdiri dari *Bus Rapid Transit* (BRT), *Mass Rapid Transit* (MRT), *Light Rail Transit* (LRT), dan kereta komuter. Moda ini dirancang untuk melayani koridor dengan permintaan perjalanan tinggi, menawarkan kapasitas angkut yang besar, keandalan tinggi, dan efisiensi energi lebih baik per penumpang. Namun, investasi infrastruktur dan biaya operasional moda berkapasitas tinggi relatif tinggi, sehingga pemilihan dan perencanaan koridor harus dilakukan secara hati-hati.

4. Klasifikasi Berdasarkan Tingkat Fleksibilitas Operasi

Klasifikasi moda transportasi perkotaan berdasarkan tingkat fleksibilitas operasi membagi moda menjadi dua kategori utama: moda fleksibel dan moda tidak fleksibel. Moda fleksibel mencakup kendaraan seperti mobil pribadi, sepeda motor, dan taksi, yang memiliki kemampuan untuk menyesuaikan rute, waktu, dan frekuensi perjalanan sesuai kebutuhan pengguna. Keunggulan utama moda ini adalah responsivitas tinggi terhadap perubahan permintaan perjalanan, sehingga memberikan kenyamanan dan kontrol langsung kepada pengguna. Namun, sifat fleksibel ini juga membuat moda sulit dikendalikan secara kolektif, sehingga dapat menimbulkan kemacetan, penggunaan energi yang tinggi, dan inefisiensi ruang jalan jika dominan dalam sistem transportasi perkotaan.

Moda tidak fleksibel, seperti MRT, LRT, dan trem, beroperasi pada jalur tetap dan jadwal yang terstruktur. Meskipun memiliki fleksibilitas rendah, moda ini menawarkan keandalan, keselamatan, kapasitas angkut yang tinggi, dan efisiensi energi per penumpang yang lebih baik. Moda tidak fleksibel sangat efektif untuk melayani koridor dengan permintaan perjalanan tinggi dan konsisten, karena dapat memaksimalkan kapasitas transportasi massal serta mendukung pengembangan kawasan berorientasi transit (TOD).

5. Klasifikasi Berdasarkan Sumber Energi dan Dampak Lingkungan

Klasifikasi moda transportasi perkotaan berdasarkan sumber energi dan dampak lingkungan menjadi semakin penting seiring meningkatnya kesadaran akan isu perubahan iklim dan kualitas udara. Moda konvensional umumnya menggunakan bahan bakar fosil, seperti bensin dan solar, yang menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) dan polutan lokal seperti nitrogen oksida (NO_x) dan partikel halus (PM_{2,5}). Dominasi moda berbahan bakar fosil ini tidak hanya berdampak pada kualitas udara dan kesehatan masyarakat, tetapi juga berkontribusi pada perubahan iklim global melalui peningkatan emisi CO₂.

Moda transportasi ramah lingkungan menggunakan sumber energi rendah emisi atau nol emisi, termasuk kendaraan listrik, kendaraan berbasis hidrogen, serta moda tidak bermotor seperti berjalan kaki dan bersepeda. Moda ini menawarkan keuntungan signifikan, seperti pengurangan polusi udara, penurunan jejak karbon, dan peningkatan kualitas hidup perkotaan. Transportasi aktif, khususnya berjalan kaki dan bersepeda, juga mendukung kesehatan masyarakat sekaligus mengurangi kepadatan lalu lintas.

6. Klasifikasi Moda Tidak Bermotor (*Non-Motorized Transport*)

Klasifikasi moda tidak bermotor (*Non-Motorized Transport/NMT*) menekankan pentingnya pergerakan manusia tanpa menggunakan kendaraan bermotor, seperti berjalan kaki dan bersepeda, sebagai komponen integral dalam sistem transportasi perkotaan. Meskipun sering dianggap sebagai moda pelengkap, peran NMT semakin diakui dalam perencanaan transportasi modern karena manfaatnya bagi kualitas hidup, kesehatan masyarakat, dan keberlanjutan kota. Pucher dan Buehler (2021) menekankan bahwa kota-kota yang berhasil meningkatkan penggunaan moda tidak bermotor cenderung memiliki tingkat aktivitas fisik yang tinggi, polusi udara rendah, dan lingkungan perkotaan yang lebih ramah manusia.

Pada konteks rekayasa transportasi, penyediaan infrastruktur yang aman dan nyaman menjadi prioritas utama untuk mendukung moda tidak bermotor. Ini mencakup trotoar yang memadai, jalur sepeda terpisah dari lalu lintas kendaraan bermotor, fasilitas penyeberangan yang aman, serta pencahayaan dan perlengkapan keselamatan lainnya. Infrastruktur yang dirancang dengan baik tidak hanya mendorong orang

untuk berjalan kaki atau bersepeda, tetapi juga mengurangi risiko kecelakaan dan meningkatkan aksesibilitas bagi semua kelompok masyarakat, termasuk anak-anak, lansia, dan penyandang disabilitas.

7. Integrasi dan Hierarki Moda Transportasi Perkotaan

Integrasi dan hierarki moda transportasi perkotaan menekankan bahwa berbagai moda transportasi tidak beroperasi secara terpisah, melainkan membentuk sistem multimoda yang saling melengkapi. Dalam kerangka hierarki moda, angkutan umum massal seperti MRT, LRT, BRT, dan kereta komuter ditempatkan sebagai tulang punggung sistem, yang melayani koridor dengan permintaan tinggi dan kapasitas besar. Moda pengumpan (*feeder*), seperti bus kota, minibus, atau sepeda, berfungsi menghubungkan area pemukiman dengan jaringan utama, sementara moda tidak bermotor (berjalan kaki dan bersepeda) mendukung mobilitas jarak pendek dan aksesibilitas titik akhir (Vuchic, 2022).

Integrasi antar moda mencakup beberapa aspek penting. Secara fisik, integrasi berarti keterhubungan antarstasiun, terminal, dan fasilitas pendukung, sehingga perpindahan antar moda menjadi nyaman dan efisien. Secara operasional, integrasi memerlukan sinkronisasi jadwal perjalanan, agar waktu tunggu antar moda minimal dan perjalanan menjadi lancar. Secara tarif, integrasi dapat diwujudkan melalui sistem tiket tunggal atau kartu transportasi terpadu, yang memudahkan pengguna berpindah antar moda tanpa biaya tambahan yang memberatkan.

C. Jaringan Jalan dan Fasilitas Pendukung

Jaringan jalan merupakan tulang punggung sistem transportasi perkotaan karena menjadi prasarana utama bagi pergerakan kendaraan bermotor, kendaraan tidak bermotor, dan pejalan kaki. Dalam konteks rekayasa transportasi, jaringan jalan tidak hanya dipahami sebagai kumpulan ruas jalan, tetapi sebagai suatu sistem jaringan hierarkis yang dirancang untuk melayani berbagai fungsi mobilitas dan aksesibilitas secara efisien, aman, dan berkelanjutan. Menurut Papacostas dan Prevedouros (2021), kualitas jaringan jalan sangat menentukan kinerja lalu lintas, tingkat pelayanan, serta keselamatan pengguna jalan di kawasan perkotaan.

1. Konsep Jaringan Jalan Perkotaan

Konsep jaringan jalan perkotaan merujuk pada susunan ruas jalan yang saling terhubung dan membentuk pola tertentu untuk melayani berbagai aktivitas sosial, ekonomi, dan spasial kota. Jaringan ini berperan sebagai tulang punggung sistem transportasi perkotaan, menghubungkan pusat-pusat kegiatan seperti kawasan bisnis, permukiman, kawasan industri, serta fasilitas publik seperti sekolah, rumah sakit, dan terminal transportasi. Rodrigue, Comtois, dan Slack (2023) menekankan bahwa jaringan jalan harus dirancang sebagai bagian dari sistem transportasi terpadu, sehingga setiap ruas jalan bukan hanya berdiri sendiri, tetapi mendukung fungsi keseluruhan jaringan dan integrasi dengan moda transportasi lain.

Pada perencanaan dan rekayasa transportasi, jaringan jalan dievaluasi berdasarkan dua fungsi utama: aksesibilitas dan mobilitas. Aksesibilitas mengacu pada kemudahan mencapai lokasi atau titik tujuan, misalnya akses ke pusat perbelanjaan, kantor, atau fasilitas publik dari lingkungan pemukiman. Jalan yang menekankan fungsi aksesibilitas biasanya memiliki banyak interaksi langsung dengan aktivitas di sekitarnya, seperti persimpangan lokal, area parkir, dan fasilitas pejalan kaki. Sebaliknya, mobilitas mengacu pada kemampuan pengguna jalan untuk bergerak dengan cepat dan efisien sepanjang jaringan. Jalan yang berfokus pada mobilitas tinggi, seperti jalan arteri atau jalan tol perkotaan, umumnya memiliki akses terbatas dan sedikit persimpangan untuk menjaga kelancaran arus lalu lintas.

2. Klasifikasi Jaringan Jalan Berdasarkan Fungsi

Klasifikasi jaringan jalan perkotaan berdasarkan fungsi bertujuan untuk mengatur hierarki pergerakan lalu lintas agar aliran kendaraan lebih terstruktur, aman, dan efisien. Sistem hierarki jalan membedakan jalan berdasarkan peran utamanya dalam melayani mobilitas dan aksesibilitas, sekaligus memisahkan pergerakan jarak jauh dari pergerakan lokal. Menurut AASHTO (2022), penerapan hierarki jalan yang tepat dapat meningkatkan keselamatan, kenyamanan, dan efisiensi sistem transportasi perkotaan, serta meminimalkan konflik antara kendaraan cepat dan lalu lintas lokal.

Jalan arteri menempati tingkat hierarki tertinggi dan berfungsi melayani pergerakan utama dengan volume lalu lintas tinggi dan jarak tempuh relatif panjang. Jalan arteri biasanya memiliki akses terbatas dan

kecepatan operasional yang tinggi untuk mendukung mobilitas cepat di koridor utama kota. Di bawahnya, jalan kolektor berfungsi menghubungkan jalan lokal dengan jalan arteri, sekaligus menyalurkan lalu lintas dari kawasan permukiman atau pusat kegiatan ke jaringan jalan utama.

Jalan lokal berada pada tingkat hierarki berikutnya dan berfokus pada akses langsung ke permukiman, bisnis lokal, atau fasilitas publik. Jalan ini melayani volume lalu lintas rendah hingga sedang dan menyediakan konektivitas bagi pengguna di skala lingkungan. Pada tingkat hierarki terendah, jalan lingkungan melayani akses internal kawasan hunian atau kompleks perumahan. Jalan ini menekankan keselamatan, kenyamanan, dan interaksi sosial, dengan volume lalu lintas yang rendah dan kecepatan terbatas.

3. Pola Jaringan Jalan Perkotaan

Pola jaringan jalan perkotaan mencerminkan susunan geometrik dan tingkat keterhubungan antar ruas jalan dalam suatu kota, yang berperan penting dalam mobilitas, aksesibilitas, dan efisiensi sistem transportasi. Beberapa pola jaringan jalan yang umum dijumpai meliputi grid, radial, cincin (*ring*), dan kombinasi dari pola-pola tersebut.

Pola grid banyak diterapkan di kota-kota modern karena memberikan kemudahan orientasi bagi pengguna jalan dan menawarkan banyak alternatif rute, sehingga distribusi lalu lintas menjadi lebih merata. Namun, pola ini juga berpotensi menimbulkan banyak konflik di persimpangan, terutama pada ruas yang padat kendaraan. Pola radial biasanya berkembang secara historis, dengan pusat kota sebagai titik fokus pergerakan. Jalan-jalan utama mengarah ke pusat kota, sementara pola cincin (*ring*) sering menyertai radial untuk menghubungkan koridor luar dan mengurangi beban lalu lintas di pusat. Kombinasi pola radial-cincin sering terlihat di kota-kota besar dengan pertumbuhan tidak merata, di mana *ring road* dan *beltway* membantu mengalihkan lalu lintas transit dari pusat kota.

Menurut Meyer dan Miller (2021), tidak ada pola jaringan yang ideal untuk semua kota, karena pilihan pola harus mempertimbangkan sejarah perkembangan kota, topografi, kepadatan penduduk, serta karakteristik perjalanan dan moda transportasi yang dominan. Kota dengan kontur datar dan perkembangan terencana dapat lebih mudah mengadopsi pola grid, sementara kota dengan sejarah panjang dan

pertumbuhan organik cenderung memiliki pola radial atau kombinasi yang lebih kompleks.

4. Kapasitas dan Kinerja Jaringan Jalan

Kapasitas dan kinerja jaringan jalan merupakan aspek fundamental dalam rekayasa transportasi perkotaan karena menentukan sejauh mana jalan dapat melayani arus lalu lintas secara efektif. Kapasitas jalan mengacu pada kemampuan maksimum jalan untuk menampung kendaraan pada kondisi tertentu, yang dipengaruhi oleh geometri jalan, komposisi kendaraan, perilaku pengemudi, serta kondisi lingkungan seperti cuaca dan visibilitas (HCM, 2022). Analisis kapasitas tidak hanya mempertimbangkan jumlah kendaraan yang dapat melewati suatu ruas jalan per jam, tetapi juga evaluasi tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*), kecepatan perjalanan, waktu tundaan, dan keandalan waktu tempuh, yang mencerminkan pengalaman nyata pengguna jalan.

Di kawasan perkotaan, kemacetan sering muncul bukan hanya akibat keterbatasan kapasitas fisik jalan, tetapi juga karena distribusi lalu lintas yang tidak merata dan manajemen jaringan yang kurang optimal. Misalnya, simpul persimpangan yang tidak terkoordinasi atau akses jalan yang tidak terkontrol dapat menimbulkan penumpukan kendaraan meskipun jalan secara teoritis memiliki kapasitas cukup. Oleh karena itu, evaluasi kinerja jaringan jalan modern harus mempertimbangkan faktor teknis sekaligus perilaku pengguna jalan dan dinamika urban.

Pendekatan manajemen lalu lintas dan optimasi jaringan menjadi kunci untuk meningkatkan kinerja jalan tanpa harus selalu menambah kapasitas fisik. Strategi yang diterapkan meliputi pengaturan arus satu arah, manajemen simpang, pengendalian akses ke jalan utama, serta penggunaan sistem sinyal adaptif berbasis data real-time. Selain itu, integrasi dengan angkutan umum dan moda tidak bermotor dapat membantu mengurangi tekanan pada jalan, meningkatkan efisiensi jaringan, dan mendukung mobilitas berkelanjutan.

5. Fasilitas Pendukung Jaringan Jalan

Fasilitas pendukung jaringan jalan berperan penting dalam memastikan sistem transportasi perkotaan berfungsi secara aman, nyaman, dan efisien. Selain badan jalan, berbagai fasilitas seperti trotoar, jalur sepeda, halte, terminal, fasilitas parkir, rambu dan marka jalan, serta perangkat pengendali lalu lintas berkontribusi langsung terhadap

pengalaman pengguna dan kinerja jaringan (NACTO, 2022). Kualitas fasilitas pendukung ini sering dijadikan indikator utama keberhasilan sistem transportasi yang berorientasi pada manusia, karena mampu meningkatkan keselamatan, kenyamanan, dan aksesibilitas bagi seluruh pengguna jalan.

Trotoar dan jalur pejalan kaki merupakan fasilitas dasar yang mendukung mobilitas *non-motorized transport*. Trotoar yang aman, luas, dan nyaman tidak hanya melindungi pejalan kaki dari risiko kecelakaan, tetapi juga mendorong masyarakat untuk memilih berjalan kaki sebagai moda perjalanan sehari-hari. Hal ini berkontribusi pada pengurangan kemacetan dan emisi kendaraan bermotor. Jalur sepeda yang terpisah dari arus lalu lintas kendaraan bermotor juga terbukti meningkatkan keselamatan pesepeda sekaligus meningkatkan minat masyarakat untuk bersepeda, mendukung prinsip transportasi berkelanjutan (Pucher & Buehler, 2021).

Fasilitas parkir menjadi komponen lain yang memiliki dampak besar terhadap kinerja jaringan jalan. Pengelolaan parkir yang buruk, seperti parkir liar atau kapasitas yang tidak memadai, dapat mengurangi kapasitas efektif jalan dan memicu kemacetan. Oleh karena itu, kebijakan parkir modern, seperti tarif progresif atau pengaturan lokasi parkir, sering digunakan sebagai instrumen manajemen permintaan lalu lintas (Litman, 2023).

6. Peran Simpang dan Fasilitas Pengendalian Lalu Lintas

Peran Simpang dan Fasilitas Pengendalian Lalu Lintas sangat krusial dalam menjamin kelancaran dan keselamatan jaringan jalan perkotaan. Simpang merupakan titik pertemuan arus lalu lintas yang berbeda, baik kendaraan bermotor, kendaraan tidak bermotor, maupun pejalan kaki. Karena kompleksitas interaksi di simpang, kinerja simpang berpengaruh langsung terhadap aliran lalu lintas di seluruh jaringan. Rekayasa transportasi menekankan pengelolaan simpang melalui pendekatan yang lebih efisien dibandingkan sekadar pelebaran jalan, seperti pengaturan prioritas, penerapan sinyal lalu lintas, pembangunan bundaran (*roundabout*), serta rekayasa geometrik yang menyesuaikan desain simpang dengan volume dan karakteristik lalu lintas (Roess, Prassas, & McShane, 2021).

Fasilitas pengendalian lalu lintas berperan penting dalam meminimalkan konflik, meningkatkan keselamatan, dan

mengoptimalkan kapasitas jaringan. Lampu lalu lintas adaptif, rambu elektronik, marka dinamis, serta sistem pemantauan berbasis kamera menjadi bagian dari strategi manajemen lalu lintas modern. Integrasi fasilitas ini dengan *Intelligent Transportation Systems* (ITS) memungkinkan pengendalian arus lalu lintas secara real-time berbasis data, termasuk penyesuaian sinyal sesuai kepadatan, pemantauan kejadian, dan respons cepat terhadap gangguan operasional (Gartner & Chen, 2022).

7. Jaringan Jalan dan Transportasi Berkelanjutan

Jaringan Jalan dan Transportasi Berkelanjutan menekankan peran jaringan jalan tidak sekadar sebagai infrastruktur untuk kendaraan bermotor, tetapi sebagai sarana mobilitas yang inklusif bagi seluruh pengguna jalan. Konsep *complete streets* menjadi landasan perancangan, di mana ruang jalan dialokasikan secara seimbang bagi pejalan kaki, pesepeda, angkutan umum, dan kendaraan pribadi, sehingga setiap moda dapat beroperasi dengan aman dan efisien (Banister, 2021).

Pendekatan ini merupakan respons terhadap tantangan urbanisasi modern, seperti kemacetan, polusi udara, konsumsi energi tinggi, dan ketimpangan akses transportasi. Integrasi jaringan jalan dengan kebijakan pengendalian permintaan perjalanan, pengembangan angkutan umum massal, serta tata guna lahan berbasis transit atau *Transit Oriented Development* (TOD) memungkinkan kota mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi sekaligus meningkatkan kualitas hidup warganya.

Fasilitas pendukung seperti trotoar, jalur sepeda, halte, terminal, dan pengaturan simpang dipandang sebagai elemen strategis, bukan sekadar pelengkap infrastruktur. Dengan demikian, jaringan jalan perkotaan modern menjadi instrumen utama dalam pembangunan kota berkelanjutan: mendukung mobilitas yang aman, adil, efisien, sekaligus ramah lingkungan, serta memperkuat daya saing kota di era urbanisasi dan perubahan iklim.

D. Standar dan Kebijakan Transportasi Perkotaan

Standar dan kebijakan transportasi perkotaan merupakan kerangka normatif dan strategis yang mengarahkan perencanaan, perancangan, pengoperasian, serta evaluasi sistem transportasi di

wilayah perkotaan. Dalam rekayasa transportasi, standar berfungsi sebagai pedoman teknis untuk menjamin keselamatan, efisiensi, dan kualitas pelayanan, sedangkan kebijakan berperan sebagai instrumen pengambilan keputusan publik untuk mencapai tujuan pembangunan kota yang berkelanjutan. Menurut Banister (2021), keberhasilan sistem transportasi perkotaan sangat ditentukan oleh konsistensi antara standar teknis dan arah kebijakan transportasi yang diterapkan.

1. Peran Standar dalam Rekayasa Transportasi Perkotaan

Peran Standar dalam Rekayasa Transportasi Perkotaan sangat krusial karena berfungsi sebagai acuan teknis untuk perencanaan, desain, dan pengelolaan sistem transportasi. Standar mencakup aspek geometrik jalan, kapasitas, tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*), keselamatan, serta fasilitas pendukung seperti trotoar, jalur sepeda, rambu, dan marka jalan. Penerapan standar ini bertujuan untuk menjamin keseragaman, keamanan, dan efisiensi dalam operasional sistem transportasi perkotaan (Papacostas & Prevedouros, 2021).

Standar juga memungkinkan evaluasi kinerja jaringan jalan dan simpang secara objektif. Misalnya, standar jarak pandang henti, radius tikungan, dan lebar jalur menjadi tolok ukur keselamatan bagi pengguna jalan. Begitu pula indikator LOS menjadi parameter penting dalam menilai kelancaran lalu lintas dan kapasitas jalan. Tanpa standar yang jelas, perancangan dan pembangunan infrastruktur bisa menghasilkan sistem transportasi yang tidak aman, kurang efisien, dan sulit diprediksi performanya.

2. Standar Teknis Internasional dalam Transportasi Perkotaan

Standar Teknis Internasional dalam Transportasi Perkotaan berperan penting sebagai acuan global untuk perencanaan, desain, dan evaluasi sistem transportasi yang aman, efisien, dan berkelanjutan. Standar ini dikembangkan oleh lembaga profesional internasional dan sering dijadikan referensi bagi negara-negara dalam menyesuaikan pedoman lokal.

Salah satu standar yang paling berpengaruh adalah *Highway Capacity Manual* (HCM, 2022) yang diterbitkan oleh *Transportation Research Board*. HCM menyediakan metodologi analisis kapasitas dan tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*) untuk berbagai fasilitas transportasi perkotaan, termasuk jalan perkotaan, simpang bersinyal, dan

jalur angkutan umum. Manual ini memungkinkan perencana transportasi menilai kinerja sistem secara kuantitatif, merancang intervensi yang tepat, dan mengoptimalkan aliran lalu lintas.

Standar dari *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 2022) memberikan panduan geometrik jalan, seperti lebar jalur, radius tikungan, dan desain persimpangan, dengan fokus pada keselamatan dan efisiensi kendaraan bermotor. Di sisi lain, *National Association of City Transportation Officials* (NACTO, 2022) menekankan pendekatan *human-centered design* dan konsep *complete streets*, yang memprioritaskan keselamatan dan kenyamanan pejalan kaki, pesepeda, dan pengguna angkutan umum.

3. Standar Nasional dan Konteks Perkotaan Indonesia

Standar Nasional dan Konteks Perkotaan Indonesia berperan penting dalam memastikan sistem transportasi perkotaan dapat berfungsi secara efektif, aman, dan sesuai karakteristik lokal. Standar nasional menyesuaikan pedoman teknis internasional dengan kondisi spesifik Indonesia, seperti tingginya dominasi sepeda motor, aktivitas tepi jalan yang padat, dan perilaku pengemudi yang khas.

Salah satu dokumen teknis utama adalah Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) yang diperbarui oleh Kementerian PUPR sebagai pengganti MKJI 1997. PKJI menyediakan metode analisis kapasitas dan kinerja jaringan jalan perkotaan yang lebih sesuai dengan kondisi lalu lintas di Indonesia, termasuk faktor kendaraan *ringan*, sepeda motor, dan interaksi antar moda. Dengan demikian, PKJI menjadi acuan utama bagi perencana dan insinyur transportasi dalam merancang dan mengevaluasi jaringan jalan perkotaan.

Indonesia juga menerapkan Standar Pelayanan Minimal (SPM) Transportasi Perkotaan yang diatur oleh Kementerian Perhubungan (2022). SPM mencakup aspek keselamatan, kenyamanan, keterjangkauan, dan keterpaduan layanan, khususnya untuk angkutan umum. Standar ini bertujuan menjamin hak masyarakat memperoleh layanan transportasi yang layak dan menjadi dasar evaluasi kinerja pemerintah daerah serta operator transportasi perkotaan.

4. Kebijakan Transportasi Perkotaan sebagai Instrumen Pembangunan

Kebijakan Transportasi Perkotaan sebagai Instrumen Pembangunan berperan strategis dalam membentuk sistem transportasi yang selaras dengan tujuan pembangunan kota. Kebijakan ini bukan sekadar aturan lalu lintas atau regulasi teknis, tetapi merupakan alat untuk mengarahkan mobilitas, mendukung pertumbuhan ekonomi, dan menjaga keberlanjutan lingkungan. Keputusan yang diambil, seperti prioritas pengembangan angkutan umum, pengaturan penggunaan kendaraan pribadi, serta integrasi transportasi dengan tata guna lahan, akan menentukan pola perjalanan, kepadatan lalu lintas, dan kualitas hidup warga kota (Vuchic, 2022).

Perkembangan kebijakan transportasi perkotaan global menunjukkan pergeseran paradigma dari *car-oriented transport* menuju *people-oriented transport*. Pendekatan ini menekankan bahwa mobilitas harus melayani kebutuhan manusia, bukan sekadar kendaraan. Strategi yang diterapkan meliputi pengurangan ketergantungan pada kendaraan pribadi melalui pembatasan parkir, pengenaan tarif kemacetan (*congestion pricing*), serta peningkatan kualitas dan jangkauan angkutan umum. Banister (2021) menegaskan bahwa paradigma ini merupakan inti dari transportasi berkelanjutan, di mana keberhasilan sistem transportasi diukur dari kontribusinya terhadap kesejahteraan dan kualitas hidup masyarakat perkotaan, bukan hanya kecepatan atau kapasitas jalan.

5. Integrasi Kebijakan Transportasi dan Tata Guna Lahan

Integrasi Kebijakan Transportasi dan Tata Guna Lahan merupakan elemen kunci dalam perencanaan kota yang berkelanjutan. Hubungan antara transportasi dan tata guna lahan bersifat timbal balik: tata guna lahan menentukan pola permintaan perjalanan, sedangkan transportasi memengaruhi nilai lahan, lokasi aktivitas, dan arah pertumbuhan kota. Oleh karena itu, kebijakan transportasi tidak dapat berdiri sendiri dan harus selaras dengan perencanaan tata ruang untuk menciptakan sistem perkotaan yang efisien dan ramah lingkungan.

Salah satu contoh integrasi yang banyak diterapkan adalah *Transit Oriented Development* (TOD), yang menekankan pengembangan kawasan berintensitas tinggi di sekitar simpul angkutan umum massal, seperti stasiun kereta, terminal bus, atau koridor

MRT/LRT. Menurut Cervero (2021), TOD dapat menurunkan ketergantungan pada kendaraan pribadi, mengurangi kemacetan, dan mendorong pola perjalanan yang lebih berkelanjutan. Pendekatan ini juga meningkatkan aksesibilitas dan mendorong pertumbuhan ekonomi lokal di sekitar simpul transportasi, sehingga menciptakan nilai tambah bagi masyarakat dan investor.

6. Kebijakan Transportasi dan Isu Keberlanjutan

Kebijakan Transportasi dan Isu Keberlanjutan menekankan bahwa pengembangan sistem transportasi perkotaan tidak bisa lagi hanya berfokus pada mobilitas dan kapasitas, tetapi harus mempertimbangkan dampak lingkungan dan perubahan iklim. Sektor transportasi merupakan kontributor utama emisi gas rumah kaca, polusi udara, dan konsumsi energi fosil, sehingga keberlanjutan menjadi faktor penentu dalam perumusan kebijakan. Menurut *International Energy Agency* (IEA, 2023), transformasi kebijakan transportasi menuju moda rendah emisi merupakan langkah penting untuk mencapai target pengurangan emisi global serta mitigasi perubahan iklim.

Kebijakan transportasi berkelanjutan meliputi beberapa strategi utama: promosi kendaraan listrik dan hibrida, pengembangan angkutan umum massal yang efisien dan terjangkau, serta peningkatan fasilitas untuk moda tidak bermotor seperti jalur sepeda dan trotoar yang aman. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi berbahan bakar fosil, tetapi juga mendorong mobilitas yang lebih sehat, aman, dan inklusif.

Rekayasa transportasi berperan penting dalam penerjemahan kebijakan keberlanjutan ini ke dalam desain dan operasi sistem transportasi yang nyata. Misalnya, perencanaan rute bus yang optimal, integrasi moda, sistem manajemen lalu lintas berbasis data, dan penyediaan infrastruktur pengisian kendaraan listrik menjadi implementasi konkret dari kebijakan yang berorientasi lingkungan. Banister (2021) menekankan bahwa keberhasilan kebijakan transportasi berkelanjutan ditentukan oleh sinkronisasi antara regulasi, teknologi, dan tata guna lahan, sehingga sistem transportasi tidak hanya efisien, tetapi juga mendukung kualitas hidup warga kota.

7. Tantangan Implementasi Standar dan Kebijakan Transportasi Perkotaan

Tantangan Implementasi Standar dan Kebijakan Transportasi Perkotaan membahas bahwa penyusunan dokumen teknis dan kebijakan yang baik belum menjamin keberhasilan sistem transportasi perkotaan jika implementasinya tidak efektif. Salah satu hambatan utama adalah keterbatasan anggaran dan kapasitas kelembagaan. Banyak pemerintah daerah menghadapi kendala pendanaan untuk membangun infrastruktur, mengoperasikan angkutan umum, atau menerapkan sistem manajemen lalu lintas modern. Selain itu, koordinasi antar lembaga sering kali lemah, sehingga kebijakan yang dibuat tidak berjalan secara terpadu (Litman, 2023).

Resistensi masyarakat juga menjadi faktor penghambat, misalnya ketika pembatasan kendaraan pribadi atau tarif parkir progresif diterapkan. Perubahan perilaku pengguna transportasi membutuhkan pendekatan edukatif dan partisipatif, agar masyarakat memahami manfaat jangka panjang dari kebijakan berkelanjutan. Dukungan politik yang kuat dan partisipasi publik menjadi penentu keberhasilan implementasi standar dan kebijakan transportasi.

Perkembangan teknologi dan pola mobilitas baru menuntut adaptasi regulasi yang cepat. Layanan *ride-hailing*, *micromobility* seperti skuter listrik, dan kendaraan otonom menghadirkan tantangan hukum, keselamatan, dan integrasi dengan sistem transportasi tradisional. Standar dan kebijakan yang kaku tidak mampu mengakomodasi inovasi ini, sehingga perlu pembaruan regulasi secara berkala untuk tetap relevan.



BAB III

KARAKTERISTIK LALU LINTAS

Karakteristik lalu lintas merupakan aspek fundamental dalam rekayasa transportasi yang menggambarkan perilaku pergerakan kendaraan pada suatu ruas atau jaringan jalan. Karakteristik ini umumnya direpresentasikan melalui parameter utama berupa arus, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas, yang saling berhubungan dan mencerminkan tingkat kinerja serta kondisi operasional sistem jalan. Selain dipengaruhi oleh kondisi fisik infrastruktur, karakteristik lalu lintas juga ditentukan oleh perilaku pengemudi, jenis dan kinerja kendaraan, serta faktor lingkungan perkotaan yang dinamis. Pemahaman yang baik terhadap karakteristik lalu lintas menjadi dasar penting dalam analisis kapasitas, tingkat pelayanan, keselamatan, serta perumusan strategi manajemen dan rekayasa lalu lintas untuk mendukung sistem transportasi perkotaan yang efisien dan berkelanjutan.

A. Arus, Kecepatan, dan Kepadatan Lalu Lintas

Karakteristik lalu lintas merupakan dasar utama dalam analisis dan perancangan sistem transportasi jalan. Tiga parameter fundamental yang selalu digunakan dalam rekayasa lalu lintas adalah arus (*flow*), kecepatan (*speed*), dan kepadatan (*density*). Ketiga variabel ini saling berhubungan dan mencerminkan kondisi operasional suatu ruas jalan pada waktu tertentu. Pemahaman yang tepat terhadap arus, kecepatan, dan kepadatan sangat penting untuk mengevaluasi kinerja jalan, menentukan kapasitas, serta merumuskan strategi manajemen lalu lintas yang efektif (Garber & Hoel, 2020).

1. Arus Lalu Lintas (*Traffic Flow*)

Arus lalu lintas (*traffic flow*) merupakan salah satu konsep fundamental dalam rekayasa transportasi perkotaan, yang mengacu pada jumlah kendaraan yang melewati suatu titik atau penampang jalan per

satuan waktu. Satuan yang umum digunakan adalah kendaraan per jam (kend/jam) atau satuan mobil penumpang per jam (smp/jam atau pcu/hour). Menurut Papacostas dan Prevedouros (2015), arus lalu lintas merefleksikan tingkat permintaan perjalanan pada suatu ruas jalan dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk waktu, lokasi, dan karakteristik pengguna jalan. Pemahaman tentang arus lalu lintas menjadi dasar bagi perencana dan insinyur transportasi dalam mengevaluasi kinerja sistem, merencanakan kapasitas jalan, dan menetapkan strategi pengelolaan lalu lintas.

Pada praktiknya, arus lalu lintas dibedakan menjadi beberapa jenis sesuai tujuan analisisnya. Arus maksimum atau peak hour flow menunjukkan volume kendaraan tertinggi yang terjadi pada jam puncak, biasanya pada pagi dan sore hari, dan menjadi indikator penting dalam perencanaan kapasitas jalan dan simpang bersinyal. Sementara itu, arus rata-rata harian (*Annual Average Daily Traffic/AADT*) digunakan untuk perencanaan jangka panjang, penentuan kebutuhan infrastruktur, serta evaluasi investasi transportasi. Arus jenuh (*saturation flow*) menggambarkan tingkat arus maksimum yang dapat dilayani oleh suatu fasilitas jalan pada kondisi ideal, terutama pada persimpangan bersinyal, dan menjadi acuan dalam desain dan optimasi kinerja simpang.

Di kawasan perkotaan, arus lalu lintas bersifat dinamis dan berfluktuasi secara signifikan akibat aktivitas masyarakat, seperti pekerjaan, pendidikan, perdagangan, dan rekreasi. Vuchic (2017) menekankan bahwa pola arus ini tidak merata dan dipengaruhi oleh faktor temporal, baik harian maupun mingguan, serta kejadian khusus seperti kecelakaan, kegiatan konstruksi, dan kondisi cuaca ekstrem. Oleh karena itu, analisis arus lalu lintas tidak dapat dilakukan secara sederhana, melainkan memerlukan pengumpulan data yang representatif, pemodelan variasi temporal, serta penyesuaian terhadap kondisi nyata di lapangan.

2. Kecepatan Lalu Lintas (*Traffic Speed*)

Kecepatan lalu lintas (*Traffic Speed*) merupakan salah satu indikator utama dalam evaluasi kinerja sistem transportasi, menggambarkan laju pergerakan kendaraan dalam satuan jarak per satuan waktu, biasanya dinyatakan dalam kilometer per jam (km/jam). Kecepatan tidak hanya mencerminkan efisiensi perjalanan, tetapi juga kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan. Garber dan Hoel (2020)

mengklasifikasikan kecepatan lalu lintas menjadi beberapa jenis utama. Pertama, kecepatan arus bebas (*free-flow speed*) adalah kecepatan rata-rata kendaraan ketika pengemudi tidak terpengaruh oleh kendaraan lain maupun hambatan lalu lintas, yang dipengaruhi oleh geometri jalan, kondisi permukaan, dan batas kecepatan yang berlaku. Kedua, kecepatan tempuh rata-rata (*average travel speed*) diperoleh dari perbandingan jarak perjalanan dengan total waktu tempuh, termasuk waktu berhenti akibat kemacetan atau persimpangan. Ketiga, kecepatan operasi (*operating speed*) mencerminkan kecepatan aktual yang digunakan mayoritas kendaraan dalam kondisi lalu lintas tertentu, yang dapat berbeda signifikan dari kecepatan arus bebas karena pengaruh interaksi antar pengguna jalan.

Di wilayah perkotaan, kecepatan lalu lintas umumnya lebih rendah dibandingkan jalan antar kota. Hal ini disebabkan oleh berbagai faktor, seperti persimpangan yang padat, aktivitas samping jalan, parkir tepi jalan, serta interaksi dengan pejalan kaki dan pesepeda. Menurut AASHTO (2018), penurunan kecepatan di perkotaan bukan semata-mata masalah teknis, tetapi juga mencerminkan konflik ruang antara berbagai pengguna jalan. Dengan demikian, kecepatan menjadi indikator penting dalam menilai keteraturan arus, kualitas pelayanan jalan, dan efisiensi sistem transportasi.

3. Kepadatan Lalu Lintas (*Traffic Density*)

Kepadatan lalu lintas (*Traffic Density*) merupakan ukuran penting dalam rekayasa transportasi yang menggambarkan jumlah kendaraan yang menempati suatu ruas jalan per satuan panjang, biasanya dinyatakan dalam kendaraan per kilometer (kend/km). Kepadatan mencerminkan tingkat “penghunian ruang” di jalan dan menjadi indikator langsung dari kemacetan serta kondisi operasional jaringan jalan. Menurut May (2019), kepadatan lalu lintas dapat dibedakan menjadi beberapa tingkat. Kepadatan rendah menunjukkan kondisi arus bebas, di mana kendaraan dapat bergerak dengan kecepatan tinggi dan interaksi antar pengguna jalan minimal. Kepadatan sedang mencerminkan kondisi arus stabil, di mana lalu lintas masih lancar namun interaksi antar kendaraan mulai meningkat, sehingga kecepatan sedikit menurun dan manuver menjadi lebih terbatas. Kepadatan tinggi menandai kondisi tidak stabil atau bahkan macet, ditandai dengan

kecepatan rendah, antrean panjang, dan meningkatnya risiko kecelakaan serta stres pengemudi.

Pada praktik rekayasa lalu lintas, pengukuran kepadatan secara langsung sering sulit dilakukan karena memerlukan pemantauan kontinu di berbagai titik jalan. Oleh karena itu, kepadatan biasanya dihitung secara tidak langsung menggunakan hubungan matematis antara arus lalu lintas (*flow*) dan kecepatan (*speed*), yang dikenal sebagai persamaan fundamental lalu lintas: $(q = k \cdot v)$, di mana (q) adalah arus, (k) adalah kepadatan, dan (v) adalah kecepatan. Pendekatan ini memungkinkan perencana dan insinyur transportasi untuk menilai kondisi jaringan secara kuantitatif tanpa pemantauan fisik yang ekstensif.

Perkembangan teknologi dalam transportasi cerdas (*Intelligent Transportation Systems/ITS*) semakin meningkatkan kemampuan pemantauan kepadatan secara real-time. Li *et al.* (2022) menjelaskan bahwa penggunaan kamera CCTV, sensor radar, loop detector, dan data GPS dari kendaraan memungkinkan estimasi kepadatan dengan akurasi tinggi. Data ini tidak hanya membantu dalam analisis operasional, tetapi juga menjadi dasar bagi pengendalian lalu lintas adaptif, perencanaan perbaikan infrastruktur, dan strategi manajemen kemacetan.

4. Peran Arus, Kecepatan, dan Kepadatan dalam Rekayasa Transportasi

Arus, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas merupakan tiga parameter fundamental yang saling terkait dan membentuk dasar analisis dalam rekayasa transportasi. Arus lalu lintas (*flow*) digunakan untuk mengukur jumlah kendaraan yang melewati suatu ruas jalan dalam satuan waktu tertentu, sehingga mencerminkan tingkat permintaan perjalanan pada jaringan jalan. Kecepatan lalu lintas (*speed*) menunjukkan laju pergerakan kendaraan dan menjadi indikator kualitas pelayanan jalan serta kenyamanan pengguna. Sementara itu, kepadatan (*density*) menggambarkan jumlah kendaraan per satuan panjang jalan dan memberikan informasi mengenai tingkat kejenuhan serta potensi kemacetan. Menurut Ortúzar dan Willumsen (2021), pemahaman interaksi ketiga variabel ini sangat penting, karena hubungan matematis antara arus, kecepatan, dan kepadatan menjadi dasar dalam penentuan kapasitas jalan, perhitungan *Level of Service* (LOS), dan evaluasi

kebijakan lalu lintas, seperti pengaturan sinyal atau pembatasan kendaraan.

Pada konteks perkotaan, dinamika arus, kecepatan, dan kepadatan cenderung kompleks akibat faktor-faktor seperti urbanisasi, pertumbuhan kendaraan pribadi, aktivitas samping jalan, serta interaksi dengan pejalan kaki dan pesepeda. Fluktuasi arus selama jam puncak, variasi kecepatan akibat persimpangan atau hambatan, serta kepadatan tinggi pada ruas tertentu menuntut pendekatan manajemen yang adaptif. Oleh karena itu, rekayasa transportasi modern tidak hanya menekankan perluasan kapasitas fisik jalan, tetapi juga pengelolaan permintaan melalui strategi seperti optimalisasi sinyal, pengaturan satu arah, pengendalian parkir, dan integrasi moda transportasi.

Perkembangan teknologi transportasi cerdas (ITS) dan *big data* memungkinkan pemantauan real-time ketiga parameter ini. Data arus, kecepatan, dan kepadatan yang diperoleh dari sensor, kamera, dan GPS kendaraan dapat dianalisis untuk mengidentifikasi pola lalu lintas, memprediksi kemacetan, dan mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti. Dengan pendekatan ini, rekayasa transportasi tidak hanya meningkatkan efisiensi jaringan jalan, tetapi juga mengoptimalkan keselamatan, kenyamanan, dan keberlanjutan sistem transportasi perkotaan.

B. Hubungan Fundamental Lalu Lintas

Hubungan fundamental lalu lintas merupakan konsep inti dalam rekayasa transportasi yang menjelaskan keterkaitan matematis dan empiris antara arus (*flow*), kecepatan (*speed*), dan kepadatan (*density*). Ketiga variabel ini membentuk dasar analisis perilaku lalu lintas di ruas jalan dan digunakan secara luas dalam perencanaan, perancangan, serta evaluasi kinerja sistem transportasi. Menurut May (2019), hubungan fundamental lalu lintas memberikan kerangka teoritis untuk memahami bagaimana perubahan satu variabel akan memengaruhi variabel lainnya, khususnya pada kondisi mendekati kapasitas jalan.

1. Konsep Dasar Hubungan Fundamental

Konsep dasar hubungan fundamental dalam rekayasa lalu lintas menghubungkan tiga variabel utama: arus (q), kecepatan (v), dan

kepadatan (k). Secara matematis, hubungan ini dirumuskan dengan persamaan sederhana:

$$q = k \times v$$

Persamaan ini menyatakan bahwa arus lalu lintas merupakan hasil perkalian antara kepadatan kendaraan per satuan panjang jalan dan kecepatan rata-rata kendaraan. Menurut Garber dan Hoel (2020), persamaan ini berlaku pada kondisi lalu lintas yang homogen dan stabil, sehingga menjadi dasar bagi sebagian besar model analisis lalu lintas, baik untuk jalan perkotaan maupun jalan antar kota.

Dari hubungan ini dapat dipahami perilaku sistem lalu lintas pada berbagai tingkat kepadatan. Pada kepadatan rendah, kendaraan dapat bergerak dengan kecepatan tinggi, namun arus relatif kecil karena jumlah kendaraan yang lewat per satuan waktu sedikit. Saat kepadatan meningkat ke tingkat sedang, kecepatan kendaraan mulai menurun karena interaksi antar kendaraan, tetapi arus justru meningkat karena lebih banyak kendaraan yang melewati titik tertentu. Titik ini sering disebut arus maksimum atau kapasitas jalan. Selanjutnya, pada kepadatan tinggi, kecepatan menurun drastis akibat kemacetan dan interaksi yang padat antar kendaraan, sehingga arus menurun meskipun jumlah kendaraan di jalan sangat banyak.

2. Diagram Fundamental Lalu Lintas

Diagram fundamental lalu lintas merupakan alat visual penting untuk memahami interaksi antara arus, kecepatan, dan kepadatan dalam sistem jalan. Hubungan ini divisualisasikan dalam tiga diagram utama: kecepatan–kepadatan (v – k), arus–kepadatan (q – k), dan arus–kecepatan (q – v), yang masing-masing memberikan wawasan berbeda tentang perilaku lalu lintas pada berbagai tingkat kejenuhan jalan.

Hubungan kecepatan–kepadatan menunjukkan bahwa kecepatan rata-rata kendaraan menurun seiring bertambahnya kepadatan. Model linier Greenshields (1935) adalah salah satu pendekatan awal yang populer, dengan persamaan:

$$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j} \right)$$

di mana (v_f) adalah kecepatan arus bebas, dan (k_j) adalah kepadatan macet. Model ini memberikan pemahaman konseptual yang sederhana mengenai dinamika lalu lintas, meskipun dalam praktik

perkotaan modern, hubungan kecepatan–kepadatan bersifat lebih kompleks dan nonlinier karena heterogenitas kendaraan dan interaksi pengguna jalan (May, 2019; Treiber & Kesting, 2022).

Diagram arus–kepadatan menggambarkan bagaimana arus lalu lintas berubah seiring kepadatan jalan. Pada awalnya, arus meningkat seiring bertambahnya kepadatan hingga mencapai titik maksimum, yang dikenal sebagai kapasitas jalan. Setelah titik ini, peningkatan kepadatan justru menurunkan arus karena kecepatan menurun dan interaksi antar kendaraan meningkat. Titik arus maksimum ini menunjukkan kondisi kritis sistem lalu lintas, di mana efisiensi operasional tertinggi dicapai, namun jalan menjadi sangat sensitif terhadap gangguan kecil, seperti kecelakaan atau berhentinya kendaraan (Vuchic, 2017).

Diagram arus–kecepatan menampilkan hubungan nonlinier antara arus dan kecepatan. Pada kecepatan sangat tinggi (arus bebas), arus rendah karena jumlah kendaraan sedikit. Arus meningkat hingga mencapai maksimum pada kecepatan menengah, kemudian menurun pada kecepatan rendah akibat kemacetan. Diagram ini sangat berguna dalam perancangan dan evaluasi kebijakan pengendalian kecepatan, seperti penerapan zona kecepatan rendah di pusat kota, yang bertujuan meningkatkan keselamatan tanpa mengorbankan kinerja sistem jalan secara signifikan (Ortúzar & Willumsen, 2021).

3. Model Hubungan Fundamental Lalu Lintas

Sejumlah model hubungan fundamental lalu lintas lain telah dikembangkan untuk menggambarkan perilaku lalu lintas secara lebih realistis. Salah satu model awal adalah Model Greenberg (1959) yang menggunakan pendekatan logaritmik, sehingga lebih sesuai untuk kondisi lalu lintas padat di mana interaksi antar kendaraan menjadi dominan. Model ini mampu menangkap penurunan kecepatan secara tajam ketika kepadatan mendekati batas jenuh, sehingga memberikan pemahaman yang lebih akurat mengenai kondisi kemacetan.

Model Underwood (1961) mengasumsikan hubungan eksponensial antara kecepatan dan kepadatan. Model ini efektif untuk kondisi arus bebas hingga menengah, karena menekankan bahwa penurunan kecepatan tidak linear terhadap peningkatan kepadatan. Pendekatan eksponensial ini lebih realistis dibandingkan model linier Greenshields untuk banyak situasi jalan perkotaan dan jalan antar kota dengan kepadatan variabel.

Muncul juga model multi-regime, yang membagi kondisi lalu lintas menjadi beberapa fase, misalnya arus bebas dan arus padat. Model ini memungkinkan analisis lebih fleksibel terhadap transisi antar kondisi lalu lintas, seperti saat jalan mulai mengalami kemacetan akibat peningkatan kepadatan pada jam puncak. Dengan membedakan regime, perencana dapat merancang strategi pengendalian lalu lintas yang lebih adaptif, misalnya pengaturan sinyal adaptif atau pembatasan kendaraan di koridor tertentu.

4. Hubungan Fundamental dalam Konteks Perkotaan

Lalu lintas perkotaan memiliki kompleksitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan lalu lintas antar kota, sehingga penerapan hubungan fundamental arus, kecepatan, dan kepadatan menjadi lebih menantang. Berbeda dengan jalan bebas hambatan atau jalan antar kota yang relatif homogen, jalan perkotaan dipenuhi persimpangan, kegiatan samping jalan seperti parkir tepi jalan dan loading/unloading, serta interaksi antara berbagai moda transportasi mulai dari kendaraan pribadi, angkutan umum, sepeda, hingga pejalan kaki. Kondisi ini menyebabkan pola arus, kecepatan, dan kepadatan di perkotaan tidak selalu mengikuti model ideal yang diasumsikan dalam persamaan dasar lalu lintas atau model Greenshields, Greenberg, maupun Underwood.

Menurut Zhang *et al.* (2023), salah satu faktor yang membedakan lalu lintas perkotaan adalah pengaruh faktor non-teknis, seperti perilaku pengemudi, kepatuhan terhadap rambu dan sinyal, serta interaksi dengan angkutan umum yang sering berhenti di jalur utama. Contohnya, bus kota yang sering berhenti di halte dapat menurunkan kecepatan kendaraan di belakangnya dan memicu fluktuasi arus yang tidak linier. Selain itu, kebijakan lalu lintas, seperti pengaturan jalur satu arah, pembatasan parkir, atau zona rendah emisi, juga memengaruhi hubungan fundamental secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa analisis sederhana berbasis model teoretis saja tidak cukup untuk merepresentasikan kondisi perkotaan.

Pendekatan berbasis data lapangan dan pemodelan adaptif menjadi sangat penting. Penggunaan sensor real-time, kamera CCTV, dan data GPS kendaraan memungkinkan perhitungan arus, kecepatan, dan kepadatan secara dinamis, sehingga model hubungan fundamental dapat diperbarui sesuai kondisi nyata. Metode ini juga memungkinkan penerapan simulasi mikroskopik untuk mengevaluasi skenario lalu lintas

perkotaan, seperti efek penutupan ruas jalan, perubahan sinyal, atau integrasi moda transportasi baru.

5. Peran Hubungan Fundamental dalam Rekayasa Transportasi

Hubungan fundamental lalu lintas berperan strategis dalam rekayasa transportasi karena menjadi dasar untuk memahami dan mengelola perilaku sistem lalu lintas secara keseluruhan. Pertama, hubungan ini memungkinkan penentuan kapasitas jalan dan tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*), yang menjadi indikator utama kinerja jaringan jalan. Dengan mengetahui bagaimana arus, kecepatan, dan kepadatan saling terkait, perencana dapat mengidentifikasi titik jenuh dan merancang strategi untuk menjaga kelancaran lalu lintas.

Kedua, hubungan fundamental digunakan untuk mengevaluasi dampak perubahan geometri jalan atau pengaturan lalu lintas. Misalnya, penambahan jalur, pemasangan rambu baru, atau penerapan sistem satu arah dapat dianalisis dampaknya terhadap arus dan kepadatan menggunakan model hubungan fundamental, sehingga keputusan rekayasa didasarkan pada data dan prediksi kinerja yang terukur.

Ketiga, hubungan ini menjadi fondasi bagi simulasi lalu lintas dan implementasi *Intelligent Transportation Systems* (ITS). Sistem ITS modern, seperti sinyal adaptif, pemantauan arus real-time, dan manajemen insiden, memanfaatkan model arus–kecepatan–kepadatan untuk memprediksi kondisi lalu lintas dan mengoptimalkan pengaturan sinyal maupun alokasi jalur. Dengan demikian, hubungan fundamental tidak hanya bersifat teoretis, tetapi juga aplikatif dalam pengelolaan jaringan jalan secara dinamis.

Keempat, pemahaman hubungan fundamental mendukung perumusan kebijakan manajemen permintaan transportasi, seperti pembatasan kendaraan pribadi, tarif parkir progresif, atau prioritas angkutan umum. Dengan mengetahui batas kapasitas dan respons sistem terhadap peningkatan arus, kebijakan dapat dirancang untuk mengurangi kemacetan dan meningkatkan efisiensi perjalanan secara keseluruhan.

C. Karakteristik Pengemudi dan Kendaraan

Karakteristik pengemudi dan kendaraan merupakan faktor penting yang memengaruhi perilaku lalu lintas, kapasitas jalan, tingkat pelayanan, serta keselamatan transportasi. Berbeda dengan pendekatan

makroskopik yang menekankan hubungan arus, kecepatan, dan kepadatan, kajian karakteristik pengemudi dan kendaraan berfokus pada unsur mikro yang membentuk dinamika lalu lintas secara keseluruhan. Menurut Treiber dan Kesting (2022), variasi perilaku individu pengemudi dan perbedaan karakteristik kendaraan menjadi penyebab utama ketidakstabilan arus lalu lintas, terutama di kawasan perkotaan yang heterogen.

1. Karakteristik Pengemudi

Karakteristik pengemudi merupakan salah satu faktor kunci dalam sistem transportasi perkotaan karena perilaku dan kemampuan manusia secara langsung memengaruhi kinerja jaringan jalan dan keselamatan lalu lintas. Secara umum, karakteristik ini dapat dibagi menjadi tiga aspek utama: fisiologis dan demografis, persepsi dan waktu reaksi, serta perilaku mengemudi.

Aspek fisiologis dan demografis mencakup usia, kondisi kesehatan, kemampuan motorik, serta pengalaman mengemudi. Pengemudi usia lanjut cenderung memiliki waktu reaksi yang lebih lambat dan kesulitan dalam pengambilan keputusan cepat, terutama di lingkungan lalu lintas yang kompleks seperti simpang bersinyal (AASHTO, 2018). Sebaliknya, pengemudi muda mungkin lebih cepat dalam merespons situasi, namun sering menunjukkan perilaku berisiko, seperti melampaui batas kecepatan. Karakteristik demografis lain, termasuk jenis kelamin dan pengalaman mengemudi, juga memengaruhi perilaku. Studi WHO (2023) menunjukkan bahwa pengemudi dengan pengalaman rendah memiliki tingkat kecelakaan lebih tinggi dibanding pengemudi berpengalaman, terutama di kawasan perkotaan padat.

Persepsi pengemudi dan waktu reaksi merupakan faktor penting dalam interaksi dengan jalan dan pengguna lain. Persepsi terhadap kondisi jalan, rambu, sinyal lalu lintas, dan kendaraan lain menentukan respons pengemudi dalam situasi tertentu. Waktu reaksi, yaitu selang waktu antara stimulus dan respons, biasanya berkisar antara 1,0 hingga 2,5 detik, tergantung pada tingkat kewaspadaan dan kompleksitas situasi (Garber & Hoel, 2020). Dalam konteks perkotaan yang padat, waktu reaksi yang lebih panjang dapat menyebabkan gangguan arus, antrean panjang, dan meningkatkan risiko kecelakaan beruntun.

Perilaku mengemudi mencakup pengaturan kecepatan, jarak antar kendaraan (*headway*), manuver mendahului, dan kepatuhan

terhadap peraturan lalu lintas. Variasi gaya mengemudi agresif, defensif, atau moderat mempengaruhi kecepatan kendaraan dan stabilitas arus lalu lintas (May, 2019). Di kota-kota berkembang, perilaku mengemudi juga dipengaruhi faktor sosial dan budaya. Penelitian oleh Zhang *et al.* (2022) menunjukkan bahwa rendahnya kepatuhan terhadap marka dan rambu lalu lintas dapat menurunkan kapasitas efektif jalan hingga 20–30%, meskipun kapasitas teoritis jalan tinggi.

2. Karakteristik Kendaraan

Karakteristik kendaraan merupakan salah satu elemen penting dalam sistem transportasi perkotaan karena setiap jenis kendaraan memiliki dimensi, kinerja, dan teknologi yang berbeda, sehingga memengaruhi interaksi antar kendaraan dan kinerja jaringan jalan secara keseluruhan.

Aspek pertama yang perlu diperhatikan adalah dimensi dan klasifikasi kendaraan. Di perkotaan, kendaraan yang beroperasi sangat beragam, mulai dari sepeda motor, mobil penumpang, bus, hingga truk berat. Perbedaan panjang, lebar, dan tinggi kendaraan menentukan ruang yang dibutuhkan di jalan, serta memengaruhi kapasitas arus lalu lintas. Untuk menormalkan pengaruh berbagai jenis kendaraan, analisis lalu lintas menggunakan konsep satuan mobil penumpang (smp atau Passenger Car Unit/PCU), sehingga arus lalu lintas dapat dibandingkan secara konsisten (MKJI, 1997; PKJI, 2023). Vuchic (2017) membahas bahwa tingginya proporsi sepeda motor di kota-kota Asia membuat arus lalu lintas menjadi sangat heterogen, sehingga pendekatan analisis konvensional perlu disesuaikan dengan karakteristik lokal.

Aspek kedua adalah karakteristik kinerja kendaraan, yang meliputi kemampuan akselerasi, deselerasi, kecepatan maksimum, dan kemampuan manuver. Kendaraan dengan akselerasi rendah, seperti bus atau truk, cenderung memperlambat arus lalu lintas, terutama di persimpangan atau pada tanjakan. Perbedaan kinerja ini juga menjadi penyebab terbentuknya gelombang kejutan lalu lintas (*traffic shockwaves*), yang dapat menimbulkan kemacetan meskipun tidak ada hambatan fisik atau kecelakaan (Treiber & Kesting, 2022). Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik kinerja kendaraan penting dalam perancangan geometri jalan, pengaturan sinyal, dan simulasi lalu lintas perkotaan.

Aspek ketiga adalah kondisi teknis dan teknologi kendaraan. Kelayakan kendaraan, termasuk sistem pengereman, pencahayaan, dan

perawatan mesin, sangat memengaruhi keselamatan dan kelancaran arus lalu lintas. Selain itu, perkembangan teknologi kendaraan, seperti sistem bantuan pengemudi (*Advanced Driver Assistance Systems/ADAS*) dan fitur semi-otonom, mulai mengubah interaksi antar kendaraan di jalan perkotaan. Litman (2023) menekankan bahwa kendaraan dengan teknologi ADAS dapat meningkatkan stabilitas arus lalu lintas dan menurunkan risiko kecelakaan, namun juga menimbulkan tantangan integrasi dengan kendaraan konvensional yang masih dominan.

3. Interaksi Pengemudi dan Kendaraan dalam Lalu Lintas Perkotaan

Interaksi antara pengemudi dan kendaraan merupakan faktor kunci yang membentuk dinamika lalu lintas perkotaan. Setiap pengemudi memiliki karakteristik fisiologis, psikologis, dan perilaku mengemudi yang unik, sedangkan setiap kendaraan memiliki dimensi, kemampuan akselerasi, deselerasi, dan fitur teknis yang berbeda. Kombinasi dari variabilitas ini menghasilkan fluktuasi kecepatan, jarak antar kendaraan, dan pola arus yang tidak stabil. Misalnya, pengemudi dengan waktu reaksi panjang atau perilaku agresif dapat memperburuk gangguan arus, sementara kendaraan berperforma rendah seperti bus atau truk dapat menimbulkan hambatan lokal pada arus kendaraan lain, terutama di persimpangan atau tanjakan.

Pada kondisi lalu lintas padat, interaksi ini menjadi lebih kompleks. Gelombang kejutan lalu lintas (*traffic shockwaves*) dapat muncul akibat perbedaan kemampuan kendaraan dan respons pengemudi terhadap kondisi di sekitarnya, yang sering berujung pada kemacetan meskipun tidak ada hambatan fisik atau kecelakaan. Selain itu, interaksi antara kendaraan bermotor dan moda tidak bermotor, seperti sepeda dan pejalan kaki, juga memengaruhi kecepatan operasi dan keselamatan, terutama di kawasan perkotaan dengan kepadatan tinggi dan fasilitas yang tidak sepenuhnya terpisah (Pucher & Buehler, 2021).

Ortúzar dan Willumsen (2021) menekankan pentingnya pemahaman mendalam terhadap karakteristik pengemudi dan kendaraan dalam pengembangan model lalu lintas mikroskopik. Model ini memungkinkan simulasi perilaku individual kendaraan dan pengemudi, sehingga setiap skenario rekayasa lalu lintas, seperti pengaturan sinyal, perubahan geometri jalan, atau kebijakan pembatasan kendaraan, dapat dianalisis secara realistis. Dengan pendekatan ini, perencana transportasi

perkotaan dapat mengevaluasi dampak perubahan kebijakan atau infrastruktur terhadap kapasitas jalan, tingkat pelayanan, dan keselamatan, serta merancang strategi manajemen lalu lintas yang adaptif dan efektif.

4. Implikasi dalam Rekayasa Transportasi

Kajian karakteristik pengemudi dan kendaraan memiliki implikasi yang sangat penting dalam rekayasa transportasi perkotaan. Pertama, aspek ini menjadi dasar perancangan geometrik jalan dan simpang yang aman, termasuk panjang percepatan dan perlambatan, radius tikungan, lebar jalur, dan desain persimpangan, sehingga mampu mengakomodasi variasi kemampuan pengemudi dan kinerja kendaraan (Garber & Hoel, 2020). Kedua, pemahaman karakteristik pengemudi dan kendaraan memungkinkan penentuan kapasitas jalan yang lebih realistis serta faktor penyesuaian arus lalu lintas, terutama di kawasan dengan lalu lintas heterogen seperti perkotaan Asia yang didominasi sepeda motor dan angkutan umum (Vuchic, 2017; PKJI, 2023).

Ketiga, kajian ini mendukung pengembangan kebijakan keselamatan lalu lintas yang lebih efektif. Dengan mengetahui perilaku pengemudi, waktu reaksi, dan interaksi kendaraan, perencana dapat merumuskan strategi pengendalian kecepatan, penempatan rambu dan marka jalan, serta kampanye keselamatan yang tepat sasaran, sehingga risiko kecelakaan dapat diminimalkan (WHO, 2023). Keempat, implikasi kajian ini juga terlihat pada implementasi teknologi transportasi cerdas (ITS) dan kendaraan otonom. Data karakteristik pengemudi dan kendaraan menjadi input penting dalam algoritma sistem pengaturan sinyal adaptif, manajemen arus real-time, dan integrasi kendaraan semi-otonom dengan lalu lintas konvensional (Litman, 2023; Treiber & Kesting, 2022).

Dengan meningkatnya kompleksitas lalu lintas perkotaan, keberagaman moda transportasi, serta interaksi antara kendaraan bermotor dan tidak bermotor, pendekatan rekayasa transportasi modern menuntut perspektif holistik. Perencanaan tidak lagi hanya berfokus pada dimensi fisik jalan, tetapi juga mempertimbangkan perilaku manusia, kemampuan kendaraan, dan interaksi keduanya dalam sistem. Hal ini memungkinkan pengembangan solusi yang tidak hanya meningkatkan kapasitas dan efisiensi, tetapi juga keselamatan,

kenyamanan, dan keberlanjutan sistem transportasi perkotaan secara keseluruhan.

D. Metode Pengumpulan Data Lalu Lintas

Pengumpulan data lalu lintas merupakan tahap krusial dalam rekayasa transportasi karena seluruh analisis, perencanaan, dan pengambilan keputusan sangat bergantung pada kualitas dan keakuratan data yang diperoleh. Data lalu lintas digunakan untuk memahami karakteristik arus kendaraan, mengevaluasi kinerja jalan, menentukan kapasitas dan tingkat pelayanan, serta merumuskan kebijakan manajemen transportasi. Menurut Garber dan Hoel (2020), kesalahan dalam pengumpulan data dapat menghasilkan analisis yang bias dan rekomendasi rekayasa yang tidak efektif, sehingga metode pengumpulan data harus dirancang secara sistematis dan sesuai dengan tujuan studi.

1. Jenis Data Lalu Lintas

Data lalu lintas merupakan elemen fundamental dalam rekayasa transportasi perkotaan karena menjadi dasar analisis, perencanaan, dan evaluasi kinerja sistem. Secara umum, data lalu lintas dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis utama. Pertama, data volume lalu lintas, yang mencakup jumlah kendaraan yang melewati ruas jalan atau simpang tertentu dalam satuan waktu tertentu, biasanya dibedakan berdasarkan jenis kendaraan. Data ini menjadi indikator permintaan perjalanan dan digunakan dalam perencanaan kapasitas jalan serta pengaturan operasi lalu lintas. Kedua, data kecepatan dan waktu tempuh, yang mengukur laju pergerakan kendaraan di suatu ruas atau koridor. Data ini penting untuk menilai kinerja operasional jalan, kenyamanan pengguna, dan tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*).

Ketiga, data kepadatan dan antrean, yang menunjukkan jumlah kendaraan per satuan panjang jalan atau panjang antrean di simpang dan titik kritis. Data ini menjadi indikator langsung kemacetan dan membantu dalam evaluasi titik-titik kemacetan serta efektivitas pengendalian arus. Keempat, data klasifikasi kendaraan, yang mencatat proporsi jenis kendaraan seperti mobil penumpang, sepeda motor, bus, dan kendaraan berat. Data ini digunakan untuk konversi satuan mobil penumpang (PCU), analisis kapasitas jalan, dan perhitungan dampak lalu lintas terhadap infrastruktur. Terakhir, data kecelakaan lalu lintas, yang

mencakup frekuensi, lokasi, jenis, dan penyebab kecelakaan. Data ini menjadi dasar perumusan kebijakan keselamatan jalan, desain geometrik, dan program mitigasi risiko (Ortúzar & Willumsen, 2021).

Pemilihan jenis data yang tepat sangat bergantung pada tujuan analisis. Untuk perencanaan jangka panjang, data AADT (*Average Annual Daily Traffic*) dan klasifikasi kendaraan menjadi kunci. Untuk evaluasi operasional, kecepatan, waktu tempuh, dan antrean menjadi fokus utama. Sementara itu, manajemen lalu lintas real-time memerlukan data volume, kecepatan, dan kepadatan secara kontinu yang diperoleh dari sensor, kamera, atau sistem transportasi cerdas. Dengan demikian, pengumpulan, pengolahan, dan interpretasi data lalu lintas yang akurat menjadi dasar bagi pengambilan keputusan yang efektif dalam perencanaan, pengendalian, dan pengembangan sistem transportasi perkotaan.

2. Metode Pengumpulan Data Secara Manual

Metode pengumpulan data lalu lintas secara manual merupakan pendekatan tradisional yang hingga kini masih digunakan, terutama pada studi berskala kecil hingga menengah atau di lokasi-lokasi yang belum memiliki infrastruktur sensor modern. Salah satu metode utama adalah pencacahan lalu lintas manual, di mana enumerator mencatat jumlah kendaraan yang melewati suatu titik tertentu dalam interval waktu tertentu. Pencacahan ini bisa mencakup volume kendaraan, klasifikasi jenis kendaraan, serta pergerakan belok di simpang. Menurut PKJI (2023), pencacahan manual memiliki keunggulan dalam memperoleh data yang detail dan spesifik sesuai kebutuhan penelitian, misalnya perbedaan jenis kendaraan dan arah pergerakan. Namun, metode ini memiliki keterbatasan, seperti memerlukan waktu yang cukup lama, biaya tenaga kerja yang tinggi, serta potensi kesalahan akibat human error, terutama pada kondisi lalu lintas padat atau kompleks.

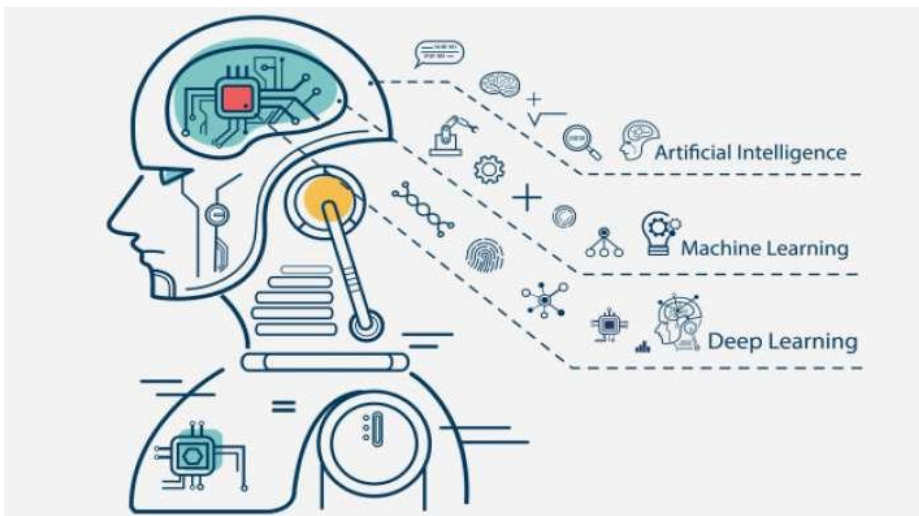
Survei kecepatan dan waktu tempuh juga dapat dilakukan secara manual. Metode ini biasanya menggunakan pendekatan floating car, di mana petugas mengendarai kendaraan tertentu melalui ruas jalan yang diteliti sambil mencatat waktu tempuh dan kecepatan rata-rata. Alternatif lain adalah pengukuran waktu tempuh menggunakan stopwatch di beberapa titik, kemudian dihitung kecepatan rata-rata kendaraan yang melewati segmen jalan tersebut. Garber dan Hoel (2020) menegaskan bahwa metode manual ini tetap relevan untuk studi awal atau

pengumpulan data sementara, meskipun cakupan sampelnya terbatas dan akurasi lebih rendah dibandingkan metode otomatis.

3. Metode Pengumpulan Data Secara Otomatis

Metode pengumpulan data lalu lintas secara otomatis telah menjadi pilihan utama dalam rekayasa transportasi modern karena mampu menghasilkan data dalam jumlah besar, dengan tingkat akurasi tinggi dan kontinuitas yang lebih baik dibandingkan metode manual. Salah satu metode utama adalah penggunaan alat pencacah otomatis (*Automatic Traffic Counter*), seperti loop detector, pneumatic tube, dan radar sensor. Perangkat ini dapat mengukur volume kendaraan, kecepatan, dan klasifikasi jenis kendaraan secara kontinu tanpa keterlibatan manusia. Menurut May (2019), alat otomatis sangat efektif untuk pengumpulan data jangka panjang, analisis pola arus lalu lintas, serta identifikasi tren musiman dan harian, sehingga mendukung perencanaan dan manajemen jaringan jalan secara lebih akurat.

Gambar 1. Kecerdasan Buatan



Sumber: *Codepolitan*

Kamera CCTV yang dilengkapi dengan teknologi *video analytics* dan kecerdasan buatan (AI) semakin banyak diterapkan. Sistem ini mampu mengumpulkan data real-time mengenai volume, kecepatan, kepadatan, dan perilaku lalu lintas, termasuk deteksi pelanggaran, antrian di simpang, dan interaksi antar moda. Studi oleh Li *et al.* (2022) menunjukkan bahwa integrasi AI dalam analisis citra video dapat

meningkatkan akurasi penghitungan kendaraan hingga mendekati metode manual yang paling teliti, sambil memungkinkan pemantauan terus-menerus di area luas dengan biaya operasional yang lebih rendah dalam jangka panjang.

Penggunaan metode otomatis ini juga mendukung implementasi sistem transportasi cerdas (*Intelligent Transportation Systems/ITS*), karena data yang diperoleh dapat langsung diolah untuk pengaturan sinyal adaptif, manajemen kemacetan, dan peringatan dini terhadap kejadian abnormal di jalan. Dengan demikian, metode pengumpulan data otomatis tidak hanya meningkatkan efisiensi pengumpulan informasi, tetapi juga menyediakan dasar yang kuat bagi analisis kinerja jaringan, evaluasi kebijakan transportasi, dan perencanaan intervensi berbasis bukti dalam sistem transportasi perkotaan modern.

4. Pengumpulan Data Berbasis Teknologi Informasi

Perkembangan teknologi informasi telah merevolusi cara pengumpulan data lalu lintas, memungkinkan pemantauan yang lebih dinamis, real-time, dan mencakup area yang luas. Salah satu pendekatan utama adalah penggunaan data GPS dan *Floating Car Data* (FCD), yang diperoleh dari kendaraan, aplikasi navigasi, atau ponsel pintar. Data ini memberikan informasi mengenai kecepatan, waktu tempuh, rute perjalanan, dan pola perjalanan pengguna. Menurut Zheng *et al.* (2021), penggunaan FCD memungkinkan pengawasan kinerja jaringan jalan perkotaan secara real-time, memberikan kemampuan untuk mendeteksi kemacetan, gangguan, dan tren perjalanan harian maupun musiman dengan cakupan wilayah yang luas, tanpa memerlukan pengawasan fisik di setiap ruas jalan.

Konsep *big data* dan data crowdsourcing juga semakin banyak digunakan. Platform transportasi daring, aplikasi ride-hailing, serta media sosial menghasilkan volume data yang sangat besar mengenai lokasi kendaraan, kondisi arus lalu lintas, dan pengalaman pengguna. Litman (2023) menekankan bahwa data crowdsourcing dapat menjadi pelengkap penting bagi metode pengumpulan data tradisional atau otomatis, karena menyediakan perspektif pengguna dan informasi terkini yang sulit diperoleh melalui sensor fisik. Namun, data berbasis partisipasi ini memerlukan pengolahan, pembersihan, dan validasi yang cermat untuk mengurangi bias, kesalahan pengukuran, dan redundansi.

5. Metode Survei Pendukung Lalu Lintas

Survei pendukung lalu lintas berperan penting dalam memahami karakteristik sistem transportasi perkotaan secara menyeluruh, karena data operasional saja sering tidak cukup untuk menangkap pola perjalanan dan perilaku pengguna. Salah satu metode utama adalah survei asal-tujuan (*Origin–Destination/OD survey*), yang bertujuan mengidentifikasi dari mana perjalanan dimulai, tujuan akhir, dan rute yang ditempuh. Informasi ini menjadi dasar dalam perencanaan jaringan jalan, desain angkutan umum, serta evaluasi distribusi permintaan perjalanan. Vuchic (2017) menekankan bahwa pemahaman pola perjalanan ini membantu perencana dalam menyesuaikan kapasitas jaringan dengan kebutuhan nyata pengguna.

Survei parkir menjadi instrumen penting untuk menilai kebutuhan ruang parkir, perilaku parkir, serta dampaknya terhadap arus lalu lintas. Parkir yang tidak terkelola dengan baik dapat menyebabkan kemacetan lokal dan menurunkan kapasitas efektif jalan, sehingga data survei parkir digunakan untuk merancang kebijakan pengendalian permintaan, penetapan tarif parkir, dan pengaturan zona parkir.

Survei pejalan kaki dan pesepeda juga semakin relevan dalam konteks transportasi berkelanjutan. Data ini mencakup volume pengguna, rute yang dipilih, dan tingkat kenyamanan serta keselamatan fasilitas pejalan kaki atau jalur sepeda. Informasi ini mendukung desain trotoar, jalur sepeda, dan integrasi moda tidak bermotor dengan angkutan umum, sesuai prinsip *complete streets* dan *Transit Oriented Development (TOD)*.

6. Tantangan dan Implikasi dalam Pengumpulan Data Lalu Lintas

Pengumpulan data lalu lintas merupakan elemen krusial dalam rekayasa transportasi perkotaan, tetapi meskipun teknologi terus berkembang, proses ini masih menghadapi berbagai tantangan signifikan. Salah satu kendala utama adalah keterbatasan anggaran, terutama bagi pemerintah daerah atau proyek skala kecil, yang membatasi kemampuan untuk memasang sensor otomatis, kamera cerdas, atau sistem pemantauan real-time. Selain itu, isu privasi menjadi perhatian penting, terutama ketika pengumpulan data memanfaatkan GPS kendaraan, aplikasi ponsel pintar, atau platform crowdsourcing. Perlindungan data pribadi harus dijamin agar pengumpulan informasi

tidak menimbulkan risiko bagi pengguna jalan. Faktor lain adalah kesenjangan teknologi antar wilayah; kota besar mungkin memiliki infrastruktur dan sumber daya untuk mengimplementasikan sistem canggih, sementara kota menengah atau kecil masih bergantung pada metode manual atau semi-otomatis.

Ortúzar dan Willumsen (2021) menekankan bahwa pemilihan metode pengumpulan data harus memperhatikan keseimbangan antara akurasi, biaya, cakupan wilayah, dan tujuan studi. Misalnya, untuk analisis operasional jangka pendek, data real-time dari CCTV atau floating car data mungkin lebih relevan, sedangkan untuk perencanaan strategis jangka panjang, data volume tahunan dan survei OD lebih penting. Dengan demikian, pendekatan hibrida yang menggabungkan metode manual, otomatis, dan berbasis TI sering kali menjadi solusi optimal.

Pada konteks rekayasa transportasi modern, data lalu lintas tidak lagi sekadar digunakan untuk analisis statis atau evaluasi performa jalan. Data ini menjadi fondasi bagi pengembangan sistem transportasi cerdas (*Intelligent Transportation Systems/ITS*), manajemen lalu lintas adaptif, dan perencanaan transportasi berbasis bukti (*evidence-based planning*). Contohnya, informasi kepadatan real-time dapat digunakan untuk mengatur sinyal lalu lintas adaptif, memprediksi kemacetan, dan mengoptimalkan rute angkutan umum. Selain itu, data historis membantu perencana memahami tren perjalanan, mengevaluasi efektivitas kebijakan transportasi, serta merancang intervensi yang lebih tepat sasaran dan berkelanjutan.



BAB IV

KAPASITAS DAN TINGKAT PELAYANAN JALAN

Kapasitas dan tingkat pelayanan jalan merupakan konsep kunci dalam rekayasa transportasi yang digunakan untuk menilai kemampuan suatu ruas jalan atau simpang dalam melayani arus lalu lintas secara aman, lancar, dan efisien. Kapasitas menggambarkan batas maksimum kendaraan yang dapat dilayani dalam kondisi tertentu, sedangkan tingkat pelayanan (*Level of Service*) mencerminkan kualitas operasional yang dirasakan oleh pengguna jalan berdasarkan indikator seperti kecepatan, kepadatan, dan tundaan. Pemahaman terhadap kedua konsep ini menjadi dasar penting dalam perencanaan, perancangan, dan evaluasi kinerja infrastruktur jalan, serta dalam penentuan kebutuhan peningkatan kapasitas atau penerapan strategi manajemen lalu lintas guna mendukung sistem transportasi perkotaan yang berkelanjutan dan responsif terhadap pertumbuhan mobilitas.

A. Konsep Kapasitas Jalan

Kapasitas jalan merupakan salah satu konsep paling fundamental dalam rekayasa lalu lintas karena menjadi dasar dalam menilai kemampuan suatu fasilitas jalan untuk melayani pergerakan lalu lintas. Secara umum, kapasitas jalan didefinisikan sebagai arus maksimum kendaraan yang dapat dilayani oleh suatu ruas jalan dalam kondisi tertentu selama periode waktu tertentu, biasanya satu jam, dan dinyatakan dalam satuan kendaraan per jam atau satuan mobil penumpang per jam (smp/jam atau pcu/hour). Definisi ini menegaskan bahwa kapasitas bukan hanya angka teknis, tetapi representasi dari interaksi kompleks antara kendaraan, pengemudi, dan kondisi jalan (Garber & Hoel, 2020).

Pada konteks perkotaan, kapasitas jalan menjadi parameter kritis karena keterbatasan ruang dan tingginya intensitas aktivitas. Vuchic (2017) menekankan bahwa kapasitas jalan perkotaan jarang sekali mencapai nilai ideal akibat adanya persimpangan, aktivitas samping jalan, pejalan kaki, serta campuran moda transportasi. Oleh karena itu, pemahaman konsep kapasitas harus selalu dikaitkan dengan kondisi operasional nyata di lapangan.

1. Kapasitas sebagai Konsep Dinamis

Berbeda dengan anggapan awam yang memandang kapasitas sebagai nilai tetap, dalam rekayasa transportasi kapasitas dipahami sebagai konsep yang bersifat dinamis dan kontekstual. Kapasitas suatu ruas jalan tidak hanya ditentukan oleh karakteristik fisik jalan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional dan lingkungan yang berubah dari waktu ke waktu. Menurut May (2019), kapasitas jalan pada jam puncak pagi dapat berbeda dengan kapasitas pada jam non-puncak karena adanya variasi komposisi lalu lintas, perilaku pengemudi, serta tingkat gangguan samping seperti aktivitas parkir, pejalan kaki, dan kendaraan keluar–masuk akses samping jalan.

Kondisi eksternal juga berperan besar dalam menentukan kapasitas efektif jalan. Cuaca buruk, kecelakaan lalu lintas, pekerjaan jalan, maupun perubahan pengaturan lalu lintas (misalnya rekayasa satu arah atau pembatasan lajur) dapat menurunkan kapasitas yang dapat dilayani oleh suatu ruas. TRB (2022) menjelaskan bahwa dalam kondisi hujan lebat, jarak pandang pengemudi menurun dan perilaku mengemudi menjadi lebih hati-hati, sehingga kecepatan operasi berkurang dan jarak antar kendaraan meningkat. Akibatnya, jumlah kendaraan yang dapat dilayani per satuan waktu menjadi lebih rendah dibandingkan kondisi cuaca cerah.

Pada konteks perkotaan, sifat dinamis kapasitas semakin menonjol akibat tingginya interaksi antar pengguna jalan dan kompleksitas lingkungan. Keberadaan angkutan umum berhenti di tepi jalan, kendaraan tidak bermotor, serta aktivitas komersial di sepanjang koridor jalan dapat menyebabkan fluktuasi kapasitas yang signifikan bahkan dalam rentang waktu yang singkat. Oleh karena itu, pendekatan perencanaan dan manajemen lalu lintas modern tidak lagi mengandalkan satu nilai kapasitas statis, melainkan menggunakan konsep kapasitas

efektif dan faktor penyesuaian yang mencerminkan kondisi aktual di lapangan.

2. Kapasitas Teoritis dan Kapasitas Praktis

Pada kajian rekayasa transportasi, kapasitas jalan tidak dipahami sebagai satu nilai tunggal, melainkan dibedakan menjadi kapasitas teoritis dan kapasitas praktis. Perbedaan ini penting untuk menjembatani antara konsep ideal dalam teori lalu lintas dan kondisi nyata yang dihadapi di lapangan. Kapasitas teoritis menggambarkan kemampuan maksimum suatu ruas jalan dalam melayani arus lalu lintas apabila seluruh kondisi berada pada keadaan ideal. Kondisi tersebut meliputi geometri jalan yang sesuai standar perencanaan, permukaan jalan yang baik, tidak adanya hambatan samping, pengemudi yang homogen dan disiplin, serta cuaca yang mendukung. Menurut Garber dan Hoel (2020), kapasitas teoritis bersifat konseptual dan lebih banyak digunakan sebagai acuan atau batas atas (*upper limit*) dalam analisis lalu lintas, namun sangat jarang tercapai dalam praktik, terutama di lingkungan perkotaan yang kompleks.

Kapasitas praktis merupakan kapasitas yang benar-benar dapat dicapai dan dipertahankan dalam kondisi operasional sehari-hari. Kapasitas ini telah mempertimbangkan berbagai faktor pembatas yang umum dijumpai di lapangan, seperti hambatan samping, variasi perilaku pengemudi, campuran jenis kendaraan, kondisi lingkungan, serta pengaruh persimpangan dan aktivitas tepi jalan. PKJI (2023) menegaskan bahwa kapasitas praktis lebih relevan digunakan dalam perencanaan, evaluasi, dan pengelolaan lalu lintas karena mencerminkan kondisi aktual yang dialami oleh pengguna jalan. Dengan menggunakan kapasitas praktis, perencana dapat memperoleh gambaran yang lebih realistis mengenai kinerja jalan dan potensi terjadinya kemacetan.

Perbedaan antara kapasitas teoritis dan kapasitas praktis sering kali sangat signifikan, khususnya di kota-kota besar dengan tingkat aktivitas dan hambatan samping yang tinggi. Parkir di tepi jalan, pergerakan pejalan kaki, keberadaan angkutan umum berhenti sembarang, serta akses keluar-masuk bangunan komersial dapat menurunkan kapasitas efektif jalan jauh di bawah kapasitas teoritisnya. Oleh karena itu, pemahaman yang tepat mengenai kedua jenis kapasitas ini menjadi kunci dalam rekayasa transportasi, agar solusi yang

dirancang tidak hanya optimal secara teoritis, tetapi juga aplikatif dan efektif dalam kondisi nyata perkotaan.

3. Kapasitas Ruas Jalan

Kapasitas ruas jalan (*link capacity*) didefinisikan sebagai kemampuan maksimum suatu segmen jalan di antara dua titik gangguan utama, seperti persimpangan bersinyal atau tidak bersinyal, dalam melayani arus lalu lintas per satuan waktu. Konsep ini sangat penting dalam rekayasa transportasi karena ruas jalan merupakan elemen dasar jaringan jalan perkotaan yang secara langsung memengaruhi kelancaran pergerakan lalu lintas. Kapasitas ruas jalan mencerminkan seberapa besar arus kendaraan yang dapat dilayani secara stabil sebelum terjadi penurunan kinerja berupa penurunan kecepatan dan peningkatan kepadatan.

Menurut *Highway Capacity Manual* (TRB, 2022), kapasitas ruas jalan dipengaruhi oleh karakteristik geometrik dan operasional. Faktor geometrik utama meliputi jumlah lajur, lebar lajur, kondisi permukaan jalan, keberadaan median atau pemisahan arah lalu lintas, serta keberadaan bahu jalan. Ruas jalan dengan jumlah lajur lebih banyak dan lebar lajur yang memadai umumnya memiliki kapasitas lebih tinggi karena menyediakan ruang gerak yang lebih besar dan mengurangi konflik antar kendaraan. Kondisi permukaan jalan yang baik juga memungkinkan kendaraan bergerak dengan kecepatan yang lebih stabil, sehingga kapasitas efektif dapat dipertahankan.

Peningkatan jumlah lajur tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kapasitas. Dalam sistem perkotaan, kinerja ruas jalan sangat dipengaruhi oleh kondisi di ujung ruas, khususnya persimpangan. Apabila simpang memiliki kapasitas terbatas atau pengaturan sinyal yang tidak optimal, maka ruas jalan di depannya akan mengalami antrean panjang, sehingga kapasitas efektif ruas menjadi lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas ruas jalan tidak dapat dianalisis secara terpisah, melainkan harus dilihat sebagai bagian dari sistem jaringan jalan secara keseluruhan.

4. Kapasitas Simpang sebagai Pembatas Jaringan

Pada sistem jaringan jalan perkotaan, kapasitas simpang sering kali menjadi faktor pembatas utama kinerja lalu lintas, bahkan lebih dominan dibandingkan kapasitas ruas jalan. Simpang merupakan titik

temu berbagai arus lalu lintas dengan arah dan tujuan yang berbeda, sehingga memunculkan konflik pergerakan seperti konflik silang, gabungan, dan pisah. Vuchic (2017) menegaskan bahwa simpang berfungsi sebagai *bottleneck* dalam jaringan transportasi perkotaan karena gangguan kecil pada simpang dapat berdampak besar terhadap kelancaran lalu lintas di ruas-ruas jalan yang terhubung.

Kapasitas simpang sangat dipengaruhi oleh jenis simpang, apakah simpang bersinyal, simpang tak bersinyal, bundaran, atau simpang dengan pengaturan khusus. Pada simpang bersinyal, kapasitas ditentukan oleh pembagian waktu hijau, panjang siklus sinyal, jumlah lajur pendekat, serta tingkat kejenuhan arus lalu lintas. Menurut *Highway Capacity Manual* (TRB, 2022), pengaturan waktu sinyal yang tidak seimbang dapat menyebabkan antrean panjang pada satu pendekat meskipun pendekat lainnya relatif lancar. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas simpang tidak hanya ditentukan oleh faktor fisik, tetapi juga oleh strategi pengendalian lalu lintas.

Pada simpang tak bersinyal, kapasitas sangat bergantung pada volume konflik dan perilaku pengemudi, khususnya dalam hal pemberian prioritas dan penerimaan celah (*gap acceptance*). Di lingkungan perkotaan dengan lalu lintas heterogen dan kepatuhan rendah terhadap aturan, kapasitas simpang tak bersinyal cenderung lebih rendah dan tidak stabil. PKJI (2023) mencatat bahwa dominasi sepeda motor dan tingginya aktivitas samping jalan memperbesar konflik di simpang, sehingga menurunkan kapasitas efektif dan meningkatkan risiko kemacetan serta kecelakaan.

5. Kapasitas dan Hubungan Fundamental Lalu Lintas

Kapasitas jalan tidak dapat dipisahkan dari hubungan fundamental lalu lintas yang mengaitkan arus (*flow*), kecepatan (*speed*), dan kepadatan (*density*). Dalam teori lalu lintas, kapasitas didefinisikan sebagai kondisi ketika arus mencapai nilai maksimum, yang terjadi pada kombinasi kecepatan dan kepadatan tertentu. Pada titik ini, sistem lalu lintas berada pada kondisi optimum secara matematis, namun secara operasional justru berada pada kondisi paling rentan. Treiber dan Kesting (2022) menjelaskan bahwa titik kapasitas merupakan keadaan metastabil, di mana gangguan kecil dapat dengan cepat mengubah kondisi lalu lintas dari arus stabil menjadi arus tidak stabil atau macet.

Hubungan ini dapat dipahami melalui diagram fundamental arus–kepadatan dan arus–kecepatan. Ketika kepadatan meningkat dari kondisi rendah, arus lalu lintas juga meningkat karena jumlah kendaraan bertambah meskipun kecepatan mulai menurun. Arus maksimum tercapai pada kepadatan kritis, yaitu titik transisi antara kondisi arus stabil dan tidak stabil. Pada kondisi ini, kecepatan masih cukup untuk mempertahankan arus tinggi, tetapi jarak antar kendaraan sudah sangat kecil. Akibatnya, setiap perubahan kecil seperti pengemudi mengerem mendadak, kendaraan lambat masuk ke arus, atau gangguan di persimpangan dapat menurunkan kecepatan secara lokal dan memicu efek berantai berupa antrean.

Fenomena ini menjelaskan mengapa kemacetan di kawasan perkotaan sering muncul secara tiba-tiba, khususnya pada jam puncak, meskipun tidak terjadi kecelakaan atau penyempitan jalan. Sedikit peningkatan kepadatan atau penurunan kecepatan pada kondisi mendekati kapasitas dapat menyebabkan penurunan arus yang signifikan, sebagaimana ditunjukkan dalam bagian menurun pada diagram arus–kepadatan. Kondisi ini sering disebut sebagai *capacity drop*, di mana kapasitas efektif jalan setelah terjadi kemacetan menjadi lebih rendah dibandingkan kapasitas sebelum kemacetan.

6. Peran Konsep Kapasitas dalam Rekayasa Transportasi

Konsep kapasitas jalan berperan yang sangat penting dalam rekayasa transportasi karena menjadi dasar dalam memahami kemampuan suatu fasilitas jalan dalam melayani arus lalu lintas secara aman dan efisien. Dengan memahami kapasitas, perencana dan insinyur transportasi dapat menilai apakah kinerja suatu ruas jalan atau simpang masih memadai atau telah melampaui batas kemampuan layanannya. Informasi ini menjadi landasan utama dalam menentukan kebutuhan peningkatan kapasitas, baik melalui pelebaran jalan, penambahan lajur, perbaikan geometrik, maupun melalui pendekatan non-fisik seperti manajemen lalu lintas dan pengendalian permintaan perjalanan.

Pada evaluasi kinerja operasional, kapasitas digunakan untuk membandingkan antara volume lalu lintas aktual dan kemampuan jalan dalam melayani arus tersebut. Rasio volume terhadap kapasitas (V/C ratio) menjadi indikator penting untuk mengidentifikasi tingkat kejenuhan dan potensi kemacetan. Nilai rasio yang mendekati atau melebihi satu menunjukkan bahwa jalan beroperasi pada atau di atas

kapasitasnya, sehingga memerlukan intervensi teknis atau kebijakan. Selain itu, konsep kapasitas juga menjadi dasar dalam penentuan tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*), yang mengaitkan kondisi arus, kecepatan, dan kenyamanan pengguna jalan ke dalam kategori kualitatif dari A hingga F.

Kapasitas juga berperan penting dalam analisis dampak lalu lintas (Andalalin) dan perencanaan jaringan jalan. Dalam studi pengembangan kawasan baru, pusat kegiatan, atau infrastruktur berskala besar, analisis kapasitas digunakan untuk memprediksi apakah jaringan jalan eksisting mampu menampung tambahan beban lalu lintas. Hasil analisis ini menjadi dasar rekomendasi mitigasi, seperti pengaturan akses, peningkatan angkutan umum, atau perubahan desain jaringan jalan agar dampak lalu lintas dapat dikendalikan.

B. Tingkat Pelayanan (*Level of Service*)

Tingkat Pelayanan atau *Level of Service* (LOS) merupakan konsep kunci dalam rekayasa lalu lintas yang digunakan untuk menggambarkan kualitas operasional suatu fasilitas jalan sebagaimana dirasakan oleh pengguna jalan. Konsep LOS pertama kali diperkenalkan secara sistematis dalam *Highway Capacity Manual* (HCM) dan hingga kini terus dikembangkan sebagai alat evaluasi kinerja jalan dan simpang. Menurut Transportation Research Board (TRB, 2022), tingkat pelayanan menunjukkan kondisi lalu lintas berdasarkan kombinasi faktor kuantitatif seperti kecepatan, kepadatan, waktu tempuh, tundaan, serta kenyamanan dan keamanan berkendara.

Secara umum, LOS dinyatakan dalam enam kelas, yaitu LOS A sampai LOS F, di mana LOS A menunjukkan kondisi terbaik (arus bebas), sedangkan LOS F menggambarkan kondisi terburuk (kemacetan parah). Pengelompokan ini bertujuan untuk menyederhanakan hasil analisis teknis agar mudah dipahami oleh perencana, pengambil kebijakan, dan pemangku kepentingan non-teknis.

1. Konsep Dasar Tingkat Pelayanan

Tingkat pelayanan atau *Level of Service* (LOS) merupakan konsep fundamental dalam rekayasa transportasi yang digunakan untuk menggambarkan kualitas pelayanan suatu fasilitas jalan dari sudut pandang pengguna. Berbeda dengan pendekatan yang hanya

menitikberatkan pada volume lalu lintas, LOS menilai bagaimana kondisi operasional jalan dirasakan oleh pengemudi, termasuk kenyamanan, kelancaran, keamanan, dan kebebasan bermanuver. Oleh karena itu, LOS tidak sekadar mencerminkan banyaknya kendaraan yang melintas, tetapi menilai kualitas interaksi antara arus lalu lintas, kapasitas jalan, dan kondisi fisik serta lingkungan sekitarnya.

Pada praktiknya, dua ruas jalan dengan volume lalu lintas yang sama dapat memiliki tingkat pelayanan yang berbeda. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh variasi kapasitas jalan, jumlah dan lebar lajur, tingkat hambatan samping, komposisi kendaraan, hingga keberadaan aktivitas tepi jalan. Ruas jalan dengan kapasitas besar dan hambatan samping rendah cenderung memberikan pengalaman berkendara yang lebih nyaman dibandingkan ruas jalan sempit dengan gangguan tinggi, meskipun volume lalu lintasnya serupa. Hal ini menunjukkan bahwa LOS bersifat kontekstual dan sangat dipengaruhi oleh karakteristik geometrik serta operasional jalan.

Menurut Roess, Prassas, dan McShane (2020), LOS merupakan indikator integratif yang menggabungkan berbagai parameter teknis seperti kecepatan, kepadatan, dan tundaan untuk merepresentasikan pengalaman pengguna jalan secara menyeluruh. Dengan demikian, LOS berfungsi sebagai jembatan antara analisis teknis yang bersifat kuantitatif dan persepsi pengguna jalan yang bersifat kualitatif. Dalam perencanaan dan evaluasi transportasi perkotaan, konsep LOS menjadi alat penting untuk menilai kinerja jaringan jalan, menetapkan standar pelayanan, serta merumuskan kebijakan dan strategi peningkatan sistem transportasi yang lebih berorientasi pada pengguna.

2. Klasifikasi Tingkat Pelayanan Jalan

Berdasarkan *Highway Capacity Manual* edisi terbaru (TRB, 2022), tingkat pelayanan jalan perkotaan diklasifikasikan ke dalam enam kategori, mulai dari LOS A hingga LOS F, yang merepresentasikan spektrum kondisi operasional dari arus bebas hingga kemacetan berat. Klasifikasi ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang sistematis mengenai kualitas pelayanan jalan yang dirasakan oleh pengguna serta tingkat kinerja fasilitas lalu lintas dalam melayani arus kendaraan.

LOS A menggambarkan kondisi arus bebas, di mana lalu lintas sangat lancar dengan kecepatan tinggi yang mendekati kecepatan arus bebas. Interaksi antar kendaraan hampir tidak ada, sehingga pengemudi

memiliki kebebasan penuh dalam memilih kecepatan dan melakukan manuver. Tundaan sangat kecil atau bahkan tidak ada, yang menjadikan tingkat kenyamanan dan keselamatan berada pada kondisi optimal.

LOS B menunjukkan arus lalu lintas yang masih stabil dengan sedikit peningkatan interaksi antar kendaraan. Kecepatan mulai menurun dibandingkan kondisi arus bebas, namun masih berada pada tingkat yang nyaman bagi pengemudi. Pada kondisi ini, gangguan kecil belum berdampak signifikan terhadap kinerja jalan, sehingga kualitas pelayanan masih tergolong baik.

LOS C merepresentasikan arus stabil dengan keterbatasan tertentu. Volume lalu lintas meningkat dan interaksi antar kendaraan semakin terasa, menyebabkan penurunan kecepatan yang lebih nyata. Meskipun demikian, arus lalu lintas masih dapat dipertahankan dalam kondisi stabil. Dalam banyak praktik perencanaan transportasi perkotaan, LOS C dianggap sebagai tingkat pelayanan yang wajar dan dapat diterima.

LOS D menggambarkan kondisi arus yang mendekati tidak stabil. Kepadatan lalu lintas cukup tinggi, ruang gerak pengemudi semakin terbatas, dan toleransi sistem terhadap gangguan menjadi sangat kecil. Kecepatan rendah dan kenyamanan berkurang secara signifikan. Banyak kota besar menetapkan LOS D sebagai batas minimum tingkat pelayanan yang masih dapat diterima, terutama di kawasan perkotaan padat.

LOS E menunjukkan kondisi ketika lalu lintas beroperasi pada atau sangat mendekati kapasitas jalan. Kecepatan sangat rendah, manuver hampir tidak mungkin dilakukan, dan sistem menjadi sangat rentan terhadap gangguan kecil yang dapat langsung memicu kemacetan. Kondisi ini bersifat tidak stabil dan memiliki risiko keselamatan yang tinggi.

LOS F merupakan kondisi terburuk, yang ditandai dengan kemacetan parah. Arus lalu lintas terhenti atau bergerak sangat lambat karena volume kendaraan telah melampaui kapasitas jalan. Tundaan menjadi sangat tinggi, tingkat stres pengguna meningkat, dan risiko kecelakaan lalu lintas bertambah drastis.

3. Parameter Penentu Tingkat Pelayanan

Penentuan tingkat pelayanan jalan tidak dilakukan secara tunggal, melainkan didasarkan pada sejumlah parameter kinerja yang

mencerminkan kondisi operasional dan pengalaman pengguna jalan. Parameter-parameter ini dipilih sesuai dengan jenis fasilitas lalu lintas yang dianalisis, baik ruas jalan maupun simpang. Menurut Highway Capacity Manual (TRB, 2022) serta Khisty dan Lall (2019), pendekatan ini bertujuan agar penilaian LOS tidak hanya bersifat kuantitatif, tetapi juga merepresentasikan kualitas pelayanan secara menyeluruh.

Salah satu parameter utama adalah kecepatan rata-rata perjalanan (*average travel speed*), yang menggambarkan efisiensi pergerakan kendaraan sepanjang ruas jalan. Kecepatan yang tinggi umumnya menunjukkan kondisi arus bebas dan tingkat pelayanan yang baik, sedangkan kecepatan rendah mencerminkan peningkatan interaksi antar kendaraan dan potensi kemacetan. Parameter ini sangat relevan untuk mengevaluasi kinerja jalan arteri dan kolektor di kawasan perkotaan.

Kepadatan lalu lintas, yang dinyatakan dalam kendaraan per kilometer per lajur, juga menjadi indikator penting, khususnya pada analisis ruas jalan. Kepadatan menggambarkan seberapa besar ruang jalan yang telah terisi oleh kendaraan. Semakin tinggi kepadatan, semakin terbatas ruang gerak pengemudi dan semakin rendah tingkat pelayanan. Oleh karena itu, HCM menggunakan kepadatan sebagai parameter utama LOS untuk jalan bebas hambatan dan jalan perkotaan tertentu.

Parameter lain yang sering digunakan adalah rasio volume terhadap kapasitas (*V/C ratio*). Rasio ini menunjukkan tingkat pemanfaatan kapasitas jalan. Nilai *V/C* yang mendekati atau melebihi satu mengindikasikan bahwa fasilitas jalan telah beroperasi pada atau di atas kapasitasnya, sehingga tingkat pelayanan menurun drastis dan sistem menjadi tidak stabil.

Untuk simpang bersinyal, parameter yang paling dominan adalah waktu tundaan rata-rata per kendaraan. Tundaan mencerminkan lamanya waktu tambahan yang dialami pengemudi akibat berhenti atau melambat di simpang. Semakin besar tundaan, semakin rendah tingkat pelayanan simpang, terlepas dari kecepatan pada ruas jalan pendekatnya.

Tingkat kenyamanan dan kebebasan manuver juga dipertimbangkan secara konseptual dalam penentuan LOS. Aspek ini mencerminkan persepsi pengguna terhadap stres, kemudahan berpindah lajur, dan fleksibilitas berkendara. Dengan mengombinasikan seluruh parameter tersebut, tingkat pelayanan dapat memberikan gambaran yang

komprehensif mengenai kinerja lalu lintas dan kualitas pelayanan jalan dalam konteks rekayasa transportasi perkotaan.

4. Tingkat Pelayanan dalam Konteks Perkotaan Indonesia

Pada konteks perkotaan Indonesia, konsep tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*) mengalami adaptasi yang cukup signifikan akibat karakteristik lalu lintas yang berbeda dengan negara maju. Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997 masih menjadi acuan utama dalam banyak studi dan perencanaan transportasi, terutama karena mempertimbangkan kondisi lokal seperti dominasi sepeda motor, aktivitas samping jalan yang tinggi, serta perilaku pengemudi yang heterogen. Namun, seiring perkembangan transportasi perkotaan, pendekatan MKJI sering dikombinasikan dengan *Highway Capacity Manual* (HCM) yang lebih mutakhir untuk memperoleh hasil analisis yang lebih komprehensif dan relevan (Warpani, 2021).

Di kota-kota besar seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung, kondisi LOS E dan bahkan LOS F kerap terjadi pada jam puncak pagi dan sore. Kondisi ini mencerminkan keterbatasan kapasitas jaringan jalan dalam mengimbangi pertumbuhan kendaraan dan intensitas aktivitas perkotaan. Akibatnya, pendekatan perencanaan transportasi di Indonesia mulai bergeser dari solusi konvensional berupa pelebaran jalan menuju strategi yang lebih berkelanjutan, seperti manajemen permintaan lalu lintas, pengembangan angkutan umum massal, pengendalian parkir, serta integrasi transportasi dengan tata guna lahan. Dengan demikian, LOS tidak hanya digunakan sebagai indikator kinerja teknis jalan, tetapi juga sebagai dasar evaluasi kebijakan transportasi perkotaan secara strategis.

5. Fungsi Tingkat Pelayanan dalam Perencanaan Transportasi

Tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*) berfungsi sebagai indikator kunci dalam perencanaan dan evaluasi sistem transportasi karena mampu menerjemahkan kinerja teknis lalu lintas ke dalam ukuran yang mudah dipahami oleh perencana maupun pengambil kebijakan. Melalui analisis LOS, kinerja eksisting ruas jalan dan simpang dapat dievaluasi secara objektif, sehingga permasalahan seperti kemacetan, tundaan tinggi, dan penurunan kenyamanan pengguna jalan dapat diidentifikasi secara sistematis. Informasi ini menjadi dasar penting

dalam menentukan kebutuhan peningkatan kapasitas, perbaikan geometrik jalan, atau penerapan manajemen lalu lintas.

LOS banyak digunakan dalam studi dampak lalu lintas (andalalin) untuk menilai konsekuensi transportasi dari pembangunan kawasan baru, seperti pusat perbelanjaan, kawasan permukiman, atau kawasan industri. Dengan membandingkan kondisi LOS sebelum dan sesudah pembangunan, perencana dapat merumuskan rekomendasi mitigasi yang proporsional dan berbasis data. LOS juga berperan dalam penetapan standar pelayanan minimum (SPM) transportasi, sehingga kualitas layanan jaringan jalan dapat dijaga pada tingkat yang dapat diterima masyarakat.

6. Kritik dan Perkembangan Konsep LOS

Pada perkembangan perencanaan transportasi modern, konsep tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*) menghadapi berbagai kritik, terutama karena pendekatan tradisionalnya yang cenderung berfokus pada kinerja kendaraan bermotor. LOS konvensional sering diukur berdasarkan kecepatan, kepadatan, dan tundaan kendaraan, sehingga keberhasilan suatu ruas jalan kerap diartikan sebagai kelancaran arus mobil. Pendekatan ini dinilai kurang sensitif terhadap kebutuhan pengguna jalan non-motorized, seperti pejalan kaki dan pesepeda, serta kurang mempertimbangkan kualitas ruang publik, keselamatan, dan dampak lingkungan.

Menanggapi kritik tersebut, *Highway Capacity Manual* (HCM) edisi terbaru (TRB, 2022) memperkenalkan dan memperkuat konsep LOS multimoda. Dalam pendekatan ini, tingkat pelayanan tidak hanya diukur untuk kendaraan bermotor, tetapi juga untuk pejalan kaki, pesepeda, dan transportasi umum. Parameter yang digunakan mencakup kenyamanan, keselamatan, kontinuitas fasilitas, tingkat konflik antar moda, serta kemudahan akses. Dengan demikian, kinerja jaringan jalan dinilai secara lebih komprehensif sesuai dengan karakteristik pengguna yang beragam.

Perkembangan ini sejalan dengan paradigma transportasi berkelanjutan dan konsep kota ramah manusia (*livable city*), yang menempatkan manusia sebagai pusat perencanaan, bukan kendaraan. Jalan tidak lagi dipandang semata-mata sebagai saluran lalu lintas, melainkan sebagai ruang publik yang harus mendukung mobilitas, interaksi sosial, dan kualitas lingkungan perkotaan.

C. Faktor Penyesuaian Kapasitas Jalan

Kapasitas jalan secara teoritis didefinisikan sebagai jumlah maksimum kendaraan yang dapat melewati suatu ruas jalan dalam kondisi ideal per satuan waktu. Namun, dalam kondisi nyata, kapasitas dasar (*base capacity*) tersebut hampir tidak pernah tercapai karena dipengaruhi oleh berbagai faktor fisik, operasional, dan lingkungan. Oleh karena itu, dalam analisis rekayasa lalu lintas, kapasitas dasar harus disesuaikan menggunakan faktor penyesuaian kapasitas agar mencerminkan kondisi aktual di lapangan. Menurut Transportation Research Board (TRB, 2022), faktor penyesuaian merupakan komponen penting dalam evaluasi kinerja jalan karena memungkinkan analisis yang lebih realistis dan kontekstual.

1. Konsep Dasar Faktor Penyesuaian Kapasitas

Faktor penyesuaian kapasitas merupakan elemen kunci dalam analisis kinerja lalu lintas karena berfungsi untuk mengoreksi kapasitas dasar agar mencerminkan kondisi lapangan yang nyata. Kapasitas dasar (C_0) didefinisikan sebagai kemampuan maksimum suatu ruas jalan untuk melayani arus lalu lintas dalam kondisi ideal, yaitu kondisi geometrik standar, arus lalu lintas homogen, tanpa hambatan samping, serta perilaku pengemudi yang seragam. Namun, dalam praktik, kondisi ideal tersebut hampir tidak pernah sepenuhnya terpenuhi, sehingga diperlukan faktor penyesuaian untuk menghasilkan estimasi kapasitas yang lebih realistis.

Secara matematis, kapasitas aktual dirumuskan sebagai hasil perkalian antara kapasitas dasar dan berbagai faktor penyesuaian, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan

$$C = C^0 \times F^1 \times F^2 \times F^3 \times \dots \times F^n.$$

Setiap faktor penyesuaian (F_1, F_2, F_3 , dan seterusnya) mewakili pengaruh satu kondisi tertentu yang dapat menurunkan atau, dalam kasus tertentu, membatasi kapasitas jalan, seperti lebar lajur, hambatan samping, komposisi lalu lintas, atau kondisi lingkungan.

Pendekatan berbasis faktor penyesuaian ini digunakan secara luas dalam *Highway Capacity Manual* (HCM) dan diadopsi pula dalam

Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI). Keunggulan utama metode ini adalah kemampuannya untuk mengisolasi pengaruh masing-masing elemen geometrik dan operasional terhadap kapasitas jalan. Dengan demikian, perencana lalu lintas dapat mengidentifikasi faktor mana yang paling signifikan dalam menurunkan kinerja ruas jalan tertentu.

2. Faktor Geometrik Jalan

Faktor geometrik jalan merupakan salah satu kelompok faktor penyesuaian kapasitas yang paling berpengaruh karena berkaitan langsung dengan kondisi fisik dan rancangan jalan. Karakteristik geometrik menentukan bagaimana pengemudi mengoperasikan kendaraannya, mulai dari kecepatan, jarak antar kendaraan, hingga kenyamanan dan rasa aman. Oleh karena itu, perubahan kecil pada elemen geometrik dapat berdampak signifikan terhadap kapasitas aktual jalan.

Lebar lajur dan bahu jalan menjadi faktor utama dalam menentukan kapasitas. Lajur yang lebih sempit dari standar mengakibatkan pengemudi merasa kurang nyaman, sehingga cenderung menurunkan kecepatan dan meningkatkan jarak aman. Kondisi ini secara langsung mengurangi jumlah kendaraan yang dapat dilayani per jam. Highway Capacity Manual (TRB, 2022) menyatakan bahwa lebar lajur kurang dari 3,5 meter akan menghasilkan faktor penyesuaian lebih kecil dari 1,00, yang berarti kapasitas dasar harus dikoreksi ke nilai yang lebih rendah. Selain itu, bahu jalan yang sempit atau tidak tersedia mengurangi ruang darurat bagi kendaraan berhenti, meningkatkan persepsi risiko, dan pada akhirnya menurunkan kapasitas efektif.

Jumlah lajur secara teoritis berbanding lurus dengan kapasitas jalan, karena semakin banyak lajur semakin besar ruang yang tersedia untuk arus lalu lintas. Namun, dalam praktik perkotaan, hubungan ini tidak selalu linear. Khisty dan Lall (2019) menekankan bahwa efektivitas penambahan lajur sangat dipengaruhi oleh distribusi volume lalu lintas antar lajur, frekuensi perpindahan lajur, serta adanya hambatan samping seperti parkir, aktivitas pejalan kaki, dan akses keluar-masuk. Akibatnya, penambahan lajur pada jalan perkotaan sering kali memberikan peningkatan kapasitas yang lebih kecil dari yang diharapkan.

Alinyemen horizontal dan vertikal juga berperan penting dalam penyesuaian kapasitas. Tikungan dengan radius kecil memaksa pengemudi mengurangi kecepatan, sedangkan tanjakan panjang

terutama berdampak besar pada kendaraan berat yang bergerak lebih lambat. Garber dan Hoel (2020) menjelaskan bahwa gradien jalan yang besar meningkatkan perbedaan kecepatan antar kendaraan, memperbesar potensi konflik, dan menurunkan kapasitas jalan secara keseluruhan. Oleh karena itu, kondisi alinyemen yang tidak ideal harus diperhitungkan secara cermat dalam analisis kapasitas melalui faktor penyesuaian geometrik.

3. Faktor Lalu Lintas dan Komposisi Kendaraan

Kapasitas jalan sangat dipengaruhi oleh karakteristik arus lalu lintas yang melintas di atasnya. Faktor lalu lintas mencerminkan sifat dinamis pergerakan kendaraan dan interaksi antar pengguna jalan, sehingga berperan penting dalam menentukan kapasitas aktual yang dapat dicapai di lapangan.

Komposisi kendaraan, khususnya persentase kendaraan berat, merupakan salah satu faktor paling signifikan. Kendaraan berat seperti truk dan bus memiliki dimensi lebih besar, akselerasi dan deselerasi lebih lambat, serta membutuhkan ruang dan waktu lebih panjang untuk bermanuver dibandingkan kendaraan *ringan*. Kondisi ini menyebabkan kendaraan berat “mengonsumsi” kapasitas jalan lebih besar. Oleh karena itu, Highway Capacity Manual (TRB, 2022) menggunakan konsep Passenger Car Equivalent (PCE) untuk mengonversi kendaraan berat ke satuan kendaraan penumpang. Semakin tinggi proporsi kendaraan berat, semakin besar nilai PCE yang diterapkan, sehingga kapasitas efektif jalan akan menurun secara signifikan, terutama pada jalan dengan gradien besar atau jumlah lajur terbatas.

Distribusi arah lalu lintas juga memengaruhi kapasitas, khususnya pada jalan dua arah tanpa median fisik. Ketidakseimbangan volume lalu lintas antara dua arah dapat membatasi peluang mendahului dan meningkatkan konflik antar kendaraan. Pada kondisi arus berlawanan yang tinggi, pengemudi cenderung mengurangi kecepatan demi keselamatan, sehingga kelancaran lalu lintas menurun. Dalam kasus ekstrem, dominasi arus pada satu arah dapat membuat arah berlawanan beroperasi jauh di bawah kapasitas idealnya.

Fluktuasi arus dan kondisi jam puncak merupakan faktor penting lainnya. Kapasitas jalan umumnya dihitung berdasarkan arus rata-rata per jam, namun dalam kenyataannya arus lalu lintas tidak selalu seragam. Pada jam puncak, terjadi fluktuasi volume yang tajam dalam interval

waktu yang lebih pendek, sehingga kapasitas efektif menjadi lebih rendah dibandingkan kondisi arus stabil. Untuk mengakomodasi hal ini, digunakan Peak Hour Factor (PHF), yaitu faktor penyesuaian yang merepresentasikan variasi arus dalam satu jam puncak. Menurut TRB (2022), nilai PHF yang lebih kecil menunjukkan fluktuasi arus yang tinggi dan menandakan kinerja jalan yang kurang efisien, sehingga kapasitas aktual perlu dikoreksi ke nilai yang lebih rendah.

4. Faktor Hambatan Samping

Hambatan samping merupakan salah satu faktor penyesuaian kapasitas yang paling berpengaruh dalam konteks jalan perkotaan, terutama di negara berkembang seperti Indonesia. Hambatan samping mengacu pada berbagai aktivitas di sisi jalan yang mengganggu kelancaran arus lalu lintas utama, baik secara langsung maupun tidak langsung. Bentuk hambatan ini antara lain pergerakan pejalan kaki yang menyeberang atau berjalan di badan jalan, kendaraan yang parkir atau berhenti sementara di tepi jalan, kendaraan yang keluar-masuk akses samping (rumah, toko, kantor, atau gang), serta aktivitas perdagangan informal seperti pedagang kaki lima dan angkutan umum yang menaikkan atau menurunkan penumpang di luar halte resmi.

Keberadaan hambatan samping menyebabkan pengemudi harus sering melakukan penyesuaian kecepatan, berpindah lajur secara mendadak, atau bahkan berhenti sesaat. Kondisi ini meningkatkan interaksi dan konflik antar kendaraan, sehingga menurunkan kapasitas dan tingkat keselamatan jalan. Menurut Warpani (2021), pada jalan perkotaan dengan aktivitas samping yang tinggi, kapasitas aktual dapat menurun hingga lebih dari 40% dibandingkan kapasitas dasar yang diasumsikan dalam kondisi ideal.

Untuk mengakomodasi pengaruh tersebut, baik *Highway Capacity Manual* (HCM) maupun *Manual Kapasitas Jalan Indonesia* (MKJI) mengklasifikasikan tingkat hambatan samping ke dalam beberapa kategori, umumnya rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Setiap tingkat hambatan samping memiliki faktor penyesuaian kapasitas yang berbeda, di mana semakin tinggi intensitas hambatan samping, semakin kecil nilai faktor penyesuaian yang diterapkan. Pendekatan ini memungkinkan perencana dan analis lalu lintas untuk merepresentasikan kondisi nyata perkotaan secara lebih akurat dalam perhitungan kapasitas.

5. Faktor Lingkungan dan Operasional

Kapasitas jalan juga sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan aspek operasional. Faktor-faktor ini sering kali bersifat kontekstual dan mencerminkan interaksi antara infrastruktur, sistem pengendalian lalu lintas, serta perilaku pengguna jalan. Dalam banyak kasus, pengaruh faktor lingkungan dan operasional dapat menyebabkan perbedaan yang signifikan antara kapasitas teoritis dan kapasitas yang benar-benar tercapai di lapangan.

Lingkungan jalan merupakan salah satu penentu utama kapasitas. Jalan di kawasan perkotaan umumnya memiliki kapasitas lebih rendah dibandingkan jalan perdesaan atau jalan luar kota. Hal ini disebabkan oleh tingginya intensitas persimpangan, banyaknya akses langsung ke bangunan di sepanjang jalan, serta aktivitas samping yang sulit dihindari. Menurut *Highway Capacity Manual*, perbedaan karakteristik lingkungan ini memerlukan faktor penyesuaian tersendiri agar perhitungan kapasitas lebih mencerminkan kondisi nyata. Pada jalan perkotaan, arus lalu lintas cenderung terfragmentasi dan sering mengalami gangguan, sehingga kapasitas efektif menurun meskipun kondisi geometrik jalan relatif baik.

Aspek operasional, khususnya pengendalian lalu lintas, juga memiliki pengaruh besar terhadap kapasitas jalan. Keberadaan sinyal lalu lintas, rambu, dan marka menentukan bagaimana arus kendaraan dialokasikan dalam ruang dan waktu. Pada simpang bersinyal, kapasitas sangat dipengaruhi oleh waktu hijau efektif, panjang siklus, serta tingkat koordinasi antar simpang. Papacostas dan Prevedouros (2018) menekankan bahwa pengaturan sinyal yang tidak optimal dapat menurunkan kapasitas secara signifikan dan meningkatkan tundaan, bahkan pada ruas jalan dengan volume lalu lintas sedang. Sebaliknya, koordinasi sinyal yang baik dapat meningkatkan kapasitas jaringan tanpa perlu perubahan fisik jalan.

Faktor perilaku pengemudi lokal juga menjadi elemen penting dalam faktor lingkungan dan operasional. Perbedaan budaya berkendara, tingkat kepatuhan terhadap aturan lalu lintas, serta pola interaksi antar kendaraan memengaruhi jarak antar kendaraan, kecepatan operasional, dan stabilitas arus lalu lintas. Perilaku agresif, manuver mendadak, dan pelanggaran lalu lintas dapat menurunkan kapasitas efektif karena meningkatkan konflik dan ketidakstabilan arus. Oleh karena itu, dalam penerapan standar internasional seperti HCM di Indonesia, diperlukan

penyesuaian yang mempertimbangkan karakteristik perilaku pengemudi lokal agar analisis kapasitas lebih realistis dan aplikatif.

6. Penerapan Faktor Penyesuaian dalam Analisis Kapasitas

Pada praktik rekayasa transportasi, faktor penyesuaian berperan penting sebagai alat analisis untuk menerjemahkan kondisi ideal ke dalam realitas lapangan. Kapasitas dasar yang ditetapkan dalam manual teknis pada dasarnya hanya merepresentasikan kondisi ideal, sehingga tanpa penerapan faktor penyesuaian, hasil analisis berpotensi menyesatkan. Oleh karena itu, faktor penyesuaian digunakan untuk mengevaluasi kinerja ruas jalan eksisting secara lebih akurat dengan mempertimbangkan kondisi geometrik, lalu lintas, lingkungan, dan operasional yang sebenarnya terjadi.

Faktor penyesuaian juga berfungsi sebagai instrumen prediktif dalam analisis perubahan. Dalam perencanaan transportasi, perubahan geometrik seperti pelebaran lajur, penambahan median, atau penataan akses, serta kebijakan lalu lintas seperti pengaturan parkir dan manajemen simpang, perlu dianalisis dampaknya terhadap kapasitas jalan. Dengan mengubah nilai faktor penyesuaian yang relevan, perencana dapat memperkirakan sejauh mana perubahan tersebut akan meningkatkan atau justru menurunkan kapasitas dan kinerja lalu lintas.

Penerapan faktor penyesuaian juga sangat penting dalam menilai kelayakan peningkatan kapasitas atau penerapan manajemen lalu lintas. Tidak semua permasalahan kemacetan harus diselesaikan dengan penambahan fisik jalan, yang sering kali membutuhkan biaya besar dan ruang yang terbatas. Melalui analisis faktor penyesuaian, dapat diidentifikasi apakah penurunan kapasitas disebabkan oleh hambatan samping, pengendalian lalu lintas yang kurang optimal, atau perilaku pengemudi. Dengan demikian, solusi non-struktural seperti penertiban parkir, optimalisasi sinyal lalu lintas, atau pengelolaan akses sering kali menjadi alternatif yang lebih efisien.

D. Analisis Kapasitas Berdasarkan Standar

Analisis kapasitas jalan merupakan tahapan penting dalam rekayasa lalu lintas untuk menilai kemampuan suatu ruas jalan atau simpang dalam melayani arus lalu lintas secara aman dan efisien. Agar hasil analisis bersifat objektif, konsisten, dan dapat dibandingkan, maka

perhitungan kapasitas harus dilakukan berdasarkan standar teknis yang diakui. Secara global, standar yang paling banyak digunakan adalah *Highway Capacity Manual* (HCM) yang diterbitkan oleh *Transportation Research Board* (TRB), sedangkan di Indonesia acuan utama adalah *Manual Kapasitas Jalan Indonesia* (MKJI). Kedua standar ini menyediakan metodologi analisis kapasitas dan tingkat pelayanan yang terstruktur, meskipun memiliki perbedaan pendekatan dan parameter sesuai konteks wilayah.

1. Konsep Standar dalam Analisis Kapasitas

Standar kapasitas jalan merupakan landasan utama dalam analisis kinerja fasilitas transportasi, karena berfungsi untuk menentukan kemampuan maksimum suatu ruas jalan atau simpang dalam melayani arus lalu lintas pada kondisi tertentu. Standar ini tidak sekadar memberikan angka kapasitas, tetapi menjadi acuan teknis yang sistematis bagi perencana dan insinyur transportasi dalam memahami batas operasional suatu fasilitas jalan. Dengan adanya standar kapasitas, evaluasi terhadap kondisi lalu lintas dapat dilakukan secara objektif dan terukur.

Standar kapasitas juga berperan penting dalam mengevaluasi kinerja operasional jalan melalui indikator tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*). LOS menggambarkan kualitas pelayanan yang dirasakan pengguna jalan, mencakup aspek kecepatan, kenyamanan, kebebasan bermanuver, dan tingkat tundaan. Melalui standar kapasitas, hubungan antara volume lalu lintas dan kapasitas dapat dianalisis sehingga kondisi pelayanan jalan dapat diklasifikasikan secara konsisten, baik untuk ruas jalan maupun simpang.

Pada konteks perencanaan, desain, dan manajemen lalu lintas, standar kapasitas menjadi dasar pengambilan keputusan yang sangat strategis. Keputusan mengenai kebutuhan pelebaran jalan, penambahan lajur, pengaturan simpang, atau penerapan manajemen lalu lintas bergantung pada hasil analisis kapasitas yang mengacu pada standar tersebut. Tanpa standar yang jelas, perencanaan berisiko menjadi subjektif dan tidak efisien, serta berpotensi menghasilkan solusi yang tidak sesuai dengan permasalahan nyata di lapangan.

2. Highway Capacity Manual (HCM)

Highway Capacity Manual (HCM) merupakan standar internasional yang paling luas dan komprehensif dalam analisis kapasitas jalan dan tingkat pelayanan lalu lintas. HCM disusun dan diperbarui secara berkala oleh *Transportation Research Board* (TRB) untuk merespons perkembangan sistem transportasi dan dinamika lalu lintas yang semakin kompleks. Edisi terbaru, yaitu HCM 7th Edition (TRB, 2022), tidak lagi hanya berfokus pada kendaraan bermotor, tetapi juga mengakomodasi pendekatan multimoda dengan memasukkan analisis pejalan kaki, pesepeda, dan angkutan umum, serta mempertimbangkan aspek keselamatan dan kinerja jaringan secara menyeluruh.

Pendekatan analisis dalam HCM didasarkan pada konsep kapasitas dasar yang merepresentasikan kondisi ideal suatu fasilitas jalan. Kapasitas dasar ini kemudian disesuaikan dengan berbagai faktor kondisi non-ideal yang mencerminkan keadaan nyata di lapangan, seperti geometri jalan, komposisi kendaraan, hambatan samping, dan lingkungan sekitar. Selain itu, HCM menggunakan berbagai ukuran kinerja lalu lintas, seperti kecepatan rata-rata, kepadatan, tundaan, dan panjang antrean, untuk menggambarkan kualitas pelayanan yang diterima pengguna jalan. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang tidak hanya berorientasi pada volume lalu lintas, tetapi juga pada pengalaman dan kenyamanan pengguna.

HCM dirancang untuk menganalisis berbagai jenis fasilitas transportasi secara spesifik dan terperinci. Analisis kapasitas dan tingkat pelayanan dapat diterapkan pada ruas jalan bebas hambatan, jalan perkotaan dan luar kota, simpang bersinyal maupun tak bersinyal, serta fasilitas pendukung seperti jalur pejalan kaki, sepeda, dan angkutan umum. Kekhususan metode untuk setiap tipe fasilitas ini menjadi salah satu kekuatan utama HCM, karena karakteristik operasional masing-masing fasilitas berbeda dan tidak dapat dianalisis dengan pendekatan yang seragam. Roess, Prassas, dan McShane (2020) menyatakan bahwa fleksibilitas inilah yang menjadikan HCM sangat adaptif terhadap berbagai skenario lalu lintas dan kebijakan transportasi.

3. Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI)

Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) merupakan standar nasional yang disusun untuk menganalisis kapasitas dan kinerja lalu lintas dengan mempertimbangkan kondisi khas jalan di Indonesia.

Berbeda dengan standar internasional seperti *Highway Capacity Manual* (HCM) yang dikembangkan berdasarkan karakteristik lalu lintas negara maju, MKJI dirancang agar lebih sesuai dengan realitas lalu lintas nasional. Karakteristik kendaraan yang beragam, dominasi sepeda motor, perilaku pengemudi yang heterogen, serta tingginya hambatan samping menjadi latar belakang utama perlunya standar khusus yang merefleksikan kondisi lokal.

Pendekatan yang digunakan dalam MKJI menitikberatkan pada analisis ruas jalan perkotaan dan luar kota, serta simpang bersinyal maupun tidak bersinyal. Dalam konteks perkotaan Indonesia, simpang dan aktivitas samping jalan sering kali menjadi faktor pembatas utama kinerja lalu lintas. Oleh karena itu, MKJI secara eksplisit memasukkan pengaruh hambatan samping dan kendaraan tidak bermotor dalam perhitungan kapasitas dan tingkat pelayanan. Warpani (2021) menegaskan bahwa pendekatan ini membuat MKJI lebih representatif untuk kota-kota di Indonesia, karena mampu menangkap fenomena khas seperti parkir di badan jalan, aktivitas perdagangan informal, serta campuran moda yang intens.

Pada analisisnya, MKJI menggunakan sejumlah parameter utama yang saling berkaitan. Arus lalu lintas dinyatakan dalam satuan mobil penumpang per jam (smp/jam) untuk menyetarakan pengaruh berbagai jenis kendaraan. Kecepatan arus bebas digunakan sebagai indikator kondisi ideal jalan tanpa gangguan, sementara kapasitas dasar menggambarkan kemampuan maksimum jalan dalam kondisi standar. Nilai-nilai dasar tersebut kemudian disesuaikan dengan faktor penyesuaian yang mencerminkan kondisi geometrik, karakteristik lalu lintas, dan lingkungan sekitar jalan. Pendekatan ini memungkinkan kapasitas aktual yang dihitung lebih mendekati kondisi lapangan.

Penentuan tingkat pelayanan dalam MKJI umumnya didasarkan pada rasio volume terhadap kapasitas (V/C ratio) serta tundaan rata-rata, terutama pada simpang. Rasio V/C digunakan untuk menggambarkan tingkat pemanfaatan kapasitas jalan, sedangkan tundaan mencerminkan kualitas pelayanan yang dirasakan pengguna jalan. Dengan menggunakan indikator-indikator tersebut, MKJI memberikan kerangka analisis yang praktis dan aplikatif bagi perencana dan praktisi transportasi di Indonesia.

Meskipun MKJI pertama kali diterbitkan pada 1997, hingga kini manual ini masih banyak digunakan dalam perencanaan, evaluasi kinerja

jalan, dan analisis dampak lalu lintas. Dalam praktik terkini, MKJI sering dikombinasikan dengan pendekatan HCM yang lebih mutakhir untuk mengakomodasi perkembangan teknologi kendaraan dan kompleksitas lalu lintas modern. Dengan demikian, MKJI tetap memiliki peran penting sebagai fondasi analisis kapasitas jalan yang kontekstual dan relevan bagi kondisi transportasi Indonesia.

4. Perbandingan HCM dan MKJI

Highway Capacity Manual (HCM) dan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) pada dasarnya memiliki tujuan yang sama, yaitu menyediakan kerangka analisis untuk menilai kapasitas dan kinerja fasilitas jalan. Namun, perbedaan latar belakang penyusunan dan konteks penerapannya menyebabkan kedua standar ini memiliki karakteristik yang berbeda. HCM dikembangkan sebagai standar internasional dengan cakupan yang sangat luas, sementara MKJI dirancang secara khusus untuk menjawab kebutuhan analisis lalu lintas di Indonesia.

Dari sisi skala dan tingkat kedalaman analisis, HCM dikenal lebih rinci dan komprehensif. HCM tidak hanya membahas kapasitas dan tingkat pelayanan ruas jalan dan simpang, tetapi juga mencakup analisis multimoda, termasuk pejalan kaki, pesepeda, dan angkutan umum. Selain itu, HCM menyediakan berbagai ukuran kinerja seperti kecepatan, kepadatan, tundaan, panjang antrean, hingga reliabilitas perjalanan. Sebaliknya, MKJI memiliki pendekatan yang lebih sederhana dan fokus utama pada lalu lintas kendaraan bermotor di jalan, sehingga lebih praktis digunakan untuk studi-studi operasional dan perencanaan dasar.

Perbedaan lain yang mendasar terletak pada konteks wilayah dan asumsi dasar analisis. HCM disusun berdasarkan kondisi lalu lintas negara maju dengan tingkat disiplin pengemudi yang relatif tinggi, komposisi kendaraan yang lebih homogen, serta hambatan samping yang rendah. MKJI, di sisi lain, secara eksplisit mempertimbangkan kondisi khas Indonesia, seperti dominasi sepeda motor, perilaku pengemudi yang beragam, serta tingginya aktivitas samping jalan. Oleh karena itu, MKJI dinilai lebih representatif untuk menggambarkan kondisi lalu lintas perkotaan di Indonesia dibandingkan HCM jika digunakan secara langsung tanpa penyesuaian.

Pada ukuran kinerja, HCM menggunakan indikator yang lebih beragam dan detail untuk menggambarkan kualitas pelayanan jalan, sedangkan MKJI cenderung menggunakan indikator yang lebih sederhana, seperti rasio volume terhadap kapasitas dan tundaan rata-rata. Pendekatan MKJI yang lebih *ringkas* ini memudahkan penerapan di lapangan, tetapi di sisi lain dapat membatasi kedalaman analisis, terutama untuk studi transportasi yang kompleks dan berskala besar.

Meskipun terdapat perbedaan-perbedaan tersebut, dalam praktik di Indonesia kedua standar ini sering digunakan secara bersamaan. Banyak studi dan analisis lalu lintas mengombinasikan kerangka konseptual dan indikator kinerja dari HCM dengan faktor penyesuaian dan konteks lokal MKJI. Menurut Khisty dan Lall (2019), pendekatan kombinitif ini memungkinkan perencana transportasi memperoleh hasil analisis yang lebih komprehensif, akurat, dan tetap relevan dengan kondisi nyata di lapangan.

5. Penerapan Standar dalam Praktik Rekayasa Transportasi

Pada praktik rekayasa transportasi, standar analisis kapasitas seperti HCM dan MKJI berperan yang sangat penting sebagai acuan teknis dalam pengambilan keputusan. Pada tahap perencanaan dan desain jalan baru, standar ini digunakan untuk memperkirakan kemampuan fasilitas jalan dalam melayani arus lalu lintas di masa kini dan masa depan. Dengan mengacu pada kapasitas dan tingkat pelayanan yang disyaratkan, perencana dapat menentukan jumlah lajur, lebar jalan, tipe simpang, serta kebutuhan pengendalian lalu lintas yang sesuai dengan proyeksi permintaan perjalanan.

Standar kapasitas juga digunakan untuk mengevaluasi kinerja ruas jalan dan simpang eksisting. Melalui perhitungan kapasitas aktual dan tingkat pelayanan, kondisi operasional jalan dapat dinilai secara objektif, apakah masih berfungsi dengan baik atau sudah mendekati bahkan melampaui kapasitasnya. Hasil evaluasi ini menjadi dasar dalam menentukan perlunya tindakan perbaikan, seperti pengaturan ulang fase sinyal, manajemen parkir, rekayasa lalu lintas, atau peningkatan kapasitas fisik.

Pada konteks Analisis Dampak Lalu Lintas (ANDALALIN), standar kapasitas berfungsi sebagai instrumen utama untuk menilai dampak pembangunan baru terhadap jaringan jalan di sekitarnya. Dengan menggunakan metode yang terstandar, dampak tambahan arus

lalu lintas akibat kawasan perumahan, pusat perbelanjaan, atau kawasan industri dapat dianalisis secara sistematis. Hal ini memungkinkan perencanaan dan pengambil kebijakan merumuskan rekomendasi mitigasi yang rasional dan dapat dipertanggungjawabkan secara teknis.

Standar kapasitas juga berperan penting dalam menilai efektivitas berbagai strategi manajemen lalu lintas, seperti penerapan sistem satu arah, pembatasan kendaraan, pengaturan jam operasional, atau optimalisasi sinyal lalu lintas. Dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah penerapan kebijakan, kinerja lalu lintas dapat dievaluasi secara kuantitatif, sehingga kebijakan yang kurang efektif dapat diperbaiki atau disesuaikan.

6. Tantangan dan Arah Pengembangan Standar Kapasitas

Perkembangan sistem transportasi perkotaan yang semakin kompleks menimbulkan tantangan baru dalam penerapan standar kapasitas jalan. Salah satu tantangan utama adalah meningkatnya peran transportasi umum dan moda aktif seperti berjalan kaki dan bersepeda. Standar kapasitas yang selama ini berfokus pada kinerja kendaraan bermotor dituntut untuk mampu menilai kinerja ruang jalan secara lebih adil bagi seluruh pengguna. Hal ini menuntut pendekatan multimoda yang tidak hanya mengukur kelancaran arus kendaraan, tetapi juga kenyamanan, keselamatan, dan aksesibilitas bagi pengguna non-motorized.

Integrasi sistem transportasi cerdas (*Intelligent Transportation Systems/ITS*) mengubah cara jaringan jalan beroperasi. Teknologi seperti sinyal adaptif, manajemen lalu lintas berbasis data real-time, dan kendaraan dengan sistem bantuan pengemudi membuat kapasitas jalan tidak lagi bersifat statis. Kapasitas dapat berubah secara dinamis tergantung pada strategi pengendalian lalu lintas yang diterapkan. Kondisi ini menantang standar konvensional yang umumnya berbasis pada asumsi arus lalu lintas rata-rata dan kondisi homogen.

Perubahan perilaku perjalanan akibat layanan berbasis aplikasi, seperti ride-hailing dan logistik perkotaan, juga memengaruhi kinerja jalan. Aktivitas naik-turun penumpang, berhenti sementara di tepi jalan, serta peningkatan perjalanan jarak pendek menimbulkan gangguan baru yang belum sepenuhnya terakomodasi dalam parameter kapasitas tradisional. Di sisi lain, tuntutan global untuk mengurangi emisi dan meningkatkan keselamatan lalu lintas mendorong pergeseran paradigma

dari sekadar peningkatan kapasitas fisik menuju pengelolaan permintaan dan kualitas pelayanan.



BAB V

ANALISIS SIMPANG DAN MANAJEMEN LALU LINTAS

Analisis simpang dan manajemen lalu lintas merupakan bagian penting dalam rekayasa transportasi yang berfokus pada upaya meningkatkan kinerja, keselamatan, dan efisiensi pergerakan lalu lintas pada titik-titik konflik utama di jaringan jalan perkotaan. Simpang, baik bersinyal maupun tak bersinyal, sering menjadi lokasi terjadinya kemacetan dan kecelakaan akibat tingginya interaksi antar arus kendaraan dan pengguna jalan lainnya. Oleh karena itu, analisis simpang dilakukan untuk menilai kapasitas, tundaan, dan tingkat pelayanan, sedangkan manajemen lalu lintas bertujuan mengoptimalkan penggunaan prasarana yang ada melalui pengaturan operasional, rekayasa geometrik, dan pemanfaatan teknologi. Pendekatan ini menjadi solusi strategis dalam menghadapi keterbatasan ruang dan meningkatnya volume lalu lintas perkotaan, sekaligus mendukung terciptanya sistem transportasi yang aman, lancar, dan berkelanjutan.

A. Jenis Simpang dan Permasalahannya

Simpang (*intersection*) merupakan elemen penting dalam jaringan jalan karena menjadi titik temu berbagai arus lalu lintas dari arah yang berbeda. Di lokasi inilah interaksi kendaraan, pejalan kaki, dan pengguna jalan lainnya terjadi secara intensif, sehingga simpang sering menjadi titik kritis yang menentukan kinerja jaringan transportasi secara keseluruhan. Menurut Transportation Research Board (TRB, 2022), sebagian besar tundaan, kemacetan, dan kecelakaan lalu lintas di wilayah perkotaan terjadi di simpang, bukan di ruas jalan.

1. Pengertian dan Peran Simpang dalam Sistem Transportasi

Simpang merupakan elemen yang sangat penting dalam sistem transportasi jalan karena menjadi titik temu berbagai pergerakan lalu lintas. Secara umum, simpang didefinisikan sebagai area pada jaringan jalan di mana dua atau lebih ruas jalan bertemu, berpotongan, atau berakhir, sehingga memungkinkan kendaraan untuk melanjutkan perjalanan lurus maupun berpindah arah melalui manuver belok kiri dan belok kanan. Keberadaan simpang tidak dapat dihindari dalam jaringan jalan perkotaan karena berfungsi sebagai penghubung antar-ruas dan memungkinkan aksesibilitas antar kawasan. Tanpa simpang, jaringan jalan akan bersifat terfragmentasi dan tidak mampu melayani kebutuhan mobilitas secara menyeluruh.

Pada sistem transportasi perkotaan, peran simpang menjadi semakin krusial karena tingkat aktivitas dan volume lalu lintas yang tinggi. Simpang berfungsi sebagai titik distribusi arus lalu lintas, tempat arus dari berbagai arah bertemu dan kemudian terbagi kembali ke arah tujuan masing-masing. Oleh karena itu, kinerja simpang sangat memengaruhi kelancaran perjalanan pada ruas-ruas jalan di sekitarnya. Khisty dan Lall (2019) menegaskan bahwa banyak permasalahan kemacetan perkotaan bukan disebabkan oleh keterbatasan kapasitas ruas jalan, melainkan oleh rendahnya kinerja simpang sebagai titik konflik utama dalam jaringan.

Simpang juga memiliki peran strategis dalam penilaian kinerja sistem transportasi. Tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*) suatu kawasan perkotaan sering kali ditentukan oleh kondisi simpang, khususnya simpang bersinyal yang mengalami tundaan tinggi pada jam puncak. Tundaan, antrean, dan konflik pergerakan di simpang menjadi indikator penting dalam evaluasi kinerja lalu lintas. Oleh karena itu, perbaikan kinerja simpang melalui pengaturan sinyal, perbaikan geometrik, atau manajemen lalu lintas sering kali memberikan dampak yang lebih signifikan terhadap kelancaran jaringan dibandingkan pelebaran ruas jalan semata.

2. Klasifikasi Jenis Simpang

Berdasarkan pengaturan lalu lintas dan karakteristik geometriaknya, simpang dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis utama. Klasifikasi ini penting karena setiap jenis simpang memiliki karakteristik operasional, tingkat konflik, serta kebutuhan pengendalian

lalu lintas yang berbeda. Pemilihan jenis simpang yang tepat akan sangat menentukan kinerja lalu lintas, tingkat keselamatan, serta efisiensi pergerakan kendaraan dalam suatu jaringan jalan, khususnya di kawasan perkotaan yang memiliki kompleksitas pergerakan tinggi.

Simpang tak bersinyal (*unsignalized intersections*) merupakan simpang yang tidak dilengkapi dengan alat pengendali lalu lintas aktif berupa lampu sinyal. Pengaturan pergerakan kendaraan pada simpang ini bergantung pada aturan prioritas, rambu lalu lintas seperti STOP atau YIELD, serta perilaku dan kesepakatan tidak tertulis antar pengemudi. Simpang jenis ini umumnya dijumpai dalam bentuk simpang T, simpang empat sederhana, atau simpang di kawasan permukiman dengan volume lalu lintas relatif rendah. Menurut Garber dan Hoel (2020), simpang tak bersinyal lebih sesuai diterapkan pada lokasi dengan arus lalu lintas rendah hingga sedang, karena pada volume yang tinggi, konflik antar arus sulit dikendalikan tanpa pengaturan aktif. Permasalahan yang sering muncul pada simpang tak bersinyal antara lain kesulitan kendaraan dari jalan minor untuk memperoleh celah pada arus utama, tingginya tundaan dan antrean pada pendekat minor, meningkatnya potensi konflik dan kecelakaan, serta tingginya ketergantungan pada kepatuhan dan kewaspadaan pengemudi.

Berbeda dengan simpang tak bersinyal, simpang bersinyal (*signalized intersections*) menggunakan lampu lalu lintas untuk mengatur giliran pergerakan kendaraan dari berbagai pendekat. Lampu lalu lintas bekerja melalui pembagian fase yang terdiri dari sinyal hijau, kuning, dan merah dengan durasi waktu tertentu. Simpang bersinyal banyak diterapkan di kawasan perkotaan dengan volume lalu lintas tinggi dan pola pergerakan yang kompleks, seperti adanya manuver belok kanan, belok kiri, serta pergerakan pejalan kaki dan pesepeda. Papacostas dan Prevedouros (2018) menyatakan bahwa simpang bersinyal mampu memberikan kontrol lalu lintas yang lebih baik dibandingkan simpang tak bersinyal, namun efektivitasnya sangat bergantung pada perencanaan waktu sinyal yang tepat. Permasalahan yang sering terjadi pada simpang bersinyal meliputi tundaan tinggi akibat waktu merah yang terlalu panjang, antrean kendaraan yang melampaui kapasitas ruang pendekat (*queue spillback*), pengaturan fase yang tidak optimal atau tidak adaptif terhadap perubahan volume lalu lintas, serta meningkatnya kompleksitas konflik dengan pengguna jalan non-motorized.

Simpang juga dapat diklasifikasikan berdasarkan pertemuan elevasi pergerakannya, yaitu simpang sebidang dan simpang tidak sebidang. Simpang sebidang adalah simpang di mana seluruh pergerakan lalu lintas bertemu pada satu bidang yang sama, sehingga potensi konflik antar arus relatif tinggi. Sebaliknya, simpang tidak sebidang atau interchange memisahkan pergerakan lalu lintas secara vertikal melalui pembangunan flyover, underpass, atau ramp, sehingga konflik langsung antar arus dapat dieliminasi. Simpang tidak sebidang dirancang untuk meningkatkan kapasitas dan keselamatan, terutama pada arus lalu lintas berkecepatan tinggi. Namun, sebagaimana dikemukakan oleh Vuchic (2017), simpang jenis ini memerlukan biaya konstruksi yang sangat besar serta kebutuhan ruang yang luas, sehingga umumnya hanya diterapkan pada jalan arteri utama, jalan tol, atau jalan bebas hambatan dengan volume lalu lintas yang sangat tinggi.

3. Permasalahan Umum pada Simpang Perkotaan

Terlepas dari perbedaan jenis dan pengaturannya, simpang di kawasan perkotaan umumnya menghadapi berbagai permasalahan yang kompleks dan saling terkait. Permasalahan ini muncul sebagai akibat dari tingginya intensitas pergerakan, keterbatasan ruang perkotaan, serta dinamika perilaku pengguna jalan. Akumulasi dari berbagai faktor tersebut menjadikan simpang sebagai titik kritis yang sangat memengaruhi kinerja sistem transportasi perkotaan secara keseluruhan.

Salah satu permasalahan utama pada simpang perkotaan adalah kemacetan dan tundaan yang tinggi. Pertumbuhan volume kendaraan yang pesat sering kali tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas simpang, baik melalui perbaikan geometrik maupun pengaturan lalu lintas yang lebih efektif. Kondisi ini menyebabkan antrean kendaraan yang panjang, terutama pada jam-jam sibuk pagi dan sore hari. Tundaan yang tinggi tidak hanya menurunkan tingkat pelayanan simpang, tetapi juga berdampak pada peningkatan konsumsi bahan bakar, waktu tempuh, serta tingkat stres pengguna jalan.

Permasalahan berikutnya berkaitan dengan konflik lalu lintas dan keselamatan. Simpang merupakan lokasi dengan tingkat konflik tertinggi dalam jaringan jalan karena terjadinya pertemuan berbagai arah pergerakan, seperti konflik silang, konflik gabung, dan konflik divergen. Tingginya intensitas konflik ini meningkatkan risiko kecelakaan, terutama jika tidak didukung oleh pengaturan lalu lintas yang memadai

dan kepatuhan pengguna jalan. Menurut WHO (2023), persimpangan jalan menyumbang proporsi yang signifikan terhadap kecelakaan lalu lintas di kawasan perkotaan, khususnya yang melibatkan kendaraan bermotor, pejalan kaki, dan pesepeda.

Keterbatasan geometrik juga menjadi kendala utama dalam peningkatan kinerja simpang perkotaan. Banyak simpang berada pada kawasan terbangun dengan ruang yang sangat terbatas, sehingga pelebaran pendekat, penambahan lajur, atau perbaikan radius tikungan sulit untuk dilakukan. Lebar pendekat yang sempit dan desain geometrik yang tidak ideal sering kali menyebabkan bottleneck, memperlambat pergerakan kendaraan, dan meningkatkan potensi konflik, terutama bagi kendaraan besar dan angkutan umum.

Keberadaan hambatan samping di sekitar simpang turut memperburuk kinerja operasional. Aktivitas parkir di badan jalan, pejalan kaki yang menyeberang tidak pada tempatnya, kendaraan berhenti untuk menaikkan atau menurunkan penumpang, serta aktivitas komersial di sekitar simpang dapat mengganggu kelancaran arus lalu lintas. Fenomena ini banyak ditemukan di kota-kota berkembang, di mana fungsi jalan sering bercampur dengan aktivitas sosial dan ekonomi. Susilo dan Joewono (2020) menegaskan bahwa hambatan samping merupakan salah satu faktor dominan yang menurunkan kapasitas dan meningkatkan tundaan pada simpang perkotaan di Indonesia.

Permasalahan lain yang tidak kalah penting adalah perilaku pengemudi. Ketidaksiplinan dalam mematuhi rambu dan sinyal lalu lintas, perilaku agresif, serta rendahnya kesadaran akan keselamatan dapat memperburuk kondisi lalu lintas di simpang. Pelanggaran seperti menerobos lampu merah, berhenti melewati garis henti, atau tidak memberi prioritas pada pejalan kaki sering memicu konflik dan kecelakaan. Oleh karena itu, selain perbaikan teknis dan geometrik, peningkatan kinerja simpang perkotaan juga memerlukan pendekatan non-teknis melalui penegakan hukum dan edukasi keselamatan berlalu lintas.

4. Implikasi terhadap Rekayasa dan Manajemen Lalu Lintas

Pemahaman yang komprehensif mengenai jenis simpang beserta permasalahan yang menyertainya memiliki implikasi langsung terhadap proses rekayasa dan manajemen lalu lintas. Simpang bukan sekadar elemen geometrik dalam jaringan jalan, melainkan titik pengendali

utama yang menentukan kelancaran, keselamatan, dan efisiensi pergerakan lalu lintas. Oleh karena itu, setiap keputusan perencanaan dan penanganan simpang harus didasarkan pada analisis yang matang terhadap karakteristik lalu lintas, tingkat konflik, serta kondisi fisik dan lingkungan sekitarnya.

Pada praktik rekayasa lalu lintas, pemilihan jenis pengendalian simpang merupakan keputusan strategis yang sangat menentukan kinerja operasional. Keputusan apakah suatu simpang tetap dipertahankan sebagai simpang tak bersinyal, diubah menjadi simpang bersinyal, atau ditingkatkan menjadi simpang tidak sebidang harus mempertimbangkan volume dan komposisi lalu lintas, tingkat kecelakaan, pola pergerakan dominan, serta keterbatasan ruang. Simpang tak bersinyal mungkin masih efektif untuk volume rendah hingga sedang, namun pada volume yang lebih tinggi diperlukan pengendalian yang lebih ketat melalui sinyal atau pemisahan tingkat guna mengurangi konflik dan tundaan.

Konteks perkotaan juga berperan penting dalam penentuan strategi penanganan simpang. Keberadaan pejalan kaki, pesepeda, angkutan umum, serta aktivitas guna lahan di sekitar simpang menuntut pendekatan yang lebih holistik. Rekayasa simpang di kawasan pusat kota, misalnya, tidak dapat hanya berorientasi pada kelancaran kendaraan pribadi, tetapi juga harus mengakomodasi keselamatan pengguna jalan rentan dan mendukung fungsi ekonomi serta sosial kawasan tersebut. Hal ini menuntut integrasi antara desain geometrik, pengaturan lalu lintas, dan manajemen operasional.

B. Analisis Simpang Tak Bersinyal

Analisis simpang tak bersinyal merupakan bagian penting dalam rekayasa lalu lintas, khususnya pada jaringan jalan perkotaan dan perdesaan dengan volume lalu lintas rendah hingga sedang. Simpang tak bersinyal adalah persimpangan yang tidak dilengkapi dengan alat pengendali lalu lintas aktif seperti lampu sinyal, sehingga pergerakan kendaraan diatur berdasarkan aturan prioritas, rambu lalu lintas, dan interaksi antar pengemudi. Menurut Transportation Research Board (TRB, 2022), simpang tak bersinyal masih banyak digunakan karena biaya operasionalnya rendah dan cukup efektif pada kondisi arus tertentu, namun memerlukan analisis kinerja yang cermat untuk menjamin keselamatan dan kelancaran lalu lintas.

1. Tujuan dan Ruang Lingkup Analisis

Analisis simpang tak bersinyal bertujuan untuk memahami sejauh mana suatu simpang mampu melayani pergerakan lalu lintas yang datang dari berbagai pendekat tanpa bantuan pengendalian aktif berupa lampu lalu lintas. Melalui analisis ini, kinerja simpang dapat dievaluasi secara kuantitatif, sehingga dapat diketahui apakah kondisi operasional yang ada masih memadai atau sudah memerlukan penanganan lebih lanjut. Penilaian ini menjadi penting karena simpang tak bersinyal sangat bergantung pada interaksi antar pengemudi dan aturan prioritas, yang pada kondisi tertentu dapat menimbulkan tundaan dan konflik yang signifikan.

Salah satu fokus utama dalam analisis simpang tak bersinyal adalah penentuan kapasitas masing-masing pendekat. Kapasitas ini menunjukkan kemampuan maksimal suatu pendekat dalam melayani arus kendaraan berdasarkan kondisi geometrik, volume lalu lintas, serta peluang kendaraan mendapatkan celah (*gap*) pada arus utama. Dari kapasitas tersebut kemudian dihitung derajat kejenuhan, yang mencerminkan perbandingan antara volume lalu lintas aktual dengan kapasitas yang tersedia. Derajat kejenuhan menjadi indikator penting untuk menilai apakah simpang masih beroperasi secara stabil atau sudah mendekati kondisi jenuh.

Analisis simpang tak bersinyal juga bertujuan untuk menghitung tundaan lalu lintas yang dialami kendaraan, terutama pada pendekat minor. Tundaan yang tinggi biasanya mengindikasikan kesulitan kendaraan dalam memasuki arus utama, yang pada akhirnya dapat menurunkan tingkat kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan. Berdasarkan nilai tundaan dan derajat kejenuhan tersebut, tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*) simpang dapat ditentukan sebagai ukuran kinerja operasional secara keseluruhan.

2. Parameter Utama dalam Analisis Simpang Tak Bersinyal

Analisis simpang tak bersinyal didasarkan pada sejumlah parameter utama yang saling berkaitan dan secara langsung memengaruhi kinerja operasional simpang. Parameter yang paling mendasar adalah volume lalu lintas, yaitu jumlah kendaraan yang melewati simpang dari masing-masing pendekat dalam satuan waktu tertentu, umumnya kendaraan per jam. Volume lalu lintas ini tidak hanya dihitung secara total, tetapi juga dibedakan berdasarkan jenis pergerakan

seperti lurus, belok kiri, dan belok kanan. Untuk keperluan analisis kapasitas, volume kendaraan tersebut biasanya dikonversi ke dalam satuan kendaraan penumpang setara (smp atau PCU) agar pengaruh perbedaan karakteristik kendaraan dapat diperhitungkan secara seragam.

Parameter berikutnya yang sangat penting adalah kapasitas pendekat. Kapasitas pendekat menggambarkan kemampuan maksimum suatu pendekat simpang dalam melayani arus kendaraan berdasarkan kondisi lalu lintas dan geometrik yang ada. Berbeda dengan simpang bersinyal, kapasitas pada simpang tak bersinyal tidak ditentukan oleh waktu hijau sinyal, melainkan oleh interaksi antar arus lalu lintas. Pada kondisi ini, arus minor sangat bergantung pada arus mayor dan peluang kendaraan untuk mendapatkan celah yang cukup aman untuk melintas. Menurut Roess, Prassas, dan McShane (2020), kapasitas pendekat dipengaruhi oleh besarnya volume arus prioritas, karakteristik celah yang tersedia, serta perilaku pengemudi dalam menerima atau menolak celah tersebut. Semakin besar volume arus mayor, semakin kecil peluang celah yang tersedia, sehingga kapasitas pendekat minor akan menurun.

Untuk menilai tingkat pemanfaatan kapasitas tersebut, digunakan parameter derajat kejenuhan (*Degree of Saturation/DS*). Derajat kejenuhan merupakan perbandingan antara volume lalu lintas aktual dengan kapasitas pendekat. Nilai DS memberikan gambaran apakah suatu pendekat masih beroperasi secara stabil atau sudah mendekati kondisi jenuh. Dalam praktik di Indonesia, Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI, 2023) menggunakan kriteria tertentu untuk menafsirkan nilai DS, di mana nilai di bawah 0,75 menunjukkan kondisi lalu lintas yang relatif lancar, nilai antara 0,75 hingga 1,00 menandakan kondisi mendekati jenuh, dan nilai di atas 1,00 menunjukkan kondisi jenuh atau macet. Parameter ini menjadi indikator utama dalam menentukan kebutuhan penanganan simpang.

Tundaan (*delay*) merupakan parameter kinerja yang sangat penting dalam analisis simpang tak bersinyal. Tundaan didefinisikan sebagai waktu tambahan yang dialami kendaraan akibat harus memperlambat atau berhenti untuk menunggu kesempatan melintasi simpang. Pada simpang tak bersinyal, tundaan umumnya lebih besar terjadi pada pendekat minor karena kendaraan harus menunggu celah yang cukup pada arus mayor. Besarnya tundaan tidak hanya memengaruhi tingkat pelayanan simpang, tetapi juga berdampak pada kenyamanan pengguna jalan, konsumsi bahan bakar, serta potensi

terjadinya konflik lalu lintas. Oleh karena itu, evaluasi tundaan menjadi bagian penting dalam menilai kelayakan operasional simpang tak bersinyal dan menentukan apakah diperlukan perubahan pengendalian atau perbaikan geometrik.

3. Pendekatan Metodologis Analisis

Pendekatan metodologis dalam analisis simpang tak bersinyal pada dasarnya bertujuan untuk memberikan kerangka yang sistematis dan terukur dalam menilai kinerja simpang. Di Indonesia, analisis ini mengacu pada Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI, 2023) yang merupakan pengembangan dari MKJI. PKJI dirancang untuk merepresentasikan kondisi lalu lintas nasional yang memiliki karakteristik khas, seperti campuran jenis kendaraan, tingkat hambatan samping yang tinggi, serta variasi perilaku pengemudi. Melalui pedoman ini, analisis lalu lintas dapat menghitung kapasitas pendekat, derajat kejenuhan, dan tundaan dengan mempertimbangkan data volume lalu lintas, kondisi geometrik simpang, serta lingkungan operasional di sekitarnya. Pendekatan berbasis standar ini memberikan konsistensi dalam analisis serta memudahkan perbandingan kinerja antar simpang.

Pendekatan internasional juga banyak dijadikan rujukan, khususnya *Highway Capacity Manual* (HCM) edisi terbaru yang diterbitkan oleh *Transportation Research Board* (TRB, 2022). HCM menyediakan metode analisis simpang tak bersinyal yang lebih teoritis dan rinci, dengan menekankan pada interaksi antar arus lalu lintas. Metode ini menggunakan pendekatan probabilistik untuk menggambarkan peluang kendaraan dari jalan minor dalam mendapatkan celah pada arus mayor. Keunggulan HCM terletak pada fleksibilitasnya dalam mengakomodasi berbagai skenario lalu lintas dan kondisi geometrik, sehingga sering digunakan sebagai pembanding atau pelengkap dalam studi akademik maupun profesional.

Inti dari pendekatan metodologis tersebut adalah konsep gap acceptance. Konsep ini menyatakan bahwa kendaraan dari pendekat minor hanya dapat memasuki atau melintasi simpang apabila terdapat celah waktu yang cukup aman pada arus lalu lintas utama. Dua parameter utama dalam konsep ini adalah celah kritis (*critical gap*), yaitu celah minimum yang dianggap aman oleh pengemudi untuk melakukan manuver, serta waktu tindak lanjut (*follow-up time*), yaitu waktu antar kendaraan berturut-turut dari arus minor yang memanfaatkan celah

tersebut. Semakin besar nilai *critical gap*, semakin kecil peluang kendaraan minor untuk melintas, sehingga kapasitas pendekat akan menurun.

4. Tingkat Pelayanan (*Level of Service*) Simpang Tak Bersinyal

Tingkat pelayanan atau *Level of Service* (LOS) pada simpang tak bersinyal merupakan indikator penting yang digunakan untuk menggambarkan kualitas pelayanan lalu lintas yang dirasakan oleh pengguna jalan. Berbeda dengan ruas jalan yang sering menitikberatkan pada kecepatan atau kepadatan, penilaian LOS pada simpang tak bersinyal umumnya berfokus pada tundaan rata-rata kendaraan, khususnya pada pendekat minor. Hal ini disebabkan oleh karakteristik simpang tak bersinyal yang sangat bergantung pada peluang kendaraan dari jalan minor untuk mendapatkan celah pada arus utama, sehingga tundaan menjadi ukuran yang paling representatif terhadap kenyamanan dan efisiensi pergerakan.

Baik *Highway Capacity Manual* (HCM) maupun Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) mengklasifikasikan tingkat pelayanan simpang tak bersinyal ke dalam enam kategori, yaitu LOS A hingga LOS F. LOS A mencerminkan kondisi terbaik, di mana tundaan yang dialami kendaraan sangat kecil dan arus lalu lintas berjalan dengan sangat lancar. Pada kondisi ini, kendaraan dari pendekat minor hampir tidak mengalami waktu tunggu yang berarti, sehingga interaksi konflik antar arus dapat dikelola dengan baik. Sebaliknya, LOS F menggambarkan kondisi terburuk, dengan tundaan yang sangat tinggi, antrean panjang, serta arus lalu lintas yang tidak stabil atau macet. Pada tingkat pelayanan ini, simpang sudah tidak mampu melayani volume lalu lintas yang ada secara memadai.

Penentuan tingkat pelayanan ini memiliki peran strategis dalam proses perencanaan dan evaluasi simpang. Dengan mengetahui LOS yang terjadi, perencana transportasi dapat menilai apakah kinerja simpang masih berada pada batas yang dapat diterima atau telah melampaui ambang toleransi operasional. Simpang dengan LOS rendah, seperti E atau F, umumnya memerlukan penanganan lebih lanjut, baik melalui perbaikan geometrik, penerapan manajemen lalu lintas, pemasangan sinyal lalu lintas, maupun perubahan skema prioritas.

5. Permasalahan Umum pada Simpang Tak Bersinyal

Simpang tak bersinyal di kawasan perkotaan sering menghadapi permasalahan serius akibat ketidakseimbangan volume lalu lintas antara jalan mayor dan jalan minor. Pada banyak kasus, arus lalu lintas pada jalan mayor sangat dominan sehingga kendaraan dari jalan minor mengalami kesulitan besar untuk mendapatkan celah yang aman. Kondisi ini menyebabkan tundaan yang tinggi, antrean panjang, dan meningkatnya frustrasi pengemudi pada pendekatan minor. Ketidakseimbangan ini semakin terasa pada jam puncak, ketika volume lalu lintas meningkat tajam tanpa adanya mekanisme pengendalian aktif seperti sinyal lalu lintas.

Permasalahan lain yang sangat berpengaruh adalah tingginya hambatan samping di sekitar simpang. Aktivitas parkir di badan jalan, pejalan kaki yang menyeberang tidak pada tempatnya, kendaraan keluar-masuk akses samping, serta aktivitas komersial informal sering kali mengganggu kelancaran arus lalu lintas. Hambatan samping ini tidak hanya menurunkan kapasitas efektif simpang, tetapi juga meningkatkan tingkat konflik antar kendaraan. Dalam konteks simpang tak bersinyal, keberadaan hambatan samping memperbesar ketidakpastian pergerakan dan memperpanjang waktu tunggu kendaraan dari jalan minor.

Perilaku pengemudi juga menjadi faktor penting yang memperburuk kinerja simpang tak bersinyal. Perilaku agresif, seperti memaksa masuk ke celah yang tidak aman, tidak mematuhi aturan prioritas, atau kurangnya sikap saling memberi jalan, dapat meningkatkan risiko kecelakaan. Sebaliknya, perilaku yang terlalu berhati-hati juga dapat memperlambat arus lalu lintas dan menambah tundaan. Ketergantungan yang besar pada perilaku pengemudi inilah yang membuat kinerja simpang tak bersinyal cenderung tidak stabil dan sulit diprediksi, terutama pada kondisi lalu lintas padat.

Keterbatasan ruang geometrik sering menjadi kendala utama dalam penanganan simpang tak bersinyal. Di kawasan perkotaan yang telah berkembang, pelebaran pendekatan atau penambahan lajur sering kali tidak memungkinkan karena keterbatasan lahan, keberadaan bangunan, atau fungsi ruang kota lainnya. Akibatnya, simpang tetap beroperasi dengan geometri yang tidak ideal meskipun volume lalu lintas terus meningkat. Menurut Susilo dan Joewono (2020), kondisi ini menyebabkan banyak simpang tak bersinyal di kota-kota berkembang

beroperasi di luar kapasitas idealnya, sehingga kinerja lalu lintas menurun dan potensi konflik serta kecelakaan semakin besar.

6. Implikasi terhadap Penanganan Simpang

Hasil analisis simpang tak bersinyal memiliki peran yang sangat penting sebagai dasar pengambilan keputusan dalam penanganan dan perbaikan kinerja simpang. Analisis ini tidak hanya menggambarkan kondisi operasional eksisting, tetapi juga memberikan gambaran mengenai tingkat kejenuhan, tundaan, dan potensi konflik yang terjadi. Dengan memahami parameter-parameter tersebut, perencana lalu lintas dapat menentukan bentuk intervensi yang paling tepat dan proporsional sesuai dengan tingkat permasalahan yang dihadapi simpang.

Pada simpang tak bersinyal dengan tingkat konflik dan tundaan yang masih relatif rendah, penanganan sederhana seperti penambahan rambu prioritas, rambu STOP atau YIELD, serta perbaikan marka jalan sering kali sudah cukup efektif. Penegasan prioritas pergerakan dapat membantu mengurangi ketidakpastian pengemudi, memperjelas hak jalan, dan meningkatkan keselamatan. Selain itu, pengaturan marka seperti garis henti dan marka arah lajur dapat memperbaiki disiplin pergerakan kendaraan tanpa memerlukan perubahan fisik yang signifikan.

Apabila permasalahan simpang berkaitan dengan keterbatasan kapasitas akibat kondisi geometrik, maka perbaikan geometri simpang menjadi alternatif penanganan. Tindakan ini dapat berupa pelebaran pendekat, penambahan lajur belok, perbaikan radius tikungan, atau penataan ulang akses di sekitar simpang. Perbaikan geometrik bertujuan untuk meningkatkan kapasitas pendekat, mengurangi konflik pergerakan, serta memperlancar arus lalu lintas. Namun, di kawasan perkotaan padat, solusi ini sering terkendala oleh keterbatasan ruang dan biaya.

Pada kondisi tertentu, pembatasan pergerakan juga dapat diterapkan sebagai strategi manajemen lalu lintas. Pembatasan belok kanan, pengaturan waktu tertentu untuk pergerakan tertentu, atau pengalihan arus lalu lintas dapat mengurangi konflik utama dan meningkatkan kinerja simpang secara keseluruhan. Pendekatan ini relatif lebih murah dibandingkan perubahan geometrik besar, tetapi memerlukan sosialisasi yang baik agar dapat diterima oleh pengguna jalan.

Apabila volume lalu lintas terus meningkat dan kinerja simpang tak bersinyal sudah tidak lagi memenuhi tingkat pelayanan yang dapat diterima, konversi menjadi simpang bersinyal dapat dipertimbangkan. Menurut Transportation Research Board (2022), keputusan pemasangan sinyal lalu lintas harus dilakukan secara hati-hati dengan mempertimbangkan keseimbangan tundaan pada seluruh pendekat, keselamatan, serta dampaknya terhadap jaringan jalan di sekitarnya. Tanpa perencanaan waktu sinyal yang tepat, simpang bersinyal justru berpotensi menimbulkan tundaan baru dan antrean panjang. Oleh karena itu, penanganan simpang harus selalu didasarkan pada hasil analisis yang komprehensif dan pendekatan rekayasa lalu lintas yang terpadu.

C. Analisis Simpang Bersinyal

Simpang bersinyal merupakan persimpangan yang dilengkapi dengan alat pemberi isyarat lalu lintas (APILL) untuk mengatur pergerakan kendaraan, pejalan kaki, dan pengguna jalan lainnya secara bergantian. Penggunaan sinyal lalu lintas bertujuan untuk meningkatkan keselamatan, mengurangi konflik lalu lintas, serta mengoptimalkan kapasitas simpang pada kondisi volume lalu lintas sedang hingga tinggi. Menurut *Transportation Research Board* (TRB, 2022), simpang bersinyal menjadi elemen kunci dalam manajemen lalu lintas perkotaan, terutama pada kawasan dengan aktivitas tinggi dan arus lalu lintas yang kompleks.

1. Tujuan Analisis Simpang Bersinyal

Analisis simpang bersinyal memiliki peran penting dalam memahami bagaimana suatu persimpangan berfungsi dalam melayani arus lalu lintas yang saling berkonflik. Tujuan utama dari analisis ini adalah menilai kinerja operasional simpang berdasarkan kondisi eksisting, sehingga dapat diketahui apakah pengaturan sinyal yang diterapkan sudah mampu melayani volume lalu lintas secara efektif dan aman. Melalui analisis yang sistematis, simpang bersinyal dapat dievaluasi tidak hanya dari sisi kelancaran arus, tetapi juga dari aspek keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan.

Analisis simpang bersinyal bertujuan untuk menentukan kapasitas dan derajat kejenuhan pada setiap pendekat simpang. Kapasitas menunjukkan kemampuan maksimum simpang dalam melayani

kendaraan, sedangkan derajat kejenuhan menggambarkan tingkat pemanfaatan kapasitas tersebut. Nilai derajat kejenuhan yang tinggi mengindikasikan bahwa pendekatan simpang mendekati atau bahkan telah melampaui kapasitasnya, sehingga berpotensi menimbulkan antrean panjang dan tundaan yang besar, terutama pada jam puncak.

Tujuan penting lainnya adalah menghitung tundaan dan panjang antrean kendaraan. Tundaan merupakan indikator utama yang mencerminkan kualitas pelayanan pada simpang bersinyal, karena secara langsung dirasakan oleh pengguna jalan. Panjang antrean juga perlu dianalisis untuk memastikan bahwa antrean yang terjadi tidak melampaui kapasitas ruang pendekat dan tidak mengganggu simpang atau ruas jalan di sekitarnya. Informasi ini sangat krusial dalam konteks perkotaan yang memiliki keterbatasan ruang dan tingkat kepadatan lalu lintas yang tinggi.

Hasil dari perhitungan kapasitas, derajat kejenuhan, tundaan, dan antrean kemudian digunakan untuk menentukan tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*) simpang bersinyal. LOS memberikan gambaran kualitatif mengenai kondisi operasional simpang, mulai dari arus yang sangat lancar hingga kondisi macet. Penentuan LOS membantu perencana dan pengambil kebijakan dalam menilai apakah kinerja simpang masih dapat diterima atau sudah memerlukan penanganan lebih lanjut.

2. Komponen Utama Simpang Bersinyal

Pada simpang bersinyal, terdapat beberapa komponen utama yang saling berkaitan dan secara langsung memengaruhi kinerja operasional simpang. Komponen-komponen ini harus dirancang dan diatur secara cermat agar simpang mampu melayani arus lalu lintas yang beragam secara aman, efisien, dan berkelanjutan. Kesalahan dalam pengaturan salah satu komponen saja dapat berdampak signifikan terhadap tundaan, antrean, bahkan tingkat kecelakaan.

Salah satu komponen terpenting adalah fase sinyal. Fase sinyal merupakan bagian dari satu siklus sinyal yang memberikan hak jalan kepada kelompok pergerakan tertentu secara bersamaan, misalnya pergerakan lurus dari satu arah atau kombinasi lurus dan belok kiri. Penentuan fase harus mempertimbangkan konflik antar arus lalu lintas, besarnya volume kendaraan, serta kebutuhan pengguna jalan lain seperti pejalan kaki dan pesepeda. Menurut Roess, Prassas, dan McShane

(2020), desain fase yang tidak tepat misalnya terlalu banyak fase atau penggabungan pergerakan yang berkonflik dapat meningkatkan tundaan secara signifikan dan memperbesar risiko kecelakaan di simpang.

Komponen berikutnya adalah waktu siklus (*cycle time*), yaitu total waktu yang diperlukan sinyal lalu lintas untuk menyelesaikan satu putaran penuh dari seluruh fase. Waktu siklus menentukan seberapa sering setiap pendekatan mendapatkan waktu hijau. Apabila waktu siklus terlalu pendek, maka waktu hijau efektif yang tersedia untuk setiap pendekatan menjadi terbatas sehingga kapasitas simpang menurun. Sebaliknya, waktu siklus yang terlalu panjang dapat menyebabkan kendaraan harus menunggu lebih lama saat lampu merah, sehingga meningkatkan tundaan dan panjang antrean, khususnya pada pendekatan dengan volume rendah. Oleh karena itu, penentuan waktu siklus harus mempertimbangkan keseimbangan antara kapasitas dan tundaan.

Pembagian waktu sinyal menjadi waktu hijau, kuning, dan merah juga merupakan komponen kunci dalam simpang bersinyal. Waktu hijau menentukan durasi kendaraan diizinkan untuk bergerak dan secara langsung berpengaruh terhadap kapasitas pendekatan. Waktu kuning berfungsi sebagai waktu transisi untuk menjamin keselamatan, memberikan kesempatan bagi kendaraan yang sudah mendekati garis henti untuk berhenti atau melanjutkan perjalanan secara aman. Sementara itu, waktu merah menghentikan pergerakan kendaraan pada pendekatan tertentu agar tidak terjadi konflik dengan arus lain. Menurut Akçelik (2019), distribusi waktu hijau yang proporsional terhadap volume lalu lintas pada masing-masing pendekatan sangat menentukan kinerja simpang, karena ketidakseimbangan alokasi waktu hijau dapat menyebabkan pendekatan tertentu mengalami tundaan dan antrean yang berlebihan.

3. Parameter Kinerja Simpang Bersinyal

Kinerja simpang bersinyal dinilai melalui sejumlah parameter utama yang mencerminkan kemampuan simpang dalam melayani arus lalu lintas secara efektif dan aman. Parameter-parameter ini digunakan untuk mengevaluasi kondisi operasional eksisting sekaligus menjadi dasar dalam perencanaan perbaikan atau optimasi pengaturan sinyal. Di antara berbagai indikator yang ada, kapasitas pendekatan, derajat kejenuhan, dan tundaan merupakan parameter yang paling sering digunakan dalam analisis rekayasa lalu lintas.

Kapasitas pendekat pada simpang bersinyal menunjukkan jumlah maksimum kendaraan yang dapat dilayani oleh suatu pendekat dalam satu satuan waktu. Kapasitas ini terutama ditentukan oleh laju arus jenuh (*saturation flow*) dan besarnya waktu hijau efektif yang diberikan pada pendekat tersebut. Laju arus jenuh sendiri dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti lebar lajur, komposisi kendaraan, keberadaan hambatan samping, serta perilaku pengemudi. Dalam konteks Indonesia, nilai-nilai ini dihitung dengan mengacu pada Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI, 2023) yang telah disesuaikan dengan kondisi lalu lintas lokal, seperti dominasi sepeda motor dan tingkat disiplin pengemudi. Sementara itu, secara internasional, pendekatan serupa digunakan dalam Highway Capacity Manual (TRB, 2022) dengan parameter yang lebih umum dan dapat diterapkan lintas negara.

Derajat kejenuhan (*Degree of Saturation/DS*) merupakan indikator penting yang menggambarkan tingkat pemanfaatan kapasitas pada setiap pendekat simpang. Nilai DS diperoleh dari perbandingan antara arus lalu lintas aktual dengan kapasitas pendekat. Nilai ini memberikan gambaran apakah simpang masih beroperasi secara stabil atau sudah mendekati bahkan melampaui kapasitasnya. Pendekat dengan nilai DS rendah menunjukkan kondisi operasi yang relatif lancar, sedangkan nilai DS mendekati atau lebih besar dari satu menandakan kondisi jenuh, di mana antrean dan tundaan cenderung meningkat. Oleh karena itu, DS sering digunakan sebagai dasar untuk menilai kebutuhan penyesuaian waktu sinyal atau tindakan rekayasa lainnya.

Tundaan (*delay*) merupakan parameter kinerja yang paling langsung dirasakan oleh pengguna jalan. Tundaan pada simpang bersinyal adalah waktu tambahan yang dialami kendaraan akibat harus berhenti atau bergerak lambat karena sinyal merah dan antrean kendaraan di depan. Besarnya tundaan dipengaruhi oleh panjang waktu merah, ketidakseimbangan alokasi waktu hijau antar pendekat, serta tingkat kejenuhan simpang. Dalam praktik analisis, tundaan rata-rata kendaraan digunakan sebagai dasar utama untuk menentukan tingkat pelayanan (*Level of Service*) simpang bersinyal, karena parameter ini mencerminkan kenyamanan, efisiensi, dan kualitas pelayanan yang diterima pengguna jalan.

4. Metode Analisis Berdasarkan Standar

Metode analisis simpang bersinyal dalam rekayasa transportasi umumnya mengacu pada standar yang telah dibakukan agar hasil evaluasi bersifat konsisten, dapat dibandingkan, dan relevan dengan kondisi lapangan. Dua standar yang paling sering digunakan adalah Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) dan *Highway Capacity Manual* (HCM). Meskipun keduanya memiliki tujuan yang sama, yaitu menilai kinerja simpang secara kuantitatif, pendekatan yang digunakan disesuaikan dengan konteks wilayah dan karakteristik lalu lintas yang dihadapi.

Pendekatan PKJI dirancang khusus untuk menjawab tantangan lalu lintas di Indonesia yang memiliki karakteristik unik, seperti dominasi sepeda motor, campuran moda yang tinggi, serta hambatan samping yang signifikan. Dalam PKJI, analisis simpang bersinyal dimulai dengan penentuan arus jenuh dasar yang merepresentasikan kemampuan maksimal lajur dalam kondisi ideal. Selanjutnya, arus jenuh tersebut disesuaikan dengan berbagai faktor penyesuaian, seperti lebar lajur, komposisi kendaraan, gradien jalan, dan tingkat hambatan samping, sehingga diperoleh nilai arus jenuh yang lebih realistis. Dari nilai ini, kapasitas pendekat dihitung berdasarkan proporsi waktu hijau efektif yang tersedia. Tahapan berikutnya adalah perhitungan tundaan dan penentuan tingkat pelayanan, yang menjadi indikator utama untuk menilai apakah kinerja simpang masih dapat diterima atau memerlukan penanganan lebih lanjut.

Pendekatan HCM yang dikembangkan oleh *Transportation Research Board* menawarkan model analisis yang lebih rinci dan komprehensif. HCM tidak hanya mempertimbangkan kondisi rata-rata, tetapi juga memasukkan variasi kedatangan kendaraan, keberadaan antrean awal, serta pengaruh koordinasi sinyal antar simpang dalam satu koridor. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap dinamika lalu lintas, terutama pada jaringan jalan perkotaan yang kompleks. Selain itu, HCM juga mengintegrasikan analisis multimoda, termasuk pejalan kaki, pesepeda, dan angkutan umum, sehingga lebih sesuai dengan konsep transportasi berkelanjutan yang berkembang di negara-negara maju.

Perbedaan pendekatan antara PKJI dan HCM menunjukkan bahwa pemilihan metode analisis harus disesuaikan dengan tujuan studi dan konteks wilayah. Di Indonesia, PKJI umumnya lebih aplikatif untuk

analisis operasional sehari-hari karena mencerminkan kondisi lalu lintas lokal. Namun, dalam studi berskala besar atau perencanaan jangka panjang, pendekatan HCM sering digunakan sebagai pelengkap untuk memperoleh gambaran kinerja simpang yang lebih menyeluruh. Dengan memahami kedua standar ini, perencana transportasi dapat memilih atau mengombinasikan metode analisis yang paling tepat guna mendukung pengambilan keputusan rekayasa lalu lintas yang efektif dan berkelanjutan.

5. Tingkat Pelayanan (*Level of Service*) Simpang Bersinyal

Tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*) pada simpang bersinyal merupakan indikator utama yang digunakan untuk menggambarkan kualitas kinerja operasional simpang dari sudut pandang pengguna jalan. Berbeda dengan kapasitas yang bersifat teknis, LOS lebih menekankan pada pengalaman pengemudi, khususnya terkait dengan tundaan yang dialami saat melintasi simpang. Oleh karena itu, LOS menjadi parameter penting dalam evaluasi apakah suatu simpang masih berfungsi secara layak atau telah memerlukan penanganan rekayasa lalu lintas.

Pada analisis simpang bersinyal, tingkat pelayanan diklasifikasikan ke dalam enam tingkat, yaitu LOS A hingga LOS F, yang ditentukan berdasarkan tundaan rata-rata per kendaraan. LOS A mencerminkan kondisi terbaik, di mana tundaan sangat kecil dan arus lalu lintas bergerak hampir tanpa hambatan. Pada kondisi ini, kendaraan jarang berhenti, antrean pendek, dan pengemudi merasakan tingkat kenyamanan serta efisiensi yang tinggi. Kondisi ini umumnya hanya ditemukan pada simpang dengan volume lalu lintas rendah atau pada periode non-puncak.

Pada tingkat LOS C hingga LOS D, tundaan yang dialami kendaraan berada pada kategori sedang. Arus lalu lintas masih berjalan relatif stabil, meskipun kendaraan mulai sering berhenti akibat sinyal merah dan antrean mulai terbentuk, terutama pada jam sibuk. Dalam praktik perencanaan transportasi perkotaan, LOS C dan LOS D sering dianggap sebagai kondisi yang masih dapat diterima, karena mencerminkan kompromi antara keterbatasan ruang jalan, tingginya permintaan lalu lintas, dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Banyak kota besar menetapkan LOS D sebagai batas minimum pelayanan yang realistis untuk simpang bersinyal di kawasan padat.

LOS F menunjukkan kondisi terburuk, di mana tundaan sangat tinggi, antrean panjang, dan kinerja simpang dinilai buruk. Pada kondisi ini, volume lalu lintas telah melampaui kapasitas simpang, sehingga terjadi antrean berkepanjangan dan potensi limpahan antrean ke ruas jalan sekitarnya. LOS F tidak hanya menurunkan kenyamanan dan efisiensi perjalanan, tetapi juga meningkatkan risiko kecelakaan, konsumsi bahan bakar, serta emisi kendaraan. Oleh karena itu, simpang dengan LOS F umumnya menjadi prioritas utama untuk dilakukan perbaikan, baik melalui optimasi waktu sinyal, perubahan geometrik, maupun manajemen lalu lintas lainnya.

Menurut Transportation Research Board (2022), penerimaan terhadap tingkat pelayanan sangat bergantung pada kebijakan transportasi setempat dan karakteristik kawasan. Di pusat kota yang padat aktivitas, LOS D bahkan mendekati LOS E terkadang masih ditoleransi sebagai konsekuensi dari keterbatasan ruang dan tingginya permintaan perjalanan. Namun demikian, dalam kerangka transportasi berkelanjutan, evaluasi LOS tidak boleh berdiri sendiri, melainkan harus dipadukan dengan pertimbangan keselamatan, aksesibilitas multimoda, dan kualitas lingkungan perkotaan.

6. Permasalahan Umum pada Simpang Bersinyal

Permasalahan umum pada simpang bersinyal merupakan tantangan klasik dalam rekayasa lalu lintas perkotaan, terutama di kota-kota dengan pertumbuhan kendaraan yang cepat dan keterbatasan ruang jalan. Salah satu permasalahan utama adalah waktu sinyal yang tidak seimbang antar pendekatan. Kondisi ini biasanya terjadi ketika pembagian waktu hijau tidak proporsional dengan volume lalu lintas aktual, sehingga pendekatan dengan arus besar mengalami tundaan dan antrean panjang, sementara pendekatan lain memiliki waktu hijau yang kurang dimanfaatkan. Ketidakseimbangan ini secara langsung menurunkan efisiensi kapasitas simpang secara keseluruhan.

Permasalahan berikutnya adalah antrean panjang yang muncul terutama pada jam puncak. Antrean yang tidak tertangani dengan baik dapat melampaui panjang penyimpanan lajur, menyebabkan limpahan antrean ke segmen jalan hulu dan mengganggu kinerja jaringan jalan di sekitarnya. Dalam kondisi ekstrem, antrean pada satu simpang dapat memicu kemacetan berantai (*spillback*) ke simpang lain, sehingga memperburuk kondisi lalu lintas kawasan secara menyeluruh.

Ketidaktertiban pengguna jalan juga menjadi permasalahan signifikan pada simpang bersinyal, khususnya di negara berkembang. Perilaku seperti melanggar sinyal, berhenti melewati garis henti, penggunaan lajur yang tidak sesuai, serta dominasi sepeda motor yang menyusup di antara kendaraan lain, menyebabkan konflik lalu lintas meningkat dan efektivitas pengaturan sinyal menurun. Faktor perilaku ini sering kali tidak sepenuhnya terakomodasi dalam model analisis teoritis, sehingga kinerja simpang di lapangan lebih buruk dibandingkan hasil perhitungan.

D. Strategi Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas

Manajemen dan rekayasa lalu lintas merupakan pendekatan non-struktural dan struktural yang bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja sistem jalan yang ada tanpa selalu harus melakukan pembangunan infrastruktur baru. Dalam konteks perkotaan modern, keterbatasan ruang, tingginya biaya pembangunan, serta dampak lingkungan menjadikan strategi manajemen lalu lintas sebagai solusi yang efektif dan berkelanjutan. Menurut Garber dan Hoel (2020), manajemen lalu lintas berfokus pada pengaturan operasional, sedangkan rekayasa lalu lintas menitikberatkan pada perencanaan teknis dan perbaikan geometrik jalan.

1. Konsep Dasar Manajemen Lalu Lintas

Konsep dasar manajemen lalu lintas merupakan kerangka strategis dalam pengelolaan sistem transportasi jalan agar dapat berfungsi secara aman, efisien, dan berkelanjutan. Tujuan utama manajemen lalu lintas adalah meningkatkan keselamatan pengguna jalan dengan meminimalkan konflik antar pergerakan, menyediakan pengaturan yang jelas melalui rambu, marka, dan sinyal, serta mengurangi potensi kecelakaan lalu lintas. Aspek keselamatan ini menjadi prioritas karena dampak kecelakaan tidak hanya bersifat material, tetapi juga menyangkut korban jiwa dan kerugian sosial yang luas.

Manajemen lalu lintas bertujuan mengurangi kemacetan dan tundaan perjalanan. Kemacetan sering kali disebabkan oleh ketidakseimbangan antara permintaan dan kapasitas jalan, serta pengelolaan arus yang kurang optimal. Melalui pengaturan arus,

pengendalian simpang, manajemen parkir, dan pembatasan pergerakan tertentu, tundaan dapat ditekan tanpa harus selalu menambah kapasitas fisik jalan yang umumnya membutuhkan biaya besar dan ruang yang terbatas.

Manajemen lalu lintas juga berperan dalam meningkatkan kapasitas efektif jalan. Kapasitas efektif tidak hanya ditentukan oleh lebar dan jumlah lajur, tetapi juga oleh bagaimana ruang jalan tersebut dikelola. Pengaturan penggunaan lajur, penerapan sistem satu arah, pengendalian hambatan samping, serta optimalisasi waktu sinyal dapat meningkatkan kemampuan jalan dalam melayani arus lalu lintas secara signifikan.

Tujuan berikutnya adalah menjamin kelancaran dan keteraturan arus lalu lintas. Arus yang tertib dan stabil akan meningkatkan kenyamanan berkendara, mengurangi stres pengguna jalan, serta menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi kendaraan. Kelancaran arus juga berdampak positif pada produktivitas ekonomi, terutama di kawasan perkotaan yang bergantung pada mobilitas tinggi.

2. Strategi Pengaturan Lalu Lintas

Strategi pengaturan lalu lintas merupakan bagian penting dari manajemen lalu lintas yang bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja jaringan jalan tanpa harus selalu melakukan pembangunan fisik. Pendekatan ini menekankan pada pengelolaan arus kendaraan, pengurangan konflik lalu lintas, serta peningkatan efisiensi penggunaan ruang jalan, khususnya di kawasan perkotaan yang memiliki keterbatasan lahan dan tingkat aktivitas yang tinggi.

Pengaturan arus dan prioritas lalu lintas dilakukan melalui berbagai kebijakan operasional, seperti penerapan sistem satu arah, larangan belok pada jam-jam tertentu, serta penetapan prioritas pergerakan pada simpang. Sistem satu arah, misalnya, dapat mengurangi konflik silang dan meningkatkan kapasitas ruas jalan dengan memanfaatkan lebar jalan secara lebih efektif. Larangan belok pada jam puncak bertujuan untuk menjaga kelancaran arus utama agar tidak terganggu oleh manuver kendaraan yang berpotensi menimbulkan antrean dan tundaan.

Pengaturan prioritas pada simpang dan penyediaan lajur khusus, seperti lajur belok atau lajur prioritas angkutan umum, menjadi strategi penting dalam meningkatkan kinerja simpang. Dengan memberikan

prioritas pada pergerakan tertentu, terutama angkutan umum, konflik lalu lintas dapat ditekan dan waktu tempuh menjadi lebih andal. Khisty dan Lall (2019) menyatakan bahwa strategi pengaturan arus dan prioritas ini terbukti efektif dalam meningkatkan kapasitas simpang dan keselamatan lalu lintas, terutama di pusat-pusat kota dengan volume lalu lintas tinggi.

Strategi lain yang tidak kalah penting adalah pengelolaan waktu sinyal pada simpang bersinyal. Optimasi waktu sinyal mencakup penentuan waktu siklus yang tepat, pembagian waktu hijau yang proporsional antar pendekat, serta koordinasi sinyal pada simpang-simpang yang berdekatan. Pengaturan waktu sinyal yang baik mampu mengurangi tundaan, meminimalkan antrean, dan meningkatkan kelancaran arus lalu lintas secara keseluruhan.

3. Rekayasa Geometrik Jalan

Rekayasa geometrik jalan merupakan salah satu strategi penting dalam manajemen lalu lintas yang berfokus pada perbaikan elemen fisik jalan dan simpang untuk meningkatkan kinerja operasional serta keselamatan pengguna jalan. Pendekatan ini dilakukan dengan menyesuaikan desain geometrik terhadap karakteristik lalu lintas aktual, sehingga pergerakan kendaraan dapat berlangsung lebih lancar, aman, dan efisien tanpa selalu memerlukan penambahan jaringan jalan baru.

Perbaikan geometri simpang menjadi bagian utama dari rekayasa geometrik, terutama pada simpang dengan tingkat konflik dan tundaan yang tinggi. pelebaran lajur pendekat, misalnya, bertujuan untuk meningkatkan kapasitas simpang dengan memungkinkan lebih banyak kendaraan mengantre dan bergerak secara bersamaan. Penambahan lajur belok, baik belok kiri maupun belok kanan, dapat memisahkan pergerakan kendaraan yang berpotensi konflik dengan arus lurus, sehingga mengurangi gangguan dan meningkatkan kelancaran arus lalu lintas utama.

Pengaturan ulang radius tikungan dilakukan untuk menyesuaikan kecepatan kendaraan saat berbelok agar tetap aman dan nyaman, khususnya bagi kendaraan berat dan angkutan umum. Radius tikungan yang terlalu kecil dapat menyebabkan perlambatan tajam dan meningkatkan risiko kecelakaan. Penyediaan pulau lalu lintas (*traffic island*) juga berperan penting dalam mengarahkan pergerakan kendaraan, melindungi pejalan kaki, serta memperjelas prioritas lalu

lintas pada simpang. Menurut AASHTO (2018), perbaikan geometrik yang dirancang dengan baik terbukti mampu mengurangi konflik lalu lintas, meningkatkan kapasitas, dan memperbaiki tingkat keselamatan, dan prinsip ini terus diperkuat dalam praktik rekayasa hingga beberapa tahun terakhir.

Manajemen akses merupakan aspek krusial dalam rekayasa geometrik jalan, terutama pada ruas jalan perkotaan dengan aktivitas samping yang tinggi. Manajemen akses mengatur jumlah, lokasi, dan jarak bukaan median, akses keluar-masuk bangunan, serta jarak antar simpang untuk meminimalkan titik konflik antara arus utama dan arus masuk-keluar. Terlalu banyak akses langsung ke jalan utama dapat menurunkan kapasitas dan meningkatkan risiko kecelakaan akibat seringnya kendaraan melambat atau berhenti mendadak.

4. Manajemen Permintaan Transportasi (TDM)

Manajemen Permintaan Transportasi (*Travel Demand Management/TDM*) merupakan pendekatan strategis dalam pengelolaan sistem transportasi yang berfokus pada pengendalian kebutuhan dan pola perjalanan masyarakat, bukan semata-mata pada penambahan kapasitas infrastruktur. Pendekatan ini muncul sebagai respons terhadap keterbatasan ruang dan biaya dalam pengembangan jaringan jalan, terutama di kawasan perkotaan padat. Dengan mengelola permintaan perjalanan, TDM bertujuan mengurangi tekanan lalu lintas pada jam puncak serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan sistem transportasi yang sudah ada.

Salah satu bentuk penerapan TDM adalah pengaturan jam kerja fleksibel atau *staggered working hours*. Kebijakan ini mendorong distribusi waktu perjalanan yang lebih merata sehingga beban lalu lintas tidak terkonsentrasi pada jam puncak tertentu. Dengan berkurangnya lonjakan volume kendaraan pada waktu-waktu kritis, tingkat kemacetan dan tundaan dapat ditekan tanpa perlu perubahan fisik pada jaringan jalan. Strategi ini terbukti efektif terutama di kawasan perkantoran dan pusat kegiatan ekonomi.

Kebijakan parkir juga menjadi instrumen penting dalam TDM. Pengaturan tarif parkir progresif, pembatasan durasi parkir, serta pengurangan ketersediaan parkir di pusat kota dapat mengendalikan penggunaan kendaraan pribadi. Biaya parkir yang tinggi dan akses parkir yang terbatas mendorong pengguna jalan untuk beralih ke angkutan

umum atau moda transportasi alternatif. Dengan demikian, kebijakan parkir tidak hanya berfungsi sebagai sumber pendapatan daerah, tetapi juga sebagai alat pengendalian lalu lintas.

Penerapan tarif kemacetan (*congestion pricing*) merupakan bentuk TDM yang semakin banyak diterapkan di kota-kota besar dunia. Kebijakan ini mengenakan biaya tambahan bagi kendaraan yang melintasi kawasan atau koridor tertentu pada waktu sibuk. Tujuannya adalah menginternalisasi biaya kemacetan yang ditimbulkan oleh penggunaan kendaraan pribadi, sehingga pengguna jalan terdorong untuk mengubah waktu, rute, atau moda perjalanan. Pendekatan ini terbukti efektif dalam menurunkan volume lalu lintas dan meningkatkan kecepatan rata-rata perjalanan.

5. Pemanfaatan Teknologi dan ITS

Pemanfaatan teknologi melalui *Intelligent Transportation Systems* (ITS) menjadi salah satu pilar utama dalam manajemen lalu lintas modern, khususnya di kawasan perkotaan dengan tingkat kompleksitas lalu lintas yang tinggi. ITS mengintegrasikan teknologi informasi, komunikasi, dan sistem kendali untuk memantau, mengelola, serta mengoptimalkan pergerakan lalu lintas secara real-time. Pendekatan ini memungkinkan pengelolaan lalu lintas yang lebih adaptif dibandingkan metode konvensional yang bersifat statis.

Salah satu bentuk penerapan ITS yang umum digunakan adalah *Area Traffic Control System* (ATCS). Sistem ini memungkinkan pengendalian sinyal lalu lintas secara terpusat dengan mempertimbangkan kondisi lalu lintas aktual di berbagai simpang. Melalui ATCS, waktu hijau dan siklus sinyal dapat disesuaikan secara dinamis berdasarkan volume dan kepadatan lalu lintas, sehingga tundaan dan antrean kendaraan dapat dikurangi. Di banyak kota besar, penerapan ATCS terbukti meningkatkan kinerja simpang dan kelancaran arus lalu lintas secara signifikan.

Penggunaan kamera pemantau lalu lintas dan sensor volume serta kecepatan kendaraan berperan penting dalam pengumpulan data lalu lintas secara kontinu. Data ini memberikan gambaran akurat mengenai pola pergerakan, tingkat kepadatan, dan potensi gangguan lalu lintas. Informasi tersebut tidak hanya digunakan untuk pengendalian operasional harian, tetapi juga sebagai dasar perencanaan dan evaluasi kebijakan transportasi jangka menengah dan panjang.

6. Strategi Keselamatan Lalu Lintas

Strategi keselamatan lalu lintas merupakan bagian integral dari rekayasa dan manajemen lalu lintas, terutama di kawasan perkotaan yang memiliki tingkat interaksi pengguna jalan sangat tinggi. Rekayasa lalu lintas tidak hanya bertujuan meningkatkan kapasitas dan kelancaran arus, tetapi juga memastikan bahwa sistem jalan mampu melindungi pengguna jalan dari risiko kecelakaan serius. Oleh karena itu, aspek keselamatan harus dipertimbangkan sejak tahap perencanaan, desain, hingga operasional jaringan jalan.

Salah satu upaya dasar dalam meningkatkan keselamatan lalu lintas adalah penataan marka dan rambu yang jelas, konsisten, dan mudah dipahami. Marka jalan berfungsi sebagai panduan visual bagi pengemudi dalam menjaga posisi lajur, menentukan prioritas, serta mengantisipasi konflik pergerakan. Rambu lalu lintas yang dirancang dan ditempatkan dengan tepat membantu mengurangi ketidakpastian pengemudi, sehingga potensi kesalahan dan konflik dapat ditekan, khususnya di simpang dan lokasi rawan kecelakaan.

Pengendalian kecepatan melalui penerapan traffic calming menjadi strategi penting dalam meningkatkan keselamatan, terutama di kawasan permukiman, sekolah, dan pusat aktivitas masyarakat. Elemen seperti speed hump, speed table, chicane, dan penyempitan lajur secara visual terbukti efektif menurunkan kecepatan kendaraan. Penurunan kecepatan ini secara langsung mengurangi tingkat keparahan cedera apabila terjadi kecelakaan, sekaligus meningkatkan rasa aman bagi pejalan kaki dan pesepeda.

Penyediaan fasilitas penyeberangan pejalan kaki yang aman dan nyaman juga merupakan komponen krusial dalam strategi keselamatan lalu lintas. Zebra cross, pelican crossing, jembatan penyeberangan, serta refuge island dirancang untuk memisahkan konflik antara kendaraan dan pejalan kaki. Fasilitas yang dirancang dengan mempertimbangkan jarak pandang, waktu penyeberangan, dan kebutuhan kelompok rentan seperti anak-anak dan lansia akan meningkatkan keselamatan sekaligus mendorong mobilitas aktif.



BAB VI

PERENCANAAN TRANSPORTASI PERKOTAAN

Perencanaan transportasi perkotaan merupakan proses strategis yang bertujuan untuk mengatur sistem pergerakan manusia dan barang agar berlangsung secara efisien, aman, berkelanjutan, dan selaras dengan perkembangan kota. Dalam konteks urbanisasi yang pesat, perencanaan transportasi tidak hanya berfokus pada penyediaan infrastruktur, tetapi juga pada pengelolaan permintaan perjalanan, pemilihan moda yang berimbang, serta integrasi dengan tata guna lahan dan kebijakan lingkungan. Menurut Banister (2023) dan Rodrigue *et al.* (2024), perencanaan transportasi perkotaan modern harus mampu menjawab tantangan kemacetan, ketimpangan aksesibilitas, dan dampak lingkungan dengan pendekatan sistemik, berbasis data, dan berorientasi pada peningkatan kualitas hidup masyarakat perkotaan.

A. Konsep dan Tahapan Perencanaan Transportasi

Perencanaan transportasi merupakan proses strategis dan analitis yang bertujuan untuk menyediakan sistem transportasi yang mampu memenuhi kebutuhan mobilitas masyarakat secara efektif, efisien, aman, dan berkelanjutan. Dalam konteks perkotaan, perencanaan transportasi tidak hanya berkaitan dengan pembangunan infrastruktur fisik seperti jalan atau terminal, tetapi juga mencakup pengelolaan permintaan perjalanan, pengaturan operasional, kebijakan publik, serta integrasi dengan tata guna lahan dan lingkungan. Menurut Ortúzar dan Willumsen (2021), perencanaan transportasi adalah upaya sistematis untuk memahami pola perjalanan masyarakat dan merancang intervensi kebijakan yang dapat mengoptimalkan pergerakan orang dan barang dalam suatu wilayah.

1. Konsep Dasar Perencanaan Transportasi

Konsep dasar perencanaan transportasi modern mengalami perubahan paradigma yang cukup mendasar dibandingkan pendekatan konvensional. Pada masa lalu, perencanaan transportasi lebih berorientasi pada penyediaan kapasitas fisik jalan (supply-oriented), seperti pelebaran ruas jalan atau pembangunan infrastruktur baru dengan tujuan utama mengurangi kemacetan. Namun, seiring meningkatnya kompleksitas permasalahan perkotaan, pendekatan tersebut dinilai tidak lagi memadai karena sering kali justru memicu peningkatan penggunaan kendaraan pribadi dan memperparah dampak lingkungan.

Pada perkembangan terkini, perencanaan transportasi beralih menuju pendekatan berbasis aksesibilitas dan keberlanjutan. Litman (2023) menegaskan bahwa tujuan utama sistem transportasi bukan semata-mata mempercepat pergerakan kendaraan, melainkan meningkatkan kemudahan masyarakat dalam mengakses berbagai aktivitas penting, seperti pekerjaan, pendidikan, layanan kesehatan, dan kegiatan sosial. Dengan demikian, fokus perencanaan tidak hanya pada kecepatan dan kapasitas jalan, tetapi pada seberapa efektif sistem transportasi menghubungkan manusia dengan tujuan perjalanannya.

Keberhasilan sistem transportasi dalam paradigma modern diukur melalui berbagai dimensi yang lebih luas. Sistem transportasi yang baik diharapkan mampu mengurangi ketimpangan akses antarwilayah dan kelompok sosial, menekan dampak lingkungan seperti emisi dan kebisingan, serta mendukung pertumbuhan ekonomi yang inklusif. Selain itu, transportasi juga berperan penting dalam meningkatkan kualitas hidup perkotaan melalui penciptaan lingkungan yang lebih aman, sehat, dan nyaman bagi seluruh pengguna jalan, termasuk pejalan kaki dan pesepeda.

2. Tujuan Perencanaan Transportasi Perkotaan

Tujuan perencanaan transportasi perkotaan pada dasarnya diarahkan untuk menciptakan sistem transportasi yang mampu melayani kebutuhan mobilitas masyarakat secara adil, efisien, dan berkelanjutan. Salah satu tujuan utamanya adalah meningkatkan aksesibilitas dan mobilitas bagi seluruh lapisan masyarakat, terutama kelompok rentan seperti pejalan kaki, penyandang disabilitas, lansia, serta pengguna angkutan umum. Dalam konteks ini, transportasi tidak hanya dipandang sebagai sarana perpindahan, tetapi sebagai alat untuk menjamin hak

masyarakat dalam mengakses peluang ekonomi, pendidikan, dan layanan publik.

Perencanaan transportasi perkotaan juga bertujuan untuk mewujudkan efisiensi sistem transportasi secara keseluruhan. Efisiensi ini dicapai dengan meminimalkan waktu tempuh perjalanan, menekan biaya transportasi, serta mengurangi konsumsi energi. Sistem transportasi yang efisien akan meningkatkan produktivitas kota, mengurangi pemborosan sumber daya, dan memberikan manfaat ekonomi baik bagi individu maupun pemerintah. Oleh karena itu, perencanaan harus mempertimbangkan pemilihan moda yang tepat, manajemen lalu lintas yang efektif, serta integrasi antar moda transportasi.

Keselamatan dan keamanan lalu lintas merupakan tujuan fundamental lainnya dalam perencanaan transportasi perkotaan. Tingginya angka kecelakaan lalu lintas di kawasan perkotaan menuntut pendekatan perencanaan yang berlandaskan prinsip *safe system*, yaitu sistem yang dirancang untuk meminimalkan risiko fatal meskipun terjadi kesalahan manusia. Hal ini diwujudkan melalui desain infrastruktur yang aman, pengendalian kecepatan, pengaturan lalu lintas yang jelas, serta kebijakan yang melindungi pengguna jalan paling rentan.

Perencanaan transportasi juga berperan penting dalam mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh aktivitas transportasi. Emisi gas rumah kaca, polusi udara, dan kebisingan merupakan masalah serius di banyak kota. Melalui perencanaan yang mendorong penggunaan angkutan umum, transportasi tidak bermotor, dan teknologi ramah lingkungan, dampak negatif tersebut dapat ditekan. Dengan demikian, sektor transportasi dapat berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim dan peningkatan kualitas lingkungan perkotaan.

3. Tahapan Perencanaan Transportasi

Perencanaan transportasi merupakan proses yang bersifat sistematis dan berkelanjutan, dimulai dari pemahaman masalah hingga tahap implementasi dan evaluasi. Tahap pertama adalah identifikasi masalah dan penetapan tujuan. Pada tahap ini, perencana mengkaji berbagai persoalan transportasi yang dihadapi suatu wilayah, seperti kemacetan lalu lintas, tingginya angka kecelakaan, rendahnya kualitas layanan angkutan umum, atau ketimpangan akses antar kawasan.

Permasalahan tersebut kemudian dirumuskan secara jelas agar dapat ditangani secara tepat. Bersamaan dengan itu, tujuan perencanaan ditetapkan secara spesifik dan terukur, serta harus selaras dengan visi pembangunan kota dan kebijakan transportasi nasional. Kejelasan tujuan ini sangat krusial karena akan menjadi acuan utama dalam seluruh proses analisis dan pengambilan keputusan selanjutnya.

Tahap berikutnya adalah pengumpulan dan pengolahan data, yang menjadi fondasi teknis dalam perencanaan transportasi. Data yang dikumpulkan mencakup aspek demografi dan sosial ekonomi penduduk, pola dan intensitas tata guna lahan, karakteristik lalu lintas seperti volume dan kecepatan, serta data perjalanan yang menggambarkan asal-tujuan, maksud perjalanan, dan pilihan moda. Data tersebut diperoleh melalui berbagai metode, mulai dari survei lapangan, data sensus, pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (SIG), hingga penggunaan *big data* transportasi. Data yang telah dikumpulkan kemudian diolah dan divalidasi agar siap digunakan dalam tahap analisis. Kualitas dan akurasi data sangat menentukan ketepatan hasil perencanaan, sehingga tahap ini memerlukan perhatian yang serius.

Dilakukan analisis kondisi eksisting untuk menilai kinerja sistem transportasi saat ini. Analisis ini mencakup evaluasi kapasitas dan tingkat pelayanan jaringan jalan, kinerja simpang, pola pergerakan perjalanan, serta identifikasi lokasi-lokasi bermasalah seperti titik kemacetan kronis atau koridor dengan tingkat kecelakaan tinggi. Hasil analisis kondisi eksisting memberikan gambaran nyata tentang kekuatan dan kelemahan sistem transportasi yang ada, serta menjadi dasar dalam merumuskan kebutuhan perbaikan dan pengembangan di masa mendatang.

Tahapan selanjutnya adalah peramalan dan penyusunan skenario masa depan. Pada tahap ini, perencana memproyeksikan kondisi transportasi di masa yang akan datang dengan mempertimbangkan pertumbuhan penduduk, perkembangan ekonomi, perubahan tata guna lahan, serta tren mobilitas. Peramalan umumnya dilakukan dengan menggunakan model transportasi, seperti model empat tahap, yang mampu menggambarkan perubahan pola perjalanan di bawah berbagai asumsi kebijakan. Penyusunan beberapa skenario alternatif penting untuk mengantisipasi ketidakpastian dan memahami konsekuensi dari setiap pilihan kebijakan transportasi.

Berdasarkan hasil peramalan tersebut, berbagai alternatif rencana transportasi kemudian dikembangkan. Alternatif ini dapat berupa

peningkatan kapasitas infrastruktur jalan, pengembangan sistem angkutan umum massal, penerapan strategi manajemen lalu lintas, maupun kebijakan pengendalian permintaan perjalanan. Setiap alternatif dianalisis secara komprehensif dari sisi teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan untuk menilai manfaat, biaya, serta dampak yang ditimbulkannya terhadap masyarakat dan lingkungan perkotaan.

Tahap evaluasi dan pemilihan alternatif dilakukan untuk menentukan rencana yang paling optimal dan layak diterapkan. Evaluasi biasanya menggunakan berbagai kriteria, seperti analisis biaya-manfaat, efektivitas pencapaian tujuan, keberlanjutan jangka panjang, serta tingkat penerimaan publik. Proses ini harus dilakukan secara transparan dan berbasis indikator kinerja yang jelas agar keputusan yang diambil dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dan kebijakan.

Tahap akhir dalam perencanaan transportasi adalah implementasi, monitoring, dan evaluasi. Rencana yang telah dipilih kemudian diwujudkan melalui program dan proyek nyata, baik dalam bentuk pembangunan infrastruktur maupun penerapan kebijakan. Setelah implementasi, kinerja sistem transportasi perlu dimonitor dan dievaluasi secara berkala untuk memastikan bahwa tujuan perencanaan tercapai. Evaluasi berkelanjutan memungkinkan penyesuaian kebijakan dan strategi apabila terjadi perubahan kondisi atau apabila hasil yang dicapai belum sesuai dengan yang diharapkan.

4. Peran Perencana Transportasi

Perencana transportasi berperan strategis dalam keseluruhan proses perencanaan transportasi, karena berada di titik temu antara analisis teknis dan pengambilan keputusan kebijakan. Dalam perannya ini, perencana bertanggung jawab menerjemahkan data, model, dan hasil analisis teknis yang kompleks menjadi informasi yang dapat dipahami oleh pengambil keputusan, seperti pemerintah daerah, pembuat kebijakan, maupun pemangku kepentingan lainnya. Dengan demikian, perencana berfungsi sebagai jembatan yang memastikan bahwa keputusan kebijakan didasarkan pada analisis yang rasional, objektif, dan berbasis bukti.

Perencana transportasi juga dituntut memiliki pemahaman yang kuat terhadap aspek sosial dan perilaku masyarakat. Setiap kebijakan atau proyek transportasi pada dasarnya akan memengaruhi pola hidup, aktivitas, dan kesejahteraan masyarakat. Oleh karena itu, perencana

perlu memahami kebutuhan berbagai kelompok pengguna jalan, termasuk pejalan kaki, pengguna angkutan umum, penyandang disabilitas, serta kelompok rentan lainnya. Pemahaman sosial ini penting agar rencana transportasi tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga adil dan inklusif.

Kemampuan komunikasi menjadi aspek krusial lainnya dalam peran perencana transportasi. Perencana harus mampu menyampaikan gagasan, alternatif kebijakan, serta konsekuensi dari setiap pilihan secara jelas dan persuasif kepada pihak non-teknis. Proses ini sering melibatkan diskusi publik, konsultasi pemangku kepentingan, dan koordinasi lintas sektor. Komunikasi yang baik membantu membangun pemahaman bersama, meningkatkan penerimaan publik, serta meminimalkan potensi konflik dalam implementasi rencana transportasi.

B. Model Empat Tahap Transportasi

Model Empat Tahap Transportasi (*Four-Step Transportation Model*) merupakan kerangka analisis klasik yang paling luas digunakan dalam perencanaan transportasi perkotaan untuk memperkirakan permintaan perjalanan dan dampaknya terhadap jaringan transportasi. Model ini dikembangkan sejak pertengahan abad ke-20 dan hingga kini masih menjadi dasar utama dalam perencanaan transportasi di banyak negara, baik pada tingkat kota, metropolitan, maupun regional. Menurut Ortúzar dan Willumsen (2021), model empat tahap menyediakan pendekatan sistematis untuk menghubungkan aktivitas tata guna lahan dengan pola pergerakan orang dan barang.

Model ini terdiri atas empat tahapan analisis yang saling berurutan, yaitu: bangkitan perjalanan, distribusi perjalanan, pemilihan moda, dan pembebanan perjalanan. Setiap tahap memiliki fungsi spesifik dan menggunakan data serta metode analisis tertentu untuk menghasilkan gambaran menyeluruh mengenai sistem transportasi perkotaan.

1. Peran Model Empat Tahap dalam Perencanaan Transportasi

Model empat tahap berperan penting dalam perencanaan transportasi karena menyediakan kerangka sistematis untuk memahami dan meramalkan perilaku perjalanan masyarakat serta dampaknya terhadap kinerja jaringan transportasi. Model ini membantu perencana

mengevaluasi kondisi eksisting sekaligus menilai bagaimana sistem transportasi akan merespons pertumbuhan penduduk, perubahan tata guna lahan, dan kebijakan transportasi yang diusulkan. Dengan demikian, model empat tahap menjadi alat yang esensial untuk pengambilan keputusan yang berbasis bukti dan data, memungkinkan perencana memilih alternatif yang paling efektif dan efisien.

Keunggulan model empat tahap terletak pada kesederhanaannya yang relatif mudah dipahami dan diterapkan, serta fleksibilitasnya dalam menangani berbagai skenario perencanaan transportasi skala besar. Tahapan-tahapannya *trip generation*, *trip distribution*, *mode choice*, dan *route assignment* mencerminkan proses logis perjalanan dari asal hingga tujuan, sehingga memungkinkan prediksi volume perjalanan, pemilihan moda transportasi, dan perhitungan beban pada jaringan jalan atau angkutan umum. Meskipun muncul model yang lebih kompleks, seperti model berbasis aktivitas atau simulasi mikro, model empat tahap tetap relevan karena mampu memberikan gambaran strategis yang jelas mengenai kebutuhan perjalanan dan kinerja sistem transportasi secara agregat.

Model empat tahap berperan sebagai alat evaluasi kebijakan. Perencana dapat menggunakan model ini untuk membandingkan berbagai alternatif intervensi, seperti pengembangan jalur angkutan umum, pengaturan manajemen permintaan perjalanan, atau perubahan infrastruktur jalan, dan menilai dampaknya terhadap volume, distribusi, dan pilihan moda perjalanan. Dengan dukungan data yang akurat, model ini memungkinkan analisis skenario yang komprehensif, membantu perencana memprediksi konsekuensi jangka panjang dari setiap keputusan, serta merancang strategi transportasi yang lebih berkelanjutan dan responsif terhadap kebutuhan masyarakat perkotaan.

2. Tahap Pertama: Bangkitan dan Tarikan Perjalanan (*Trip Generation*)

Tahap bangkitan dan tarikan perjalanan merupakan langkah awal dalam model empat tahap, yang berfokus pada pemahaman seberapa banyak perjalanan yang dihasilkan oleh suatu wilayah dan seberapa banyak perjalanan yang tertarik ke wilayah tersebut. Setiap zona perencanaan ditentukan berdasarkan batas administrasi atau karakteristik tata guna lahan yang relatif homogen, sehingga data yang dikumpulkan dapat merepresentasikan perilaku perjalanan masyarakat secara akurat.

Bangkitan perjalanan (*trip production*) mencerminkan jumlah perjalanan yang dimulai dari suatu zona, biasanya dipengaruhi oleh faktor-faktor sosial ekonomi, seperti jumlah penduduk, kepemilikan kendaraan, tingkat pendapatan, dan struktur rumah tangga. Zona dengan populasi tinggi atau kepemilikan kendaraan yang besar cenderung menghasilkan lebih banyak perjalanan.

Tarikan perjalanan (*trip attraction*) mengacu pada jumlah perjalanan yang diarahkan ke suatu zona sebagai tujuan. Tarikan ini biasanya terkait dengan intensitas aktivitas di zona tersebut, misalnya jumlah lapangan kerja, fasilitas pendidikan, pusat perdagangan, atau layanan publik lainnya. Zona komersial dan perkantoran umumnya memiliki tarikan perjalanan yang tinggi karena menarik pengunjung dan pekerja dari berbagai lokasi. Pemahaman terhadap pola bangkitan dan tarikan ini menjadi dasar bagi analisis distribusi perjalanan, pemilihan moda, dan perencanaan kapasitas jaringan transportasi.

Metodologi yang digunakan pada tahap ini bervariasi, mulai dari analisis regresi untuk menghubungkan variabel sosial ekonomi dengan jumlah perjalanan, metode cross-classification untuk mengelompokkan rumah tangga berdasarkan karakteristik tertentu, hingga penggunaan koefisien bangkitan yang diestimasi dari studi empiris sebelumnya. Keakuratan tahap ini sangat krusial; kesalahan dalam memperkirakan jumlah perjalanan yang dihasilkan atau tertarik dapat memengaruhi seluruh tahapan berikutnya, termasuk distribusi perjalanan, pemilihan moda, dan penugasan rute. Oleh karena itu, pengumpulan data yang valid dan pemilihan metode yang sesuai menjadi kunci keberhasilan dalam membangun model transportasi yang realistis dan dapat diandalkan (Garber & Hoel, 2020).

3. Tahap Kedua: Distribusi Perjalanan (*Trip Distribution*)

Tahap distribusi perjalanan merupakan langkah kedua dalam model empat tahap, yang berfokus pada penghubungan perjalanan dari zona asal ke zona tujuan untuk membentuk matriks asal-tujuan (*origin-destination matrix*). Matriks ini sangat penting karena memberikan gambaran pola interaksi spasial antar zona dalam wilayah perkotaan, termasuk intensitas pergerakan antara kawasan permukiman, pusat perkantoran, kawasan perdagangan, dan fasilitas publik. Informasi ini menjadi dasar dalam perencanaan kapasitas jaringan jalan, perencanaan angkutan umum, dan evaluasi kebijakan transportasi.

Model gravitasi menjadi pendekatan yang paling umum digunakan dalam tahap distribusi perjalanan. Prinsip dasarnya mirip dengan hukum gravitasi Newton, yaitu jumlah perjalanan antara dua zona dipengaruhi oleh besarnya aktivitas di masing-masing zona (misalnya jumlah penduduk, pekerjaan, atau fasilitas) dan berbanding terbalik dengan hambatan perjalanan, seperti jarak, waktu tempuh, atau biaya perjalanan. Dengan demikian, zona yang lebih dekat atau lebih mudah diakses cenderung saling menarik lebih banyak perjalanan dibandingkan zona yang jauh atau sulit dijangkau.

Distribusi perjalanan sangat sensitif terhadap perubahan waktu tempuh, biaya, dan kualitas layanan transportasi. Oleh karena itu, kebijakan transportasi misalnya pembangunan jalan tol, pengembangan angkutan massal, atau pengaturan tarif transportasi dapat secara signifikan mengubah pola perjalanan antar zona. Perubahan ini harus diperhitungkan dalam simulasi skenario masa depan agar rencana transportasi tetap relevan dan efektif dalam memenuhi kebutuhan mobilitas masyarakat (Ortúzar & Willumsen, 2021).

4. Tahap Ketiga: Pemilihan Moda (*Mode Choice*)

Tahap ketiga dalam model empat tahap adalah pemilihan moda, yang berfokus pada bagaimana perjalanan yang telah terdistribusi pada tahap sebelumnya dibagi ke berbagai moda transportasi yang tersedia, seperti kendaraan pribadi, angkutan umum, sepeda, atau berjalan kaki. Proses ini dikenal dengan istilah *modal split* dan menjadi krusial karena menentukan alokasi beban pada masing-masing sistem transportasi serta memengaruhi kemacetan, penggunaan energi, dan dampak lingkungan.

Keputusan pemilihan moda dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk waktu perjalanan, biaya, kenyamanan, keandalan, karakteristik individu atau rumah tangga, serta kebijakan transportasi yang diterapkan. Misalnya, tarif angkutan umum yang terjangkau dan waktu tempuh yang kompetitif dapat meningkatkan proporsi pengguna angkutan massal dibandingkan kendaraan pribadi. Sebaliknya, kemudahan parkir dan akses jalan yang cepat mendorong penggunaan kendaraan pribadi.

Pada praktik analisis transportasi, model logit multinomial banyak digunakan untuk merepresentasikan perilaku pemilihan moda. Model ini berdasarkan konsep utilitas, di mana setiap individu cenderung memilih moda yang memberikan manfaat terbesar relatif terhadap biaya

dan usaha yang dikeluarkan (Ben-Akiva & Lerman, 2020). Tahap pemilihan moda memiliki implikasi langsung terhadap perencanaan transportasi berkelanjutan, karena kebijakan yang mendorong peralihan dari kendaraan pribadi ke angkutan umum atau moda aktif seperti berjalan kaki dan bersepeda dapat menurunkan kemacetan, mengurangi emisi, dan meningkatkan kualitas hidup perkotaan.

5. Tahap Keempat: Pembebanan Perjalanan (*Traffic Assignment*)

Tahap keempat dalam model empat tahap adalah pembebanan perjalanan (*traffic assignment*), yang berfokus pada penentuan rute perjalanan di jaringan transportasi yang tersedia. Proses ini bertujuan untuk memperkirakan arus lalu lintas, kecepatan, serta waktu tempuh pada setiap ruas jalan atau koridor angkutan umum. Dengan informasi ini, perencana transportasi dapat menilai kinerja jaringan secara menyeluruh, mengidentifikasi titik-titik kemacetan, serta merencanakan intervensi rekayasa atau manajemen lalu lintas.

Pembebanan perjalanan biasanya mengacu pada prinsip keseimbangan pengguna (*user equilibrium*), di mana setiap pengguna memilih rute sedemikian rupa sehingga tidak ada yang dapat memperpendek waktu tempuhnya dengan berpindah rute. Alternatif lain adalah pendekatan *system optimum*, yang menempatkan pengguna sedemikian rupa agar total waktu perjalanan jaringan minimal. Pilihan prinsip yang digunakan akan memengaruhi distribusi arus dan analisis kinerja jaringan.

Hasil pembebanan perjalanan menjadi dasar penting dalam berbagai aplikasi perencanaan transportasi, termasuk evaluasi kapasitas jalan, penentuan tingkat pelayanan, serta analisis dampak lalu lintas (*traffic impact analysis*). TRB (2022) menekankan bahwa akurasi tahap ini sangat bergantung pada kualitas data dari tahap sebelumnya, seperti distribusi perjalanan dan pemilihan moda, sehingga keseluruhan model empat tahap harus dijalankan secara konsisten dan terintegrasi untuk menghasilkan proyeksi lalu lintas yang realistis dan bermanfaat bagi pengambilan keputusan perencanaan.

C. Analisis Permintaan dan Pola Perjalanan

Analisis permintaan dan pola perjalanan merupakan komponen inti dalam perencanaan transportasi perkotaan karena berfungsi untuk

memahami bagaimana, mengapa, kapan, dan ke mana masyarakat melakukan perjalanan. Permintaan perjalanan (*travel demand*) tidak muncul secara mandiri, melainkan merupakan turunan dari aktivitas sosial, ekonomi, dan spasial penduduk kota. Menurut Ortúzar dan Willumsen (2023), permintaan perjalanan adalah respons sistem transportasi terhadap kebutuhan individu untuk mengakses peluang seperti pekerjaan, pendidikan, layanan kesehatan, dan rekreasi. Oleh karena itu, analisis ini menjadi dasar dalam merumuskan kebijakan transportasi yang efisien, berkelanjutan, dan berkeadilan.

1. Konsep Permintaan Perjalanan

Permintaan perjalanan merupakan konsep fundamental dalam perencanaan transportasi, yang mencakup tidak hanya jumlah perjalanan, tetapi juga karakteristik dan kualitas perjalanan tersebut. Setiap perjalanan memiliki dimensi waktu, biaya, kenyamanan, keselamatan, dan dampak lingkungan yang memengaruhi keputusan individu dalam memilih rute, moda, dan waktu perjalanan (Litman, 2024). Dengan demikian, pemahaman permintaan perjalanan tidak sekadar kuantitatif, tetapi juga kualitatif, sehingga perencana transportasi dapat merancang sistem yang efisien, aman, dan berkelanjutan.

Faktor-faktor yang memengaruhi permintaan perjalanan sangat kompleks, termasuk pertumbuhan penduduk, urbanisasi, perubahan gaya hidup, kemajuan teknologi digital, serta kebijakan tata guna lahan. Misalnya, pertumbuhan pusat bisnis baru atau kawasan perumahan dapat meningkatkan permintaan perjalanan pada koridor tertentu, sementara penerapan transportasi publik yang nyaman dapat mengubah perilaku masyarakat dari kendaraan pribadi ke moda alternatif.

Permintaan perjalanan sering muncul dalam bentuk laten (*latent demand*), yaitu kebutuhan perjalanan yang belum terealisasi karena keterbatasan infrastruktur atau layanan transportasi. Fenomena ini penting dalam konteks perkotaan modern karena setiap peningkatan kapasitas jalan dapat menimbulkan perjalanan baru (*induced demand*), yang pada gilirannya dapat menimbulkan kemacetan tambahan jika tidak diimbangi dengan pengelolaan permintaan yang tepat (Handy, 2022). Oleh karena itu, analisis permintaan perjalanan menjadi dasar strategis bagi perencanaan transportasi yang responsif terhadap dinamika perkotaan dan kebutuhan masyarakat.

2. Pola Perjalanan Perkotaan

Pola perjalanan perkotaan mencerminkan bagaimana penduduk bergerak dalam suatu wilayah, baik dari segi lokasi maupun waktu perjalanan. Analisis pola perjalanan biasanya mempertimbangkan asal dan tujuan perjalanan (*origin–destination*), waktu perjalanan misalnya jam puncak dan non-puncak tujuan perjalanan seperti pekerjaan, pendidikan, belanja, atau rekreasi, serta moda transportasi yang digunakan. Dengan memahami pola perjalanan ini, perencana transportasi dapat merancang jaringan jalan, angkutan umum, dan fasilitas penunjang lainnya yang lebih sesuai dengan kebutuhan aktual masyarakat.

Faktor tata guna lahan memiliki pengaruh besar terhadap pola perjalanan. Kota dengan pengembangan campuran (*mixed-use development*) cenderung menghasilkan perjalanan yang lebih pendek dan bervariasi dalam pemilihan moda, karena fasilitas perumahan, perkantoran, dan layanan publik terintegrasi dalam jarak yang dekat. Sebaliknya, kota dengan zonasi fungsi yang terpisah secara ketat mendorong perjalanan jarak jauh dan dominasi kendaraan pribadi, sehingga meningkatkan kemacetan dan waktu tempuh (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2024).

Pola perjalanan juga dipengaruhi oleh faktor sosial-ekonomi, seperti kepemilikan kendaraan, tingkat pendapatan, dan kebiasaan mobilitas individu. Dengan menganalisis pola perjalanan secara spasial dan temporal, perencana dapat mengidentifikasi koridor kritis, titik kemacetan potensial, serta kebutuhan peningkatan layanan transportasi publik atau fasilitas pejalan kaki dan sepeda. Hal ini memungkinkan perencanaan transportasi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan responsif terhadap dinamika perkotaan.

3. Analisis Asal–Tujuan (O–D)

Analisis Asal–Tujuan (O–D) merupakan alat penting dalam perencanaan transportasi karena mampu memetakan interaksi spasial perjalanan di suatu wilayah. Dengan data O–D, perencana dapat mengetahui dari mana perjalanan dimulai, ke mana tujuan perjalanan diarahkan, serta intensitas pergerakan antar zona. Data ini tidak hanya membantu dalam memahami pola perjalanan saat ini, tetapi juga menjadi dasar untuk meramalkan kebutuhan transportasi di masa depan. Berbagai metode digunakan untuk mengumpulkan data O–D, mulai dari survei

rumah tangga, survei di tepi jalan, hingga pemanfaatan data digital seperti tiket elektronik dan *big data* dari aplikasi navigasi atau ponsel pintar (Zhang *et al.*, 2023).

Matriks O–D yang dihasilkan memungkinkan identifikasi koridor perjalanan utama dan titik-titik dengan volume perjalanan tinggi, sehingga perencana dapat menentukan prioritas pengembangan jaringan transportasi. Informasi ini sangat berguna dalam merancang kapasitas jalan, menempatkan fasilitas transit, dan merencanakan angkutan umum massal. Di kota-kota metropolitan, analisis O–D menjadi kunci dalam pengembangan sistem transit berbasis koridor, seperti *Bus Rapid Transit* (BRT), *Mass Rapid Transit* (MRT), atau *Light Rail Transit* (LRT), dengan tujuan memastikan layanan yang efisien dan sesuai dengan permintaan perjalanan masyarakat.

Analisis O–D juga berperan dalam evaluasi alternatif kebijakan transportasi, seperti perubahan rute, penerapan manajemen permintaan, atau pembangunan infrastruktur baru. Dengan pemahaman yang mendalam terhadap interaksi perjalanan antar zona, perencana dapat merumuskan strategi yang lebih tepat untuk mengurangi kemacetan, meningkatkan aksesibilitas, dan mendukung transportasi berkelanjutan di perkotaan.

4. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Permintaan dan Pola Perjalanan

Permintaan dan pola perjalanan di perkotaan dipengaruhi oleh kombinasi faktor sosial, ekonomi, teknis, dan kebijakan yang saling terkait. Faktor sosial ekonomi, seperti tingkat pendapatan, usia, kepemilikan kendaraan, dan ukuran rumah tangga, menentukan kemampuan dan kecenderungan individu untuk melakukan perjalanan. Misalnya, keluarga dengan lebih dari satu kendaraan pribadi cenderung melakukan perjalanan lebih sering dengan mobil dibandingkan yang mengandalkan angkutan umum.

Tata guna lahan juga memengaruhi pola perjalanan. Kota dengan kepadatan tinggi dan fungsi lahan campuran (*mixed-use*) memungkinkan perjalanan yang lebih pendek dan fleksibel, sementara zonasi yang terpisah secara ketat biasanya menghasilkan perjalanan panjang dan ketergantungan pada kendaraan pribadi. Selain itu, kinerja sistem transportasi seperti waktu tempuh, biaya perjalanan, reliabilitas, dan

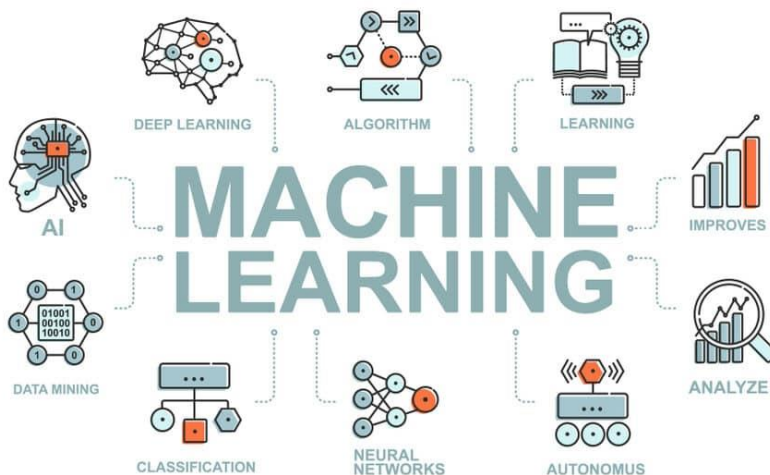
kenyamanan secara langsung memengaruhi keputusan individu dalam memilih rute, moda, dan frekuensi perjalanan.

Kebijakan publik juga memiliki peran penting dalam membentuk permintaan perjalanan. Tarif parkir, pembatasan kendaraan, subsidi angkutan umum, dan insentif transportasi berkelanjutan dapat mengarahkan masyarakat untuk memilih moda yang lebih ramah lingkungan atau mengubah pola perjalanan. Banister (2023) menekankan bahwa penerapan strategi Transport Demand Management (TDM) semakin penting untuk mengendalikan dominasi kendaraan pribadi di pusat kota dan mendorong penggunaan angkutan umum serta moda aktif, sehingga mendukung mobilitas yang lebih efisien dan berkelanjutan.

5. Pendekatan Modern dalam Analisis Permintaan Perjalanan

Pendekatan modern dalam analisis permintaan perjalanan memanfaatkan kemajuan teknologi untuk memperoleh data yang lebih lengkap, real-time, dan berskala besar. Selain metode survei konvensional, perencana transportasi kini menggunakan *big data* dari GPS, ponsel pintar, media sosial, serta data smart card angkutan umum untuk memetakan pola perjalanan penduduk secara akurat. Informasi ini memungkinkan perencanaan yang lebih responsif terhadap perubahan perilaku perjalanan dan kondisi lalu lintas aktual (Chen & Fan, 2024).

Gambar 2. *Machine Learning*



Sumber: *Codepolitan*

Penggunaan *artificial intelligence* (AI) dan *machine learning* membantu dalam pemodelan pola perjalanan yang kompleks, prediksi permintaan masa depan, serta evaluasi dampak kebijakan transportasi sebelum diterapkan. Dengan kemampuan analisis yang lebih canggih, pendekatan ini mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti (*evidence-based planning*) dan memudahkan integrasi berbagai moda transportasi.

Dampak positifnya juga terasa pada pengembangan transportasi berkelanjutan. Data real-time memungkinkan perencanaan kota ramah pejalan kaki, optimalisasi angkutan umum rendah emisi, dan integrasi antarmoda yang efisien. Dengan demikian, pendekatan modern tidak hanya meningkatkan akurasi perencanaan, tetapi juga membantu mewujudkan sistem transportasi yang lebih hijau, aman, dan inklusif bagi seluruh masyarakat.

D. Integrasi Transportasi dan Tata Guna Lahan

Integrasi transportasi dan tata guna lahan merupakan prinsip fundamental dalam perencanaan transportasi perkotaan modern, karena kedua sistem tersebut memiliki hubungan timbal balik yang sangat erat. Tata guna lahan memengaruhi pola dan intensitas perjalanan, sementara sistem transportasi menentukan tingkat aksesibilitas dan nilai suatu kawasan. Menurut Wegener dan Fürst (2022), kota yang gagal mengintegrasikan perencanaan transportasi dan tata guna lahan cenderung mengalami kemacetan kronis, urban sprawl, ketergantungan kendaraan pribadi, serta degradasi kualitas lingkungan perkotaan.

1. Hubungan Timbal Balik Transportasi dan Tata Guna Lahan

Hubungan antara transportasi dan tata guna lahan bersifat timbal balik dan dinamis. Tata guna lahan menentukan di mana aktivitas utama berlangsung seperti permukiman, pusat kerja, fasilitas pendidikan, dan perdagangan yang secara langsung memengaruhi kebutuhan perjalanan penduduk. Semakin tersebar lokasi aktivitas, semakin panjang perjalanan yang harus ditempuh, dan pemilihan moda transportasi akan dipengaruhi oleh ketersediaan dan kualitas sistem transportasi. Sebaliknya, infrastruktur transportasi yang dibangun, seperti jalan arteri, jalan tol, atau jaringan angkutan massal, dapat meningkatkan aksesibilitas suatu kawasan, sehingga mendorong perubahan fungsi

lahan dan intensitas pemanfaatannya (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2024).

Fenomena ini tampak jelas pada pembangunan koridor MRT atau LRT di perkotaan. Kawasan di sekitar stasiun transit cenderung mengalami peningkatan kepadatan bangunan, pertumbuhan aktivitas komersial, dan kenaikan nilai tanah. Perubahan ini merupakan manifestasi dari *land use feedback effect*, di mana pengembangan transportasi tidak hanya merespons kebutuhan perjalanan, tetapi juga mengubah pola pemanfaatan lahan secara signifikan. Dengan kata lain, transportasi dan tata guna lahan membentuk siklus interaksi: transportasi memengaruhi perkembangan lahan, sementara pola penggunaan lahan menentukan kebutuhan dan desain transportasi.

Pemahaman terhadap hubungan ini menjadi penting dalam perencanaan perkotaan modern. Integrasi antara kebijakan transportasi dan perencanaan tata guna lahan memungkinkan terciptanya kota yang lebih efisien, mengurangi kemacetan, mempersingkat jarak perjalanan, serta mendukung pengembangan sistem transportasi berkelanjutan. Dengan pendekatan ini, pengembangan transportasi tidak hanya menjadi solusi mobilitas, tetapi juga instrumen strategis dalam pembentukan struktur kota yang seimbang dan produktif.

2. Konsep Aksesibilitas sebagai Penghubung

Konsep aksesibilitas berperan sebagai penghubung antara transportasi dan tata guna lahan karena menentukan seberapa mudah individu dapat mencapai tujuan aktivitas. Menurut Litman (2023), aksesibilitas diukur bukan sekadar dari jarak fisik atau kapasitas jalan, tetapi dari kemudahan mencapai berbagai tujuan dengan biaya, waktu, dan usaha yang minimal. Pendekatan ini menekankan bahwa keberhasilan sistem transportasi tidak hanya dinilai dari arus kendaraan, tetapi dari sejauh mana masyarakat dapat mengakses pekerjaan, pendidikan, layanan publik, dan aktivitas ekonomi lainnya secara efisien.

Pada praktiknya, kota yang menerapkan tata guna lahan kompak dan berorientasi transit seperti pengembangan kawasan mixed-use di sepanjang koridor angkutan massal cenderung memiliki tingkat aksesibilitas yang tinggi meskipun kapasitas jalannya terbatas. Hal ini memungkinkan masyarakat untuk melakukan perjalanan lebih singkat dengan berbagai moda transportasi, termasuk angkutan umum, sepeda, atau berjalan kaki. Sebaliknya, kota dengan penyebaran fungsi lahan

yang luas (*urban sprawl*) memaksa penduduk melakukan perjalanan lebih panjang, meningkatkan ketergantungan pada kendaraan pribadi, dan menimbulkan kemacetan serta emisi yang lebih tinggi.

Pendekatan berbasis aksesibilitas menuntut perencana untuk memikirkan integrasi transportasi dan tata guna lahan secara holistik. Perencanaan jalan, transit, dan fasilitas pendukung harus selaras dengan pola penggunaan lahan, sehingga setiap pembangunan transportasi tidak hanya meningkatkan kapasitas jalan, tetapi juga meningkatkan kemudahan masyarakat dalam mengakses berbagai aktivitas kota. Dengan demikian, aksesibilitas menjadi indikator utama dalam merancang kota yang efisien, berkelanjutan, dan ramah pengguna.

3. *Transit Oriented Development (TOD)*

Transit Oriented Development (TOD) merupakan pendekatan strategis yang mengintegrasikan transportasi dan tata guna lahan dengan fokus pada pengembangan kawasan di sekitar simpul angkutan umum massal. Konsep ini menekankan kepadatan tinggi, fungsi campuran (*mixed-use*), serta desain yang ramah pejalan kaki, sehingga memungkinkan penghuni dan pengguna transportasi untuk melakukan perjalanan jarak pendek tanpa bergantung pada kendaraan pribadi. Cervero *et al.* (2023) menunjukkan bahwa implementasi TOD dapat secara signifikan mengurangi penggunaan kendaraan pribadi, meningkatkan modalitas angkutan umum, dan menurunkan emisi gas rumah kaca, sekaligus menciptakan lingkungan perkotaan yang lebih inklusif dan berkelanjutan.

Di banyak kota Asia, termasuk di Indonesia, TOD mulai menjadi strategi kunci dalam perencanaan kota modern. Dengan membangun pusat kegiatan seperti perkantoran, hunian, dan fasilitas komersial dalam radius berjalan kaki dari stasiun MRT, LRT, atau koridor BRT, TOD mendorong pola perjalanan yang lebih efisien dan menurunkan tekanan terhadap jaringan jalan. Selain itu, TOD juga dapat menjadi alat pengendalian pertumbuhan kota, karena pengembangan lahan diarahkan ke kawasan yang memiliki akses transportasi tinggi, sehingga mencegah *urban sprawl* dan meningkatkan penggunaan lahan secara optimal.

Penerapan TOD menuntut kolaborasi lintas sektor antara perencana transportasi, pengembang properti, pemerintah daerah, dan pemangku kepentingan masyarakat. Keberhasilan TOD tidak hanya diukur dari peningkatan volume pengguna angkutan umum, tetapi juga

dari terciptanya lingkungan kota yang nyaman, aman, dan mudah diakses, yang mendukung kualitas hidup perkotaan secara menyeluruh. Dengan demikian, TOD menjadi model perencanaan yang menjembatani kebutuhan mobilitas dengan pengembangan kota yang berkelanjutan.

4. Dampak Urban Sprawl dan Ketidakterpaduan

Ketidakterpaduan antara sistem transportasi dan tata guna lahan dapat menimbulkan dampak serius berupa urban sprawl, yaitu penyebaran permukiman berintensitas rendah ke wilayah pinggiran kota. Fenomena ini menimbulkan jarak tempuh harian yang lebih panjang, meningkatkan konsumsi energi, serta menambah biaya transportasi bagi rumah tangga. Selain itu, kelompok masyarakat berpendapatan rendah sering kali menghadapi keterbatasan akses terhadap pusat kegiatan ekonomi, pendidikan, dan layanan publik, sehingga ketimpangan sosial semakin melebar (Ewing & Hamidi, 2022).

Urban sprawl juga berdampak negatif terhadap efektivitas jaringan transportasi. Pembangunan jalan baru yang bertujuan mengurangi kemacetan sering hanya memberikan solusi sementara, karena memicu perjalanan tambahan atau *induced demand*. Hal ini menyebabkan kemacetan kembali meningkat seiring waktu, sementara investasi infrastruktur menjadi kurang efisien. Kondisi ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis kapasitas jalan saja tidak cukup untuk mengatasi permasalahan mobilitas perkotaan.

Perencanaan terpadu antara transportasi dan tata guna lahan menjadi sangat penting. Pendekatan ini menekankan keselarasan antara lokasi aktivitas dan aksesibilitas transportasi, pengendalian pertumbuhan kota, serta pengembangan pola perjalanan yang berkelanjutan. Dengan integrasi yang baik, sistem transportasi dapat lebih efisien secara ekonomi, adil secara sosial, dan ramah lingkungan, sekaligus mencegah penyebaran kota yang tidak terkendali.

5. Integrasi Kebijakan dan Kelembagaan

Integrasi transportasi dan tata guna lahan memerlukan pendekatan yang melampaui aspek teknis, dengan menekankan koordinasi kebijakan dan kelembagaan. Keselarasan antara rencana tata ruang wilayah (RTRW), rencana detail tata ruang (RDTR), dan rencana induk transportasi perkotaan menjadi kunci agar pembangunan infrastruktur transportasi selaras dengan arah pengembangan kota yang

diinginkan. Tanpa integrasi ini, investasi transportasi berisiko tidak efektif dan bahkan dapat memperparah permasalahan mobilitas serta urban sprawl (UN-Habitat, 2023).

Keterlibatan berbagai pemangku kepentingan juga menjadi faktor krusial. Pemerintah pusat dan daerah, sektor swasta, serta masyarakat harus bekerja sama dalam perencanaan, implementasi, dan evaluasi kebijakan transportasi dan tata guna lahan. Partisipasi aktif masyarakat, misalnya dalam konsultasi publik atau perencanaan berbasis komunitas, membantu memastikan bahwa kebijakan yang diterapkan relevan dengan kebutuhan lokal dan dapat diterima secara sosial.

Koordinasi kelembagaan yang efektif memungkinkan sinkronisasi program, pengawasan implementasi, dan pemantauan hasil secara berkelanjutan. Dengan integrasi kebijakan dan kelembagaan yang kuat, perencanaan transportasi dan tata guna lahan dapat menghasilkan sistem perkotaan yang lebih efisien, inklusif, dan berkelanjutan, sekaligus mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya yang ada.



BAB VII

PEMODELAN TRANSPORTASI

Pemodelan transportasi merupakan alat analitis yang digunakan untuk memahami, merepresentasikan, dan memprediksi pergerakan orang dan barang dalam suatu sistem transportasi secara terstruktur dan kuantitatif. Melalui pemodelan, hubungan antara permintaan perjalanan, karakteristik pengguna, jaringan transportasi, serta kebijakan yang diterapkan dapat dianalisis secara sistematis guna mendukung pengambilan keputusan dalam perencanaan dan pengelolaan transportasi. Menurut Ortúzar dan Willumsen (2011) serta Meyer dan Miller (2019), pemodelan transportasi berperan penting dalam mengevaluasi kinerja jaringan eksisting, memproyeksikan dampak pembangunan dan pertumbuhan wilayah, serta menilai berbagai skenario kebijakan secara objektif. Seiring perkembangan teknologi, ketersediaan data, dan kompleksitas sistem perkotaan, pemodelan transportasi terus berkembang dari pendekatan statis konvensional menuju model yang lebih dinamis, multimoda, dan berbasis perilaku, sehingga menjadi fondasi utama dalam perencanaan transportasi berkelanjutan di era modern.

A. Model Bangkitan dan Tarikan Perjalanan

Model bangkitan dan tarikan perjalanan (*trip generation model*) merupakan tahap awal dan fundamental dalam pemodelan transportasi perkotaan. Tahap ini bertujuan untuk memperkirakan jumlah perjalanan yang dihasilkan (bangkitan/produksi) dan jumlah perjalanan yang ditarik (tarikan/atraksi) oleh suatu zona dalam wilayah perencanaan. Menurut Ortúzar dan Willumsen (2021), akurasi tahap bangkitan perjalanan sangat menentukan kualitas hasil keseluruhan pemodelan transportasi, karena kesalahan pada tahap awal akan terakumulasi pada tahap distribusi, pemilihan moda, dan pembebanan jaringan.

1. Konsep Dasar Bangkitan dan Tarikan Perjalanan

Konsep bangkitan dan tarikan perjalanan merupakan dasar dalam pemodelan transportasi perkotaan. Bangkitan perjalanan (*trip production*) berkaitan dengan zona asal, biasanya kawasan permukiman, dan mencerminkan jumlah perjalanan yang dihasilkan oleh penduduk di wilayah tersebut untuk berbagai tujuan aktivitas seperti bekerja, bersekolah, berbelanja, maupun rekreasi. Zona ini menekankan faktor-faktor sosial ekonomi, kepemilikan kendaraan, dan karakteristik rumah tangga yang memengaruhi intensitas perjalanan.

Tarikan perjalanan (*trip attraction*) berfokus pada zona tujuan, seperti kawasan perkantoran, pusat perdagangan, kawasan industri, fasilitas pendidikan, dan layanan publik. Tarikan ini mencerminkan kemampuan suatu zona untuk menarik perjalanan berdasarkan jumlah aktivitas yang ada, ketersediaan fasilitas, dan tingkat kepadatan kegiatan.

Pendekatan pemisahan antara bangkitan dan tarikan membantu perencana memahami dinamika aliran perjalanan secara lebih detail. Meskipun kedua konsep ini dibedakan, total jumlah perjalanan yang diproduksi oleh zona asal harus seimbang dengan total perjalanan yang ditarik oleh zona tujuan, sehingga tercipta konsistensi dalam peramalan dan analisis jaringan transportasi (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2024). Dengan memahami karakteristik masing-masing zona, perencana dapat merancang sistem transportasi yang lebih efisien dan sesuai dengan kebutuhan masyarakat.

2. Peran Model Bangkitan dalam Perencanaan Transportasi

Model bangkitan dan tarikan perjalanan memiliki peran sentral dalam perencanaan transportasi perkotaan. Model ini digunakan untuk memperkirakan permintaan perjalanan baik pada kondisi saat ini maupun proyeksi masa depan, sehingga perencana dapat memahami bagaimana arus perjalanan akan berkembang seiring pertumbuhan penduduk, perubahan tata guna lahan, dan pembangunan infrastruktur baru.

Model bangkitan membantu mengevaluasi dampak perubahan tata guna lahan terhadap sistem transportasi. Misalnya, pembangunan kawasan perumahan baru atau peningkatan kepadatan di pusat kota akan meningkatkan jumlah perjalanan yang dihasilkan dari zona asal tertentu, sehingga membutuhkan penyesuaian kapasitas jalan, angkutan umum, atau fasilitas transportasi lain.

Model ini juga menjadi input utama dalam tahap distribusi perjalanan (*trip distribution*), yang menghubungkan perjalanan dari zona asal ke zona tujuan, serta mendukung analisis kebutuhan infrastruktur dan pelayanan transportasi, seperti penentuan rute angkutan umum, penambahan lajur jalan, atau perencanaan koridor transit massal. Dengan demikian, penerapan model bangkitan dan tarikan perjalanan memungkinkan perencana menilai dampak pembangunan kawasan baru, perubahan fungsi lahan, dan peningkatan kepadatan terhadap volume perjalanan perkotaan secara sistematis dan berbasis data (Meyer & Miller, 2020).

3. Variabel Penentu Bangkitan dan Tarikan

Variabel penentu bangkitan dan tarikan perjalanan merupakan fondasi dalam membangun model perjalanan yang akurat. Pada sisi bangkitan, karakteristik sosial-ekonomi penduduk menjadi faktor utama. Jumlah penduduk dan rumah tangga, ukuran serta komposisi rumah tangga, tingkat pendapatan, serta kepemilikan kendaraan memengaruhi seberapa banyak perjalanan yang dihasilkan dari suatu zona permukiman. Selain itu, karakteristik tata guna lahan di zona asal, seperti ketersediaan fasilitas pendidikan, pusat perbelanjaan, atau area rekreasi, juga memengaruhi pola bangkitan perjalanan.

Di sisi tarikan, faktor-faktor yang menentukan jumlah perjalanan yang ditarik ke suatu zona lebih berfokus pada intensitas aktivitas di zona tujuan. Jumlah lapangan kerja, luas kawasan komersial, kapasitas fasilitas pendidikan, serta kapasitas dan kualitas fasilitas pelayanan publik menjadi indikator utama. Misalnya, zona perkantoran atau pusat perdagangan dengan jumlah pekerjaan yang besar akan menarik lebih banyak perjalanan dari berbagai zona asal.

Kombinasi variabel bangkitan dan tarikan ini harus dipertimbangkan secara kontekstual, karena interaksi antara karakteristik sosial-ekonomi dan tata guna lahan menentukan pola perjalanan yang sebenarnya terjadi di perkotaan. Analisis yang cermat terhadap variabel-variabel ini memungkinkan perencana untuk meramalkan kebutuhan transportasi dengan lebih tepat, mendukung perencanaan infrastruktur, dan mendorong kebijakan transportasi yang lebih efisien dan berkelanjutan (Litman, 2023).

4. Pendekatan Pemodelan Bangkitan Perjalanan

Pemodelan bangkitan dan tarikan perjalanan merupakan langkah penting dalam perencanaan transportasi, karena menentukan jumlah perjalanan yang dihasilkan dan ditarik oleh suatu zona. Salah satu pendekatan utama adalah pendekatan regresi, yang memanfaatkan metode statistik untuk menjelaskan hubungan antara variabel independent seperti jumlah penduduk, ukuran rumah tangga, atau jumlah lapangan kerja dengan jumlah perjalanan. Model regresi bisa berupa linier maupun non-linier, dan bentuk umum dari model ini adalah:

$$T = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$$

di mana (T) adalah jumlah perjalanan dan (X_i) adalah variabel penjelas. Pendekatan regresi efektif ketika data survei perjalanan tersedia cukup lengkap dan hubungan antara variabel independen dengan jumlah perjalanan cukup kuat. Keunggulannya terletak pada kemampuan untuk memberikan estimasi kuantitatif yang dapat diuji secara statistik dan diinterpretasikan dengan mudah (Ortúzar & Willumsen, 2021).

Pendekatan kedua adalah klasifikasi silang (*cross-classification*), yang mengelompokkan rumah tangga atau zona ke dalam kelas-kelas berdasarkan kombinasi variabel, misalnya pendapatan dan kepemilikan kendaraan. Setiap kelas dianggap memiliki tingkat bangkitan perjalanan yang relatif seragam. Metode ini banyak diaplikasikan dalam praktik karena lebih stabil terhadap perubahan struktur populasi, mudah diperbarui, dan tidak terlalu bergantung pada hubungan statistik yang kompleks. Dengan pendekatan ini, perencana dapat menghasilkan estimasi perjalanan yang realistis sekaligus fleksibel terhadap dinamika perkotaan (Meyer & Miller, 2020).

5. Kalibrasi dan Validasi Model

Kalibrasi dan validasi model bangkitan perjalanan merupakan tahap penting untuk memastikan akurasi dan keandalan prediksi permintaan perjalanan. Kalibrasi dilakukan dengan menyesuaikan parameter model berdasarkan data survei yang ada, seperti survei rumah tangga atau data asal-tujuan (O-D), sehingga estimasi jumlah perjalanan yang dihasilkan dan ditarik oleh suatu zona mendekati kondisi nyata di lapangan. Proses ini memungkinkan model mencerminkan karakteristik

lokal, termasuk pola perjalanan, perilaku pengguna, dan pengaruh sosial-ekonomi yang spesifik pada wilayah studi.

Setelah kalibrasi, model perlu melalui proses validasi, yaitu membandingkan hasil estimasi dengan data observasi independen yang tidak digunakan dalam pembangunan model. Validasi bertujuan untuk memastikan bahwa model mampu merepresentasikan kondisi nyata dengan baik dan dapat diandalkan dalam analisis skenario transportasi. Proses ini penting karena perilaku perjalanan dapat berubah seiring waktu akibat faktor ekonomi, perkembangan teknologi, atau kebijakan transportasi baru, sehingga model yang tidak tervalidasi dapat memberikan prediksi yang menyesatkan.

Hensher dan Button (2022) menekankan bahwa kalibrasi dan validasi harus dilakukan secara berkala untuk menjaga relevansi model. Dengan pembaruan rutin, model bangkitan perjalanan tetap dapat digunakan sebagai dasar perencanaan transportasi jangka panjang, evaluasi dampak kebijakan, dan pengambilan keputusan investasi infrastruktur yang lebih akurat dan efektif. Pendekatan ini memastikan bahwa perencanaan transportasi tidak hanya berbasis data historis, tetapi juga adaptif terhadap dinamika perkotaan yang terus berubah.

6. Perkembangan Model Bangkitan Perjalanan Modern

Perkembangan model bangkitan perjalanan modern menandai pergeseran signifikan dari pendekatan konvensional yang hanya mengandalkan metode statistik tradisional. Saat ini, integrasi *big data* menjadi kunci, termasuk data dari ponsel, GPS kendaraan, dan transaksi tiket transportasi. Data ini memungkinkan perencana transportasi untuk menganalisis pola perjalanan dalam skala besar dan waktu nyata, sehingga dapat menangkap dinamika perjalanan yang sebelumnya sulit diobservasi dengan survei konvensional.

Pendekatan berbasis *machine learning* mulai diterapkan untuk memodelkan hubungan non-linier antara variabel sosial-ekonomi, tata guna lahan, dan perilaku perjalanan. Metode ini mampu mengidentifikasi pola kompleks dan interaksi variabel yang tidak mudah ditangkap oleh model regresi klasik, sehingga meningkatkan akurasi prediksi bangkitan dan tarikan perjalanan.

Model bangkitan modern juga memperluas fokus analisis. Tidak hanya menghitung jumlah perjalanan, tetapi juga mempertimbangkan frekuensi perjalanan, waktu perjalanan, dan tujuan aktivitas, sejalan

dengan filosofi activity-based models. Pendekatan ini memungkinkan perencana memahami bagaimana individu dan rumah tangga merencanakan dan menyesuaikan perjalanannya dalam konteks kebutuhan sehari-hari, memberikan dasar yang lebih kuat bagi perumusan kebijakan transportasi berkelanjutan, pengembangan angkutan umum, dan strategi manajemen permintaan transportasi.

B. Model Distribusi Perjalanan

Model distribusi perjalanan (*trip distribution model*) merupakan tahap kedua dalam kerangka Model Empat Tahap Transportasi, yang berfungsi untuk menghubungkan jumlah perjalanan yang dihasilkan (produksi) dan yang ditarik (atraksi) antar zona sehingga membentuk matriks asal-tujuan (*Origin-Destination / O-D matrix*). Matriks ini menunjukkan besarnya aliran perjalanan dari setiap zona asal ke setiap zona tujuan dan menjadi dasar penting bagi analisis pemilihan moda dan pembebanan jaringan.

Menurut Ortúzar dan Willumsen (2021), model distribusi perjalanan menjawab pertanyaan mendasar dalam perencanaan transportasi: ke mana perjalanan dari suatu zona akan dilakukan dan berapa besar intensitas interaksi antar zona tersebut. Dengan kata lain, model ini menggambarkan pola spasial pergerakan penduduk dalam suatu wilayah perkotaan.

1. Konsep Dasar Distribusi Perjalanan

Tahap distribusi perjalanan merupakan langkah krusial dalam perencanaan transportasi karena menghubungkan zona asal dengan zona tujuan, sehingga membentuk pola perjalanan spasial dalam suatu wilayah. Pada tahap ini, setelah jumlah perjalanan yang dihasilkan (*trip production*) dan yang ditarik (*trip attraction*) dari setiap zona diketahui melalui model bangkitan dan tarikan, distribusi perjalanan menentukan bagaimana perjalanan tersebut dialokasikan antar zona. Proses ini menghasilkan matriks asal-tujuan (O-D matrix), yang menjadi fondasi untuk analisis jaringan transportasi selanjutnya, termasuk pemilihan moda dan pembebanan rute.

Metode distribusi perjalanan yang paling umum adalah model gravitasi, yang didasarkan pada analogi hukum gravitasi Newton. Model ini menyatakan bahwa jumlah perjalanan antara dua zona sebanding

dengan besarnya aktivitas di masing-masing zona (misalnya jumlah penduduk atau lapangan kerja) dan berbanding terbalik dengan hambatan perjalanan, seperti jarak, waktu, atau biaya. Dengan demikian, zona yang lebih dekat atau lebih mudah diakses cenderung menarik lebih banyak perjalanan daripada zona yang jauh atau sulit dijangkau.

Pendekatan lain termasuk model *intervening opportunities* atau metode *entropy-maximizing*, yang mempertimbangkan distribusi perjalanan secara probabilistik berdasarkan peluang dan preferensi pengguna. Pentingnya tahap distribusi perjalanan terletak pada kemampuannya menangkap pola interaksi antar zona, sehingga perencana dapat mengidentifikasi koridor utama, potensi kemacetan, dan kebutuhan kapasitas jaringan. Matriks O–D yang dihasilkan menjadi input penting untuk tahap pemilihan moda dan pembebanan perjalanan, serta menjadi dasar evaluasi skenario kebijakan transportasi jangka panjang (Ortúzar & Willumsen, 2021).

2. Tujuan dan Peran Model Distribusi Perjalanan

Model distribusi perjalanan berperan sebagai jembatan antara jumlah perjalanan yang dihasilkan dan tujuan perjalanan dengan alokasi rute dalam wilayah perkotaan. Dengan menggunakan model ini, perencana dapat menggambarkan pola interaksi spasial antar zona, sehingga terlihat bagaimana penduduk bergerak dari kawasan permukiman menuju pusat kegiatan, seperti perkantoran, pusat perdagangan, sekolah, atau fasilitas publik. Informasi ini penting untuk memahami hubungan fungsional antar zona dan mengidentifikasi koridor perjalanan utama yang menjadi fokus pengembangan transportasi.

Model distribusi perjalanan berfungsi sebagai input utama bagi model pemilihan moda. Setelah pola asal–tujuan diketahui, tahap berikutnya adalah menentukan moda transportasi yang digunakan, baik kendaraan pribadi, angkutan umum, sepeda, maupun pejalan kaki. Dengan demikian, distribusi perjalanan membantu memperkirakan permintaan moda dan menilai kebutuhan infrastruktur atau layanan transportasi tertentu.

Peran lain model distribusi adalah mendukung analisis dampak perubahan tata guna lahan dan jaringan transportasi. Misalnya, pembangunan kawasan perkantoran baru atau koridor angkutan massal dapat mengubah pola perjalanan, dan model distribusi memungkinkan

perencana untuk mengevaluasi efeknya terhadap jaringan transportasi. Selanjutnya, informasi ini digunakan untuk perencanaan jaringan jangka menengah dan panjang, termasuk identifikasi kebutuhan pelebaran jalan, pengembangan angkutan umum, atau strategi pengendalian permintaan. Dengan demikian, model distribusi perjalanan menjadi alat strategis untuk memastikan sistem transportasi efisien, seimbang, dan berkelanjutan (Rodrigue *et al.*, 2024).

3. Model Gravitasi dalam Distribusi Perjalanan

Model gravitasi dalam distribusi perjalanan merupakan pendekatan yang sangat populer karena kesederhanaan dan fleksibilitasnya dalam merepresentasikan interaksi spasial antar zona. Prinsip dasar model ini mengasumsikan bahwa jumlah perjalanan antara dua zona dipengaruhi oleh “massa” aktivitas masing-masing zona yakni produksi perjalanan di zona asal dan tarikan perjalanan di zona tujuan dan menurun seiring meningkatnya hambatan perjalanan seperti jarak, waktu tempuh, atau biaya.

Pada praktiknya, model ini menghasilkan matriks asal–tujuan (O–D) yang menjadi input penting bagi tahap pemilihan moda dan pembebanan perjalanan. Fungsi hambatan ($f(c_{ij})$) digunakan untuk menangkap preferensi pengguna terhadap perjalanan yang lebih pendek atau lebih cepat, sehingga perjalanan jarak jauh atau mahal akan cenderung berkurang. Bentuk fungsi hambatan yang umum berupa eksponensial atau daya, yang secara matematis menurunkan probabilitas perjalanan secara bertahap seiring meningkatnya biaya atau waktu.

Faktor penyeimbang (K) pada model gravitasi memastikan bahwa jumlah total perjalanan yang dihasilkan dan yang ditarik tetap seimbang, menjaga konsistensi sistem. Menurut Ortúzar dan Willumsen (2021), meskipun model gravitasi memiliki keterbatasan dalam menangkap perilaku individu yang kompleks, pendekatan ini tetap menjadi dasar perhitungan distribusi perjalanan pada tingkat zonal karena memberikan estimasi yang realistis dan dapat diandalkan untuk perencanaan transportasi perkotaan. Dengan demikian, model gravitasi membantu perencana dalam mengidentifikasi koridor utama, merencanakan kapasitas jaringan, dan mengevaluasi dampak kebijakan transportasi.

4. Fungsi Hambatan Perjalanan

Fungsi hambatan perjalanan (*travel impedance function*) berperan sebagai penghubung antara karakteristik zona dan perilaku perjalanan individu dalam model distribusi. Hambatan ini mencerminkan kesulitan atau “biaya” yang harus ditanggung pengguna jalan untuk melakukan perjalanan dari zona asal ke zona tujuan. Faktor yang paling umum digunakan meliputi waktu tempuh, jarak, biaya perjalanan, atau kombinasi dari ketiganya yang dikenal sebagai *generalized cost*.

Pada konteks perkotaan, waktu tempuh sering menjadi variabel dominan karena secara langsung memengaruhi kenyamanan, keandalan, dan efisiensi perjalanan (Vickerman, 2023). Dengan meningkatnya waktu perjalanan, kecenderungan seseorang untuk memilih rute atau tujuan tertentu menurun, sehingga fungsi hambatan harus merepresentasikan perilaku tersebut secara akurat.

Pemilihan bentuk fungsi hambatan baik eksponensial, daya, atau logaritmik harus dikalibrasi menggunakan data survei aktual dari perjalanan masyarakat setempat. Kalibrasi ini memastikan bahwa model distribusi dapat merefleksikan preferensi nyata pengguna dan menghasilkan estimasi perjalanan yang realistis. Dengan fungsi hambatan yang tepat, perencana transportasi dapat memprediksi pola perjalanan dengan lebih akurat, mengevaluasi efek pembangunan infrastruktur baru, dan merancang kebijakan transportasi yang efektif.

5. Model *Intervening Opportunities*

Model *Intervening Opportunities* menawarkan pendekatan alternatif untuk distribusi perjalanan yang berbeda dari model gravitasi tradisional. Daripada menekankan jarak atau waktu tempuh sebagai faktor utama, model ini mengasumsikan bahwa pemilihan tujuan perjalanan dipengaruhi oleh jumlah peluang yang tersedia di sepanjang rute dari zona asal ke tujuan. Dengan kata lain, individu cenderung menerima “peluang” terdekat yang memenuhi kebutuhan misalnya pekerjaan, fasilitas pendidikan, atau layanan public sehingga semakin banyak peluang di dekat asal, semakin kecil kemungkinan perjalanan jauh dilakukan.

Pendekatan ini cocok untuk menganalisis perjalanan yang bersifat berbasis peluang, seperti perjalanan kerja atau akses ke layanan publik, karena mencerminkan perilaku nyata individu yang tidak selalu

memaksimalkan jarak tetapi mencari tujuan yang paling mudah dicapai. Model ini juga berguna dalam perencanaan transportasi perkotaan untuk mengestimasi pola perjalanan tanpa harus bergantung sepenuhnya pada fungsi hambatan jarak atau waktu.

Menurut Ortúzar & Willumsen (2021), penggunaan model *intervening opportunities* dapat meningkatkan akurasi prediksi distribusi perjalanan di wilayah dengan kepadatan aktivitas yang tinggi dan beragam, serta menjadi alternatif bagi kota-kota yang mengalami keterbatasan data untuk kalibrasi model gravitasi.

6. Pendekatan *Entropy Maximizing*

Pendekatan *Entropy Maximizing* menawarkan metode yang lebih matematis dan sistematis untuk distribusi perjalanan. Prinsip utamanya adalah memaksimalkan entropi sistem, yaitu mencari distribusi perjalanan yang paling mungkin terjadi dengan tetap memperhatikan kendala-kendala utama, seperti jumlah produksi perjalanan (*trip production*), jumlah tarikan perjalanan (*trip attraction*), dan biaya perjalanan antar zona. Dengan kata lain, model ini menghasilkan distribusi yang paling netral dan efisien secara statistik, tanpa menekankan asumsi spesifik tentang preferensi individu terhadap jarak atau peluang.

Keunggulan pendekatan ini terletak pada fleksibilitasnya. Model *entropy maximizing* mampu mengakomodasi berbagai jenis kendala dan skenario, misalnya perubahan jumlah perjalanan akibat pembangunan kawasan baru, variasi biaya transportasi, atau pengaruh kebijakan tarif dan parkir. Karena sifatnya yang makro dan berbasis optimasi, pendekatan ini sering digunakan dalam studi akademik, perencanaan transportasi regional, dan pemodelan jaringan besar, di mana distribusi perjalanan yang realistis diperlukan untuk mendukung analisis kebijakan dan simulasi sistem transportasi (Wilson, 2020).

Pendekatan ini dapat dikombinasikan dengan model lain, seperti model gravitasi atau peluang antara, untuk memperbaiki estimasi distribusi perjalanan pada kondisi nyata perkotaan yang kompleks, sehingga perencana memiliki alat yang kuat untuk mendukung keputusan investasi dan pengelolaan jaringan transportasi.

C. Model Pemilihan Moda

Model pemilihan moda (*mode choice model*) merupakan tahap ketiga dalam Model Empat Tahap Transportasi yang bertujuan untuk menentukan bagaimana perjalanan antar zona asal dan tujuan dialokasikan ke berbagai moda transportasi yang tersedia, seperti kendaraan pribadi, angkutan umum, dan moda tidak bermotor. Model ini menjelaskan perilaku individu dalam memilih moda perjalanan berdasarkan pertimbangan rasional maupun persepsi terhadap atribut perjalanan.

Menurut Ben-Akiva dan Lerman (2020), pemilihan moda merupakan keputusan perilaku yang sangat dipengaruhi oleh faktor waktu, biaya, kenyamanan, keamanan, dan karakteristik sosial-ekonomi pelaku perjalanan. Oleh karena itu, model pemilihan moda berperan penting dalam merumuskan kebijakan transportasi berkelanjutan dan pengendalian penggunaan kendaraan pribadi di perkotaan.

1. Tujuan dan Peran Model Pemilihan Moda

Model pemilihan moda berperan penting dalam perencanaan transportasi perkotaan karena menentukan bagaimana perjalanan yang telah terdistribusi akan dibagi ke berbagai jenis moda, seperti kendaraan pribadi, angkutan umum, sepeda, atau berjalan kaki. Peran utama model ini meliputi perkiraan modal split, yang membantu perencana memahami sejauh mana masyarakat menggunakan masing-masing moda transportasi, serta menilai dampak kebijakan transportasi seperti tarif angkutan umum, subsidi, pembatasan kendaraan pribadi, atau pengembangan jalur sepeda.

Model pemilihan moda menjadi dasar untuk menilai efektivitas peningkatan layanan angkutan umum. Misalnya, jika layanan bus atau MRT ditingkatkan dari segi frekuensi, kenyamanan, dan keandalan, model ini dapat memperkirakan sejauh mana pengguna beralih dari kendaraan pribadi ke angkutan umum, sehingga membantu mengurangi kemacetan, konsumsi energi, dan emisi gas rumah kaca.

Pada konteks lingkungan dan perencanaan berkelanjutan, pemilihan moda juga mendukung analisis dampak lingkungan, termasuk emisi polusi dan penggunaan energi. Dengan memahami preferensi dan perilaku pemilihan moda masyarakat, perencana dapat merancang sistem

transportasi yang lebih efisien, inklusif, dan ramah lingkungan, sekaligus meningkatkan kualitas hidup perkotaan (Litman, 2023).

2. Teori Dasar Pemilihan Moda

Teori dasar pemilihan moda berakar pada *Random Utility Theory* (Teori Utilitas Acak), yang menyatakan bahwa setiap individu cenderung memilih moda transportasi yang memberikan utilitas tertinggi atau kepuasan maksimal dari sudut pandangnya. Konsep ini menekankan bahwa pilihan moda bukan sekadar keputusan rasional murni, tetapi juga dipengaruhi oleh preferensi individu yang bersifat subjektif.

Utilitas suatu moda terdiri dari dua komponen utama. Pertama, utilitas sistematis, yaitu bagian yang dapat diukur dan dimodelkan berdasarkan atribut moda seperti waktu perjalanan, biaya, kenyamanan, reliabilitas, dan fasilitas pendukung. Kedua, utilitas acak, yang merepresentasikan faktor psikologis, preferensi pribadi, dan ketidakpastian perilaku pengguna yang tidak dapat diamati secara langsung. Kombinasi kedua komponen ini menjadikan pemilihan moda bersifat probabilistik, sehingga model pemilihan moda dapat memperkirakan kemungkinan pengguna memilih suatu moda tertentu, bukan sekadar menentukan satu moda secara deterministik.

Pendekatan ini memungkinkan perencanaan transportasi untuk menangkap keragaman perilaku individu dan menganalisis dampak kebijakan transportasi atau perubahan layanan terhadap modal split dengan lebih realistis. Hal ini sangat penting dalam merancang sistem transportasi perkotaan yang efektif, berkelanjutan, dan responsif terhadap preferensi masyarakat.

3. Model Logit dalam Pemilihan Moda

Model logit, khususnya *Multinomial Logit* (MNL), merupakan pendekatan yang paling luas digunakan dalam pemilihan moda karena kesederhanaannya dan kemampuan untuk memprediksi probabilitas pilihan antara beberapa moda yang tersedia. Model ini berlandaskan pada konsep utilitas acak, di mana probabilitas seorang individu memilih moda tertentu bergantung pada besarnya utilitas sistematis moda tersebut dibandingkan dengan utilitas moda lain.

Secara matematis, probabilitas memilih moda (k) dirumuskan sebagai:

$$P_k = \frac{e^{V_k}}{\sum_m e^{V_m}}$$

di mana P_k adalah probabilitas pemilihan moda k , V_k adalah utilitas sistematis moda k , dan indeks m mencakup seluruh moda yang tersedia. Utilitas sistematis V_k biasanya dinyatakan sebagai fungsi linear dari atribut moda:

$$V_k = \beta_1 T_k + \beta_2 C_k + \beta_3 Q_k + \dots$$

di mana T_k adalah waktu perjalanan, C_k adalah biaya perjalanan, dan Q_k mencakup atribut kualitas layanan seperti kenyamanan, frekuensi, dan reliabilitas. Parameter β_i menunjukkan sensitivitas pengguna terhadap masing-masing atribut.

Model MNL memungkinkan perencana transportasi untuk menganalisis respons pengguna terhadap perubahan atribut moda atau kebijakan transportasi, seperti penyesuaian tarif, peningkatan kenyamanan, atau pengurangan waktu perjalanan. Pendekatan ini sangat berguna dalam merancang strategi transportasi perkotaan yang efisien, berkelanjutan, dan sesuai preferensi pengguna.

4. Variabel yang Mempengaruhi Pemilihan Moda

Pemilihan moda perjalanan dipengaruhi oleh kombinasi faktor teknis, sosial, dan kebijakan yang saling berinteraksi. Karakteristik perjalanan seperti waktu tempuh, biaya, jarak, dan reliabilitas langsung memengaruhi kenyamanan dan efisiensi moda yang dipilih. Misalnya, semakin cepat dan tepat waktu suatu moda, semakin besar kemungkinan pengguna memilihnya. Selain itu, karakteristik moda turut menentukan pilihan, termasuk kenyamanan, kapasitas, keselamatan, dan aksesibilitas. Moda dengan fasilitas lebih baik, kapasitas cukup, dan tingkat keselamatan tinggi cenderung menarik lebih banyak pengguna, terutama pada perjalanan jarak menengah hingga panjang.

Karakteristik individu juga memengaruhi perilaku pemilihan moda. Pendapatan, usia, kepemilikan kendaraan, dan jenis pekerjaan membentuk preferensi perjalanan. Misalnya, individu dengan

kepemilikan kendaraan tinggi mungkin lebih memilih mobil pribadi, sedangkan kelompok berpendapatan rendah lebih bergantung pada angkutan umum.

Konteks kebijakan dan lingkungan berperan penting, seperti tarif parkir, pembatasan kendaraan, dan kualitas infrastruktur transportasi. Kebijakan transportasi yang mendorong penggunaan angkutan umum atau mengatur akses kendaraan pribadi dapat mengubah distribusi moda secara signifikan. Hensher dan Rose (2023) menekankan bahwa faktor non-ekonomi, seperti persepsi keselamatan, kenyamanan psikologis, dan pengalaman pengguna, semakin berpengaruh dalam pemilihan moda modern, seiring meningkatnya kesadaran akan kualitas hidup dan transportasi berkelanjutan.

5. Pengembangan Model Pemilihan Moda

Pengembangan model pemilihan moda terus berkembang untuk menggambarkan perilaku pengguna secara lebih realistis dan menangkap kompleksitas pilihan transportasi di perkotaan. Salah satu pendekatan adalah *Nested Logit Model*, yang memungkinkan pemodelan struktur hirarkis pilihan moda. Misalnya, pengguna pertama-tama memilih antara moda motorized dan *non-motorized*, lalu memilih jenis kendaraan spesifik di dalam kategori tersebut. Pendekatan ini mengurangi asumsi independensi dari alternatif yang sering menjadi keterbatasan pada model MNL.

Mixed Logit Model adalah pengembangan lain yang fleksibel, karena mampu menangkap heterogenitas preferensi individu. Model ini memperhitungkan variasi perilaku pengguna yang tidak dapat dijelaskan oleh model logit standar, sehingga hasil estimasi lebih realistis terutama untuk populasi dengan karakteristik perjalanan yang beragam. Selain itu, *Latent Class Model* mengelompokkan pengguna berdasarkan pola preferensi tersembunyi, misalnya kelompok yang sangat sensitif terhadap waktu perjalanan versus kelompok yang lebih mementingkan kenyamanan atau biaya. Dengan pengelompokan ini, perencana dapat merancang kebijakan dan intervensi transportasi yang lebih tepat sasaran.

6. Pemilihan Moda dan Transportasi Berkelanjutan

Pemilihan moda memiliki peran strategis dalam mendukung transportasi berkelanjutan. Dengan memodelkan preferensi pengguna

terhadap berbagai alternatif moda, perencana dapat menilai efektivitas kebijakan yang bertujuan mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi dan menurunkan emisi. Misalnya, peningkatan kualitas angkutan umum dari frekuensi layanan, kenyamanan, hingga reliabilitas dapat meningkatkan utilitas moda umum sehingga mendorong perpindahan pengguna dari kendaraan pribadi ke angkutan massal.

Kebijakan seperti tarif kemacetan (*congestion pricing*) memberikan insentif ekonomi untuk mengurangi perjalanan kendaraan pribadi pada jam sibuk, sekaligus mendorong penggunaan angkutan umum atau moda aktif. Pengembangan moda aktif, seperti jalur pejalan kaki dan sepeda yang aman, juga berkontribusi pada pengurangan emisi, peningkatan kesehatan, dan kualitas ruang publik.

Integrasi antar moda, misalnya sinkronisasi jadwal bus dengan layanan MRT atau LRT, memungkinkan perjalanan multimoda menjadi lebih efisien dan nyaman, sehingga meningkatkan daya tarik transportasi berkelanjutan. Dengan mensimulasikan perubahan utilitas moda, model pemilihan moda membantu perencana memprediksi pergeseran perilaku perjalanan, menilai dampaknya terhadap jaringan transportasi, serta merancang strategi yang lebih efektif untuk mencapai tujuan lingkungan dan sosial perkotaan (Banister, 2023).

D. Model Pembebanan Jaringan

Model pembebanan jaringan (*traffic assignment model*) merupakan tahap akhir dalam rangkaian pemodelan transportasi klasik empat tahap. Tujuan utama dari model ini adalah menentukan bagaimana arus perjalanan (*trip flow*) dialokasikan ke jaringan transportasi, baik jaringan jalan raya maupun jaringan angkutan umum, berdasarkan pola asal-tujuan (OD matrix) yang telah dihasilkan dari tahap sebelumnya. Dengan kata lain, pembebanan jaringan menjawab pertanyaan: rute mana yang dipilih oleh pengguna transportasi dan seberapa besar beban lalu lintas pada setiap ruas jaringan?

Menurut Ortúzar dan Willumsen (2011), pembebanan jaringan adalah proses matematis dan perilaku untuk memetakan permintaan perjalanan ke jaringan transportasi dengan mempertimbangkan karakteristik jaringan, seperti kapasitas jalan, waktu tempuh, biaya perjalanan, serta perilaku pengguna jalan. Tahap ini sangat penting karena menjadi dasar untuk mengevaluasi kinerja jaringan, seperti

tingkat kemacetan, waktu tempuh, emisi, serta kebutuhan peningkatan infrastruktur.

1. Konsep Dasar Pembebanan Jaringan

Pembebanan jaringan merupakan tahap akhir dalam pemodelan transportasi yang berfokus pada penentuan alokasi perjalanan ke dalam jaringan jalan atau moda transportasi yang tersedia. Konsep dasar dari pembebanan jaringan adalah bahwa setiap pengguna perjalanan memilih rute yang dianggap paling optimal, biasanya untuk meminimalkan *generalized travel cost*, yang mencakup waktu tempuh, biaya, kenyamanan, dan risiko kemacetan. Pemilihan rute ini mencerminkan perilaku rasional pengguna, meskipun dalam kenyataan perilaku tersebut dapat dipengaruhi oleh preferensi pribadi, informasi yang tersedia, dan ketidakpastian kondisi lalu lintas.

Pada praktiknya, pembebanan jaringan dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik jaringan transportasi, seperti kapasitas jalan, laju arus jenuh, kecepatan bebas, dan interaksi antar rute. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk memperkirakan distribusi arus lalu lintas, identifikasi ruas yang rawan kemacetan, serta evaluasi kinerja jaringan secara keseluruhan. Hasil pembebanan jaringan menjadi dasar penting bagi perencanaan dan manajemen lalu lintas, termasuk pengaturan sinyal, pembangunan jalan baru, optimasi rute angkutan umum, serta penilaian dampak investasi infrastruktur transportasi.

Pendekatan pembebanan jaringan dapat berbeda-beda, mulai dari *user equilibrium*, di mana tidak ada pengguna yang dapat memperpendek waktu perjalanan dengan berpindah rute, hingga *system optimum*, yang meminimalkan total waktu perjalanan seluruh jaringan. Pemilihan pendekatan sangat bergantung pada tujuan analisis apakah fokus pada perilaku individu atau efisiensi sistem secara keseluruhan (Meyer & Miller, 2019).

2. Jenis-Jenis Model Pembebanan Jaringan

Model pembebanan jaringan memiliki berbagai pendekatan yang disesuaikan dengan kompleksitas jaringan dan tujuan analisis. Pendekatan pertama adalah *All-or-Nothing Assignment*, yang merupakan metode paling sederhana. Dalam model ini, seluruh arus perjalanan dari satu pasangan asal-tujuan dibebankan ke rute terpendek berdasarkan waktu tempuh atau jarak, tanpa memperhitungkan kapasitas jalan atau

kemacetan. Model ini mengasumsikan kondisi *free-flow*, sehingga tidak merepresentasikan interaksi nyata antar kendaraan. *All-or-nothing* cocok digunakan untuk analisis awal atau jaringan dengan volume rendah, tetapi jarang dipakai untuk kota besar yang kompleks (Khisty & Lall, 2020).

Pendekatan kedua adalah *Incremental Assignment*, di mana total arus lalu lintas dibagi menjadi beberapa bagian (misalnya 40%, 30%, 20%, 10%) dan dibebankan secara bertahap ke jaringan. Setelah setiap tahap, waktu tempuh diperbarui sesuai volume yang telah masuk. Model ini lebih realistis dibanding *all-or-nothing* karena mempertimbangkan efek peningkatan volume terhadap waktu tempuh. Namun, hasilnya sangat bergantung pada pembagian persentase arus dan belum sepenuhnya memenuhi prinsip keseimbangan pengguna.

Pendekatan ketiga adalah *User Equilibrium* (UE), yang berlandaskan prinsip Wardrop: “Tidak ada pengguna yang dapat memperbaiki waktu tempuhnya dengan berpindah rute secara sepihak.” Dalam kondisi UE, semua rute yang digunakan memiliki waktu tempuh minimum dan sama antara zona asal dan tujuan, sedangkan rute yang tidak digunakan memiliki waktu tempuh lebih besar. Model UE menggambarkan perilaku rasional individu, sangat realistis dalam kondisi kemacetan, dan paling banyak digunakan dalam perencanaan transportasi perkotaan, terutama untuk kota besar dengan tingkat kepadatan tinggi (Sheffi, 2018).

Terdapat *System Optimal (SO) Assignment*, yang bertujuan meminimalkan total waktu tempuh seluruh sistem, bukan waktu tempuh individu. Dalam model ini, pengguna diarahkan ke rute tertentu demi kepentingan sistem secara keseluruhan, sehingga optimal secara sosial tetapi jarang terjadi secara alami. SO relevan untuk kebijakan manajemen lalu lintas dan penerapan ITS, misalnya melalui road pricing, pengaturan rute, atau sistem panduan rute (Meyer & Miller, 2019).

3. Fungsi Waktu Tempuh dan Kapasitas Jalan

Pada pembebanan jaringan, fungsi waktu tempuh dan kapasitas jalan merupakan komponen kunci karena menentukan bagaimana volume lalu lintas memengaruhi kecepatan dan kenyamanan perjalanan. Salah satu fungsi yang paling umum digunakan adalah fungsi *Bureau of Public Roads* (BPR), yang memodelkan peningkatan waktu tempuh saat

volume lalu lintas mendekati atau melebihi kapasitas jalan. Fungsi ini dinyatakan secara matematis sebagai:

$$t = t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{v}{c} \right)^\beta \right)$$

di mana:

- a. t = waktu tempuh aktual pada kondisi tertentu
- b. t_0 = waktu tempuh bebas hambatan (*free-flow travel time*)
- c. v = volume lalu lintas yang melewati ruas jalan
- d. c = kapasitas jalan maksimum
- e. α, β = parameter empiris yang dikalibrasi berdasarkan data lokal

Fungsi BPR memungkinkan perencana transportasi untuk mengestimasi peningkatan waktu tempuh akibat kemacetan, sehingga dapat digunakan dalam berbagai model pembebanan jaringan seperti *All-or-Nothing*, *User Equilibrium*, maupun *System Optimal*. Parameter α dan β dapat disesuaikan untuk mencerminkan karakteristik jaringan lokal, misalnya jalan arteri, jalan kolektor, atau jalan lokal, sehingga hasil pemodelan lebih akurat (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Penggunaan fungsi BPR memudahkan integrasi dengan software pemodelan transportasi modern, karena secara numerik sederhana namun tetap realistis untuk menangkap efek kemacetan pada waktu tempuh. Dengan demikian, fungsi ini menjadi dasar penting dalam analisis kapasitas, evaluasi kinerja jalan, dan perencanaan strategi manajemen lalu lintas.

4. Pembebanan Jaringan Multimoda

Pembebanan jaringan multimoda menjadi aspek penting dalam perencanaan transportasi perkotaan modern karena sistem transportasi saat ini tidak hanya bergantung pada kendaraan pribadi, tetapi juga melibatkan angkutan umum, pejalan kaki, dan sepeda. Pendekatan ini mempertimbangkan interaksi antar moda serta faktor-faktor yang memengaruhi kenyamanan dan efisiensi perjalanan. Beberapa variabel kunci yang diperhitungkan dalam pembebanan multimoda antara lain waktu tunggu penumpang, waktu transfer antar moda, frekuensi layanan atau headway angkutan umum, serta kapasitas kendaraan umum yang tersedia.

Integrasi pembebanan multimoda memungkinkan perencana untuk mengevaluasi bagaimana pengguna berpindah dari satu moda ke moda lain, misalnya dari bus ke kereta ringan atau dari sepeda ke angkutan umum. Analisis ini membantu memahami beban pada jaringan secara keseluruhan dan mengidentifikasi titik-titik kritis yang memerlukan peningkatan kapasitas atau perbaikan layanan. Dengan demikian, pembebanan multimoda tidak hanya memberikan gambaran arus perjalanan, tetapi juga menilai pengalaman pengguna dalam sistem transportasi perkotaan.

Menurut Vuchic (2017), penerapan pembebanan jaringan multimoda sangat penting untuk mendukung konsep *sustainable urban mobility* dan *transit-oriented development* (TOD). Dengan memperhitungkan seluruh moda secara terpadu, perencana dapat merancang strategi transportasi yang lebih efisien, mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi, menurunkan emisi, serta meningkatkan aksesibilitas dan kualitas hidup masyarakat perkotaan. Pendekatan ini juga memungkinkan evaluasi kebijakan, seperti peningkatan frekuensi angkutan umum, perbaikan fasilitas pejalan kaki, atau pengembangan jalur sepeda, secara komprehensif dan berbasis data.

5. Implementasi Model Pembebanan Jaringan

Implementasi model pembebanan jaringan dalam perencanaan transportasi perkotaan memerlukan pemanfaatan perangkat lunak khusus yang mampu memproses data secara komprehensif dan menghasilkan simulasi aliran lalu lintas. Beberapa perangkat lunak yang umum digunakan antara lain PTV VISUM, TransCAD, dan EMME untuk analisis makro, serta Aimsun dan VISSIM untuk simulasi mikro yang lebih rinci. Pemilihan perangkat lunak biasanya disesuaikan dengan skala studi, tujuan analisis, serta ketersediaan data yang mendukung.

Model pembebanan jaringan digunakan untuk berbagai tujuan strategis. Pertama, evaluasi kinerja jaringan eksisting, yang memungkinkan perencana memahami titik-titik kritis kemacetan, waktu tempuh, dan distribusi arus kendaraan. Kedua, analisis dampak pembangunan baru, seperti proyek jalan, pusat komersial, atau pengembangan kawasan TOD, untuk memprediksi bagaimana perubahan infrastruktur memengaruhi aliran lalu lintas. Ketiga, penilaian skenario kebijakan transportasi, misalnya penerapan tarif kemacetan, pengaturan lajur bus, atau pembatasan kendaraan pribadi, yang

membutuhkan simulasi dampak sebelum kebijakan diterapkan. Terakhir, model ini juga mendukung perencanaan jaringan jalan dan angkutan umum secara terpadu, sehingga memungkinkan integrasi multimoda dan peningkatan aksesibilitas.

Menurut de Dios Ortúzar (2021), keakuratan hasil pembebanan jaringan sangat bergantung pada kualitas data input. Matriks asal–tujuan (O–D) yang akurat, parameter fungsi waktu tempuh, serta informasi kapasitas dan karakteristik jaringan menjadi faktor kunci. Tanpa data yang tepat, hasil model bisa menyimpang dari kondisi nyata, sehingga keputusan perencanaan yang diambil bisa kurang efektif. Oleh karena itu, pengumpulan data yang representatif dan kalibrasi model secara berkala menjadi bagian penting dari proses implementasi pembebanan jaringan.

6. Tantangan dan Perkembangan Terkini

Pembebanan jaringan modern menghadapi berbagai tantangan yang semakin kompleks seiring perkembangan kota dan teknologi transportasi. Salah satu tantangan utama adalah perilaku pengguna yang tidak selalu rasional. Meskipun model tradisional, seperti user equilibrium, mengasumsikan bahwa setiap pengguna memilih rute dengan waktu tempuh minimum, kenyataannya keputusan perjalanan sering dipengaruhi oleh preferensi pribadi, kebiasaan, atau informasi yang tidak sempurna. Ketidakpastian waktu tempuh akibat kemacetan dinamis, kecelakaan, dan kondisi cuaca juga membuat prediksi aliran lalu lintas menjadi lebih sulit.

Kemunculan aplikasi navigasi real-time dan sistem informasi lalu lintas modern mengubah perilaku pengguna secara cepat. Pengendara dapat berpindah rute secara adaptif berdasarkan rekomendasi aplikasi, sehingga distribusi arus lalu lintas menjadi lebih dinamis dan sulit diprediksi oleh model statis konvensional. Integrasi data dari *big data*, GPS kendaraan, dan sensor real-time menjadi kebutuhan penting untuk memodelkan sistem transportasi secara akurat dan responsif terhadap perubahan kondisi di lapangan.

Untuk merespons tantangan tersebut, penelitian dan praktik perencanaan modern banyak memanfaatkan pendekatan *dynamic traffic assignment* (DTA) dan agent-based modeling. DTA memungkinkan simulasi aliran lalu lintas yang berubah seiring waktu dengan memperhitungkan interaksi pengguna secara dinamis, sementara agent-

based modeling mampu meniru perilaku individual pengendara dan respons terhadap kebijakan atau informasi lalu lintas. Pendekatan ini memberikan fleksibilitas lebih besar dibanding model statis klasik dan mendukung perencanaan transportasi perkotaan yang lebih adaptif dan berkelanjutan (Zheng *et al.*, 2022).



BAB VIII

TRANSPORTASI UMUM

PERKOTAAN

Transportasi umum perkotaan merupakan tulang punggung mobilitas masyarakat di kota-kota modern, berperan penting dalam mengurangi kemacetan, meningkatkan aksesibilitas, dan menekan dampak lingkungan akibat penggunaan kendaraan pribadi. Sistem ini mencakup berbagai moda seperti bus, angkutan rel *ringan*, MRT, BRT, dan layanan pengumpan yang terintegrasi, serta didukung oleh perencanaan rute, jadwal, dan infrastruktur yang efektif. Transportasi umum yang dirancang secara efisien dan berkelanjutan tidak hanya meningkatkan kenyamanan dan keselamatan pengguna, tetapi juga mendorong pertumbuhan ekonomi kota, integrasi sosial, dan perwujudan mobilitas perkotaan yang inklusif (Ceder, 2021; Litman, 2023).

A. Sistem Angkutan Umum Perkotaan

Sistem angkutan umum perkotaan merupakan subsistem utama dalam sistem transportasi perkotaan yang dirancang untuk melayani pergerakan masyarakat secara massal, terjadwal, dan terorganisasi. Angkutan umum berperan strategis dalam menjamin aksesibilitas, mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi, serta mendukung efisiensi ruang dan keberlanjutan lingkungan perkotaan. Menurut Vuchic (2017), kota modern yang berfungsi dengan baik hampir selalu ditopang oleh sistem angkutan umum yang andal, terintegrasi, dan berkapasitas tinggi.

1. Pengertian dan Tujuan Angkutan Umum Perkotaan

Angkutan umum perkotaan adalah layanan transportasi kolektif yang dirancang untuk melayani masyarakat secara efisien dan terjangkau, beroperasi pada rute dan jadwal tertentu, serta dikelola oleh

operator resmi, baik pemerintah maupun swasta. Sistem ini berfungsi untuk memenuhi kebutuhan perjalanan harian masyarakat, seperti pergi ke tempat kerja, sekolah, pusat perbelanjaan, maupun fasilitas sosial lainnya. Keberadaan angkutan umum yang handal menjadi tulang punggung mobilitas perkotaan karena memungkinkan akses yang luas sekaligus mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi.

Tujuan utama angkutan umum perkotaan tidak hanya terkait dengan mobilitas semata, tetapi juga mencakup aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan. Dari sisi sosial, angkutan umum menyediakan akses yang adil dan inklusif bagi kelompok masyarakat yang tidak memiliki kendaraan pribadi, seperti pelajar, lansia, dan masyarakat berpenghasilan rendah. Dari sisi transportasi, layanan ini mampu mengurangi kemacetan dengan menurunkan jumlah kendaraan pribadi di jalan, sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan ruang perkotaan karena satu unit angkutan umum dapat mengangkut puluhan hingga ratusan penumpang.

Dampak lingkungan juga menjadi fokus penting, karena angkutan umum yang efektif dapat menekan emisi gas rumah kaca, polusi udara, dan konsumsi energi fosil. Secara ekonomi, angkutan umum mendukung pembangunan perkotaan dengan meningkatkan aksesibilitas ke pusat-pusat kegiatan ekonomi dan sosial, mendorong mobilitas tenaga kerja, dan memperkuat daya saing kota. Dengan demikian, menurut Litman (2023), kualitas dan efektivitas angkutan umum merupakan salah satu indikator penting dalam menilai kualitas hidup perkotaan dan perencanaan kota yang berkelanjutan.

2. Peran Strategis Angkutan Umum dalam Sistem Transportasi Kota

Pada konteks transportasi perkotaan, angkutan umum berperan strategis sebagai tulang punggung pergerakan massal, karena kapasitas jalan dan ruang kota memiliki keterbatasan yang tidak dapat diatasi hanya dengan kendaraan pribadi. Kehadiran angkutan umum yang kuat menjadi kunci untuk mencegah kemacetan kronis, pemborosan energi, dan degradasi lingkungan yang serius, terutama di kota besar (Cervero, 2021). Sistem ini tidak hanya memfasilitasi mobilitas, tetapi juga membentuk kerangka bagi pengembangan kota yang efisien dan berkelanjutan.

Secara lebih spesifik, angkutan umum berperan dalam mengendalikan pertumbuhan lalu lintas kendaraan pribadi melalui

pergeseran moda, atau modal shift, sehingga mengurangi kepadatan jalan. Selain itu, layanan angkutan umum mendukung integrasi tata guna lahan, khususnya dalam konsep *Transit-Oriented Development* (TOD), dengan mendorong pembangunan kawasan padat, berfungsi campuran, dan ramah pejalan kaki di sekitar simpul transportasi massal. Angkutan umum juga meningkatkan ketahanan sistem transportasi kota, karena mampu menangani lonjakan permintaan perjalanan dengan lebih efisien dibandingkan kendaraan pribadi.

Angkutan umum berfungsi sebagai instrumen kebijakan publik, misalnya untuk pengendalian emisi, peningkatan aksesibilitas ke wilayah pinggiran, dan penyediaan mobilitas yang adil bagi semua lapisan masyarakat. Dengan demikian, angkutan umum bukan hanya sarana transportasi, tetapi juga alat strategis dalam perencanaan kota modern yang berkelanjutan, aman, dan efisien.

3. Komponen Sistem Angkutan Umum Perkotaan

Sistem angkutan umum perkotaan terdiri dari tiga komponen utama yang saling terkait dan membentuk kesatuan yang utuh untuk mendukung mobilitas perkotaan yang efektif. Komponen-komponen ini meliputi aspek fisik, operasional, serta kelembagaan dan kebijakan.

Komponen fisik mencakup prasarana dan sarana transportasi. Sarana meliputi berbagai moda angkutan seperti bus, LRT, MRT, trem, dan kendaraan pendukung lainnya, sementara prasarana mencakup jalur bus, rel, halte, stasiun, terminal, depo, serta fasilitas tambahan seperti park and ride. Kualitas dan kapasitas komponen fisik sangat menentukan keandalan sistem secara keseluruhan. Prasarana khusus angkutan umum, misalnya jalur bus eksklusif atau rel khusus, terbukti mampu meningkatkan kecepatan dan ketepatan layanan, sehingga menjadi faktor penting dalam peningkatan kualitas angkutan umum (Vuchic, 2017).

Komponen operasional berkaitan dengan pengelolaan layanan sehari-hari. Hal ini mencakup perencanaan rute dan jaringan, penjadwalan dan frekuensi layanan, pengelolaan armada, sistem tarif dan tiket, serta pengendalian operasional harian. Kinerja operasional yang baik dapat memastikan pemanfaatan prasarana secara optimal dan meningkatkan pengalaman penumpang. Sebaliknya, operasi yang tidak efisien akan menurunkan kualitas pelayanan meskipun prasarana memadai.

Komponen kelembagaan dan kebijakan meliputi lembaga pengelola transportasi, regulasi pemerintah, skema pembiayaan dan subsidi, serta kemitraan antara pemerintah dan sektor swasta. Tata kelola yang baik, koordinasi lintas sektor, dan konsistensi kebijakan merupakan faktor krusial bagi keberhasilan angkutan umum perkotaan, karena menentukan kelangsungan operasional, keamanan finansial, serta integrasi sistem transportasi secara menyeluruh (Cervero, 2021).

4. Klasifikasi Sistem Angkutan Umum Perkotaan

Sistem angkutan umum perkotaan dapat dikelompokkan menjadi beberapa klasifikasi berdasarkan teknologi, kapasitas, dan media operasi, yang mencerminkan fleksibilitas dan tujuan layanan masing-masing moda.

Pertama, angkutan umum berbasis jalan adalah sistem yang paling fleksibel dan banyak digunakan, terutama di kota-kota berkembang. Moda ini meliputi bus konvensional yang beroperasi dengan rute tetap dan berhenti di halte, serta *Bus Rapid Transit* (BRT) yang menawarkan jalur khusus, halte tertutup, dan sistem tiket Prabayar. BRT mampu memberikan kualitas layanan yang setara dengan sistem rel, namun dengan biaya investasi yang lebih rendah, sehingga menjadi alternatif efektif untuk koridor perkotaan yang padat (Wright & Hook, 2019).

Kedua, angkutan umum berbasis rel memiliki kapasitas tinggi dan keandalan waktu yang lebih baik, menjadikannya pilihan utama untuk koridor dengan permintaan perjalanan besar. Moda ini mencakup MRT (*Mass Rapid Transit*) yang melayani koridor dengan permintaan sangat tinggi, LRT (*Light Rail Transit*) untuk permintaan menengah dan integrasi tata ruang kota, serta *Commuter Rail* yang melayani perjalanan jarak menengah hingga jauh dari pinggiran ke pusat kota. Sistem berbasis rel efektif mengangkut penumpang dalam jumlah besar secara cepat dan stabil, sehingga sangat sesuai untuk mendukung mobilitas urban modern (Vuchic, 2017).

Ketiga, angkutan umum skala kecil dan non-konvensional mencakup angkutan mikro atau minibus, layanan paratransit, serta layanan berbasis permintaan (*demand responsive transport*). Moda ini sering berfungsi sebagai pengumpan atau feeder menuju sistem angkutan massal utama, membantu menjangkau kawasan yang tidak dilayani oleh

bus besar atau jaringan rel, sehingga memperluas aksesibilitas dan keterhubungan dalam sistem transportasi perkotaan.

5. Karakteristik Sistem Angkutan Umum yang Efektif

Sistem angkutan umum perkotaan yang efektif ditandai oleh sejumlah karakteristik kunci yang saling terkait dan memengaruhi tingkat penggunaan serta kepuasan penumpang. Salah satu ciri utama adalah keandalan; layanan harus memiliki jadwal yang konsisten dengan tingkat keterlambatan yang rendah, sehingga pengguna dapat merencanakan perjalanan dengan percaya diri tanpa ketidakpastian yang tinggi.

Frekuensi layanan menjadi faktor penting, terutama pada jam sibuk, karena ketersediaan armada yang cukup mencegah kepadatan berlebih dan mengurangi waktu tunggu di halte atau stasiun. Kecepatan operasional yang kompetitif dibandingkan kendaraan pribadi juga diperlukan agar angkutan umum menjadi alternatif yang menarik bagi pengguna, sekaligus mendukung efisiensi jaringan transportasi kota.

Aspek kenyamanan dan keselamatan tidak kalah penting, meliputi kualitas fasilitas dalam kendaraan, kondisi halte atau stasiun, serta perlindungan terhadap risiko kecelakaan atau kejahatan. Hal ini berpengaruh langsung terhadap persepsi kualitas layanan dan kepuasan penumpang. Faktor aksesibilitas dan keterjangkauan tarif memastikan bahwa angkutan umum dapat digunakan oleh berbagai lapisan masyarakat, termasuk pelajar, lansia, dan kelompok berpendapatan rendah. Tarif yang wajar dan akses fisik yang mudah dijangkau meningkatkan inklusivitas sistem dan mendorong pergeseran dari kendaraan pribadi ke moda kolektif.

Menurut Litman (2023), kombinasi karakteristik ini menentukan keputusan individu dalam memilih moda perjalanan, sehingga perencanaan dan pengelolaan angkutan umum harus fokus pada peningkatan kualitas layanan secara menyeluruh agar sistem transportasi perkotaan dapat berjalan efektif, berkelanjutan, dan memberikan manfaat sosial, ekonomi, serta lingkungan.

6. Tantangan Pengembangan Angkutan Umum Perkotaan

Pengembangan angkutan umum perkotaan tidak lepas dari berbagai tantangan yang kompleks, baik dari sisi teknis, sosial, maupun kelembagaan. Salah satu kendala utama adalah keterbatasan pendanaan,

karena investasi infrastruktur dan pengadaan armada membutuhkan biaya yang sangat besar, sementara sumber pembiayaan publik dan swasta sering terbatas. Hal ini sering menunda perluasan jaringan atau peningkatan kualitas layanan, sehingga mempengaruhi daya tarik angkutan umum bagi masyarakat.

Konflik ruang jalan dengan kendaraan pribadi juga menjadi masalah signifikan, terutama di kota-kota padat yang telah mengalami kemacetan kronis. Jalur khusus bus atau *bus rapid transit* (BRT) sering kali bersaing dengan kendaraan pribadi untuk ruang jalan, menimbulkan resistensi dari pengguna jalan lain dan menuntut desain yang cermat serta manajemen lalu lintas yang efektif.

Terdapat resistensi sosial terhadap perubahan kebijakan transportasi, seperti pembatasan kendaraan pribadi, penerapan tarif kemacetan, atau pengalihan rute angkutan umum. Kebijakan-kebijakan ini meskipun bermanfaat secara sistemik, sering kali menghadapi penolakan karena berhubungan dengan kebiasaan, kenyamanan, atau kepentingan ekonomi individu.

Ketidakterpaduan antar moda dan wilayah administrasi juga menjadi tantangan, di mana koordinasi antara transportasi bus, kereta, dan layanan paratransit sering lemah, ditambah lagi dengan batasan administratif antar kota atau kabupaten. Hal ini menyebabkan layanan tidak optimal dan mengurangi kenyamanan pengguna, sehingga menghambat pergeseran dari kendaraan pribadi ke angkutan umum.

Gambar 3. *E-Commerce*



Sumber: *DJKN*

Perubahan pola perjalanan akibat teknologi digital dan kerja jarak jauh juga memengaruhi permintaan angkutan umum. Aplikasi *ride-hailing*, *telecommuting*, dan e-commerce mengubah perilaku perjalanan tradisional, sehingga perencana perlu menyesuaikan rute, frekuensi, dan kapasitas armada berdasarkan data real-time dan tren penggunaan terkini.

B. Perencanaan Rute dan Jadwal

Perencanaan rute dan jadwal merupakan inti dari operasional sistem angkutan umum perkotaan karena secara langsung menentukan tingkat aksesibilitas, efisiensi, dan kualitas pelayanan yang diterima pengguna. Rute menentukan ke mana layanan angkutan umum bergerak, sedangkan jadwal menentukan kapan layanan tersebut tersedia. Menurut Ceder (2021), rute dan jadwal yang dirancang dengan baik dapat meningkatkan daya tarik transportasi umum, mengurangi waktu tempuh perjalanan, serta mendorong peralihan dari kendaraan pribadi ke angkutan umum.

Pada konteks perkotaan yang dinamis dan kompleks, perencanaan rute dan jadwal harus mempertimbangkan pola perjalanan masyarakat, karakteristik jaringan jalan, ketersediaan armada, serta keterbatasan sumber daya dan kebijakan transportasi yang berlaku.

1. Tujuan Perencanaan Rute dan Jadwal

Perencanaan rute dan jadwal angkutan umum perkotaan merupakan komponen penting dalam menciptakan sistem transportasi yang efisien, andal, dan responsif terhadap kebutuhan masyarakat. Tujuan utamanya adalah meningkatkan aksesibilitas, sehingga masyarakat dapat dengan mudah mencapai pusat-pusat kegiatan seperti tempat kerja, sekolah, pusat perdagangan, dan fasilitas pelayanan publik. Dengan rute yang dirancang secara strategis dan jadwal yang disesuaikan dengan pola perjalanan pengguna, waktu perjalanan total termasuk waktu tunggu, waktu tempuh di kendaraan, dan waktu transfer antar moda dapat diminimalkan, sehingga perjalanan menjadi lebih nyaman dan efisien.

Perencanaan rute dan jadwal juga berfokus pada efisiensi operasional, yakni memaksimalkan pemanfaatan armada yang tersedia dan menekan biaya operasional tanpa mengorbankan kualitas layanan.

Hal ini penting untuk memastikan keberlanjutan finansial sistem angkutan umum, terutama di kota besar dengan permintaan tinggi. Keandalan layanan menjadi aspek lain yang tidak kalah penting, karena pengguna angkutan umum membutuhkan kepastian waktu perjalanan agar dapat merencanakan aktivitas sehari-hari dengan baik.

Perencanaan rute dan jadwal yang baik juga mendukung integrasi sistem transportasi, termasuk integrasi antar rute, antar moda (misalnya bus ke MRT atau LRT), dan keterkaitan dengan tata guna lahan di sekitar jaringan transportasi. Integrasi ini penting untuk menciptakan pengalaman perjalanan yang mulus, mendorong peralihan dari kendaraan pribadi ke angkutan umum, serta mendukung konsep *transit-oriented development* (TOD). Menurut Cervero (2021), kegagalan dalam merancang rute dan jadwal yang efektif sering menjadi salah satu alasan utama rendahnya minat masyarakat menggunakan angkutan umum, sehingga perencanaan yang tepat menjadi kunci keberhasilan sistem transportasi perkotaan.

2. Prinsip Dasar Perencanaan Rute Angkutan Umum

Perencanaan rute angkutan umum harus berlandaskan pada prinsip-prinsip yang memastikan layanan dapat menjangkau kebutuhan masyarakat secara efektif, efisien, dan terintegrasi. Prinsip pertama adalah cakupan (*coverage*), yaitu rute harus mampu menjangkau wilayah permukiman serta pusat-pusat aktivitas yang memiliki permintaan perjalanan signifikan. Prinsip ini menekankan pemerataan akses, sehingga semua lapisan masyarakat memiliki kesempatan untuk menggunakan angkutan umum, meskipun terkadang hal ini dapat mengorbankan kecepatan perjalanan karena rute yang lebih panjang atau berliku.

Prinsip kedua adalah langsung dan efisien (*directness*), yang menekankan pentingnya rute yang relatif lurus dan cepat agar waktu tempuh total dapat diminimalkan. Rute yang berliku-liku cenderung menurunkan daya saing angkutan umum dibanding kendaraan pribadi, sehingga pengguna lebih terdorong memilih moda pribadi jika perjalanan terasa lambat atau tidak nyaman.

Prinsip keterpaduan jaringan menekankan bahwa setiap rute harus menjadi bagian dari jaringan transportasi yang terpadu. Hal ini meliputi kemudahan transfer antar rute dan antar moda, konsistensi penomoran rute, serta penyediaan informasi yang jelas bagi pengguna.

Dengan jaringan yang terintegrasi, pengalaman perjalanan menjadi lebih mulus, mendorong peralihan dari kendaraan pribadi ke angkutan umum, serta mendukung konsep *transit-oriented development* (TOD).

Prinsip terakhir adalah kesesuaian dengan permintaan, di mana rute dan jenis layanan disesuaikan dengan tingkat permintaan perjalanan di setiap koridor. Koridor dengan permintaan tinggi memerlukan layanan berkapasitas besar dan frekuensi tinggi, sedangkan wilayah berpermintaan rendah dapat dilayani oleh moda pengumpan atau layanan dengan kapasitas lebih kecil. Menurut Ceder (2021), tantangan utama dalam perencanaan rute angkutan umum adalah menemukan keseimbangan yang tepat antara cakupan layanan dan efisiensi operasional agar sistem tetap menarik bagi pengguna sekaligus ekonomis bagi operator.

3. Tahapan Perencanaan Rute Angkutan Umum

Perencanaan rute angkutan umum dilakukan melalui tahapan sistematis yang bertujuan menghasilkan jaringan layanan yang efektif, efisien, dan sesuai kebutuhan masyarakat. Tahap pertama adalah analisis permintaan perjalanan, di mana perencana mengidentifikasi pola perjalanan masyarakat menggunakan survei asal-tujuan, data tiket elektronik, data GPS kendaraan, maupun *big data* dari ponsel dan aplikasi transportasi. Analisis ini membantu menentukan koridor perjalanan utama dan besarnya permintaan penumpang di setiap wilayah, sehingga perencanaan rute dapat fokus pada area dengan kebutuhan tinggi.

Tahap kedua adalah identifikasi pusat aktivitas dan koridor utama. Pusat aktivitas mencakup kawasan perkantoran, pusat pendidikan, pusat perbelanjaan, kawasan industri, dan terminal transportasi. Koridor dengan intensitas perjalanan tinggi diutamakan dalam perencanaan, karena rute di koridor ini akan melayani volume penumpang terbesar dan memberikan dampak maksimal terhadap mobilitas perkotaan.

Tahap ketiga adalah pengembangan alternatif rute. Beberapa opsi rute dirancang dengan mempertimbangkan faktor-faktor teknis dan operasional, seperti panjang rute, waktu tempuh, kemudahan akses ke halte, serta potensi konflik lalu lintas dan hambatan fisik. Alternatif yang dirancang bertujuan untuk menyediakan pilihan yang realistis dan fleksibel sebelum dilakukan evaluasi lebih lanjut.

Tahap terakhir adalah evaluasi dan pemilihan rute. Setiap alternatif rute dinilai berdasarkan kriteria teknis, ekonomi, dan sosial, termasuk jumlah penumpang potensial, biaya operasional, tingkat pelayanan, dan dampak terhadap lalu lintas umum. Rute yang menawarkan manfaat maksimal bagi pengguna dengan biaya yang wajar dipilih sebagai rute operasional. Dengan melalui tahapan ini secara sistematis, perencanaan rute angkutan umum dapat mendukung efisiensi layanan, aksesibilitas, serta integrasi dengan sistem transportasi perkotaan secara keseluruhan.

4. Perencanaan Jadwal Angkutan Umum

Perencanaan jadwal angkutan umum merupakan aspek penting dalam memastikan layanan yang andal, efisien, dan nyaman bagi penumpang. Jadwal yang baik tidak hanya mengatur waktu keberangkatan dan kedatangan kendaraan di setiap rute dan halte, tetapi juga bertujuan meminimalkan waktu tunggu penumpang sekaligus menjaga pemanfaatan armada secara optimal.

Salah satu konsep utama dalam perencanaan jadwal adalah headway dan frekuensi layanan. Headway merujuk pada selang waktu antar kendaraan yang melayani rute tertentu. Semakin pendek headway, semakin tinggi frekuensi layanan, sehingga waktu tunggu penumpang berkurang. Umumnya, koridor utama pada jam sibuk memiliki headway 2–5 menit, koridor sekunder 10–15 menit, dan pada jam non-puncak headway dapat lebih panjang. Vuchic (2017) menyatakan bahwa waktu tunggu merupakan faktor paling sensitif terhadap kepuasan pengguna, sehingga perencanaan headway harus didasarkan pada tingkat permintaan dan karakteristik koridor.

Jadwal harus disesuaikan dengan fluktuasi permintaan perjalanan. Perencanaan membedakan jam puncak pagi dan sore, jam non-puncak, serta akhir pekan dan hari libur. Penyesuaian ini penting untuk mencegah kelebihan kapasitas pada periode rendah dan kekurangan kapasitas pada periode tinggi, sehingga layanan tetap efisien dan dapat diandalkan.

Sinkronisasi antar rute dan moda menjadi kunci dalam sistem transportasi terpadu. Jadwal antar rute maupun antar moda harus disinkronkan, terutama di simpul transportasi seperti terminal dan stasiun, untuk meminimalkan waktu transfer dan memaksimalkan kenyamanan penumpang. Ceder (2021) menekankan bahwa integrasi

jadwal antar rute dan moda dapat meningkatkan efisiensi jaringan secara signifikan tanpa memerlukan tambahan armada, sekaligus mendukung konsep transportasi perkotaan yang berkelanjutan.

5. Penentuan Kebutuhan Armada

Penentuan kebutuhan armada merupakan tahap penting dalam perencanaan operasional angkutan umum, karena jumlah kendaraan yang tepat akan memastikan layanan berjalan lancar, frekuensi tercapai, dan biaya operasi terkendali. Kebutuhan armada dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain panjang rute, waktu tempuh satu siklus perjalanan (*cycle time*), headway yang diinginkan, serta waktu istirahat dan cadangan kendaraan untuk mengantisipasi gangguan operasional atau perawatan.

Secara matematis, jumlah armada minimum dapat dihitung dengan membagi waktu siklus perjalanan dengan headway yang direncanakan. Misalnya, jika satu siklus perjalanan memakan waktu 60 menit dan headway yang diinginkan adalah 10 menit, maka jumlah kendaraan minimum yang diperlukan adalah 6 unit. Perhitungan ini harus mempertimbangkan waktu tambahan untuk istirahat sopir, pergantian shift, serta cadangan armada untuk menangani keterlambatan atau gangguan layanan.

Hasil perhitungan kebutuhan armada menjadi dasar penting dalam perencanaan operasional dan anggaran, karena memengaruhi alokasi sumber daya, biaya bahan bakar, pemeliharaan kendaraan, dan strategi penjadwalan. Perencanaan yang matang akan memastikan layanan angkutan umum efisien, andal, dan mampu memenuhi permintaan penumpang secara konsisten.

6. Pemanfaatan Teknologi dalam Perencanaan Rute dan Jadwal

Pemanfaatan teknologi dalam perencanaan rute dan jadwal angkutan umum perkotaan telah membawa perubahan signifikan dalam efektivitas dan efisiensi sistem. Sistem Informasi Geografis (SIG) memungkinkan analisis spasial yang mendalam, seperti identifikasi koridor perjalanan utama, distribusi permintaan perjalanan, serta aksesibilitas antar kawasan. Dengan pemetaan yang akurat, perencana dapat merancang rute yang lebih tepat sasaran dan menjangkau wilayah dengan kebutuhan tinggi.

Pemodelan transportasi berbasis komputer memungkinkan simulasi berbagai skenario operasional, mulai dari perubahan rute,

jadwal, hingga pengaruh pembangunan infrastruktur baru. Perangkat lunak seperti PTV VISUM, TransCAD, atau EMME dapat menghitung dampak rute dan jadwal terhadap waktu tempuh, kepadatan kendaraan, dan distribusi penumpang, sehingga perencanaan menjadi lebih terukur dan berbasis bukti.

Analisis *big data* mobilitas, termasuk data GPS kendaraan, data tiket elektronik, dan data dari aplikasi navigasi, memberikan informasi real-time mengenai pola perjalanan masyarakat. Data ini memungkinkan penyesuaian rute dan frekuensi layanan secara dinamis sesuai dengan permintaan aktual, sehingga layanan angkutan umum menjadi lebih responsif.

Sistem manajemen armada berbasis GPS mempermudah pengawasan kendaraan secara langsung, optimasi jadwal, dan respons cepat terhadap gangguan operasional. Dengan integrasi teknologi ini, perencanaan rute dan jadwal tidak hanya lebih efisien, tetapi juga dapat mendukung sistem transportasi perkotaan yang adaptif, berkelanjutan, dan berorientasi pada kebutuhan pengguna. Litman (2023) menekankan bahwa teknologi adalah kunci untuk menjadikan angkutan umum lebih menarik dan kompetitif dibandingkan kendaraan pribadi.

C. Kinerja dan Pelayanan Angkutan Umum

Kinerja dan pelayanan angkutan umum merupakan indikator utama keberhasilan sistem transportasi perkotaan dalam memenuhi kebutuhan mobilitas masyarakat. Kinerja berkaitan dengan bagaimana sistem beroperasi secara teknis dan efisien, sedangkan pelayanan mencerminkan kualitas yang dirasakan oleh pengguna selama menggunakan layanan angkutan umum. Menurut Litman (2023), angkutan umum yang memiliki kinerja operasional baik namun gagal memberikan pelayanan yang nyaman dan andal tetap berpotensi ditinggalkan oleh pengguna. Oleh karena itu, evaluasi kinerja dan pelayanan harus dilakukan secara terpadu dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, dan persepsi pengguna.

1. Konsep Kinerja dan Tingkat Pelayanan Angkutan Umum

Kinerja dan tingkat pelayanan angkutan umum adalah dua konsep yang saling terkait namun memiliki fokus penilaian berbeda. Kinerja menekankan kemampuan sistem untuk beroperasi sesuai dengan

rencana yang telah ditetapkan, termasuk ketepatan waktu, kapasitas angkut yang tersedia, serta efisiensi pemanfaatan sumber daya. Aspek ini lebih banyak dinilai dari perspektif operator dan perencana transportasi, karena berkaitan dengan efektivitas operasional dan pengelolaan armada.

Tingkat pelayanan (*Level of Service* – LOS) menekankan pengalaman pengguna. Hal ini mencakup kenyamanan di dalam kendaraan dan di halte/stasiun, kemudahan akses, keselamatan perjalanan, serta keandalan layanan. Pengguna menilai sistem angkutan umum berdasarkan seberapa mudah, nyaman, dan aman perjalanan. Misalnya, layanan dengan waktu tunggu pendek, frekuensi tinggi, dan kondisi kendaraan yang bersih akan dinilai memiliki tingkat pelayanan tinggi, meskipun biaya operasional untuk operator mungkin lebih besar.

Menurut Vuchic (2017), keseimbangan antara kinerja operasional dan kualitas pelayanan menjadi kunci keberhasilan sistem angkutan umum. Sistem yang efisien dari sisi operator tetapi tidak nyaman atau dapat diandalkan bagi penumpang akan menurunkan minat masyarakat menggunakan angkutan umum. Sebaliknya, layanan yang sangat memuaskan pengguna tetapi tidak efisien secara operasional dapat membebani anggaran dan keberlanjutan sistem. Oleh karena itu, perencanaan angkutan umum harus mempertimbangkan kedua aspek ini secara bersamaan agar tercapai pelayanan yang optimal dan berkelanjutan.

2. Indikator Kinerja Operasional Angkutan Umum

Evaluasi kinerja operasional angkutan umum perkotaan dilakukan dengan mengacu pada berbagai indikator kuantitatif yang mencerminkan efisiensi, efektivitas, dan daya saing sistem. Salah satu indikator utama adalah waktu perjalanan (*travel time*), yang mencakup seluruh rangkaian perjalanan penumpang: waktu berjalan menuju halte, waktu tunggu, waktu di dalam kendaraan, serta waktu transfer antar moda. Semakin singkat dan stabil waktu perjalanan, semakin tinggi daya saing angkutan umum dibandingkan kendaraan pribadi, karena pengguna cenderung memilih moda yang dapat menghemat waktu.

Indikator kedua adalah ketepatan waktu (*on-time performance*), yang mengukur sejauh mana kendaraan tiba dan berangkat sesuai jadwal. Ketidakpastian waktu perjalanan sering menjadi faktor utama ketidakpuasan penumpang, sehingga menjaga ketepatan waktu menjadi

fokus penting dalam manajemen operasional. Selanjutnya, headway dan konsistensi layanan juga menjadi penentu kualitas operasional. Headway yang konsisten, meskipun tidak selalu pendek, lebih diutamakan dibanding frekuensi tinggi yang tidak teratur, karena ketidakteraturan meningkatkan waktu tunggu penumpang dan menurunkan kepercayaan terhadap sistem.

Tingkat pemanfaatan kapasitas (*load factor*) menunjukkan rasio antara jumlah penumpang aktual dengan kapasitas kendaraan. *Load factor* yang terlalu tinggi menimbulkan kepadatan berlebih dan menurunkan kenyamanan, sedangkan *load factor* rendah mengindikasikan pemanfaatan armada yang tidak efisien. Produktivitas armada juga menjadi tolok ukur penting, diukur melalui jumlah penumpang per kendaraan-kilometer atau biaya operasi per penumpang, yang membantu menilai efisiensi ekonomi layanan.

Menurut Ceder (2021), semua indikator ini saling terkait dan harus dianalisis secara holistik. Misalnya, peningkatan ketepatan waktu mungkin memengaruhi *load factor* dan produktivitas armada. Dengan memantau dan menyeimbangkan berbagai indikator tersebut, perencana dan operator dapat memperoleh gambaran kinerja yang akurat serta mengambil keputusan untuk meningkatkan kualitas layanan secara berkelanjutan.

3. Indikator Pelayanan Angkutan Umum dari Perspektif Pengguna

Pelayanan angkutan umum dari perspektif pengguna menekankan pengalaman dan persepsi penumpang terhadap kualitas layanan, bukan sekadar kinerja teknis sistem. Salah satu aspek utama adalah kenyamanan, yang mencakup kepadatan di dalam kendaraan, kebersihan, suhu, ketersediaan tempat duduk, serta kondisi halte atau stasiun. Kenyamanan yang rendah sering mendorong pengguna untuk beralih ke kendaraan pribadi, sehingga menjadi faktor penting dalam menjaga tingkat penggunaan angkutan umum.

Aspek kedua adalah keselamatan dan keamanan. Keselamatan terkait risiko kecelakaan selama perjalanan, sedangkan keamanan mencakup perlindungan dari tindak kriminal di dalam kendaraan maupun fasilitas pendukungnya. Litman (2023) menekankan bahwa persepsi keamanan memiliki pengaruh signifikan terhadap keputusan

penggunaan angkutan umum, terutama bagi kelompok rentan seperti perempuan dan lansia.

Kemudahan akses dan informasi menjadi indikator penting. Pelayanan yang efektif harus memungkinkan penumpang menjangkau halte atau stasiun dengan mudah, termasuk penyediaan fasilitas bagi penyandang disabilitas. Informasi yang jelas mengenai rute, jadwal, dan status real-time perjalanan juga meningkatkan kepercayaan pengguna terhadap sistem.

Keterjangkauan tarif turut memengaruhi kepuasan pengguna. Tarif harus sebanding dengan kualitas layanan, transparan, dan bila memungkinkan terintegrasi antar moda sehingga memudahkan perjalanan lanjutan. Sistem tarif yang adil dan mudah dipahami mendorong penggunaan angkutan umum secara berkelanjutan dan membantu mencapai tujuan sosial, ekonomi, dan lingkungan perkotaan.

4. Metode Evaluasi Kinerja dan Pelayanan

Evaluasi kinerja dan pelayanan angkutan umum dilakukan dengan memadukan berbagai metode yang mampu menangkap baik aspek teknis operasional maupun pengalaman pengguna. Salah satu pendekatan utama adalah survei pengguna, yang digunakan untuk mengukur kepuasan penumpang terhadap kenyamanan, keamanan, keandalan layanan, serta kemudahan akses. Survei ini memberikan wawasan langsung mengenai persepsi pengguna, yang sering kali menjadi indikator kunci keberhasilan sistem.

Pengukuran operasional lapangan dilakukan dengan memantau waktu tempuh, headway, keterlambatan, dan tingkat kepadatan kendaraan secara langsung atau melalui perangkat GPS. Metode ini memungkinkan penilaian kuantitatif terhadap kinerja operasional sistem dan membantu mengidentifikasi titik-titik bottleneck atau area yang memerlukan perbaikan. Analisis data tiket elektronik juga menjadi metode penting, karena informasi transaksi dapat digunakan untuk mengetahui volume penumpang, distribusi perjalanan sepanjang hari, serta pola perjalanan di koridor tertentu. Data ini mendukung pengambilan keputusan terkait penyesuaian rute, frekuensi, dan kapasitas armada.

Seiring perkembangan teknologi, pemanfaatan *big data* dan sistem transportasi cerdas (ITS) semakin banyak digunakan. Data real-time dari sensor, GPS, dan aplikasi mobilitas memungkinkan

pemantauan kinerja sistem secara dinamis serta respons cepat terhadap gangguan operasional. Ceder (2021) menekankan bahwa pendekatan berbasis data digital ini meningkatkan akurasi, efisiensi, dan ketepatan evaluasi dibandingkan metode konvensional, sekaligus mendukung perencanaan dan pengambilan kebijakan yang lebih adaptif dan berbasis bukti.

5. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja dan Pelayanan

Kinerja dan pelayanan angkutan umum sangat dipengaruhi oleh kombinasi faktor internal dan eksternal yang saling terkait. Salah satu faktor eksternal yang paling menentukan adalah kondisi lalu lintas umum, terutama bagi moda berbasis jalan seperti bus. Kemacetan, hambatan lalu lintas, atau gangguan jaringan jalan dapat secara langsung memperpanjang waktu perjalanan, meningkatkan ketidakpastian jadwal, dan menurunkan kenyamanan pengguna.

Kualitas infrastruktur dan fasilitas pendukung juga berperan penting. Jalan yang rusak, halte yang tidak layak, atau kurangnya fasilitas park and ride dapat menurunkan efisiensi operasi dan mengurangi pengalaman pengguna. Faktor internal seperti kompetensi dan disiplin operator juga memengaruhi kinerja, termasuk kemampuan mengelola armada, menjaga ketepatan waktu, dan memberikan layanan yang aman dan nyaman.

Kebijakan lalu lintas dan prioritas angkutan umum menjadi elemen kunci lainnya. Penerapan jalur bus khusus, pengaturan sinyal prioritas, atau pengendalian parkir dapat meningkatkan kecepatan dan reliabilitas layanan. Selain itu, integrasi antar moda dan antar wilayah menentukan seberapa mudah pengguna melakukan perjalanan multimoda, yang berdampak langsung pada kenyamanan dan kepuasan pengguna.

Ketidakeimbangan antara permintaan perjalanan dan kapasitas sistem, serta kurangnya prioritas operasional terhadap angkutan umum, sering kali menyebabkan penurunan kinerja dan kualitas pelayanan. Oleh karena itu, perencanaan yang holistik, dukungan kebijakan, serta pemeliharaan infrastruktur dan pengembangan kompetensi operator menjadi sangat penting untuk menjaga kinerja dan pelayanan angkutan umum perkotaan tetap optimal.

6. Upaya Peningkatan Kinerja dan Pelayanan Angkutan Umum

Upaya peningkatan kinerja dan pelayanan angkutan umum harus dilakukan secara menyeluruh dan berkelanjutan, dengan mempertimbangkan aspek operasional, infrastruktur, teknologi, dan sumber daya manusia. Salah satu langkah utama adalah penerapan jalur khusus dan prioritas sinyal bagi angkutan umum. Langkah ini bertujuan untuk mengurangi gangguan lalu lintas dari kendaraan pribadi, mempercepat perjalanan, dan meningkatkan keandalan layanan, sehingga angkutan umum menjadi lebih kompetitif dibanding moda pribadi.

Peningkatan frekuensi dan konsistensi layanan menjadi faktor penting dalam menjaga kepuasan pengguna. Headway yang pendek dan teratur pada jam sibuk dapat meminimalkan waktu tunggu, meningkatkan kenyamanan, dan mendorong masyarakat untuk beralih dari kendaraan pribadi ke angkutan umum. Modernisasi armada dan fasilitas juga mendukung pelayanan yang lebih nyaman, aman, dan efisien. Bus dan kereta yang dilengkapi pendingin udara, tempat duduk ergonomis, dan fasilitas informasi real-time akan meningkatkan pengalaman pengguna secara signifikan.

Integrasi sistem tarif dan informasi menjadi elemen penting lainnya. Sistem tarif yang transparan dan terhubung antar moda, disertai dengan informasi rute dan jadwal yang akurat, memudahkan pengguna dalam merencanakan perjalanan. Sementara itu, peningkatan kualitas sumber daya manusia, termasuk kompetensi operator dan petugas layanan, memastikan operasional berjalan lancar dan interaksi dengan pengguna tetap profesional.

D. Integrasi dan Pengembangan Transportasi Berkelanjutan

Transportasi berkelanjutan merupakan pendekatan strategis untuk mengembangkan sistem transportasi perkotaan yang efisien, ramah lingkungan, dan inklusif. Integrasi angkutan umum dengan moda lain, infrastruktur kota, dan tata guna lahan menjadi kunci untuk mewujudkan mobilitas yang berkelanjutan. Menurut Litman (2023), transportasi berkelanjutan tidak hanya menitikberatkan pada kapasitas atau kecepatan, tetapi juga pada pengurangan dampak lingkungan, kesetaraan akses, dan keselamatan pengguna.

Pengembangan sistem transportasi berkelanjutan menekankan prinsip “*mobility for all, efficiency for society*”, yang memastikan bahwa

sistem transportasi tidak hanya memenuhi kebutuhan mobilitas individu, tetapi juga mendukung kesejahteraan dan kualitas hidup masyarakat secara luas.

1. Konsep Transportasi Berkelanjutan

Transportasi berkelanjutan merupakan pendekatan perencanaan dan pengelolaan sistem transportasi yang menyeimbangkan kebutuhan mobilitas saat ini dengan kepentingan generasi mendatang. Fokus utamanya tidak hanya pada aspek teknis atau kapasitas jaringan, tetapi juga pada dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi. Dari perspektif lingkungan, transportasi berkelanjutan bertujuan mengurangi emisi gas rumah kaca, polusi udara, dan ketergantungan pada energi fosil, sehingga mendukung kualitas udara dan mitigasi perubahan iklim.

Dari sisi sosial, konsep ini menekankan aksesibilitas yang adil dan inklusif bagi seluruh lapisan masyarakat, termasuk kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penyandang disabilitas. Dengan menyediakan mobilitas yang merata, transportasi berkelanjutan berkontribusi pada pemerataan kesempatan ekonomi dan sosial di perkotaan. Sementara itu, aspek ekonomi berkaitan dengan efisiensi operasional dan pemanfaatan sumber daya untuk memaksimalkan manfaat ekonomi bagi masyarakat dan pemerintah, misalnya melalui pengurangan biaya perjalanan dan peningkatan produktivitas perkotaan.

Menurut Cervero (2021), transportasi berkelanjutan tidak bisa dicapai secara parsial. Diperlukan integrasi yang erat antara perencanaan transportasi, kebijakan publik, dan pengelolaan lingkungan perkotaan, termasuk pengembangan angkutan umum berkualitas, pengaturan tata guna lahan yang mendukung mobilitas, serta promosi moda aktif seperti berjalan kaki dan bersepeda. Pendekatan holistik ini memastikan bahwa sistem transportasi mampu melayani kebutuhan mobilitas secara efektif, sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan, kesejahteraan sosial, dan efisiensi ekonomi jangka panjang.

2. Integrasi Moda dan Jaringan Transportasi

Integrasi antar moda merupakan elemen kunci dalam mewujudkan sistem transportasi perkotaan yang berkelanjutan dan efisien. Dengan adanya integrasi, pengguna dapat berpindah dari satu moda transportasi ke moda lain secara lancar, cepat, dan nyaman, sehingga meningkatkan daya tarik angkutan umum dibandingkan

kendaraan pribadi. Integrasi ini mencakup berbagai dimensi, mulai dari fisik, tarif, jadwal, hingga informasi.

Integrasi fisik melibatkan konektivitas antar terminal, halte, stasiun, dan fasilitas park and ride, sehingga transfer antar moda dapat dilakukan dengan minimum jarak berjalan dan waktu tunggu. Integrasi tarif memungkinkan penggunaan tiket tunggal atau kartu pintar yang berlaku di seluruh moda, sehingga perjalanan antar moda tidak terganggu oleh mekanisme pembayaran yang kompleks. Sementara itu, integrasi jadwal bertujuan menyelaraskan waktu keberangkatan antar moda agar waktu tunggu antar rute atau moda menjadi minimal, meningkatkan kecepatan dan kenyamanan perjalanan.

Integrasi informasi menjadi semakin penting, terutama dengan adanya sistem informasi real-time yang memberikan data tentang rute, ketersediaan armada, dan perkiraan waktu tiba. Hal ini memungkinkan pengguna untuk merencanakan perjalanan dengan lebih baik dan mengurangi ketidakpastian. Vuchic (2017) menekankan bahwa keberhasilan integrasi antar moda bukan hanya soal teknis, tetapi juga memerlukan koordinasi kelembagaan, regulasi, dan kebijakan publik yang konsisten, sehingga seluruh elemen transportasi bekerja secara sinergis untuk mendukung mobilitas perkotaan yang berkelanjutan.

3. Hubungan dengan Tata Guna Lahan

Transportasi dan tata guna lahan saling memengaruhi secara erat, membentuk pola mobilitas dan struktur perkotaan. Pola tata guna lahan menentukan lokasi permukiman, pusat kegiatan, dan fasilitas publik, sehingga memengaruhi permintaan perjalanan harian masyarakat. Sebaliknya, ketersediaan dan kualitas sistem transportasi memengaruhi aksesibilitas suatu lokasi, nilai lahan, dan pilihan lokasi bagi pengembangan ekonomi. Hubungan timbal balik ini menjadi dasar bagi perencanaan perkotaan yang terintegrasi dan berkelanjutan.

Salah satu pendekatan untuk mengoptimalkan hubungan transportasi dan tata guna lahan adalah konsep *Transit-Oriented Development* (TOD). TOD menekankan pembangunan kawasan padat, multifungsi, dan berorientasi pada transportasi massal. Prinsip-prinsip TOD meliputi konsentrasi aktivitas di sepanjang koridor transportasi publik, pengurangan ketergantungan pada kendaraan pribadi, pengembangan fasilitas publik dan komersial yang mudah dijangkau

dengan berjalan kaki atau bersepeda, serta penggunaan lahan campuran untuk meningkatkan mobilitas dan efisiensi ekonomi.

Implementasi TOD yang efektif mampu meningkatkan jumlah pengguna angkutan umum, mengurangi kemacetan, dan menurunkan emisi karbon perkotaan. Selain itu, integrasi transportasi dengan tata guna lahan juga mendukung pembangunan perkotaan yang lebih ramah lingkungan, inklusif, dan berkelanjutan, karena memadukan aksesibilitas, efisiensi energi, dan kualitas hidup masyarakat (Litman, 2023).

4. Strategi Pengembangan Transportasi Berkelanjutan

Pengembangan transportasi berkelanjutan menuntut pendekatan strategis yang terpadu, dengan fokus pada peningkatan kualitas layanan, efisiensi operasional, dan pengurangan dampak lingkungan. Salah satu strategi utama adalah peningkatan kualitas angkutan umum, yang mencakup modernisasi armada dengan kendaraan rendah emisi atau listrik, peningkatan kenyamanan, keselamatan, dan keandalan layanan, serta optimalisasi rute, jadwal, dan frekuensi berdasarkan data permintaan nyata. Langkah ini bertujuan menjadikan angkutan umum sebagai alternatif yang kompetitif dibandingkan kendaraan pribadi, sekaligus menekan emisi dan kemacetan perkotaan.

Pengembangan infrastruktur untuk *non-motorized transport* (NMT) menjadi komponen penting dalam transportasi berkelanjutan. Jalur sepeda dan trotoar yang aman dan nyaman, dilengkapi dengan fasilitas parkir sepeda di halte dan stasiun, mendorong masyarakat untuk menggunakan moda aktif seperti berjalan kaki dan bersepeda, sekaligus mendukung integrasi dengan angkutan umum.

Strategi berikutnya adalah pengelolaan permintaan transportasi (TDM – *Transport Demand Management*), termasuk penerapan kebijakan pembatasan kendaraan pribadi di pusat kota melalui congestion pricing, serta promosi berbagi kendaraan (*carpooling*) dan penggunaan angkutan umum. Kebijakan ini membantu menyeimbangkan permintaan perjalanan dengan kapasitas jaringan, mengurangi kemacetan, dan menekan konsumsi energi.

5. Tantangan Implementasi Transportasi Berkelanjutan

Implementasi transportasi berkelanjutan menghadapi berbagai tantangan yang kompleks, baik dari sisi teknis, sosial, maupun

kelembagaan. Salah satu hambatan utama adalah pendanaan terbatas, yang membatasi kemampuan pemerintah atau operator untuk membangun infrastruktur baru, memperluas jaringan angkutan umum, atau melakukan modernisasi armada dengan kendaraan rendah emisi. Keterbatasan ini sering mengakibatkan layanan yang kurang memadai dan menurunkan daya tarik angkutan umum dibandingkan kendaraan pribadi.

Ketergantungan masyarakat pada kendaraan pribadi menjadi tantangan signifikan. Budaya penggunaan kendaraan pribadi yang sudah tertanam, terutama di kota-kota dengan jaringan transportasi umum yang masih terbatas, membuat pergeseran moda (*modal shift*) menjadi sulit dicapai. Resistensi sosial ini sering diperparah oleh kebijakan yang dianggap membatasi kebebasan bergerak, seperti pembatasan kendaraan di pusat kota atau penerapan tarif kemacetan.

Tantangan lainnya adalah fragmentasi kelembagaan dan kurangnya koordinasi antar sektor. Transportasi perkotaan melibatkan banyak pihak, termasuk dinas perhubungan, perencanaan kota, operator angkutan, dan lembaga lingkungan. Kurangnya sinkronisasi dapat menghambat implementasi strategi terpadu, misalnya integrasi tarif, jadwal, dan moda transportasi. Selain faktor sosial dan kelembagaan, perubahan permintaan perjalanan akibat teknologi digital juga menambah kompleksitas. Layanan ride-hailing, e-commerce, dan kerja jarak jauh mengubah pola perjalanan masyarakat secara cepat, sehingga perencanaan transportasi harus bersifat adaptif dan berbasis data real-time.

6. Indikator Keberhasilan Transportasi Berkelanjutan

Keberhasilan transportasi berkelanjutan dapat diukur melalui sejumlah indikator kunci yang mencerminkan aspek lingkungan, sosial, dan operasional sistem transportasi perkotaan. Pertama, persentase perjalanan yang menggunakan transportasi publik menjadi tolok ukur utama. Semakin tinggi proporsi perjalanan dengan moda massal, semakin besar efektivitas upaya pengurangan ketergantungan pada kendaraan pribadi, sekaligus menurunkan kemacetan dan konsumsi energi fosil.

Kedua, pengurangan emisi CO₂ dan polusi udara perkotaan mencerminkan dampak lingkungan dari sistem transportasi. Transportasi yang ramah lingkungan, termasuk penggunaan kendaraan listrik, BRT,

MRT, dan sepeda, akan berkontribusi pada penurunan jejak karbon kota serta peningkatan kualitas udara bagi masyarakat.

Ketiga, rata-rata waktu perjalanan dan tingkat kepuasan pengguna menjadi indikator langsung terhadap kualitas pelayanan. Sistem transportasi yang efisien dan andal, dengan waktu tunggu yang minim dan frekuensi layanan yang memadai, akan meningkatkan kenyamanan dan menarik lebih banyak pengguna untuk beralih dari kendaraan pribadi.

Keempat, tingkat integrasi antar moda dan aksesibilitas wilayah menunjukkan sejauh mana transportasi perkotaan mampu menjangkau seluruh kawasan, termasuk wilayah pinggiran, serta memfasilitasi transfer yang lancar antar moda. Integrasi ini mencakup koordinasi jadwal, tarif, dan informasi real-time untuk mempermudah pergerakan masyarakat.

Kelima, keterjangkauan tarif dan inklusivitas sosial menjadi tolok ukur kesetaraan akses. Sistem transportasi berkelanjutan harus dapat diakses oleh semua lapisan masyarakat, termasuk kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penyandang disabilitas, tanpa membebani ekonomi.

Evaluasi berkala terhadap indikator-indikator tersebut memungkinkan perencana dan pengambil kebijakan untuk menyesuaikan strategi, memprioritaskan intervensi yang efektif, serta memastikan pengembangan transportasi perkotaan yang efisien, ramah lingkungan, dan berorientasi pada masyarakat.



BAB IX

KESELAMATAN DAN DAMPAK TRANSPORTASI

Keselamatan dan Dampak Transportasi membahas aspek kritis dalam sistem transportasi perkotaan yang mencakup perlindungan pengguna jalan, mitigasi risiko kecelakaan, serta pengelolaan dampak lingkungan. Keselamatan lalu lintas jalan menekankan pencegahan kecelakaan melalui desain infrastruktur, edukasi pengemudi, penegakan hukum, dan teknologi cerdas (*ITS*), sementara manajemen kecelakaan melibatkan analisis data, pemodelan risiko, dan strategi intervensi berbasis bukti. Di sisi lain, transportasi juga memberikan dampak signifikan terhadap lingkungan, termasuk polusi udara, kebisingan, konsumsi energi, dan perubahan tata guna lahan, sehingga transportasi berkelanjutan dan ramah lingkungan menjadi pendekatan penting untuk mengurangi efek negatif sekaligus meningkatkan efisiensi mobilitas. Dengan integrasi keselamatan dan keberlanjutan, sistem transportasi perkotaan dapat mendukung mobilitas yang aman, sehat, dan ramah lingkungan bagi masyarakat.

A. Keselamatan Lalu Lintas Jalan

Keselamatan lalu lintas jalan (*road traffic safety*) adalah komponen krusial dalam rekayasa transportasi perkotaan karena kecelakaan lalu lintas menimbulkan korban jiwa, cedera, dan kerugian ekonomi yang signifikan. Menurut Peden *et al.* (2020), kecelakaan lalu lintas merupakan salah satu penyebab utama kematian global, dengan sekitar 1,35 juta orang meninggal setiap tahun akibat insiden jalan raya. Di samping itu, kecelakaan juga menimbulkan beban ekonomi melalui biaya perawatan medis, kehilangan produktivitas, dan kerusakan infrastruktur.

Keselamatan jalan dipengaruhi oleh interaksi antara manusia, kendaraan, dan lingkungan jalan. Faktor manusia meliputi perilaku pengemudi, tingkat kepatuhan terhadap rambu lalu lintas, serta kondisi fisik dan mental. Faktor kendaraan berkaitan dengan kondisi teknis, termasuk sistem pengereman, lampu, suspensi, serta teknologi keselamatan seperti *Anti-lock Braking System (ABS)* atau *Electronic Stability Control (ESC)*. Faktor lingkungan dan infrastruktur mencakup geometri jalan, kondisi permukaan, desain persimpangan, pencahayaan, dan kondisi cuaca (Vaa, 2021).

1. Faktor Penyebab Kecelakaan

Kecelakaan lalu lintas merupakan hasil interaksi kompleks antara berbagai faktor yang saling memengaruhi. Faktor manusia sering menjadi penyebab utama, seperti perilaku mengemudi yang agresif, kecepatan berlebih, gangguan konsentrasi akibat penggunaan ponsel atau kelelahan, konsumsi alkohol atau obat-obatan terlarang, serta kurangnya pengalaman atau pelatihan pengemudi. Perilaku ini dapat memicu kesalahan reaksi, kesalahan penilaian jarak dan kecepatan, serta kegagalan mematuhi aturan lalu lintas.

Faktor kendaraan juga berperan penting. Kondisi rem, lampu, dan sistem kemudi yang tidak optimal dapat meningkatkan risiko kecelakaan, begitu pula kegagalan mekanis mendadak seperti pecah ban atau masalah suspensi. Kendaraan lama yang tidak dilengkapi dengan sistem keselamatan modern, seperti airbag atau ABS, cenderung menimbulkan dampak lebih serius ketika terjadi tabrakan.

Faktor jalan dan lingkungan turut memengaruhi keselamatan. Jalan yang berlubang, marka jalan yang tidak jelas, atau persimpangan yang tidak aman dapat menjadi titik rawan kecelakaan. Kekurangan rambu peringatan, sinyal lalu lintas yang tidak konsisten, serta kondisi cuaca buruk seperti hujan deras atau kabut tebal menambah kompleksitas risiko di jalan. Menurut Elvik *et al.* (2022), sebagian besar kecelakaan di perkotaan terjadi di persimpangan, karena di lokasi tersebut terjadi konflik arah dan interaksi yang rumit antara kendaraan, pejalan kaki, dan pesepeda.

2. Strategi Peningkatan Keselamatan Jalan

Peningkatan keselamatan jalan memerlukan pendekatan holistik yang menggabungkan desain infrastruktur, regulasi, edukasi, teknologi,

dan manajemen perilaku pengemudi. Salah satu kerangka yang banyak digunakan adalah *Safe System Approach*, yang menekankan pencegahan risiko secara menyeluruh sehingga kecelakaan dapat diminimalkan bahkan jika terjadi kesalahan manusia.

Desain jalan yang aman menjadi langkah pertama. Hal ini mencakup pemisahan jalur kendaraan dan pejalan kaki, penerapan traffic calming seperti speed bump dan roundabout, serta persimpangan yang terkontrol dengan lampu lalu lintas dan marka jalan yang jelas. Desain ini tidak hanya mengurangi risiko tabrakan, tetapi juga menurunkan kecepatan kendaraan di area padat aktivitas, sehingga dampak kecelakaan dapat diminimalkan.

Penegakan hukum dan edukasi lalu lintas menjadi faktor kunci berikutnya. Penerapan aturan seperti batas kecepatan, penggunaan helm dan sabuk pengaman wajib, serta kampanye keselamatan berbasis masyarakat dapat membentuk perilaku berkendara yang lebih aman. Selain itu, pelatihan pengemudi baru dan program kesadaran publik membantu memperkuat budaya keselamatan jalan.

Pemanfaatan teknologi kendaraan dan infrastruktur juga semakin penting. Penggunaan *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS) membantu pengemudi dalam mengantisipasi bahaya, sementara sistem kendaraan cerdas dan *Intelligent Transport Systems* (ITS) memungkinkan pemantauan real-time terhadap kepadatan, kecepatan, dan kondisi jalan. Penerapan sistem manajemen lalu lintas yang adaptif mampu mengurangi kemacetan sekaligus menurunkan risiko kecelakaan.

Manajemen kecepatan menjadi strategi tambahan yang efektif. Penetapan zona kecepatan rendah di area padat penduduk, sekolah, atau fasilitas umum, serta pengaturan kecepatan adaptif di koridor utama menggunakan sensor dan tanda elektronik, membantu mengontrol perilaku pengemudi dan menurunkan risiko fatalitas.

3. Peran Pemangku Kepentingan

Keselamatan jalan merupakan tanggung jawab bersama yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan. Pemerintah dan lembaga transportasi berperan dalam menetapkan standar desain infrastruktur, regulasi keselamatan, dan pengawasan implementasi di lapangan. Keberadaan regulasi yang jelas dan konsisten menjadi fondasi bagi terciptanya sistem transportasi yang aman.

Operator angkutan umum juga memiliki peran penting, terutama dalam memastikan kendaraan selalu dalam kondisi laik jalan dan pengemudi terlatih sesuai standar keselamatan. Kualitas armada dan disiplin pengemudi menjadi faktor kritis dalam mencegah kecelakaan, terutama pada moda transportasi massal yang membawa banyak penumpang.

Masyarakat sebagai pengguna jalan harus berperilaku disiplin, mematuhi peraturan lalu lintas, serta meningkatkan kesadaran terhadap risiko. Partisipasi aktif masyarakat, seperti melaporkan kondisi jalan berbahaya atau mematuhi rambu lalu lintas, memperkuat efektivitas kebijakan keselamatan jalan.

Kolaborasi antar pemangku kepentingan ini juga mencakup pengumpulan dan analisis data kecelakaan, evaluasi risiko, serta penerapan kebijakan berbasis bukti (*evidence-based policy*). Data yang akurat memungkinkan identifikasi titik rawan (*black spots*) dan perumusan strategi mitigasi yang tepat, sehingga upaya peningkatan keselamatan dapat lebih terfokus dan berdampak nyata. Dengan pendekatan kolaboratif ini, risiko kecelakaan dapat diminimalkan dan keselamatan seluruh pengguna jalan lebih terjamin.

4. Evaluasi dan Monitoring Keselamatan Jalan

Evaluasi dan monitoring keselamatan jalan merupakan tahap penting untuk memastikan efektivitas strategi pencegahan kecelakaan. Salah satu metode utama adalah analisis statistik kecelakaan, yang mencakup jumlah kejadian, lokasi, jenis kecelakaan, dan tingkat keparahan cedera atau fatalitas. Analisis ini membantu mengidentifikasi titik rawan (*black spots*) dan pola risiko tertentu, sehingga intervensi dapat difokuskan secara tepat.

Survei pengguna memberikan informasi tentang persepsi masyarakat terhadap keselamatan, kenyamanan, dan risiko di jalan. Persepsi pengguna sering kali berbeda dengan data objektif, namun tetap penting karena memengaruhi perilaku berkendara dan kepatuhan terhadap aturan. Survei ini juga bisa menunjukkan area di mana intervensi non-teknis, seperti kampanye keselamatan atau edukasi publik, diperlukan.

Pemanfaatan teknologi ITS (*Intelligent Transport Systems*) semakin menjadi alat kunci dalam monitoring keselamatan. Dengan sensor dan perangkat real-time, ITS dapat memantau kecepatan

kendaraan, kepadatan lalu lintas, dan pelanggaran aturan, sehingga data terkini dapat digunakan untuk pengendalian lalu lintas dan *peringatan dini*.

B. Analisis dan Manajemen Kecelakaan

Analisis dan manajemen kecelakaan (*accident analysis and management*) merupakan bagian krusial dalam rekayasa transportasi karena memungkinkan identifikasi penyebab, pola, dan lokasi rawan kecelakaan sehingga strategi pencegahan yang efektif dapat diterapkan. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada penanganan akibat kecelakaan, tetapi juga pada pencegahan sistemik melalui perbaikan desain jalan, regulasi, dan teknologi transportasi (Elvik *et al.*, 2022).

Menurut Liu *et al.* (2021), manajemen kecelakaan harus berbasis data (*data-driven*), yang meliputi pengumpulan, analisis, dan evaluasi data kecelakaan untuk merumuskan intervensi yang tepat sasaran. Proses ini membantu meminimalkan risiko kecelakaan di masa depan dan mengurangi fatalitas serta cedera serius.

1. Jenis dan Pola Kecelakaan

Kecelakaan lalu lintas dapat dianalisis melalui berbagai kategori untuk memahami pola dan penyebabnya secara lebih mendalam. Berdasarkan jenis kendaraan yang terlibat, kecelakaan bisa melibatkan kendaraan pribadi seperti mobil dan sepeda motor, angkutan umum seperti bus atau minibus, serta pengguna non-motorized transport seperti sepeda dan pejalan kaki. Klasifikasi ini penting karena masing-masing jenis kendaraan memiliki karakteristik risiko yang berbeda, misalnya kecepatan, ukuran, dan kemampuan manuver, yang memengaruhi tingkat keparahan kecelakaan.

Dari sisi lokasi, kecelakaan umumnya terjadi di persimpangan, jalur lurus, atau tikungan serta jalur menaik/menurun. Persimpangan sering disebut sebagai titik konflik utama (*major conflict points*) karena interaksi kompleks antar pengguna jalan misalnya kendaraan yang berbelok bersamaan dengan pejalan kaki yang menyeberang meningkatkan risiko terjadinya tabrakan. Jalan lurus dan jalur menaik/menurun juga memiliki risiko, terutama terkait kecepatan kendaraan dan jarak pandang terbatas.

Faktor waktu dan lingkungan juga memengaruhi frekuensi dan tingkat keparahan kecelakaan. Jam sibuk dengan kepadatan lalu lintas tinggi, malam hari dengan visibilitas rendah, serta kondisi cuaca ekstrem seperti hujan lebat, kabut, atau permukaan jalan licin, semuanya berkontribusi pada meningkatnya risiko kecelakaan. Penelitian global menunjukkan bahwa sebagian besar kecelakaan perkotaan terjadi di persimpangan akibat konflik arah dan perilaku pengguna jalan yang tidak disiplin (Elvik *et al.*, 2022; Peden *et al.*, 2020). Pemahaman terhadap pola ini menjadi dasar bagi perancangan intervensi keselamatan yang lebih efektif.

2. Metode Analisis Kecelakaan

Analisis kecelakaan jalan dilakukan menggunakan berbagai metode untuk memahami pola, faktor penyebab, dan lokasi rawan agar intervensi keselamatan dapat dilakukan secara tepat sasaran. Metode statistik menjadi pendekatan dasar, dengan menghitung frekuensi kecelakaan, tingkat keparahan, dan mortalitas. Analisis ini juga membandingkan tingkat kecelakaan antar ruas jalan, zona, atau koridor tertentu untuk mengidentifikasi area dengan risiko tinggi.

Survei lapangan dan investigasi lokasi memberikan informasi yang lebih mendalam. Inspeksi fisik dilakukan untuk menilai kondisi jalan, geometri, rambu, pencahayaan, dan lingkungan sekitar, sementara observasi perilaku pengguna jalan, pengemudi, pejalan kaki, maupun pesepeda membantu memahami faktor manusia yang berperan dalam kecelakaan. Data ini sering digunakan untuk memvalidasi temuan statistik dan memberikan konteks yang lebih realistis.

Pemodelan risiko kecelakaan semakin populer dengan kemajuan teknologi. Model regresi digunakan untuk memprediksi faktor penyebab, sementara pendekatan berbasis Bayesian networks dan *machine learning* memungkinkan identifikasi kombinasi variabel yang paling berisiko tinggi (Liu *et al.*, 2021). Analisis black spot juga digunakan untuk menemukan lokasi rawan kecelakaan dengan konsentrasi tinggi, sehingga perbaikan desain jalan atau pengaturan lalu lintas dapat difokuskan pada titik-titik kritis. Kombinasi metode ini memungkinkan penerapan intervensi berbasis bukti (*evidence-based intervention*) yang lebih efektif dibandingkan pendekatan reaktif.

3. Strategi Manajemen Kecelakaan

Manajemen kecelakaan jalan menekankan pendekatan terpadu untuk mencegah terjadinya kecelakaan dan meminimalkan dampak ketika kecelakaan terjadi. Strategi ini dibangun atas empat pilar utama yang saling melengkapi. Pilar pertama, *Engineering Countermeasures*, berfokus pada aspek teknis dan infrastruktur. Perbaikan geometri jalan, seperti desain tikungan yang aman, jalur khusus pejalan kaki, dan jalur sepeda, dapat mengurangi risiko tabrakan. Keselamatan persimpangan ditingkatkan melalui penerapan lampu lalu lintas, signage yang jelas, dan rambu peringatan. Selain itu, *traffic calming* seperti *speed bump*, roundabout, dan median separator membantu menurunkan kecepatan kendaraan di area padat pengguna jalan.

Pilar kedua, *Enforcement* atau penegakan hukum, menekankan kepatuhan pengguna jalan terhadap aturan. Penerapan batas kecepatan, zona keselamatan sekolah, serta pengawasan penggunaan helm, sabuk pengaman, dan larangan ponsel saat berkendara menjadi prioritas. Pengawasan berbasis sistem transportasi cerdas (ITS) memungkinkan deteksi pelanggaran secara real-time, sehingga tindakan korektif dapat segera dilakukan.

Pilar ketiga, *Education*, berfokus pada peningkatan kesadaran pengguna jalan. Kampanye keselamatan berbasis masyarakat dan sekolah, pelatihan pengemudi baru, serta penyuluhan tentang konsekuensi sosial dan ekonomi kecelakaan, membangun budaya keselamatan jangka panjang. Kesadaran ini penting agar perilaku pengguna jalan lebih aman dan disiplin.

Pilar keempat, *Emergency Response* atau tanggap darurat, menekankan kecepatan dan efektivitas penanganan kecelakaan. Sistem tanggap darurat meliputi ambulans, layanan medis, serta penggunaan ITS untuk pelaporan kecelakaan real-time, alokasi ambulans, dan manajemen evakuasi. Integrasi data kecelakaan dengan pusat kendali kota memungkinkan respons yang cepat dan koordinasi yang lebih baik. Pendekatan *Safe System* menekankan bahwa integrasi keempat pilar ini harus bersifat sistemik. Fokusnya bukan hanya menangani akibat kecelakaan, tetapi mencegah risiko secara menyeluruh, sehingga fatalitas dan cedera parah dapat diminimalkan secara signifikan (OECD, 2022).

4. Evaluasi Efektivitas Manajemen Kecelakaan

Evaluasi efektivitas manajemen kecelakaan bertujuan untuk menilai sejauh mana intervensi keselamatan telah berhasil dan

menentukan langkah perbaikan yang diperlukan. Salah satu metode utama adalah pengukuran outcome, yang menilai hasil nyata dari strategi yang diterapkan, seperti pengurangan jumlah kecelakaan, fatalitas, cedera serius, serta peningkatan kepatuhan pengguna jalan terhadap peraturan lalu lintas. Hasil ini memberikan gambaran langsung mengenai dampak dari berbagai tindakan keselamatan yang telah dilaksanakan.

Indikator proses juga digunakan untuk memantau pelaksanaan strategi. Indikator ini mencakup jumlah lokasi rawan kecelakaan (*black spots*) yang telah diperbaiki, jumlah pelatihan keselamatan yang diberikan kepada pengemudi atau masyarakat, serta frekuensi dan cakupan operasi penegakan hukum. Analisis indikator proses membantu menilai seberapa efektif implementasi program dan mendeteksi hambatan operasional.

Pemanfaatan *big data* semakin menjadi komponen penting dalam evaluasi manajemen kecelakaan. Data GPS kendaraan, sensor jalan, dan rekaman CCTV digunakan untuk memantau perilaku pengguna jalan, kepadatan lalu lintas, dan lokasi kejadian secara real-time. Analisis data ini memungkinkan perencana dan pembuat kebijakan menyesuaikan strategi secara adaptif, misalnya menambah patroli di lokasi rawan atau mengubah desain persimpangan berdasarkan pola risiko yang terdeteksi.

C. Dampak Lingkungan Transportasi

Transportasi perkotaan modern memiliki pengaruh signifikan terhadap lingkungan fisik dan sosial. Dampak ini tidak hanya terkait dengan polusi udara dan kebisingan, tetapi juga mencakup perubahan tata guna lahan, konsumsi energi, dan emisi gas rumah kaca. Litman (2023) menyatakan bahwa transportasi merupakan salah satu kontributor utama emisi global dan degradasi lingkungan perkotaan, sehingga pengelolaan dampak transportasi menjadi komponen penting dalam perencanaan kota berkelanjutan.

1. Polusi Udara dan Emisi Gas Rumah Kaca

Polusi udara dan emisi gas rumah kaca merupakan dampak signifikan dari transportasi perkotaan yang bergantung pada kendaraan bermotor berbahan bakar fosil. Kendaraan ini menghasilkan berbagai jenis polutan, antara lain karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NOx), partikel halus (PM2.5 dan PM10), serta karbon dioksida (CO₂).

Emisi-emisi ini tidak hanya menurunkan kualitas udara, tetapi juga memiliki dampak serius terhadap kesehatan masyarakat. Paparan jangka panjang terhadap polutan dapat meningkatkan risiko penyakit pernapasan, penyakit kardiovaskular, dan menurunkan kualitas hidup penduduk kota (Sperling, 2021).

Sektor transportasi sendiri menyumbang sekitar 20–25% dari total emisi CO₂ global, dengan kontribusi terbesar berasal dari kendaraan pribadi di perkotaan. Pertumbuhan jumlah kendaraan pribadi, khususnya di kota-kota berkembang, memperburuk tingkat polusi udara sekaligus meningkatkan emisi gas rumah kaca yang mendorong perubahan iklim global. Dampak jangka panjang dari emisi ini mencakup pemanasan global, meningkatnya intensitas gelombang panas, banjir akibat curah hujan ekstrem, serta penurunan kualitas udara yang semakin memengaruhi kesehatan masyarakat dan kenyamanan lingkungan perkotaan (Litman, 2023; Sperling, 2021).

Pengendalian polusi udara dari sektor transportasi menjadi prioritas penting dalam perencanaan kota berkelanjutan. Strategi mitigasi meliputi promosi transportasi publik rendah emisi, pengembangan kendaraan listrik, integrasi moda transportasi, dan pengaturan tata guna lahan untuk mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi. Pendekatan ini tidak hanya menurunkan emisi, tetapi juga meningkatkan kualitas hidup dan keberlanjutan lingkungan perkotaan secara keseluruhan.

2. Polusi Kebisingan

Polusi kebisingan merupakan salah satu dampak penting dari transportasi perkotaan yang sering kurang diperhatikan dibanding polusi udara. Kebisingan lalu lintas, terutama di kota-kota padat dengan volume kendaraan tinggi, menimbulkan efek negatif pada kesehatan fisik dan mental masyarakat. Paparan suara bising secara terus-menerus dapat menyebabkan gangguan tidur, stres kronis, penurunan konsentrasi, serta meningkatkan risiko gangguan kardiovaskular dan masalah psikologis (Cetin *et al.*, 2022). Dampak ini tidak hanya memengaruhi individu, tetapi juga produktivitas dan kualitas hidup di kawasan perkotaan.

Untuk mengurangi kebisingan lalu lintas, beberapa strategi telah diterapkan. Pertama, desain infrastruktur yang ramah suara, seperti pembangunan dinding penahan suara di sepanjang jalan, penggunaan material peredam getaran, dan permukaan jalan yang lebih halus, dapat

menurunkan transmisi bunyi. Kedua, manajemen lalu lintas berperan penting, misalnya dengan mengatur aliran kendaraan, menetapkan zona kecepatan rendah, serta membatasi jam operasional kendaraan berat. Ketiga, pemanfaatan kendaraan ramah lingkungan, seperti kendaraan listrik atau hibrida yang lebih senyap dibandingkan mesin konvensional, dapat mengurangi sumber kebisingan secara langsung.

Pendekatan terpadu antara desain infrastruktur, manajemen lalu lintas, dan teknologi kendaraan menjadi kunci pengendalian polusi kebisingan di perkotaan. Strategi ini tidak hanya meningkatkan kenyamanan penduduk, tetapi juga mendukung pembangunan kota yang lebih sehat, aman, dan berkelanjutan.

3. Konsumsi Energi dan Sumber Daya Alam

Konsumsi energi dan pemanfaatan sumber daya alam menjadi isu kritis dalam transportasi perkotaan, terutama yang bergantung pada bahan bakar fosil. Kendaraan pribadi yang dominan meningkatkan permintaan energi secara signifikan dan menyebabkan ketergantungan pada sumber daya tak terbarukan. Sperling (2021) menekankan bahwa tingginya konsumsi energi ini tidak hanya menimbulkan inefisiensi operasional, tetapi juga berdampak pada lingkungan melalui peningkatan emisi gas rumah kaca dan degradasi ekosistem. Oleh karena itu, pengelolaan energi dan sumber daya menjadi elemen penting dalam pembangunan transportasi berkelanjutan.

Beberapa strategi telah diimplementasikan untuk menekan konsumsi energi. Pengembangan transportasi umum berkapasitas tinggi, seperti bus rapid transit dan kereta massal, dapat mengurangi jumlah kendaraan pribadi di jalan sekaligus meningkatkan efisiensi energi per penumpang. Selain itu, promosi kendaraan listrik dan hibrida menjadi alternatif untuk menurunkan ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi. Optimalisasi rute melalui teknologi *Intelligent Transport Systems* (ITS) juga berperan penting dengan mengurangi kemacetan, waktu tempuh, dan penggunaan bahan bakar secara keseluruhan.

Pendekatan terpadu yang menggabungkan efisiensi operasional, teknologi bersih, dan transportasi publik berkapasitas tinggi menjadi kunci dalam menekan konsumsi energi dan meminimalkan dampak lingkungan. Dengan demikian, kota-kota dapat meningkatkan mobilitas

masyarakat sekaligus mendukung keberlanjutan energi dan perlindungan lingkungan jangka panjang.

4. Dampak Tata Guna Lahan

Transportasi memiliki dampak signifikan terhadap tata guna lahan perkotaan, terutama dalam konteks alokasi ruang dan kualitas lingkungan. Infrastruktur transportasi seperti jalan raya, area parkir, terminal, dan fasilitas pendukung lain menempati area luas yang sering mengurangi ruang hijau dan meningkatkan permukaan kedap air, sehingga memperbesar risiko banjir dan panas perkotaan. Ketergantungan masyarakat pada kendaraan pribadi juga mendorong fenomena urban sprawl, di mana permukiman dan pusat kegiatan tersebar secara luas. Akibatnya, jarak perjalanan meningkat, konsumsi energi bertambah, dan kualitas lingkungan menurun (Litman, 2023).

Untuk mengurangi dampak negatif ini, integrasi antara transportasi dan perencanaan kota menjadi strategi kunci. Penerapan konsep *Transit-Oriented Development* (TOD) mendorong konsentrasi aktivitas di sekitar koridor angkutan umum, sehingga mengurangi kebutuhan perjalanan jarak jauh dan ketergantungan pada kendaraan pribadi. Selain itu, pengembangan jalur pejalan kaki dan sepeda meningkatkan mobilitas non-motorized yang ramah lingkungan, sekaligus menurunkan tekanan pada jaringan jalan. Kebijakan ruang hijau juga penting untuk menjaga keseimbangan antara infrastruktur transportasi dan lingkungan, karena area hijau mampu menyerap polusi, mengurangi efek panas, dan meningkatkan kualitas hidup perkotaan.

5. Strategi Mitigasi Dampak Lingkungan Transportasi

Strategi mitigasi dampak lingkungan transportasi berfokus pada pengurangan emisi, efisiensi energi, dan perlindungan kualitas hidup perkotaan. Salah satu pendekatan utama adalah pengembangan transportasi ramah lingkungan, termasuk penggunaan kendaraan listrik, hibrida, dan berbahan bakar alternatif, serta promosi angkutan umum massal yang hemat energi. Dengan demikian, ketergantungan pada kendaraan pribadi beremisi tinggi dapat dikurangi, sekaligus menekan emisi gas rumah kaca dan polusi udara.

Pengaturan mobilitas dan manajemen permintaan (*transport demand management*) menjadi strategi penting. Kota-kota modern menerapkan pembatasan kendaraan pribadi di pusat kota melalui zona rendah emisi (*low emission zone*), tarif parkir progresif, dan sistem

congestion pricing. Langkah ini mendorong masyarakat beralih ke moda transportasi umum atau non-motorized, sekaligus mengurangi kemacetan dan konsumsi energi.

Infrastruktur hijau juga mendukung mitigasi dampak lingkungan. Pembangunan jalur sepeda, trotoar, dan ruang terbuka hijau di sepanjang koridor transportasi meningkatkan mobilitas non-motorized, sekaligus menyerap polusi udara dan menurunkan efek panas kota. Penggunaan material jalan yang ramah lingkungan serta permukaan resapan air membantu mengurangi banjir dan memperbaiki kualitas lingkungan perkotaan.

Pemanfaatan teknologi dan *big data* semakin memperkuat strategi mitigasi. Sistem transportasi cerdas (ITS) memungkinkan pengaturan aliran lalu lintas secara real-time untuk meminimalkan kemacetan, sementara monitoring kualitas udara dan kebisingan secara terus-menerus memberikan data yang diperlukan untuk intervensi cepat. Dengan kombinasi strategi ini, kota dapat mengembangkan sistem transportasi yang lebih bersih, efisien, dan berkelanjutan.

D. Transportasi Berkelanjutan dan Ramah Lingkungan

Transportasi berkelanjutan (*sustainable transportation*) adalah konsep yang menekankan penyediaan sistem transportasi yang efisien, aman, dan ramah lingkungan, serta mampu memenuhi kebutuhan mobilitas masyarakat saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhinya sendiri (Litman, 2023). Dalam konteks perkotaan modern, transportasi berkelanjutan tidak hanya berfokus pada pengurangan emisi gas rumah kaca dan polusi, tetapi juga pada integrasi sosial, ekonomi, dan tata guna lahan.

1. Konsep Transportasi Berkelanjutan

Transportasi berkelanjutan merupakan pendekatan sistemik yang menekankan keseimbangan antara mobilitas, lingkungan, dan kesejahteraan sosial. Prinsip efisiensi energi dan lingkungan menekankan pengurangan konsumsi bahan bakar fosil dan emisi karbon, melalui prioritas pada kendaraan rendah emisi, angkutan umum, serta mobilitas *non-motorized* seperti berjalan kaki dan bersepeda. Dengan demikian, transportasi tidak hanya melayani kebutuhan mobilitas, tetapi juga berperan dalam mitigasi perubahan iklim dan polusi perkotaan.

Keselamatan dan kesehatan menjadi pilar penting lainnya. Desain jalan yang aman, regulasi lalu lintas yang ketat, serta pengurangan polusi udara dan kebisingan bertujuan menurunkan risiko kecelakaan dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat. Dengan demikian, transportasi berkelanjutan tidak hanya memfokuskan pada aspek teknis, tetapi juga dampak sosial dan kesehatan publik.

Aksesibilitas dan keadilan sosial menjadi pertimbangan strategis. Transportasi publik yang terjangkau, merata, dan inklusif memastikan semua lapisan Masyarakat termasuk lansia, penyandang disabilitas, dan kelompok ekonomi lemah dapat menikmati mobilitas yang setara. Hal ini mendorong pemerataan akses terhadap pekerjaan, pendidikan, layanan kesehatan, dan pusat kegiatan sosial.

Integrasi tata guna lahan dan mobilitas merupakan aspek terakhir yang krusial. Pendekatan *Transit-Oriented Development* (TOD) dan penyelarasan zonasi kota dengan jaringan transportasi publik dapat mengurangi jarak perjalanan, mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi, dan meningkatkan efisiensi sistem transportasi. Dengan prinsip-prinsip ini, transportasi berkelanjutan berperan sebagai fondasi bagi kota yang ramah lingkungan, inklusif, dan efisien.

2. Strategi Pengembangan Transportasi Ramah Lingkungan

Strategi pengembangan transportasi ramah lingkungan menekankan pendekatan terpadu yang melibatkan aspek teknis, kebijakan, dan perilaku masyarakat untuk menciptakan sistem transportasi yang efisien, aman, dan berkelanjutan. Fokus utama pertama adalah pengembangan angkutan umum massal yang hemat energi, seperti *Bus Rapid Transit* (BRT), kereta komuter, dan metro. Selain menyediakan kapasitas angkut besar, strategi ini menekankan integrasi rute dan jadwal antar moda sehingga pengguna dapat berpindah dengan mudah, meningkatkan daya tarik transportasi publik dibandingkan kendaraan pribadi.

Promosi mobilitas *non-motorized* menjadi strategi penting berikutnya. Penyediaan jalur sepeda yang aman dan trotoar yang ramah pejalan kaki mendorong masyarakat menggunakan moda yang lebih bersih. Skema berbagi sepeda (*bike-sharing*) dan zona pedestrian-friendly di pusat kota juga mengurangi ketergantungan pada kendaraan bermotor, menurunkan emisi, dan memperbaiki kualitas lingkungan perkotaan. Penggunaan kendaraan ramah lingkungan merupakan

komponen teknologi yang krusial. Kendaraan listrik (EV) dan hibrida, baik untuk transportasi pribadi maupun armada umum, dikombinasikan dengan infrastruktur pengisian daya yang strategis, dapat menekan emisi karbon sekaligus meningkatkan efisiensi energi.

Pengelolaan permintaan transportasi (*Transport Demand Management/TDM*) membantu mengatur kepadatan kendaraan melalui kebijakan seperti congestion pricing, pembatasan parkir, dan pemberian insentif bagi pengguna transportasi ramah lingkungan. Strategi ini mengurangi kemacetan sekaligus mendorong pergeseran perilaku masyarakat ke moda transportasi yang lebih berkelanjutan.

Pemanfaatan teknologi cerdas (*Intelligent Transport Systems/ITS*) memungkinkan optimalisasi aliran lalu lintas, pengurangan kemacetan, dan pemantauan kualitas udara serta kebisingan secara real-time. Dengan intervensi cepat berbasis data, kota dapat mengurangi dampak lingkungan transportasi secara signifikan. Integrasi semua strategi ini membentuk sistem transportasi perkotaan yang ramah lingkungan, efisien, dan berorientasi pada kesejahteraan masyarakat.

3. Integrasi dengan Tata Guna Lahan

Integrasi antara transportasi dan tata guna lahan merupakan elemen penting dalam mewujudkan transportasi berkelanjutan. Konsep *Transit-Oriented Development (TOD)* menekankan pembangunan kawasan padat, multifungsi, dan berorientasi pada akses transportasi massal. Menurut Newman & Kenworthy (2021), implementasi TOD secara efektif dapat mengurangi ketergantungan masyarakat pada kendaraan pribadi, memperpendek jarak perjalanan harian, dan meningkatkan proporsi penggunaan transportasi publik serta moda non-motorized seperti berjalan kaki dan bersepeda.

Integrasi ini membantu menurunkan emisi karbon dan konsumsi energi dengan menghubungkan kawasan perumahan, pusat komersial, dan fasilitas publik langsung ke jaringan angkutan umum. Desain tata guna lahan yang berorientasi transit juga mendorong penggunaan ruang kota secara efisien, mengurangi sprawl perkotaan, dan menciptakan lingkungan perkotaan yang lebih sehat dan ramah bagi pejalan kaki. Dengan demikian, penggabungan perencanaan transportasi dan tata guna lahan bukan hanya soal aksesibilitas, tetapi juga strategi untuk meningkatkan efisiensi, keberlanjutan lingkungan, dan kualitas hidup masyarakat perkotaan.

4. Evaluasi Transportasi Berkelanjutan

Evaluasi transportasi berkelanjutan menjadi langkah penting untuk memastikan sistem transportasi perkotaan mampu memenuhi kebutuhan mobilitas saat ini tanpa mengorbankan generasi mendatang. Salah satu aspek utama yang dievaluasi adalah dampak lingkungan. Indikator lingkungan mencakup emisi CO₂ per penumpang-kilometer, konsumsi energi per unit mobilitas, serta tingkat polusi udara dan kebisingan. Analisis terhadap indikator ini membantu perencana menilai sejauh mana transportasi yang ada telah berhasil mengurangi beban lingkungan, sekaligus mengidentifikasi area yang memerlukan perbaikan atau intervensi teknologi ramah lingkungan.

Evaluasi juga menitikberatkan pada aspek mobilitas dan efisiensi sistem transportasi. Proporsi perjalanan yang menggunakan transportasi umum atau moda non-motorized, seperti bersepeda dan berjalan kaki, menjadi tolok ukur utama. Waktu perjalanan rata-rata dan kecepatan efektif perjalanan juga dianalisis untuk menilai kenyamanan dan kecepatan sistem bagi pengguna. Data ini memungkinkan pembuat kebijakan menyesuaikan rute, jadwal, dan frekuensi layanan angkutan umum agar lebih responsif terhadap pola perjalanan masyarakat dan memaksimalkan penggunaan angkutan massal.

Aspek sosial dan ekonomi juga menjadi bagian penting dari evaluasi transportasi berkelanjutan. Aksesibilitas ke fasilitas publik, pendidikan, dan tempat kerja diukur untuk memastikan transportasi inklusif bagi seluruh lapisan masyarakat, termasuk kelompok rentan. Selain itu, biaya transportasi relatif terhadap pendapatan masyarakat dan tingkat keselamatan pengguna jalan menjadi indikator penting untuk menilai keadilan dan efektivitas sistem. Evaluasi menyeluruh terhadap ketiga dimensi lingkungan, mobilitas, dan sosial-ekonomi memberikan dasar bagi penyesuaian kebijakan transportasi dan alokasi investasi infrastruktur secara tepat, sehingga pembangunan transportasi perkotaan dapat berlangsung secara berkelanjutan dan berorientasi pada kualitas hidup masyarakat (Litman, 2023; Banister, 2021).

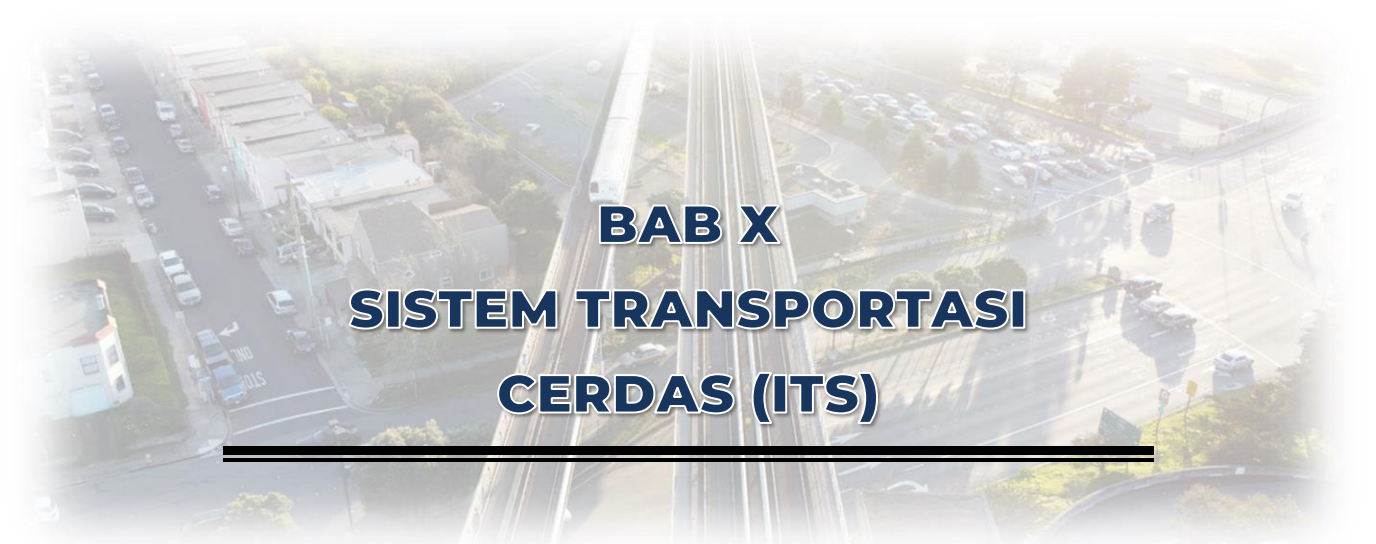
5. Studi Kasus Implementasi Transportasi Berkelanjutan

Beberapa kota di dunia telah menunjukkan keberhasilan dalam penerapan transportasi berkelanjutan melalui berbagai pendekatan

inovatif yang disesuaikan dengan kondisi lokal masing-masing. Copenhagen, Denmark, misalnya, menempatkan sepeda sebagai moda utama transportasi perkotaan. Kota ini menyediakan jaringan jalur sepeda yang luas dan aman, serta menerapkan kebijakan parkir yang membatasi penggunaan kendaraan pribadi di pusat kota. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi emisi karbon, tetapi juga meningkatkan kesehatan masyarakat melalui mobilitas aktif dan menurunkan kemacetan jalan.

Curitiba, Brasil, menempuh strategi berbeda dengan mengembangkan sistem *Bus Rapid Transit* (BRT) sebagai tulang punggung mobilitas kota. Sistem BRT ini terintegrasi dengan tata guna lahan, sehingga kawasan permukiman dan komersial dirancang sedemikian rupa agar mudah diakses melalui angkutan umum. Pendekatan ini berhasil meningkatkan efisiensi transportasi, mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi, dan mendorong pertumbuhan kota yang lebih terstruktur.

Singapura menjadi contoh lain dengan penerapan kombinasi kebijakan dan teknologi canggih. Kota ini menggunakan congestion pricing untuk mengatur kepadatan kendaraan di pusat kota, didukung oleh transportasi publik yang efisien dan terintegrasi. Sistem *Intelligent Transport Systems* (ITS) digunakan untuk memantau aliran lalu lintas dan menyesuaikan operasi transportasi secara real-time. Hasil dari penerapan strategi-strategi ini menunjukkan penurunan emisi gas rumah kaca, peningkatan penggunaan transportasi publik, serta peningkatan kualitas hidup warga perkotaan melalui mobilitas yang lebih aman dan efisien. Implementasi di ketiga kota ini menegaskan bahwa keberhasilan transportasi berkelanjutan membutuhkan perpaduan antara perencanaan tata guna lahan, teknologi, kebijakan, dan perubahan perilaku masyarakat (Newman & Kenworthy, 2021; OECD, 2022).



BAB X

SISTEM TRANSPORTASI CERDAS (ITS)

Sistem Transportasi Cerdas (*Intelligent Transportation Systems / ITS*) adalah integrasi teknologi informasi, komunikasi, sensor, dan analisis data dalam manajemen transportasi untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan mobilitas perkotaan. ITS memungkinkan pengendalian arus lalu lintas secara real-time, pengaturan lampu adaptif, pemantauan kendaraan dan pejalan kaki, serta integrasi dengan transportasi publik dan kendaraan otonom. Dengan memanfaatkan *big data*, ITS mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti, optimasi jaringan transportasi, dan perencanaan kota pintar (*smart city*), sehingga menghadirkan sistem transportasi yang lebih responsif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan (Chen *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2022).

A. Konsep dan Komponen ITS

Intelligent Transportation Systems (ITS) merupakan sistem transportasi yang memanfaatkan teknologi informasi, komunikasi, sensor, dan perangkat lunak untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan mobilitas perkotaan. ITS bukan sekadar teknologi, tetapi juga integrasi antara manajemen lalu lintas, perencanaan transportasi, kebijakan, dan interaksi pengguna. Tujuan utama ITS adalah mengoptimalkan arus kendaraan, mengurangi kemacetan, meningkatkan keselamatan jalan, dan mendukung transportasi berkelanjutan. Menurut Schrank *et al.* (2022) dan ITS America (2021), ITS berperan sebagai jembatan antara infrastruktur tradisional dan transportasi masa depan yang berbasis data dan teknologi cerdas.

1. Konsep ITS

Konsep *Intelligent Transport Systems* (ITS) menekankan pemanfaatan teknologi untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi, keberlanjutan, dan pengalaman pengguna dalam sistem transportasi. Dari sisi keselamatan, ITS berperan penting dalam mengurangi risiko kecelakaan melalui sistem peringatan dini, manajemen insiden, serta komunikasi antar kendaraan dan infrastruktur (*vehicle-to-vehicle* / V2V dan *vehicle-to-infrastructure* / V2I). Dengan kemampuan ini, pengemudi dapat menerima informasi kritis secara real-time, sehingga potensi kecelakaan dapat diminimalkan.

Dari perspektif efisiensi lalu lintas, ITS memungkinkan pengelolaan aliran kendaraan secara adaptif. Pemantauan kondisi jalan secara real-time dan penggunaan kontrol sinyal cerdas membantu mengurangi kemacetan, menurunkan waktu perjalanan, dan mengoptimalkan kapasitas jalan. Hal ini tidak hanya memperlancar mobilitas, tetapi juga meningkatkan produktivitas perkotaan dengan mengurangi waktu terbuang di jalan (Stevanovic *et al.*, 2021).

Aspek keberlanjutan menjadi fokus lain ITS. Sistem ini mendorong penggunaan transportasi publik, kendaraan ramah lingkungan, dan pengelolaan aliran lalu lintas yang mengurangi konsumsi bahan bakar serta emisi karbon. Dengan cara ini, ITS tidak hanya memberikan manfaat operasional, tetapi juga mendukung tujuan lingkungan kota secara lebih luas (Litman, 2023). Selain itu, ITS meningkatkan pengalaman pengguna dengan menyediakan informasi perjalanan secara real-time, termasuk kondisi jalan, kemacetan, ketersediaan parkir, dan prediksi waktu tempuh. Informasi ini membantu pengemudi dan penumpang membuat keputusan perjalanan yang lebih efisien dan aman, sehingga sistem transportasi perkotaan menjadi lebih responsif dan *user-friendly*.

2. Komponen Utama ITS

Sistem *Intelligent Transport Systems* (ITS) terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan kenyamanan transportasi perkotaan. Komponen pertama adalah sensor dan perangkat deteksi, seperti sensor loop, kamera CCTV, radar, dan LiDAR, yang berfungsi memantau kendaraan, kecepatan, serta volume lalu lintas. Selain itu, sensor lingkungan digunakan untuk memonitor kondisi cuaca, permukaan jalan,

dan tingkat polusi udara. Data yang dikumpulkan dari sensor ini menjadi dasar bagi analisis real-time dan pengambilan keputusan operasional (Chen *et al.*, 2021).

Komponen kedua adalah sistem komunikasi, yang mencakup *vehicle-to-infrastructure* (V2I) untuk interaksi kendaraan dengan rambu atau lampu lalu lintas cerdas, serta *vehicle-to-vehicle* (V2V) untuk koordinasi antar kendaraan guna menghindari tabrakan dan meningkatkan kelancaran arus lalu lintas. Jaringan komunikasi berbasis 5G dan IoT memungkinkan transfer data cepat dan responsif, mendukung pengambilan keputusan secara real-time.

Komponen ketiga adalah sistem kontrol dan manajemen lalu lintas, seperti lampu lalu lintas adaptif yang menyesuaikan durasi sinyal berdasarkan kepadatan jalan, sistem rerouting untuk mengarahkan kendaraan melalui jalur alternatif saat kemacetan atau insiden terjadi, serta pemantauan titik rawan kecelakaan untuk intervensi keselamatan. Sistem ini berperan langsung dalam menjaga kelancaran dan keamanan perjalanan.

Komponen keempat adalah platform analitik dan *big data*, yang mengumpulkan data dari sensor, GPS, perangkat mobile, dan sistem tiket elektronik. Analisis prediktif dilakukan untuk memodelkan permintaan transportasi, memprediksi kemacetan, dan menilai dampak kebijakan transportasi, sehingga perencanaan menjadi lebih berbasis bukti dan adaptif (Sun *et al.*, 2022).

Antarmuka pengguna menyediakan informasi langsung bagi pengemudi dan penumpang, termasuk estimasi waktu tempuh, kondisi lalu lintas, dan lokasi parkir. Penggunaan smart signage dan aplikasi mobile memudahkan pengguna mengambil keputusan perjalanan secara cepat dan akurat, meningkatkan pengalaman dan kepuasan dalam menggunakan sistem transportasi perkotaan.

3. Integrasi Komponen ITS

Integrasi komponen ITS merupakan inti dari efektivitas sistem transportasi cerdas. Sensor dan perangkat deteksi, seperti loop sensor, kamera, radar, dan LiDAR, menangkap data kondisi jalan, volume kendaraan, dan perilaku pengguna jalan secara real-time. Data ini kemudian dikirim melalui sistem komunikasi, termasuk *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) dan *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), yang memanfaatkan jaringan IoT atau 5G untuk transfer informasi cepat dan andal.

Platform analitik dan *big data* memproses informasi yang dikumpulkan untuk menghasilkan rekomendasi operasional dan prediksi kondisi lalu lintas. Analisis ini memungkinkan rerouting dinamis, pengaturan lampu adaptif, prioritas transportasi publik, dan identifikasi titik rawan kecelakaan secara cepat. Antarmuka pengguna, baik melalui smart signage maupun aplikasi mobile, menyampaikan informasi ini kepada pengemudi dan penumpang untuk mendukung pengambilan keputusan secara real-time.

Kolaborasi antar komponen ini menghasilkan manfaat yang saling memperkuat: kemacetan dapat dikurangi melalui optimasi aliran lalu lintas, keselamatan pengguna jalan meningkat karena deteksi dini dan *peringatan*, serta pengelolaan transportasi menjadi lebih ramah lingkungan melalui monitoring emisi dan penggunaan kendaraan efisien. Dengan integrasi yang optimal, ITS bukan hanya sistem teknis, tetapi juga alat strategis untuk transportasi perkotaan berkelanjutan.

B. Aplikasi ITS dalam Manajemen Lalu Lintas

Sistem Transportasi Cerdas (*Intelligent Transportation Systems/ITS*) tidak hanya merupakan konsep teknologi, tetapi juga implementasi nyata untuk mengelola arus lalu lintas, meningkatkan keselamatan, mengurangi kemacetan, dan meningkatkan efisiensi transportasi perkotaan. ITS memanfaatkan sensor, komunikasi, dan analisis data untuk memberikan pengendalian lalu lintas secara real-time, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis informasi untuk pengemudi, operator jalan, dan perencana transportasi (Stevanovic *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2021).

1. Pengaturan Lampu Lalu Lintas Adaptif

Pengaturan lampu lalu lintas adaptif (*adaptive traffic signal control*) merupakan salah satu penerapan ITS yang sangat efektif dalam mengelola arus lalu lintas perkotaan secara dinamis. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan sensor loop, kamera, dan radar untuk mendeteksi jumlah kendaraan, kecepatan, serta arah pergerakan di persimpangan. Data yang terkumpul kemudian dianalisis oleh platform ITS untuk menentukan durasi lampu hijau yang optimal, sehingga waktu tunggu kendaraan berkurang dan kemacetan dapat diminimalkan.

Sistem lampu adaptif juga berperan dalam pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi kendaraan. Penelitian oleh Stevanovic *et al.* (2021) menunjukkan bahwa penerapan adaptive signal control mampu menurunkan waktu perjalanan hingga 20–35%, sekaligus mengurangi dampak lingkungan akibat emisi gas buang. Keunggulan lain dari sistem ini adalah kemampuannya untuk memberikan prioritas pada kendaraan tertentu, seperti bus angkutan umum atau kendaraan darurat, melalui mekanisme transit signal priority. Hal ini tidak hanya memperlancar arus lalu lintas, tetapi juga mendukung efisiensi transportasi publik dan respons darurat di perkotaan.

2. Manajemen Kemacetan dan Rerouting Dinamis

Manajemen kemacetan dan rerouting dinamis merupakan salah satu aplikasi ITS yang menekankan pengaturan arus lalu lintas secara adaptif dan berbasis data real-time. Sistem ITS memanfaatkan informasi dari sensor jalan, GPS kendaraan, dan aplikasi mobile untuk memantau kepadatan lalu lintas di berbagai ruas jalan. Data ini dianalisis untuk mengidentifikasi titik-titik rawan kemacetan dan menentukan rute alternatif yang dapat mengurangi kepadatan secara efektif.

Rerouting dinamis kemudian disampaikan kepada pengemudi melalui aplikasi navigasi atau papan informasi elektronik (*variable message signs*), sehingga pengemudi dapat menyesuaikan perjalanan tanpa menimbulkan gangguan tambahan di jalan utama. Penerapan strategi ini memungkinkan distribusi arus lalu lintas yang lebih merata dan mengurangi waktu perjalanan keseluruhan.

Sebagai contoh, Kota Singapura memanfaatkan ITS untuk mengalihkan kendaraan secara otomatis selama jam sibuk. Sistem ini terbukti mampu menurunkan kemacetan hingga 15–20%, meningkatkan efisiensi transportasi perkotaan, dan mengurangi emisi kendaraan akibat berhenti-dan-mulai yang berlebihan (Sun *et al.*, 2022). Dengan demikian, rerouting dinamis tidak hanya meningkatkan kenyamanan pengguna jalan, tetapi juga mendukung transportasi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

3. Pemantauan dan Pencegahan Kecelakaan

Pemantauan dan pencegahan kecelakaan merupakan salah satu fungsi kunci ITS dalam meningkatkan keselamatan lalu lintas. Sistem ITS dilengkapi dengan *incident detection system* yang mengandalkan

kamera, sensor, dan analisis video untuk mendeteksi kecelakaan, kendaraan yang berhenti mendadak, atau perilaku berisiko lainnya di jalan. Informasi ini memungkinkan otoritas transportasi merespons secara cepat, misalnya dengan mengirim kendaraan darurat atau memberikan peringatan langsung kepada pengemudi melalui aplikasi mobile.

ITS juga berperan dalam pencegahan melalui analisis data historis untuk mengidentifikasi titik rawan kecelakaan atau hotspots. Dengan informasi ini, tindakan preventif dapat diterapkan, seperti pemasangan rambu tambahan, lampu peringatan, atau pengaturan kecepatan adaptif di lokasi berisiko tinggi. Pendekatan ini memungkinkan intervensi berbasis bukti (*evidence-based*) yang lebih efektif dibandingkan penanganan pasca-kecelakaan.

Implementasi ITS dalam keselamatan lalu lintas tidak hanya menurunkan frekuensi dan tingkat keparahan kecelakaan, tetapi juga meningkatkan kepercayaan pengguna jalan terhadap sistem transportasi. Dengan pemantauan real-time dan strategi pencegahan proaktif, ITS mendukung terciptanya lingkungan transportasi yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan (Chen *et al.*, 2021; Litman, 2023).

4. Transportasi Publik Cerdas

Transportasi publik cerdas memanfaatkan teknologi ITS untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan pengalaman pengguna. Salah satu penerapan utama adalah perencanaan rute dan jadwal dinamis, di mana bus atau kereta dapat menyesuaikan keberangkatan berdasarkan volume penumpang dan kondisi kepadatan jalan secara real-time. Pendekatan ini memungkinkan operator merespons fluktuasi permintaan secara adaptif, sehingga mengurangi waktu tunggu dan memaksimalkan pemanfaatan armada.

ITS mendukung implementasi prioritas lampu hijau bagi bus (*bus signal priority*), yang membantu mengurangi keterlambatan pada koridor padat dan meningkatkan ketepatan waktu perjalanan. Strategi ini meningkatkan keandalan transportasi umum, mendorong lebih banyak masyarakat untuk memilih moda publik dibanding kendaraan pribadi.

Integrasi ITS dengan sistem tiket elektronik juga memberikan manfaat signifikan bagi manajemen armada. Data real-time tentang kapasitas kendaraan, pola perjalanan penumpang, dan titik kepadatan memungkinkan operator melakukan penyesuaian operasional,

merencanakan layanan secara lebih efisien, serta mengoptimalkan alokasi armada. Dengan kombinasi strategi ini, transportasi publik tidak hanya menjadi lebih handal, tetapi juga lebih responsif terhadap kebutuhan mobilitas perkotaan (Sun *et al.*, 2022).

5. Sistem Parkir Cerdas

Sistem parkir cerdas merupakan salah satu aplikasi ITS yang efektif untuk mengurangi kemacetan perkotaan akibat pencarian tempat parkir. Dengan memasang sensor di setiap lokasi parkir, sistem mampu memantau ketersediaan tempat secara real-time. Informasi ini kemudian disalurkan melalui aplikasi mobile atau papan informasi elektronik, sehingga pengemudi dapat langsung diarahkan ke slot parkir yang kosong tanpa harus mengelilingi area secara manual.

Penerapan *smart parking* management tidak hanya menghemat waktu bagi pengguna jalan, tetapi juga berdampak positif pada aliran lalu lintas secara keseluruhan. Dengan waktu pencarian parkir yang berkurang, kemacetan lokal menurun dan emisi kendaraan yang dihasilkan dari kendaraan yang berputar-putar juga berkurang. Studi di beberapa kota Eropa menunjukkan bahwa implementasi sistem ini mampu menurunkan waktu pencarian parkir hingga 30%, sekaligus mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan transportasi perkotaan (Chen *et al.*, 2021).

Data yang dikumpulkan dari sistem parkir cerdas dapat digunakan oleh otoritas kota untuk perencanaan dan pengelolaan infrastruktur parkir secara lebih strategis. Analisis pola penggunaan parkir memungkinkan penyesuaian tarif, penambahan fasilitas parkir, atau pengaturan ulang zonasi parkir untuk meningkatkan efisiensi ruang kota dan mendukung mobilitas yang lebih ramah lingkungan.

6. Integrasi ITS dengan Kebijakan Transportasi

Integrasi ITS dengan kebijakan transportasi menjadi kunci dalam menciptakan sistem mobilitas perkotaan yang efisien, aman, dan berkelanjutan. Sistem ITS tidak hanya berfungsi sebagai alat teknis, tetapi juga dapat mendukung implementasi kebijakan *Transport Demand Management* (TDM), misalnya pembatasan kendaraan pribadi di pusat kota melalui congestion pricing atau pemberian insentif bagi pengguna transportasi publik. Dengan demikian, ITS berperan langsung dalam

mengarahkan perilaku perjalanan masyarakat menuju moda yang lebih ramah lingkungan dan mengurangi kemacetan perkotaan.

Data yang dihasilkan oleh ITS dapat digunakan untuk evaluasi dan pemantauan kebijakan transportasi. Misalnya, analisis data lampu lalu lintas adaptif, jalur bus prioritas, atau efektivitas low-emission zones dapat memberikan gambaran akurat tentang sejauh mana kebijakan tersebut mencapai tujuan yang diinginkan. Pendekatan berbasis data ini memungkinkan pengambil keputusan menyesuaikan strategi secara real-time, merespons perubahan kondisi jalan, dan mengoptimalkan aliran transportasi perkotaan.

C. Teknologi Informasi dan *Big Data* Transportasi

Perkembangan teknologi informasi (TI) dan *big data* telah merevolusi manajemen transportasi perkotaan, memungkinkan pengumpulan, penyimpanan, dan analisis data dalam skala besar untuk mendukung sistem transportasi cerdas (*Intelligent Transportation Systems / ITS*). *Big data* transportasi memanfaatkan berbagai sumber informasi untuk memahami perilaku perjalanan, memprediksi permintaan transportasi, meningkatkan keselamatan, dan mendukung transportasi berkelanjutan (Chen *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2022).

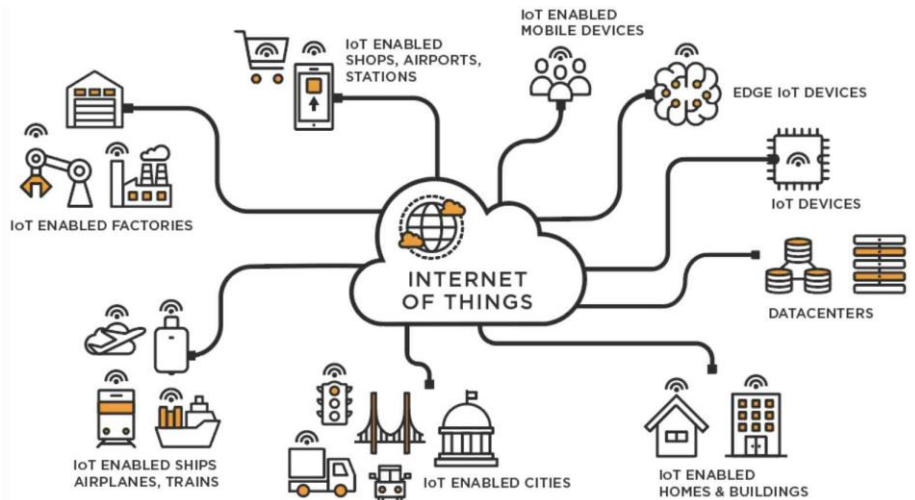
1. Sumber Data Transportasi

Sumber data transportasi modern sangat beragam dan berasal dari berbagai teknologi yang memungkinkan pemantauan serta analisis mobilitas secara real-time. Sensor jalan dan kamera CCTV menjadi salah satu sumber utama, dengan kemampuan mengukur volume kendaraan, kecepatan, dan kepadatan di berbagai ruas jalan. Sensor loop dan radar, misalnya, dapat memantau pergerakan kendaraan secara terus-menerus sehingga data kepadatan lalu lintas bisa dianalisis secara langsung untuk pengaturan arus lalu lintas.

GPS dan perangkat mobile memberikan data lokasi dari kendaraan pribadi, transportasi publik, dan aplikasi navigasi. Informasi ini mencakup pola perjalanan, kecepatan rata-rata, dan rute yang diambil, sehingga memudahkan perencanaan transportasi untuk memahami perilaku pengguna jalan secara lebih akurat. Sistem tiket elektronik juga menjadi sumber data penting untuk transportasi publik, mencatat jumlah

penumpang, rute favorit, dan waktu perjalanan, yang dapat dimanfaatkan untuk mengoptimalkan rute dan jadwal kendaraan.

Gambar 4. *Internet of Things*



Sumber: *Dicoding*

Data transportasi juga diperoleh dari aplikasi lalu lintas dan media sosial, di mana laporan pengguna mengenai kemacetan, kecelakaan, atau kondisi jalan dikumpulkan secara real-time. Selain itu, teknologi *Internet of Things* (IoT) menghadirkan integrasi data yang lebih canggih, dengan perangkat cerdas, rambu elektronik, dan sensor lingkungan yang menggabungkan informasi kendaraan, kondisi jalan, dan lingkungan sekitarnya. Dengan kombinasi sumber data ini, perencanaan transportasi perkotaan dapat menjadi lebih adaptif, efisien, dan responsif terhadap perubahan permintaan perjalanan (Fagnant & Kockelman, 2022).

2. Analisis dan Pemanfaatan *Big Data*

Analisis *big data* dalam transportasi berperan penting dalam mendukung sistem ITS dan pengambilan keputusan berbasis bukti. Salah satu fungsi utamanya adalah prediksi permintaan transportasi. Dengan memanfaatkan data historis maupun real-time, model prediktif dapat memperkirakan volume lalu lintas pada berbagai jam, hari, dan musim. Informasi ini sangat berguna untuk perencanaan kapasitas jalan, penjadwalan transportasi publik, serta pengaturan aliran lalu lintas agar lebih efisien.

Gambar 5. *Big Data*



Sumber: *Corporate Training*

Big data memungkinkan identifikasi titik rawan kecelakaan melalui *hotspot analysis*. Dengan menganalisis data kecelakaan historis dan kondisi lalu lintas saat ini, lokasi dengan risiko tinggi dapat dikenali lebih cepat. Hasil analisis ini memungkinkan intervensi keselamatan yang lebih tepat, seperti pemasangan rambu tambahan, lampu peringatan, atau pengaturan kecepatan di lokasi-lokasi kritis.

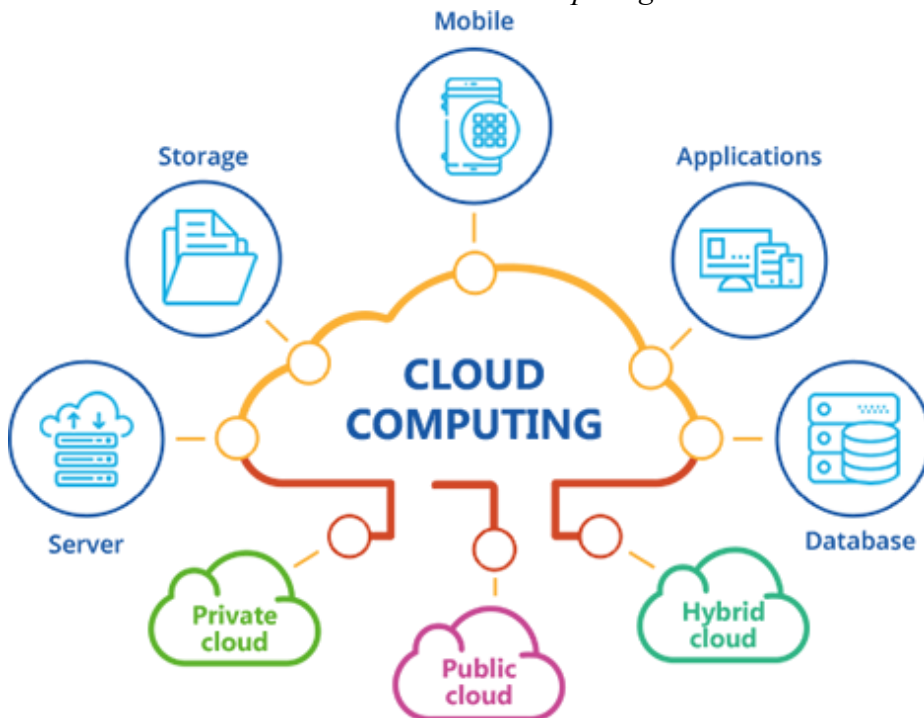
Big data juga berperan dalam optimasi jaringan jalan. Informasi yang dikumpulkan dari sensor, GPS, dan aplikasi mobile dapat digunakan untuk mengatur rerouting kendaraan secara real-time, mengurangi kemacetan, dan memastikan arus lalu lintas berjalan lebih lancar. Sistem ini juga mendukung evaluasi kebijakan transportasi, seperti efektivitas jalur prioritas bus, area low-emission, atau pembatasan kendaraan pribadi di pusat kota.

3. Teknologi dan Infrastruktur *Big Data* Transportasi

Teknologi dan infrastruktur *big data* transportasi menjadi fondasi utama dalam penerapan sistem ITS yang efektif. Salah satu aspek penting adalah cloud computing dan *data storage*, di mana data besar yang dikumpulkan dari sensor jalan, GPS, dan aplikasi mobile disimpan dan diproses secara terpusat. Pemrosesan berbasis cloud memungkinkan analisis data dalam skala besar dan real-time, sehingga pengambil keputusan dapat merespons kondisi lalu lintas atau insiden dengan cepat.

Machine learning dan *predictive analytics* berperan sentral dalam memanfaatkan *big data*. Teknologi ini digunakan untuk memprediksi pola perjalanan, kemacetan, dan potensi risiko kecelakaan. Misalnya, model prediksi permintaan transportasi publik dapat menyesuaikan jadwal bus atau kereta secara otomatis berdasarkan volume penumpang dan kondisi jalan, meningkatkan efisiensi layanan dan pengalaman pengguna.

Gambar 6. *Cloud Computing*



Sumber: *Btech*

Integrasi data dan interoperabilitas antar sistem juga menjadi kunci keberhasilan. Data dari berbagai sumber, seperti sensor jalan, GPS kendaraan, sistem tiket elektronik, dan media sosial, harus diintegrasikan agar analisis lebih akurat. Interoperabilitas memastikan bahwa kendaraan, infrastruktur, dan platform analitik dapat saling berkomunikasi secara efektif, sehingga sistem ITS dapat bekerja secara holistik dan terkoordinasi.

Visualisasi data dan dashboard menjadi alat penting bagi pengambil keputusan. Informasi transportasi disajikan dalam bentuk peta interaktif, grafik, dan dashboard manajemen, memungkinkan respons cepat terhadap kemacetan, insiden, atau perubahan permintaan transportasi. Dengan infrastruktur ini, *big data* tidak hanya menjadi

sumber informasi, tetapi juga menjadi alat strategis dalam meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan keberlanjutan transportasi perkotaan.

4. Manfaat *Big Data* untuk Transportasi Perkotaan

Pemanfaatan *big data* dalam transportasi perkotaan menghadirkan dampak yang signifikan bagi perencanaan dan operasional sistem transportasi modern. Salah satu manfaat utama adalah pengambilan keputusan berbasis bukti. Dengan analisis data historis dan real-time, perencana transportasi dapat memahami pola perjalanan, kepadatan lalu lintas, dan perilaku pengguna jalan, sehingga kebijakan dan intervensi dapat dirancang lebih akurat dan tepat sasaran. Misalnya, penyesuaian jadwal angkutan umum atau prioritas lampu hijau untuk bus dapat dilakukan berdasarkan data aktual, bukan asumsi.

Big data meningkatkan efisiensi operasional. Optimalisasi aliran kendaraan melalui lampu lalu lintas adaptif dan rerouting dinamis mampu mengurangi kemacetan, menurunkan konsumsi bahan bakar, dan mempersingkat waktu perjalanan. Integrasi data dari sensor jalan, GPS kendaraan, dan aplikasi mobile memungkinkan sistem ITS untuk merespons kondisi lalu lintas secara real-time, sehingga kapasitas jalan dapat dimanfaatkan secara optimal.

Keselamatan jalan juga mendapat manfaat langsung dari *big data*. Analisis hotspot kecelakaan, pemantauan perilaku pengemudi, dan sistem peringatan dini dapat diterapkan untuk mengurangi risiko kecelakaan, terutama di titik rawan. Data ini mendukung intervensi berbasis bukti, mulai dari pemasangan rambu tambahan hingga pengaturan kecepatan adaptif, yang secara sistemik meningkatkan keselamatan pengguna jalan.

Dari sisi lingkungan, *big data* memungkinkan transportasi lebih ramah lingkungan. Pemantauan emisi kendaraan dan analisis pola perjalanan mendorong penggunaan transportasi publik atau kendaraan listrik, sehingga emisi CO₂ dapat dikurangi. Lebih jauh, integrasi *big data* ke dalam ekosistem kota pintar (*smart city*) memungkinkan koordinasi lintas sektor transportasi, energi, lingkungan, dan manajemen darurat untuk menciptakan sistem perkotaan yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan (Chen *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2022).

D. Kendaraan Otonom dan Masa Depan Transportasi

Kendaraan otonom (*Autonomous Vehicles / AVs*) merupakan salah satu inovasi paling signifikan dalam perkembangan sistem transportasi cerdas (*Intelligent Transportation Systems / ITS*). Kendaraan otonom dapat bergerak tanpa pengemudi manusia, menggunakan kombinasi sensor, perangkat lunak AI, komunikasi V2V (*Vehicle-to-Vehicle*) dan V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*) untuk navigasi, pengambilan keputusan, dan koordinasi lalu lintas. Integrasi AV dengan ITS diharapkan merevolusi mobilitas perkotaan, meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan transportasi (Fagnant & Kockelman, 2022; Schrank *et al.*, 2022).

1. Konsep Kendaraan Otonom

Kendaraan otonom merupakan inovasi dalam transportasi yang memungkinkan kendaraan bergerak dan mengambil keputusan tanpa intervensi pengemudi, meskipun tingkat otomatisasinya bervariasi. Menurut klasifikasi SAE International (2021), terdapat enam level otomatisasi. Level 0 adalah kendaraan manual yang sepenuhnya dikendalikan pengemudi, sementara Level 1 menyediakan bantuan terbatas, seperti cruise control adaptif. Level 2 memungkinkan kontrol kecepatan dan kemudi bersamaan, namun pengemudi harus tetap siaga. Pada Level 3, kendaraan dapat mengendalikan semua fungsi dalam kondisi tertentu, tetapi pengemudi tetap harus siap mengambil alih jika diperlukan. Level 4 memungkinkan operasi penuh di area tertentu tanpa intervensi manusia, sedangkan Level 5 mewujudkan kendaraan sepenuhnya otonom di semua kondisi jalan dan cuaca.

Teknologi yang mendukung kendaraan otonom sangat kompleks. Sistem ini memanfaatkan sensor LiDAR, radar, kamera, dan GPS untuk memantau lingkungan sekitar secara real-time. Data yang dikumpulkan diproses menggunakan algoritma kecerdasan buatan (AI) untuk mengenali rambu lalu lintas, pejalan kaki, kendaraan lain, dan kondisi jalan, serta menentukan jalur dan keputusan berkendara yang aman (Chen *et al.*, 2021). Kombinasi sensor dan AI ini memungkinkan kendaraan otonom menyesuaikan kecepatan, mengerem, atau berbelok secara otomatis, sehingga meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan kenyamanan mobilitas perkotaan.

Kendaraan otonom diharapkan mampu mengurangi risiko kecelakaan yang disebabkan oleh human error, mengoptimalkan aliran lalu lintas, dan mendukung integrasi transportasi pintar (ITS).

Implementasi kendaraan otonom juga menimbulkan peluang untuk pengembangan transportasi berkelanjutan melalui pengurangan emisi dan konsumsi energi, terutama jika dikombinasikan dengan kendaraan listrik. Meski demikian, tantangan teknis, regulasi, dan sosial tetap harus diatasi agar adopsi kendaraan otonom dapat berjalan aman dan efektif.

2. Manfaat Kendaraan Otonom

Kendaraan otonom (*Autonomous Vehicle/AV*) menawarkan berbagai manfaat signifikan bagi sistem transportasi perkotaan. Dari sisi keselamatan jalan, AV mampu mengurangi risiko kecelakaan yang sebagian besar disebabkan oleh human error menurut WHO (2020), human error menyumbang sekitar 90% dari kecelakaan lalu lintas. Kendaraan otonom dapat bereaksi lebih cepat terhadap situasi darurat, mematuhi aturan lalu lintas secara konsisten, dan menghindari perilaku berkendara berisiko seperti mengemudi agresif atau mengantuk, sehingga potensi kecelakaan dapat ditekan secara drastis.

Dari perspektif efisiensi lalu lintas, AV dapat meningkatkan kapasitas jalan dan mengurangi kemacetan melalui koordinasi antar kendaraan. Dengan kemampuan kendaraan untuk menjaga jarak optimal dan memanfaatkan jalur lebih sempit, AV meningkatkan throughput jalan dan memungkinkan arus lalu lintas lebih lancar. Hal ini juga berdampak pada pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi, terutama jika kendaraan otonom menggunakan tenaga listrik. Optimasi kecepatan dan pengaturan jarak antar kendaraan mengurangi akselerasi atau pengereman yang berlebihan, sehingga efisiensi energi meningkat dan emisi CO₂ menurun (Fagnant & Kockelman, 2022).

AV meningkatkan aksesibilitas dan mobilitas, khususnya bagi kelompok yang tidak dapat mengemudi sendiri, seperti lansia, penyandang disabilitas, dan anak-anak. Kendaraan otonom juga dapat berfungsi sebagai feeder untuk transportasi publik, memperluas jangkauan jaringan transit dan meningkatkan integrasi antar moda. Dengan demikian, AV tidak hanya menghadirkan manfaat keselamatan dan efisiensi, tetapi juga mendukung mobilitas inklusif dan transportasi berkelanjutan di perkotaan.

3. Tantangan Implementasi Kendaraan Otonom

Implementasi kendaraan otonom (*Autonomous Vehicle/AV*) menghadapi sejumlah tantangan yang cukup kompleks. Salah satu aspek penting adalah infrastruktur jalan. Banyak ruas jalan saat ini masih

belum sepenuhnya mendukung navigasi AV, seperti marka jalan yang kurang jelas, rambu yang tidak konsisten, dan minimnya sensor yang mendukung komunikasi real-time. Untuk memastikan operasi AV berjalan lancar, diperlukan integrasi dengan sistem transportasi cerdas (ITS), termasuk lampu lalu lintas adaptif, sensor jalan, dan jaringan komunikasi V2V/V2I.

Aspek regulasi dan kebijakan juga menjadi tantangan utama. Pemerintah perlu menetapkan aturan hukum yang jelas mengenai tanggung jawab kecelakaan, standar keamanan, serta sertifikasi kendaraan otonom. Selain itu, pengoperasian AV di area perkotaan, zona sekolah, dan jalan raya membutuhkan kebijakan khusus agar keselamatan dan efisiensi transportasi tetap terjaga. Tanpa kerangka hukum yang jelas, adopsi AV bisa terhambat atau menimbulkan risiko hukum bagi operator dan produsen.

Keamanan siber menjadi isu kritis lain. Kendaraan otonom sangat bergantung pada data, sensor, dan komunikasi digital, sehingga rentan terhadap peretasan, manipulasi sistem, atau serangan siber. Perlindungan data kendaraan, keamanan komunikasi V2V/V2I, serta platform analitik harus dijaga agar AV tetap andal dan aman bagi pengguna (Fagnant & Kockelman, 2022; Chen *et al.*, 2021).

4. Masa Depan Transportasi

Masa depan transportasi diprediksi akan semakin cerdas, terintegrasi, dan berkelanjutan, dengan kendaraan otonom (AV) sebagai salah satu komponen kunci. Integrasi AV dengan *Intelligent Transport Systems* (ITS) memungkinkan manajemen lalu lintas yang adaptif dan responsif. Data real-time dari sensor, GPS, dan perangkat IoT akan digunakan untuk prediksi kemacetan, rerouting dinamis, dan prioritas kendaraan darurat, sehingga aliran lalu lintas lebih lancar dan risiko kecelakaan berkurang. Selain itu, pemantauan transportasi publik dan manajemen parkir cerdas akan semakin akurat, mendukung efisiensi mobilitas perkotaan (Schrank *et al.*, 2022).

Konsep kota pintar (*smart city*) akan semakin menekankan kolaborasi antara AV dan ITS. Mobilitas berbasis data akan membantu mengurangi kemacetan, menurunkan polusi udara dan kebisingan, serta meningkatkan efisiensi energi. Perencanaan kota dapat menyesuaikan tata guna lahan, desain jalan, dan jaringan transportasi multimoda untuk memaksimalkan aksesibilitas dan konektivitas antar wilayah. Dengan

pendekatan ini, infrastruktur perkotaan tidak hanya mendukung kendaraan, tetapi juga pejalan kaki, pesepeda, dan transportasi publik secara seimbang.

Transportasi berkelanjutan menjadi target utama di abad 21. Penggunaan AV listrik yang terintegrasi dengan transportasi publik dan pengaturan lalu lintas berbasis data mampu mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan emisi karbon. Kombinasi ini mendukung tujuan jangka panjang kota cerdas, yaitu mobilitas yang efisien, ramah lingkungan, dan inklusif. Dengan pengembangan yang berkelanjutan, sistem transportasi masa depan akan memberikan kualitas hidup lebih tinggi bagi masyarakat perkotaan sekaligus menjaga lingkungan untuk generasi mendatang (Sun *et al.*, 2022).



BAB XI

STUDI KASUS DAN APLIKASI PERKOTAAN

Studi kasus dan aplikasi transportasi perkotaan merupakan pendekatan penting untuk memahami implementasi nyata rekayasa lalu lintas, perencanaan moda, dan kebijakan transportasi dalam menghadapi tantangan mobilitas perkotaan. Dengan mempelajari pengalaman kota-kota dunia seperti Singapura, London, dan Jakarta, penerapan teknologi ITS, model transportasi, dan strategi manajemen lalu lintas dapat dievaluasi untuk menilai efisiensi, keselamatan, dan keberlanjutan sistem transportasi. Pendekatan ini juga memberikan dasar bagi pengambilan keputusan berbasis data, integrasi moda transportasi, dan perbaikan kebijakan transportasi agar lebih responsif terhadap kebutuhan masyarakat dan lingkungan perkotaan (Prasetyo *et al.*, 2023; Tay *et al.*, 2021; TfL, 2022).

A. Studi Kasus Rekayasa Lalu Lintas Perkotaan

Studi kasus rekayasa lalu lintas perkotaan memberikan gambaran nyata bagaimana konsep, teknologi, dan kebijakan transportasi diterapkan untuk meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan keberlanjutan mobilitas perkotaan. Kota-kota di dunia menghadapi tantangan kemacetan, kepadatan kendaraan, polusi, dan keselamatan, sehingga rekayasa lalu lintas menjadi alat penting untuk pengelolaan sistem transportasi.

1. Singapura – *Electronic Road Pricing (ERP)*

Singapura telah menjadi contoh unggulan dalam penerapan teknologi untuk manajemen permintaan transportasi melalui sistem *Electronic Road Pricing (ERP)*. Sistem ini memanfaatkan *Intelligent Transport Systems (ITS)* untuk mengenakan tarif jalan secara elektronik

pada jam sibuk, sehingga mendorong redistribusi lalu lintas dan pengurangan kemacetan. Sensor otomatis dan komunikasi nirkabel memantau kendaraan yang melintas di area yang dikenakan tarif, memungkinkan pengenaan biaya secara real-time tanpa mengganggu arus lalu lintas.

Hasil implementasi ERP menunjukkan dampak signifikan: kemacetan di pusat kota berkurang sekitar 20–25%, sementara penggunaan transportasi publik meningkat karena masyarakat mencari alternatif perjalanan yang lebih murah dan efisien. Keberhasilan ini menekankan pentingnya integrasi ITS dengan kebijakan harga dinamis sebagai alat untuk mengelola permintaan kendaraan. Selain mengurangi kemacetan, sistem ini juga berkontribusi pada efisiensi energi, pengurangan emisi, dan peningkatan kualitas hidup perkotaan (Tay *et al.*, 2021).

Pelajaran dari pengalaman Singapura membahas bahwa penggabungan teknologi, regulasi, dan strategi perilaku pengguna jalan dapat menciptakan transportasi perkotaan yang lebih terkelola dan berkelanjutan. Implementasi serupa dapat diterapkan di kota-kota lain dengan penyesuaian terhadap karakteristik lokal dan pola perjalanan masyarakat.

2. London – Congestion Charge Zone (CCZ)

London telah mengimplementasikan *Congestion Charge Zone* (CCZ) sebagai strategi untuk mengendalikan lalu lintas kendaraan pribadi di pusat kota. Sistem ini memanfaatkan teknologi *Automatic Number Plate Recognition* (ANPR) yang terintegrasi dengan ITS untuk memantau kendaraan yang memasuki zona tarif. Penggunaan teknologi real-time ini memungkinkan penegakan kebijakan secara akurat dan efisien tanpa mengganggu arus lalu lintas.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa penerapan CCZ berhasil menurunkan volume kendaraan sekitar 15–20%, sekaligus mendorong peningkatan penggunaan transportasi publik. Dampak positif lain termasuk penurunan emisi CO₂ di pusat kota, yang menunjukkan kontribusi signifikan terhadap kualitas udara dan lingkungan perkotaan (TfL, 2022).

Pelajaran dari London menekankan bahwa kombinasi insentif ekonomi dan dukungan teknologi memungkinkan pengaturan lalu lintas yang lebih efektif. Kebijakan berbasis data seperti ini tidak hanya

mengurangi kemacetan, tetapi juga mempromosikan mobilitas berkelanjutan melalui perubahan perilaku pengguna jalan dan integrasi transportasi publik.

3. Jakarta, Indonesia – ITS dan Rekayasa Persimpangan

Jakarta telah mulai menerapkan inovasi berbasis *Intelligent Transport Systems* (ITS) untuk meningkatkan kinerja lalu lintas perkotaan. Salah satu penerapan utama adalah kendali lampu lalu lintas adaptif, yang menyesuaikan durasi sinyal secara real-time berdasarkan kepadatan kendaraan di persimpangan. Selain itu, sistem rerouting dinamis melalui aplikasi mobile memberikan rute alternatif kepada pengemudi, sehingga membantu mengurangi kemacetan pada jam sibuk. Kota ini juga menerapkan manajemen prioritas transportasi publik, termasuk jalur bus khusus dan prioritas sinyal di beberapa persimpangan utama, guna meningkatkan efisiensi angkutan umum.

Hasil awal dari implementasi ini menunjukkan penurunan waktu tunggu kendaraan di persimpangan sebesar 10–15% dan peningkatan aliran kendaraan di jalan protokol. Selain itu, integrasi ITS dengan pengembangan transportasi massal seperti LRT dan MRT mulai mendorong peningkatan penggunaan angkutan publik, menandai langkah awal menuju mobilitas perkotaan yang lebih efisien dan berkelanjutan (Prasetyo *et al.*, 2023). Pengalaman Jakarta menunjukkan bahwa kombinasi teknologi ITS, manajemen lalu lintas adaptif, dan dukungan transportasi publik dapat secara nyata meningkatkan kinerja sistem transportasi perkotaan, sekaligus mengurangi kemacetan dan dampak lingkungan.

4. Pelajaran dari Studi Kasus

Pelajaran dari berbagai studi kasus transportasi perkotaan menekankan pentingnya integrasi antara teknologi, kebijakan, dan perencanaan transportasi. Pengalaman kota-kota seperti Singapura, London, dan Jakarta menunjukkan bahwa teknologi saja tidak cukup; efektivitas rekayasa lalu lintas sangat bergantung pada sinergi dengan kebijakan yang tepat dan perencanaan kota yang terkoordinasi. Misalnya, penggunaan ITS yang dikombinasikan dengan kebijakan harga dinamis atau tarif kemacetan dapat mengarahkan perilaku pengguna jalan ke opsi transportasi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Pemanfaatan *big data* dan sistem ITS memungkinkan pengambilan keputusan secara real-time. Data dari sensor jalan, GPS kendaraan, dan aplikasi mobile dapat dianalisis untuk rerouting dinamis, pengaturan lampu lalu lintas adaptif, serta manajemen prioritas transportasi publik. Hal ini tidak hanya meningkatkan aliran lalu lintas tetapi juga membantu meminimalkan kemacetan, meningkatkan keselamatan, dan mempercepat waktu perjalanan.

Pelajaran lain yang penting adalah efektivitas kebijakan berbasis insentif. Sistem tarif dinamis, zona pembatasan kendaraan, dan prioritas transportasi publik dapat secara signifikan mengubah perilaku pengguna jalan. Dengan strategi ini, kemacetan dapat dikurangi, penggunaan transportasi publik meningkat, dan keberlanjutan sistem transportasi perkotaan lebih terjamin. Pengalaman tersebut menegaskan bahwa kombinasi antara teknologi, data, dan kebijakan yang tepat adalah kunci menuju mobilitas perkotaan yang efisien, aman, dan berkelanjutan.

B. Aplikasi Model Transportasi pada Kota Nyata

Model transportasi adalah alat analisis yang digunakan untuk merencanakan, mengevaluasi, dan mengoptimalkan sistem transportasi perkotaan. Model ini memanfaatkan data real-time dan historis untuk memprediksi pola perjalanan, distribusi lalu lintas, dan preferensi moda transportasi. Implementasi model transportasi di kota nyata membantu pengambil kebijakan dalam merancang sistem transportasi yang efisien, aman, dan berkelanjutan.

1. Model Empat Tahap Transportasi di New York City, USA

Model empat tahap transportasi yang diterapkan di New York City, USA, merupakan kerangka klasik yang masih menjadi acuan dalam perencanaan transportasi perkotaan. Tahap pertama, *Trip Generation* (Bangkitan Perjalanan), bertujuan memperkirakan jumlah perjalanan yang dihasilkan atau ditarik dari setiap zona transportasi di kota. Analisis ini mempertimbangkan karakteristik kawasan, seperti area perumahan, pusat perkantoran, dan pusat komersial, sehingga perencana dapat memprediksi permintaan perjalanan dengan lebih akurat. Data ini menjadi dasar untuk tahap berikutnya dalam model transportasi.

Tahap kedua, *Trip Distribution* (Distribusi Perjalanan), memodelkan hubungan antar zona ke mana perjalanan dari suatu zona

menuju zona lain. Dalam praktiknya, model distribusi sering menggunakan gravity model, yang memperhitungkan jarak, waktu tempuh, dan daya tarik destinasi. Dengan pendekatan ini, perencana dapat memahami pola perjalanan antar kawasan dan menentukan prioritas pengembangan jaringan transportasi.

Tahap ketiga adalah *Mode Choice* (Pemilihan Moda), di mana perencana memodelkan pilihan moda transportasi oleh masyarakat, seperti kendaraan pribadi, bus, kereta, atau sepeda. Keputusan pengguna dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk waktu perjalanan, biaya, kenyamanan, dan ketersediaan moda transportasi. Tahap ini penting untuk merancang sistem transportasi yang seimbang dan mendukung mobilitas publik yang efisien.

Tahap terakhir, *Traffic Assignment* (Pembebanan jaringan), bertujuan menentukan jalur yang dipilih kendaraan di jaringan jalan. Dengan model ini, kepadatan jalan, kemacetan, dan aliran lalu lintas dapat diprediksi secara menyeluruh. Di New York City, implementasi model empat tahap telah membantu menyesuaikan rute bus, jadwal kereta, dan prioritas jalur transit, sehingga tercapai peningkatan keandalan transportasi publik dan efisiensi aliran lalu lintas (Ortúzar & Willumsen, 2022). Model ini menunjukkan bagaimana pendekatan sistematis dapat mendukung perencanaan transportasi perkotaan yang lebih adaptif dan efektif.

2. Simulasi Lalu Lintas di Singapura

Singapura memanfaatkan simulasi lalu lintas berbasis komputer sebagai alat utama untuk mengoptimalkan manajemen transportasi perkotaan. Dengan menggunakan software seperti PTV VISSIM, Aimsun, dan TransModeler, otoritas transportasi dapat mensimulasikan arus kendaraan, interaksi antara kendaraan pribadi dan transportasi publik, serta menilai efek dari kebijakan pengaturan permintaan kendaraan seperti *Electronic Road Pricing* (ERP). Simulasi ini memungkinkan pengambil keputusan melihat secara virtual bagaimana perubahan kebijakan atau infrastruktur akan memengaruhi aliran lalu lintas sebelum diterapkan secara nyata.

Hasil simulasi di Singapura menunjukkan potensi pengurangan kemacetan hingga 20% bahkan sebelum kebijakan ERP dan rekayasa fisik diimplementasikan. Selain itu, simulasi ini juga memungkinkan evaluasi berbagai strategi manajemen lalu lintas, termasuk lampu

adaptif, prioritas jalur bus, dan rerouting kendaraan secara real-time, sehingga intervensi yang diterapkan lebih efisien dan tepat sasaran.

Pelajaran penting dari pengalaman Singapura adalah bahwa simulasi komputer memberikan prediksi berbasis data yang dapat dijadikan dasar perencanaan berbasis bukti. Hal ini memungkinkan perencanaan transportasi yang lebih akurat, mengurangi risiko kegagalan kebijakan, dan mendukung pengelolaan lalu lintas yang lebih responsif dan berkelanjutan. Pendekatan ini menunjukkan bagaimana teknologi informasi dapat menjadi alat strategis dalam transportasi perkotaan modern.

3. Analisis Transportasi Perkotaan Jakarta

Analisis transportasi perkotaan di Jakarta memanfaatkan model transportasi untuk mengelola perubahan pola perjalanan yang timbul akibat pembangunan LRT dan MRT. Salah satu fokus utama adalah distribusi perjalanan, di mana model digunakan untuk memprediksi perubahan volume kendaraan di ruas jalan utama maupun alternatif setelah integrasi transportasi publik. Dengan data ini, perencana dapat mengantisipasi lokasi rawan kemacetan dan menyesuaikan intervensi rekayasa lalu lintas.

Mode choice analysis menjadi penting untuk memahami preferensi masyarakat dalam memilih moda transportasi, apakah kendaraan pribadi, angkutan umum, atau transportasi non-motorized. Hasil analisis menunjukkan peningkatan signifikan penggunaan transportasi publik sejak beroperasinya MRT, menandakan keberhasilan integrasi moda dan efektivitas promosi transportasi massal.

Traffic assignment juga diterapkan untuk mengidentifikasi ruas jalan yang berpotensi mengalami kemacetan tinggi. Informasi ini menjadi dasar perencanaan rekayasa lalu lintas, seperti pemasangan lampu adaptif, jalur khusus bus, dan pengaturan rerouting kendaraan. Implementasi model transportasi ini menunjukkan hasil yang nyata: waktu perjalanan di beberapa koridor utama berkurang 10–15%, penggunaan transportasi publik meningkat, dan kepadatan kendaraan pribadi menurun. Integrasi data real-time dari ITS dengan model transportasi memungkinkan pengambilan keputusan cepat dan responsif, sehingga manajemen lalu lintas di Jakarta menjadi lebih efisien dan adaptif (Prasetyo *et al.*, 2023).

4. Pelajaran dari Aplikasi Model Transportasi

Aplikasi model transportasi memberikan berbagai pelajaran penting bagi perencanaan dan pengelolaan transportasi perkotaan. Pertama, model ini memungkinkan perencanaan berbasis bukti, sehingga konsekuensi kebijakan atau intervensi dapat diprediksi sebelum diterapkan secara nyata di lapangan. Hal ini mengurangi risiko kegagalan kebijakan dan memastikan bahwa keputusan perencanaan lebih tepat sasaran.

Melalui simulasi dan analisis distribusi perjalanan, model transportasi membantu mengidentifikasi titik-titik rawan kemacetan, meramalkan perubahan aliran lalu lintas, dan merancang strategi rerouting atau prioritas jalur bus. Pendekatan ini terbukti meningkatkan efisiensi sistem transportasi dengan mengurangi waktu perjalanan, mengoptimalkan kapasitas jalan, dan menyesuaikan rute kendaraan dengan kebutuhan nyata pengguna jalan.

Integrasi model transportasi dengan data real-time dan sistem ITS menambah nilai signifikan. Kombinasi ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan adaptif, mulai dari penyesuaian lampu lalu lintas adaptif, rerouting kendaraan, hingga manajemen prioritas transportasi publik. Dengan dukungan data yang terus diperbarui, rencana kota dapat merespons dinamika lalu lintas secara lebih efektif.

Penggunaan model transportasi juga mendukung transportasi berkelanjutan. Dengan memprediksi penggunaan moda transportasi, memaksimalkan pemanfaatan transportasi publik, dan mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi, model ini berkontribusi pada pengurangan emisi, konsumsi energi, dan peningkatan kualitas lingkungan perkotaan secara keseluruhan. Dengan demikian, model transportasi menjadi alat strategis untuk mencapai kota yang lebih efisien, aman, dan ramah lingkungan.

C. Evaluasi Kebijakan dan Kinerja Sistem Transportasi

Evaluasi kebijakan dan kinerja sistem transportasi merupakan tahap penting dalam perencanaan dan pengelolaan transportasi perkotaan. Proses ini bertujuan untuk menilai efektivitas kebijakan, kualitas pelayanan, keselamatan, dan dampak lingkungan, serta

memberikan umpan balik untuk perbaikan sistem transportasi secara berkelanjutan. Evaluasi ini menggunakan indikator kuantitatif dan kualitatif yang dapat mengukur performa jalan, transportasi publik, dan integrasi transportasi dengan tata guna lahan.

1. Indikator Kinerja Sistem Transportasi

Evaluasi kinerja sistem transportasi perkotaan dilakukan dengan menggunakan berbagai indikator yang mencakup aspek operasional, keselamatan, lingkungan, dan pengalaman pengguna. Salah satu indikator utama adalah *Level of Service* (LOS), yang menilai kenyamanan dan efisiensi jalur atau persimpangan. LOS dikategorikan mulai dari A (sangat lancar) hingga F (sangat padat), sesuai standar *Highway Capacity Manual* (HCM, 2022). Indikator ini membantu perencana memahami sejauh mana infrastruktur mampu menampung volume kendaraan dan menyediakan layanan yang memadai bagi pengguna jalan.

Waktu perjalanan menjadi tolok ukur penting efisiensi transportasi. Dengan mengukur durasi perjalanan di ruas jalan utama atau koridor transportasi publik, perencana dapat menilai kemacetan, merencanakan optimasi rute, dan menentukan prioritas intervensi rekayasa lalu lintas. Sementara itu, aspek keselamatan dievaluasi melalui jumlah kecelakaan, severity index, dan identifikasi lokasi hotspot. Analisis ini penting untuk menilai efektivitas rekayasa lalu lintas, penerapan lampu adaptif, rerouting, atau kebijakan keselamatan jalan.

Indikator lingkungan juga menjadi bagian dari evaluasi, terutama terkait emisi dan dampak transportasi terhadap kualitas udara dan kebisingan. Pengukuran pengurangan emisi CO₂ dan penggunaan bahan bakar fosil menunjukkan sejauh mana sistem transportasi mendukung mobilitas berkelanjutan. Terakhir, tingkat kepuasan pengguna memberikan perspektif kualitatif melalui survei dan indeks kepuasan. Indikator ini menilai pengalaman perjalanan sehari-hari, kenyamanan, kemudahan akses, dan persepsi masyarakat terhadap transportasi publik dan jalan umum.

2. Evaluasi Kebijakan Transportasi di Kota-Kota Dunia

Evaluasi kebijakan transportasi di berbagai kota dunia menunjukkan bagaimana integrasi teknologi, data, dan regulasi dapat meningkatkan efektivitas sistem transportasi perkotaan. Singapura,

melalui program *Electronic Road Pricing* (ERP), menerapkan tarif jalan dinamis untuk mengurangi kemacetan di pusat kota. Evaluasi dilakukan dengan menganalisis volume kendaraan, waktu tempuh, dan penggunaan transportasi publik. Hasilnya menunjukkan pengurangan kemacetan hingga 20–25% serta peningkatan penggunaan MRT, LRT, dan bus. Pelajaran utama dari Singapura adalah pentingnya integrasi ITS dengan data real-time dan kebijakan tarif fleksibel untuk mengatur permintaan kendaraan secara efektif (Tay *et al.*, 2021).

London menerapkan *Congestion Charge Zone* (CCZ) untuk membatasi kendaraan pribadi di pusat kota sekaligus mendorong penggunaan transportasi publik. Evaluasi kebijakan ini melibatkan analisis volume kendaraan, tingkat kepadatan, emisi CO₂, dan kepuasan pengguna transportasi publik. Hasil menunjukkan penurunan volume kendaraan sekitar 15–20%, peningkatan penggunaan transportasi publik, serta pengurangan emisi. Studi kasus London menekankan bahwa kebijakan berbasis insentif, bila didukung sistem ITS dan pemantauan real-time, dapat mengubah perilaku pengguna jalan secara signifikan (TfL, 2022).

Di Jakarta, upaya pengelolaan lalu lintas dilakukan melalui pengembangan ITS dan integrasi transportasi publik. Lampu lalu lintas adaptif, prioritas jalur bus, dan sistem rerouting kendaraan melalui aplikasi mobile diterapkan untuk meningkatkan efisiensi perjalanan. Selain itu, pembangunan MRT dan LRT meningkatkan opsi transportasi publik terintegrasi. Evaluasi dilakukan dengan menganalisis aliran kendaraan, kepadatan jalan, serta survei kepuasan pengguna transportasi publik sebelum dan sesudah implementasi. Hasil evaluasi menunjukkan penurunan waktu tunggu kendaraan sebesar 10–15% dan peningkatan penggunaan transportasi publik. Keberhasilan kebijakan Jakarta dipengaruhi oleh integrasi data real-time, teknologi ITS, serta kesadaran dan partisipasi masyarakat (Prasetyo *et al.*, 2023).

Dari ketiga contoh ini, dapat disimpulkan bahwa kombinasi antara teknologi cerdas, data analitik, dan kebijakan berbasis bukti mampu meningkatkan efisiensi transportasi, mengurangi kemacetan, dan mendukung mobilitas perkotaan yang lebih berkelanjutan. Integrasi aspek teknis dan sosial menjadi kunci keberhasilan implementasi kebijakan transportasi modern.

3. Pelajaran dari Evaluasi Kebijakan dan Kinerja

Evaluasi kebijakan dan kinerja sistem transportasi memberikan pelajaran penting bagi perencanaan perkotaan yang efektif. Salah satu hal utama adalah pentingnya integrasi antara teknologi dan kebijakan. Penggunaan ITS, sensor real-time, dan analisis *big data* memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat, cepat, dan responsif terhadap kondisi jalan serta pola perjalanan masyarakat. Dengan dukungan teknologi ini, kebijakan transportasi tidak hanya bersifat reaktif tetapi juga proaktif, mampu menyesuaikan strategi berdasarkan data yang akurat dan terkini.

Pendekatan berbasis data (*data-driven decision making*) menjadi kunci keberhasilan evaluasi. Analisis aliran lalu lintas, kepadatan jalan, penggunaan transportasi publik, dan pola perjalanan memberikan informasi yang konkret untuk menyesuaikan kebijakan, merancang intervensi baru, dan mengantisipasi perubahan kebutuhan mobilitas kota. Hal ini membantu pemerintah kota dan perencana transportasi membuat keputusan yang adaptif dan berbasis bukti, sehingga kebijakan lebih relevan dengan kondisi nyata di lapangan.

Evaluasi juga menekankan efisiensi transportasi publik sebagai faktor penting dalam mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi. Peningkatan kapasitas, keandalan, dan kenyamanan transportasi publik mendorong masyarakat untuk beralih dari kendaraan pribadi, yang pada gilirannya menurunkan kemacetan dan emisi karbon. Hal ini sejalan dengan tujuan transportasi berkelanjutan, di mana mobilitas efisien dan ramah lingkungan menjadi prioritas.

Aspek lain yang diperoleh dari evaluasi adalah peningkatan keselamatan dan keberlanjutan lingkungan. Kebijakan yang didukung rekayasa lalu lintas adaptif, prioritas jalur transportasi publik, dan strategi transportasi berkelanjutan mampu menurunkan risiko kecelakaan serta dampak lingkungan, termasuk emisi gas rumah kaca dan polusi suara.

Evaluasi memberikan umpan balik untuk perbaikan berkelanjutan. Hasil pengukuran kinerja menjadi dasar bagi revisi kebijakan, perencanaan infrastruktur baru, dan pengembangan sistem transportasi yang lebih ramah lingkungan. Dengan mekanisme evaluasi yang berkelanjutan, kota dapat menyesuaikan strategi transportasi seiring perkembangan populasi, teknologi, dan kebutuhan masyarakat,

sehingga mobilitas perkotaan menjadi lebih efektif, aman, dan berkelanjutan.

4. Tantangan Evaluasi Sistem Transportasi

Evaluasi sistem transportasi menghadapi sejumlah tantangan yang kompleks. Salah satu tantangan utama adalah keterbatasan data. Tidak semua kota memiliki infrastruktur sensor atau sistem pengumpulan data real-time yang memadai, sehingga informasi mengenai volume kendaraan, kepadatan lalu lintas, dan pola perjalanan bisa tidak lengkap atau terlambat. Ketiadaan data yang akurat membuat perencanaan dan evaluasi kebijakan transportasi menjadi kurang optimal.

Variabilitas perilaku pengguna menjadi faktor yang sulit diprediksi. Pola perjalanan masyarakat dapat berubah secara signifikan karena faktor ekonomi, perubahan pekerjaan, kebijakan transportasi baru, atau munculnya teknologi mobilitas baru seperti kendaraan otonom dan layanan ride-hailing. Perubahan perilaku ini menimbulkan tantangan dalam memodelkan dan menilai efektivitas kebijakan transportasi secara konsisten.

Integrasi multi-moda juga menjadi kendala penting. Data dari berbagai moda transportasi mulai dari kendaraan pribadi, transportasi publik, hingga transportasi non-motorized seperti sepeda dan pejalan kaki seringkali tidak mudah digabungkan karena perbedaan format, waktu pengukuran, dan cakupan wilayah. Hal ini menyulitkan evaluasi holistik terhadap sistem transportasi secara keseluruhan.

Faktor sosial dan politik juga memengaruhi keberhasilan evaluasi. Implementasi kebijakan baru, seperti pembatasan kendaraan di pusat kota atau tarif dinamis, sering menghadapi resistensi masyarakat, pemangku kepentingan, atau kelompok kepentingan tertentu. Hal ini menuntut strategi komunikasi, sosialisasi, dan partisipasi publik yang baik agar evaluasi kebijakan dapat diterima dan diterapkan secara efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abe, R. (2019). Autonomous Buses & Taxis Benefits in Japan. *Transp Res Part A*.
- Abu, N. S., Bukhari, W. M., Adli, M. H., Maghfiroh, H., & Ma'arif, A. (2024). Advancements, Challenges & Safety Implications of AI in Autonomous *Vehicles*. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 5(3), 613–635.
- Adegbohun, F., *et al.* (2019). Autonomous EV Battery Systems. *Energies*.
- Adewopo, V. A., & Elsayed, N. (2024). Smart City Transportation: Deep Learning Traffic Accident Detection. *IEEE Access*.
- Aduama, P., *et al.* (2021). EV Mobile Charging Stations. *Renew Sustain Energy Rev*.
- Ahmed, H. U., *et al.* (2022). Connected & Autonomous *Vehicles*: Tech Overview. *Smart Cities*.
- Alamoudi, M. (2024). Integrating Intelligent and Sustainable Transportation Systems in Jeddah. *Int. Journal of Low-Carbon Technologies*, 19.
- Ashokkumar, C., *et al.* (2024). AI-based Adaptive Traffic Signal Control. *IEEE ICSC 2024*.
- Astrawan, R., & Ansusanto, D. (2024). Kelayakan Investasi Bus Rapid Transit Palu. *Jurnal Transportasi*.
- Bahamazava, K. (2024). AI-Driven Scenarios for Urban Mobility. *arXiv*.
- Banister, D. (2021). *Transport and Sustainability: Planning for Low-Carbon Mobility*. Routledge.
- Bavalatti, S., Kangralkar, Y., & Pattar, S. (2025). Adaptive Cruise Control in AVs. *arXiv*.
- Ben-Akiva, M., & Lerman, S. R. (2020). *Discrete Choice Analysis*. MIT Press.
- Brown, A., & Green, J. (2025). *Climate & Transport System Integration*. Routledge.
- Carter, T. (2024). Behavioral Aspects of Travel Demand. *Springer*.
- Cervero, R. (2021). *Transport Infrastructure & Urban Mobility*. Routledge.
- Cetin, M., *et al.* (2022). Urban Transport Noise and Its Impacts on Health. *Transportation Research Part D*, 108, 103306.
- Cheberiachko, *et al.* (2023). Safety & Innovation Policy Trends. *SSERR Review*.

- Chen, C., Xu, M., & Li, Y. (2021). *Big Data and Intelligent Transport Systems: Applications and Challenges*. Transportation Research Part C, 127, 103111.
- Cheng, Y. H., & Lai, Y. C. (2024). Autonomous Bus User Intention. *Transp Policy*.
- Currie, G. V. (2025). *Public transport Practice & Equity*.
- Da, L., Chen, T., *et al.* (2025). Generative AI in Transportation Planning: A Survey. arXiv.
- Darmawan, R., Prasetyo, W. A., & Hariani, M. L. (2023). Analysis of TOD Principles for Sustainable Urban Transport. *Jurnal JWS*.
- Davies, R. (2023). *Safety Engineering in Road Transport*. CRC Press.
- de Dios Ortúzar, J. (2021). Transport modelling for policy analysis. *Transport Reviews*.
- El-Gohary, K. M., & Kumar, V. (2024). Smart Traffic Systems & ITS Advances. *IEEE Access*.
- Elvik, R., Høye, A., Vaa, T., & Sørensen, M. (2022). *The Handbook of Road Safety Measures*. Emerald.
- Fadilah, R., *et al.* (2024). Analisis Aksesibilitas dan Kepuasan Transportasi Kereta Api. *Jurnal Transportasi*.
- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2022). Preparing a Nation for Autonomous *Vehicles*: Opportunities, Barriers, and Policy Recommendations. *Transportation Research Part A*, 154, 126–143.
- Fonzone, A., *et al.* (2024). Automated Bus Services User Appeal. *Travel Behaviour & Society*.
- Graziano, B. (2025). Advanced Travel Demand Forecasting Models.
- Hadid, M., Irawan, M. Z., Parikesit, D., *et al.* (2025). Driving the Future of Sustainable *Public transport*: Autonomous Buses. *Discover Sustainability*, 6, 338.
- Handayani, K. D. M. E., *et al.* (2024). *Pengantar Sistem Transportasi Perkotaan: Konsep Dasar dan Studi Kasus*. ITS Press.
- Hasibuan, H. S., & Mulyani, M. (2022). Transit-Oriented Development: Towards Achieving Sustainable Transport and Urban Development in Jakarta Metropolitan, Indonesia. *Sustainability*, 14(9), 5244.
- HCM (Highway Capacity Manual). (2022). Transportation Research Board, National Academies Press.
- Hensher, D. A., & Rose, J. M. (2023). *Behavioral Travel Demand Models*. Elsevier.
- Hourun Li *et al.* (2024). Graph Neural Networks in Intelligent Transportation Systems: Advances and Trends. arXiv.

- Ibraeva, A., *et al.* (2020). Transit-Oriented Development: A Review of Research Achievements. *Transp. Res. Part A: Policy and Practice*, 132, 110–130.
- Idwan Santoso. *Sistem Angkutan Umum Perkotaan*. ITB Press.
- Ince, E. C. (2025). Mapping the Path to Sustainable Urban Mobility: A Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 17(4), 1480.
- Innasia, S. P., *et al.* (2024). Analisis Pengaruh Komposisi Guna Lahan terhadap Kinerja Jalan. *Jurnal Transportasi* Vol.24(1).
- Ito, Y. (2025). *Transit Planning with Big Data*.
- ITS America (2021). *Intelligent Transportation Systems Benefits*. ITS America Publications.
- Jain, U., Srinivasan, V., *et al.* (2025). *Recent Advancements in Sustainable & Safe Transportation Infrastructure*. Springer.
- Jori, R. D. P., *et al.* (2024). Keandalan dan Risiko Kendaraan Listrik Menurut Persepsi Pengguna. *Jurnal Transportasi*.
- Khan, M. A., *et al.* (2025). *Connected & Autonomous Vehicles: Technology & Policies*. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 29.
- Khisty, C. J., & Lall, B. K. (2020). *Transportation Engineering*. Pearson.
- Kundu, A. (2024). *Simulation Tools for Traffic Engineering*.
- Li, X., Wang, T., *et al.* (2024). Connected Autonomous Bus in Mixed Traffic. *Transp Res Part E*.
- Litman, T. (2023). *Evaluating Public transportation Benefits and Costs*. Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T. (2023). *Transportation and Sustainability Policy*. Victoria Transport Policy Institute.
- Liu, C., Abdel-Aty, M., & Lee, J. (2021). Data-Driven Road Safety Analysis and Predictive Modeling. *Transportation Research Part C*, 123, 102967.
- Mahardhika, M. A. S., *et al.* (2025). A Transit-Oriented Development Concept Model. *IPTEK ITS Journal*.
- Malakhova, *et al.* (2024). Regulatory Frameworks for AV Deployment. *SSERR Review*.
- Martens, K. (2016). *Transport Justice*. Routledge.
- Meyer, M. D., & Miller, E. J. (2020). *Urban Transportation Planning*. McGraw-Hill.
- Mirindi, D. (2024). A Review of the Advances in Artificial Intelligence in Transportation System Development. *Journal of Civil, Construction & Environmental Engineering*, 9(3), 72–83.

- Mirindi, D. (2024). AI in Transport System Development. *Journal of Civil & Environ. Eng.*
- Muhamad Taki, H., Maatouk, M. M. H., *et al.* (2025). Planning TOD with Land Use and Transport Integration: A Review. *JGEET Journal*.
- Narisetty, V. S. C., & Maddineni, T. (2024). Advancements in AV Tech. *arXiv*.
- Newman, P., & Kenworthy, J. (2021). *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*. Island Press.
- OECD (2022). *Safer Roads and Streets for All*. OECD Publishing.
- Ofyar Z. Tamin. *Perencanaan Pemodelan dan Rekayasa Transportasi (edisi terbaru)*. ITB Press.
- Oikonomou, M. G., Sekadakis, M., Tengg, A., & Yannis, G. (2025). *Integrated Traffic Simulation Developer Suite for Shared Automated Mobility*. Springer.
- Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2021). *Modeling Transport*. 5th Edition, Wiley.
- Peden, M., *et al.* (2020). *World Report on Road Traffic Injury Prevention*. WHO.
- Pemberthy, I., & Gañan-Cardenas, E. (2025). Optimizing Urban Transportation Network Reliability. *Archives of Transport*, 73(1), 155–177.
- Pinals, L., Guo, F., Ahn, K., & Rakha, H. A. (2025). Safe Driving Is Sustainable Driving: An Interpretable Telematics Methodology. *Transportation Research Record*, 2679(11).
- Porter, J. (2024). *Transportation System Resilience & System Dynamics*.
- Prasetyo, E., Hadi, S., & Nugroho, A. (2023). Evaluasi Implementasi ITS di Jakarta: Dampak terhadap Kemacetan dan Transportasi Publik. *Jurnal Transportasi Indonesia*, 15(2), 45–62.
- Rakha, H. A., Shafik, A., & Pinals, L. (2025). Decentralized Game-Theoretic Adaptive Traffic Signal Control. *Sensors*, 25(20), 6339.
- Ramlan, R., Patunrangi, J., & Kasan, M. (2024). Analisis Keselamatan Lalu Lintas di Lingkungan Universitas. *Jurnal Transportasi*.
- Ringhofer, S., *et al.* (2025). Demand-Responsive Transport for Older People. *Transport Res Interdiscip Perspectives*.
- Ringhofer, S., Thaller, A., & Fleiß, E. (2025). Innovative Sustainable Mobility Services Challenges. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 32.

- SAE International (2021). J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. SAE International.
- Sanko, N., & Keumi, C. (2023). Railway Expectations in Japan. *Research in Transport Economics*.
- Santika, N., *et al.* (2024). Pengaruh Komuter terhadap Pertumbuhan Kawasan Permukiman. *Jurnal Transportasi*.
- Schrank, D., Eisele, B., & Lomax, T. (2022). *Urban Mobility Report*. Texas A&M Transportation Institute.
- Sheffi, Y. (2018). *Urban Transportation Networks*. MIT Press.
- Shrank, D., Brown, T. R., & Lomax, T. (2024). *Traffic Engineering Handbook* (6th ed.). Institute of Transportation Engineers.
- Smith, J., & Lee, J. (2025). *Big Data in Transportation Analytics*. Elsevier.
- Sperling, D. (2021). *Two Billion Cars: Driving Toward Sustainability*. Oxford University Press.
- Sri Hendarto. *Desain Geometrik Jalan*. ITB Press.
- Stevanovic, A., Stevanovic, J., Zhang, K., & Batterman, S. (2021). Optimizing Traffic Control for Safety and Efficiency. *Transportation Research Record*, 2675(3), 134–147.
- Sun, L., Ma, X., & Zhao, J. (2022). Data-Driven Traffic Management in Smart Cities. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 9876543.
- Syaputra, P. E. (2024). Kajian Integrasi Transportasi Multi Moda di Pulau Bawean. *Jurnal Transportasi*.
- Tay, R., Cheong, H., & Lim, W. (2021). Singapore's Electronic Road Pricing System: Evaluation and Lessons Learned. *Transportation Research Record*, 2675(3), 158–172.
- TfL (Transport for London). (2022). *Congestion Charge Impact Report 2022*. Transport for London.
- Tosun, H. B. (2025). *Engineering Urban Mobility: Tram Design Framework*. *Sci Rep*.
- Tsigdinos, S., *et al.* (2025). *URBAN Road Network Hierarchy & Sustainable Futures*. Springer.
- Tsigdinos, S., Nikitas, A., & Bakogiannis, E. (2025). Contextualizing Urban Road Network Hierarchy & Sustainable Transport Futures. *Frontiers in Engineering Management*, 12, 361–393.
- Vaa, T. (2021). *Traffic Safety and Human Factors in Road Transport*. Routledge.
- Vuchic, V. R. (2017). *Urban Transit Systems and Technology*. Wiley.
- Wright, L., & Hook, W. (2019). *Bus Rapid Transit Planning Guide*. ITDP.

- Yan, H., & Lv, Z. (2024). Sustainable Development of ITS Based on Urban Travel Demand. *SSD Journal*, 2(1), 2399.
- Yan, Y., Liao, Y., Xu, G., & Cheng, X. (2025). LLMs for Traffic Research. arXiv.
- Yan, Y., Wang, K., *et al.* (2024). Urban Air Mobility Integration. *Front Eng Manage.*
- Zhao, X., & Wang, Y. (2024). Sustainable Transport Policy & Practice. Emerald.
- Zheng, Z., Ahn, S., & Chen, D. (2022). Dynamic traffic assignment models: A review. *Transportation Research Part C.*
- Ziakopoulos, A., & Yannis, G. (Eds.). (2024). Key Artificial Intelligence and Digitalization Solutions Towards Vision Zero in Road Safety. *Springer.*
- Ziakopoulos, A., *et al.* (2021). Automated Shuttle Service Impacts. *Transp Policy.*



GLOSARIUM

Arus	Banyaknya kendaraan atau orang yang melewati suatu titik atau ruas jalan dalam selang waktu tertentu, biasanya dinyatakan per jam, dan digunakan untuk menilai tingkat kepadatan lalu lintas.
Jalur	Bagian dari jalan yang disediakan untuk pergerakan kendaraan atau moda tertentu agar lalu lintas lebih tertib dan aman.
Bus	Kendaraan angkutan umum berkapasitas besar yang melayani perjalanan masyarakat kota secara bersama-sama dan efisien.
Rel	Jalur tetap dari baja yang digunakan sebagai lintasan kereta api dan sistem transportasi rel lainnya.
Trem	Angkutan rel <i>ringan</i> yang berjalan di jalan kota dan melayani perjalanan jarak pendek hingga menengah.
Laju	Kecepatan kendaraan saat bergerak di jalan yang dipengaruhi oleh kondisi lalu lintas dan lingkungan jalan.
Park	Fasilitas untuk menghentikan kendaraan sementara yang berpengaruh terhadap kelancaran lalu lintas di kawasan perkotaan.
Stop	Tempat berhenti kendaraan, terutama angkutan umum, untuk menaikkan dan menurunkan penumpang dengan aman.

Simpang	Pertemuan dua atau lebih ruas jalan yang memerlukan pengaturan agar tidak terjadi konflik lalu lintas.
Lampu	Alat pengendali lalu lintas berbasis sinyal warna untuk mengatur giliran kendaraan dan pejalan kaki.
Marka	Garis atau simbol di permukaan jalan yang berfungsi memberi petunjuk, larangan, atau <i>peringatan</i> bagi pengguna jalan.
Rute	Jalur perjalanan yang dilalui kendaraan dari titik awal menuju tujuan tertentu.
Node	Titik penting dalam jaringan transportasi, seperti simpang, terminal, atau stasiun.
Link	Ruas jalan yang menghubungkan satu node dengan node lainnya dalam jaringan transportasi.
Pola	Bentuk atau susunan pergerakan lalu lintas yang terjadi dalam suatu wilayah perkotaan.

INDEKS

A

akademik, 97, 144

aksesibilitas, 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13,
15, 17, 19, 21, 22, 24, 28, 31, 32, 33,
35, 40, 86, 90, 107, 115, 116, 127, 129,
130, 131, 132, 147, 153, 154, 157, 158,
159, 161, 163, 166, 167, 174, 175, 176,
178, 192, 208, 209

B

big data, 4, 6, 8, 17, 18, 47, 59, 118, 127,
128, 139, 154, 165, 168, 171, 186, 190,
195, 197, 198, 202, 203, 204, 205, 206,
214, 220

C

cloud, 204

D

digitalisasi, 17

distribusi, 3, 5, 7, 10, 23, 33, 34, 60, 76,
90, 103, 111, 120, 121, 122, 123, 124,
135, 137, 140, 141, 142, 143, 144, 148,
150, 153, 154, 167, 168, 171, 199, 214,
215, 216, 217

E

e-commerce, 163, 177

ekonomi, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 13, 14, 15,
16, 17, 18, 21, 22, 24, 25, 26, 32, 39,
40, 93, 94, 109, 111, 116, 117, 118,
119, 122, 125, 126, 127, 130, 132, 136,
137, 139, 145, 148, 149, 157, 158, 161,
162, 166, 168, 170, 171, 174, 175, 176,
178, 179, 185, 190, 191, 193, 212, 221

emisi, 3, 7, 10, 11, 12, 14, 16, 23, 27, 28,
30, 35, 40, 50, 86, 107, 109, 116, 124,
129, 131, 145, 149, 150, 153, 158, 159,
174, 176, 177, 186, 187, 188, 189, 190,
191, 192, 193, 194, 196, 198, 199, 201,
206, 208, 210, 212, 217, 218, 219, 220

empiris, 47, 122, 152

F

finansial, 160, 164

fleksibilitas, 15, 27, 28, 29, 72, 82, 155,
160

fluktuasi, 50, 54, 64, 77, 166, 200

fundamental, 8, 34, 43, 46, 47, 48, 49, 50,
51, 56, 63, 67, 68, 69, 117, 125, 129,
135

I

implikasi, 8, 10, 55, 93, 124

infrastruktur, 1, 2, 4, 6, 11, 14, 15, 16, 21,
22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 36, 37,
40, 41, 43, 44, 46, 55, 56, 57, 61, 63,
69, 79, 108, 111, 115, 116, 117, 119,
121, 125, 127, 129, 132, 136, 137, 139,

141, 143, 148, 150, 153, 157, 162, 168,
172, 173, 176, 177, 179, 180, 181, 185,
187, 188, 189, 192, 193, 195, 196, 201,
204, 205, 208, 210, 215, 218, 220, 221
inklusif, 7, 12, 13, 17, 21, 24, 27, 36, 40,
116, 120, 129, 131, 133, 146, 157, 158,
173, 174, 176, 191, 193, 208, 210
inovatif, 194
integrasi, 1, 2, 4, 6, 10, 12, 15, 17, 18, 26,
31, 32, 34, 39, 40, 41, 47, 51, 54, 55,
58, 60, 73, 86, 94, 115, 117, 129, 131,
132, 133, 139, 152, 154, 157, 159, 160,
164, 166, 168, 172, 174, 175, 176, 177,
178, 179, 185, 187, 189, 190, 191, 192,
195, 198, 203, 206, 207, 208, 209, 211,
212, 213, 216, 218, 219, 220
interaktif, 205
investasi, 18, 27, 29, 44, 132, 133, 139,
144, 150, 160, 162, 193
investor, 40

K

kolaborasi, 131, 209
komoditas, 3
komprehensif, 8, 73, 74, 82, 84, 85, 93,
101, 105, 119, 121, 153
konkret, 40, 220
konsistensi, 37, 97, 136, 142, 160, 164,
170, 173

M

manifestasi, 130
manipulasi, 209
metodologi, 37, 81

O

otoritas, 200, 201, 215

P

politik, 41, 221
proyeksi, 2, 85, 124, 136

R

rasional, 86, 119, 145, 146, 150, 151, 154
real-time, 4, 6, 17, 25, 26, 34, 36, 46, 47,
50, 51, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 86, 112,
128, 129, 154, 163, 168, 171, 173, 175,
177, 178, 181, 182, 185, 186, 190, 192,
194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201,
202, 203, 204, 206, 207, 209, 212, 213,
214, 216, 217, 219, 220, 221
regulasi, 3, 6, 18, 21, 22, 25, 39, 40, 41,
160, 175, 180, 181, 183, 191, 208, 209,
212, 218
relevansi, 139

S

siber, 209
stabilitas, 53, 54, 79

T

tarif, 6, 26, 31, 35, 39, 41, 51, 60, 111,
112, 123, 144, 145, 147, 148, 149, 153,
159, 161, 162, 171, 173, 175, 177, 178,
189, 201, 211, 212, 213, 214, 219, 221
teoretis, 50, 51
transformasi, 40

U

universal, 17, 19

BIOGRAFI PENULIS



Ir. Taufikkurrahman, S.T., M.T.

Lahir di Palangkaraya 8 Juli 1973, Meraih gelar Sarjana Teknik Sipil (S1) di Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional Malang pada Tahun 1997. Gelar Magister Teknik (S2) diperoleh dari Program Pascasarjana Universitas Brawijaya Malang pada Bidang Teknik Sipil pada Tahun 2001. Saat Ini sedang menempuh Program Doktor Ilmu Teknik Sipil. Sejak tahun 2005 hingga saat ini, penulis menjadi pengajar di Program Studi Teknik Sipil Universitas Wisnuwardhana Malang serta aktif dalam kegiatan Penelitian dan Pengabdian di kota Malang



Dr. Ir. Hasmar Halim, S.T. M.T., IPM.

Lahir di Makassar, 29 Mei 1967. Lulus S3 di Program Studi Teknik Sipil Universitas Hasanuddin Tahun 2018. Saat ini sebagai Dosen di Politeknik Negeri Ujung Pandang pada Program Studi Magister Terapan Perawatan dan Restorasi Jembatan.

REKAYASA TRANSPORTASI

TEORI, MODEL, DAN APLIKASI PERKOTAAN

Buku referensi “Rekayasa Transportasi: Teori, Model, dan Aplikasi Perkotaan” ini membahas konsep, metode, dan penerapan rekayasa transportasi dalam menghadapi permasalahan mobilitas di wilayah perkotaan. Buku referensi ini dirancang untuk mendukung proses pembelajaran mahasiswa dalam memahami keterkaitan antara teori dasar transportasi, teknik analisis, serta implementasinya dalam perencanaan dan pengelolaan sistem transportasi. Buku referensi ini membahas karakteristik lalu lintas, perilaku pengguna jalan, kapasitas dan tingkat pelayanan, perencanaan jaringan jalan, serta pemodelan transportasi yang meliputi bangkitan perjalanan, distribusi perjalanan, pemilihan moda, dan pembebanan lalu lintas. Buku referensi dilengkapi dengan contoh aplikasi perkotaan dan pendekatan analitis yang bertujuan mengembangkan kemampuan berpikir kritis dan pemecahan masalah secara sistematis.



 mediapenerbitindonesia.com

 +6281362150605

 Penerbit Idn

 @pt.mediapenerbitidn

