

2 LANDASAN TEORI

2.1 Lalu Lintas

Berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan (Pemerintah Indonesia, 2009), lalu lintas didefinisikan sebagai pergerakan kendaraan dan orang di ruang lalu lintas jalan. Ruang lalu lintas jalan merupakan prasarana yang diperuntukkan bagi perpindahan kendaraan, orang, serta barang, yang mencakup jalan dan fasilitas penumpang. Dalam sistem lalu lintas, terdapat tiga komponen utama yang saling berinteraksi, yaitu manusia, kendaraan, dan jalan, yang bersama-sama menentukan kelancaran pergerakan lalu lintas.

2.2 Karakteristik dan Kondisi Lalu Lintas

2.2.1 Arus Lalu Lintas

Data lalu lintas diklasifikasikan menjadi dua, yaitu data arus lalu lintas eksisting dan data arus lalu lintas rencana. Data eksisting digunakan untuk mengevaluasi kinerja lalu lintas pada waktu tertentu, khususnya saat jam sibuk. Sementara itu, data rencana digunakan untuk menentukan kebutuhan infrastruktur, seperti jumlah lajur dan lebar jalur jalan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

Volume lalu lintas dihitung untuk mengetahui jumlah kendaraan yang melintasi suatu persimpangan dalam kurun waktu tertentu. Dalam perencanaan lalu lintas, indikator utama yang digunakan adalah lalu lintas harian rata-rata tahunan (LHRT), yang diperoleh dengan membagi total volume tahunan dengan jumlah hari dalam setahun (Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2015).

Berbagai faktor eksternal dapat memengaruhi volume lalu lintas, seperti hari libur, cuaca ekstrem, kegiatan besar, serta hambatan atau perbaikan jalan di sekitar lokasi. Penentuan waktu pengamatan juga harus mencakup jam-jam puncak, saat volume lalu lintas berada pada tingkat tertinggi. Jadwal perhitungan yang digunakan harus disesuaikan dengan kondisi lalu lintas yang diamati agar hasilnya mencerminkan situasi aktual di lapangan (Alamsyah, 2008).

2.2.2 Kendaraan

Kendaraan adalah sarana transportasi yang terbagi menjadi kendaraan bermotor dan kendaraan tidak bermotor. Kendaraan bermotor adalah kendaraan yang bergerak menggunakan mesin, sedangkan kendaraan tidak bermotor adalah kendaraan yang digerakkan dengan tenaga manusia atau ditarik oleh hewan (Pemerintah Indonesia, 2009).

Kendaraan dalam arus lalu lintas diklasifikasikan menjadi sepeda motor (SM), mobil penumpang (MP), kendaraan sedang (KS), bus besar (BB), dan truk berat (TB). Sementara itu, kendaraan tidak bermotor (KTB), seperti sepeda, becak, delman, dan gerobak, tidak diperhitungkan dalam arus lalu lintas, tetapi dianggap sebagai hambatan samping yang memengaruhi nilai arus jenuh dan diperhitungkan dalam faktor koreksi arus jenuh (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

Simpang bersinyal umumnya berada pada jaringan jalan perkotaan. Pada jaringan jalan perkotaan, bus besar (BB) dan truk berat (TB) keberadaannya sangat terbatas dan umumnya hanya beroperasi pada malam hari. Oleh karena itu, dalam perhitungan volume lalu lintas, kedua jenis kendaraan ini umumnya tidak diperhitungkan atau jika dihitung dikategorikan sebagai kendaraan sedang (KS). Dengan demikian, klasifikasi kendaraan pada jaringan jalan perkotaan disederhanakan menjadi 3 kategori, yaitu sepeda motor (SM), mobil penumpang (MP), dan kendaraan sedang (KS) (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

Tabel 2.1 Klasifikasi Kendaraan dan Tipikalnya

Kode	Jenis kendaraan	Tipikal kendaraan
SM	Kendaraan bermotor roda 2 (dua) dan 3 (tiga) dengan panjang $< 2,5$ m.	Sepeda motor, kendaraan bermotor roda 3 (tiga).
MP	Mobil penumpang 4 (empat) tempat duduk, mobil penumpang 7 (tujuh) tempat duduk, mobil angkutan barang kecil, mobil angkutan barang sedang dengan panjang $\leq 5,5$ m.	Sedan, jeep, minibus, mikrobus, <i>pickup</i> , truk kecil.
KS	Bus sedang dan mobil angkutan barang 2 (dua) sumbu dengan panjang	Bus tanggung, bus metromini, truk sedang.

Kode	Jenis kendaraan	Tipikal kendaraan
	$\leq 9,0$ m.	
BB	Bus besar 2 (dua) dan 3 (tiga) gandar dengan panjang $\leq 12,0$ m.	Bus antar kota, bus <i>double decker city tour</i> .
TB	Mobil angkutan barang 3 (tiga) sumbu, truk gandeng, dan truk tempel (<i>semitrailer</i>) dengan panjang $> 12,0$ m.	Truk tronton, truk <i>semi trailer</i> , truk gandeng.

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

2.2.3 Hambatan Samping

Lalu lintas yang baik adalah lalu lintas yang dapat menciptakan arus yang lancar, kecepatan yang memadai, aman, dan nyaman. Namun sering kali muncul suatu permasalahan yang disebabkan oleh aktivitas di sisi jalan, atau dapat dikatakan sebagai hambatan samping (Wahida et al., 2023).

Hambatan samping merupakan kegiatan di samping segmen jalan yang mempengaruhi kinerja lalu lintas, seperti pejalan kaki, penghentian kendaraan umum atau kendaraan lainnya, kendaraan keluar masuk lahan di samping jalan, dan keberadaan kendaraan lambat (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

Hambatan samping pada persimpangan ditentukan berdasarkan tipe lingkungan jalan (Tabel 2.2) dan kelas hambatan samping (Tabel 2.3).

Tabel 2.2 Kelas Tipe Lingkungan Jalan

Kelas Tipe Lingkungan Jalan	Kondisi Lingkungan Jalan
Komersial	Guna lahan komersial (misalnya pertokoan, rumah makan, perkantoran) dengan jalan masuk langsung bagi pejalan kaki dan kendaraan.
Permukiman	Guna lahan tempat tinggal dengan jalan masuk langsung bagi pejalan kaki dan kendaraan.
Akses Terbatas	Tanpa jalan masuk atau jalan masuk langsung terbatas

Kelas Tipe Lingkungan Jalan	Kondisi Lingkungan Jalan
	(misalnya karena adanya penghalang fisik, jalan samping dan sebagainya).

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

Tabel 2.3 Kriteria Kelas Hambatan Samping

Kelas Hambatan Samping	Kriteria
Tinggi	Arus berangkat pada tempat masuk dan keluar simpang terganggu dan berkurang akibat aktivitas samping jalan di sepanjang pendekat. Contoh, adanya aktivitas angkutan umum seperti menaikturunkan penumpang atau mengetem, pejalan kaki dan/atau pedagang kaki lima di sepanjang atau melintas pendekat, kendaraan keluar/masuk samping pendekat.
Sedang	Arus berangkat pada tempat masuk dan keluar simpang sedikit terganggu dan sedikit berkurang akibat aktivitas samping jalan di sepanjang pendekat.
Rendah	Arus berangkat pada tempat masuk dan keluar simpang tidak terganggu dan tidak berkurang oleh hambatan samping.

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

2.3 Jalan

Berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan (Pemerintah Indonesia, 2009), jalan didefinisikan sebagai seluruh bagian jalur lalu lintas umum, termasuk bangunan pelengkap dan perlengkapannya, yang berada di atas, di bawah, atau sejajar dengan permukaan tanah maupun air. Definisi ini tidak mencakup jalan rel dan jalan kabel.

2.3.1 Klasifikasi Jalan

Berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan (Pemerintah Indonesia, 2004), jalan diklasifikasikan menurut fungsinya menjadi 4 kategori, yaitu:

1. Jalan arteri, merupakan jalan umum yang berfungsi melayani angkutan utama dengan ciri perjalanan jarak jauh, kecepatan rata-rata tinggi, dan jumlah jalan masuk dibatasi secara berdaya guna.
2. Jalan kolektor, merupakan jalan umum yang berfungsi melayani angkutan pengumpul atau pembagi dengan ciri perjalanan jarak sedang, kecepatan rata-rata sedang, dan jumlah jalan masuk dibatasi.
3. Jalan lokal, merupakan jalan umum yang berfungsi melayani angkutan setempat dengan ciri perjalanan jarak dekat, kecepatan rata-rata rendah, dan jumlah jalan masuk tidak dibatasi.
4. Jalan lingkungan, merupakan jalan umum yang berfungsi melayani angkutan lingkungan dengan ciri perjalanan jarak dekat, dan kecepatan rata-rata rendah.

Berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan (Pemerintah Indonesia, 2004), jalan diklasifikasikan menurut status jalan menjadi 5 kategori, yaitu:

1. Jalan nasional, merupakan jalan arteri dan jalan kolektor dalam sistem jaringan jalan primer yang menghubungkan antar ibukota provinsi, dan jalan strategis nasional, serta jalan tol.
2. Jalan provinsi, merupakan jalan kolektor dalam sistem jaringan jalan primer yang menghubungkan ibu kota provinsi dengan ibu kota kabupaten/kota, atau antar ibu kota kabupaten/kota, dan jalan strategis provinsi.
3. Jalan kabupaten, merupakan jalan lokal dalam sistem jaringan jalan primer yang menghubungkan ibu kota kabupaten dengan ibu kota kecamatan, antar ibu kota kecamatan, ibu kota kabupaten dengan pusat kegiatan lokal, antar pusat kegiatan lokal, serta jalan umum dalam sistem jaringan jalan sekunder dalam wilayah kabupaten, dan jalan strategis kabupaten.

4. Jalan kota, merupakan jalan umum dalam sistem jaringan jalan sekunder yang menghubungkan antar pusat pelayanan dalam kota, menghubungkan pusat pelayanan dengan persil, menghubungkan antar persil, serta menghubungkan antar pusat permukiman yang berada di dalam kota.
5. Jalan desa, merupakan jalan umum yang menghubungkan kawasan dan/atau antar permukiman di dalam desa, serta jalan lingkungan.

Berdasarkan Pedoman Desain Geometrik Jalan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024), kelas jalan dikelompokkan berdasarkan:

1. Spesifikasi penyediaan prasarana jalan (SPPJ).
 - a. Jalan bebas hambatan (JBH), merupakan jalan umum yang melayani lalu lintas menerus dengan pengendalian jalan masuk secara penuh, tidak ada persimpangan sebidang, dilengkapi pagar ruang milik jalan, dilengkapi dengan median, paling sedikit mempunyai 2 lajur setiap arah, dan lebar lajur paling sedikit 3,5 m.
 - b. Jalan raya (JRY), merupakan jalan umum yang melayani lalu lintas menerus dengan pengendalian jalan masuk secara terbatas, memiliki median dan paling sedikit 2 lajur setiap arah, dengan lebar lajur baku paling kecil 3,5 m.
 - c. Jalan sedang (JSD), merupakan jalan umum yang melayani lalu lintas jarak sedang, paling sedikit dua lajur untuk dua arah dengan lebar jalur baku paling sedikit 7 m.
 - d. Jalan kecil (JKC), merupakan jalan umum yang melayani lalu lintas setempat, paling sedikit mempunyai 2 lajur untuk dua arah dengan lebar jalur paling sedikit 5,5 m.
 - e. Jalan lalu lintas rendah (JLR), merupakan jalan umum yang melayani lalu lintas rendah ($LHRT_D < 2000$ SMP/hari, atau $q_{JD} < 200$ SMP/Jam), paling sedikit mempunyai 1 lajur untuk dua arah dengan lebar jalur paling sedikit 4,0 m.

2. Penggunaan jalan dan kelancaran lalu lintas dan angkutan jalan (LLAJ).

Tabel 2.4 Kelas Jalan Sesuai Penggunaannya

Kelas Jalan	Fungsi Jalan	Dimensi Kendaraan (m)			Muatan Sumbu Terberat (MST) ton
		Lebar	Panjang	Tinggi	
Kelas I	Arteri, Kolektor	$\leq 2,55$	$\leq 18,0$	$\leq 4,2$	10
Kelas II	Arteri, Kolektor,	$\leq 2,55$	$\leq 12,0$	$\leq 4,2$	8
Kelas III	Lokal, dan Lingkungan	$\leq 2,2$	$\leq 9,0$	$\leq 3,5$	8 ^{*)}
Kelas Khusus	Arteri	$> 2,55$	$> 18,0$	$\leq 4,2$	$> 2,55$

Catatan: ^{*)} dalam keadaan tertentu dapat < 8 ton

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024)

Berdasarkan Pedoman Desain Geometrik Jalan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024), medan jalan diklasifikasikan sebagai berikut:

Tabel 2.5 Klasifikasi Medan Jalan

No.	Jenis Medan	Notasi	Kemiringan Medan^{*)} %
1	Datar	D	< 10
2	Bukit	B	10 – 25
3	Gunung	G	> 25

Catatan: ^{*)} nilai kemiringan medan rata-rata per 50 m dalam satu kilometer

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024)

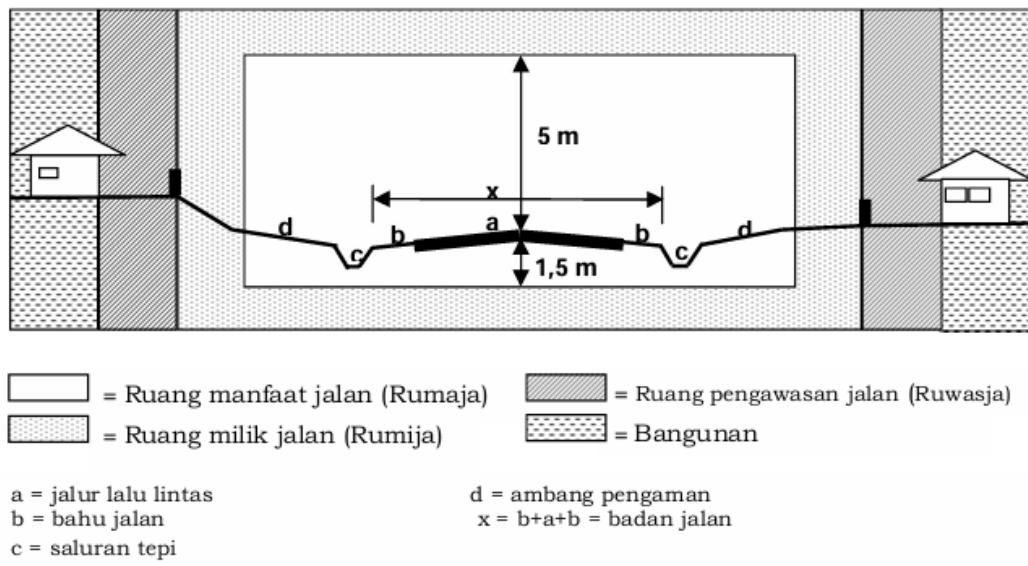
2.3.2 Bagian-Bagian Jalan

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 34 Tahun 2006 tentang Jalan (Pemerintah Indonesia, 2006), bagian-bagian jalan menjadi:

1. Ruang manfaat jalan (rumaja), merupakan ruang sepanjang jalan yang dibatasi oleh lebar, tinggi, dan kedalaman tertentu yang ditetapkan oleh penyelenggara jalan yang bersangkutan berdasarkan pedoman yang ditetapkan oleh menteri. Rumaja meliputi badan jalan, saluran tepi jalan, dan ambang pengamannya. Komponen yang ada dalam rumaja yaitu median, perkerasan jalan, jalur pemisah, bahu jalan, saluran tepi jalan, trotoar, lereng, ambang pengaman, timbuanan dan galian, gorong-gorong, perlengkapan jalan, bangunan pelengkap lainnya, dan serta ruang bebas jalan (rubeja) jika dibutuhkan. Rumaja dilengkapi ruang bebas jalan dengan ukuran tinggi, dan kedalaman sebagai berikut:
 - a. Lebar ruang bebas diukur di antara dua garis vertikal pada batas terluar ambang pengaman atas batas terluar rumaja.
 - b. Tinggi ruang bebas minimal 5 m di atas permukaan jalur lalu lintas.
 - c. Kedalaman ruang bebas minimal 1,5 m di bawah permukaan jalur lalu lintas terendah.
2. Ruang milik jalan (rumija), merupakan ruang sepanjang jalan yang dibatasi oleh lebar, tinggi, dan kedalaman tertentu, meliputi ruang manfaat jalan dan sejajar tanah tertentu di luar ruang milik jalan. Rumija diperuntukkan bagi ruang manfaat jalan, pelebaran jalan, dan penambahan jalur lalu lintas di masa akan datang serta kebutuhan ruang untuk pengamanan jalan. Rumija paling sedikit memiliki lebar sebagai berikut:
 - a. Jalan bebas hambatan 30 m.
 - b. Jalan raya 25 m.
 - c. Jalan sedang 15 m.
 - d. Jalan kecil 11 m.
3. Ruang pengawasan jalan (ruwasja), merupakan ruang sepanjang jalan yang dibatasi oleh lebar dan tinggi tertentu, meliputi ruang tertentu di luar ruang milik jalan. Ruwasja diperuntukkan bagi pandangan bebas pengemudi dan pengaman konstruksi jalan, serta pengamanan fungsi jalan. Ruwasja pada dasarnya adalah ruang lahan milik masyarakat umum yang mendapat

pengawasan dari pembina jalan. Dalam hal Rumija tidak cukup luas, maka lebar Ruwasja ditentukan dari tepi badan jalan paling sedikit:

- a. Jalan arteri primer 15 m.
- b. Jalan kolektor primer 10 m.
- c. Jalan lokal primer 7 m.
- d. Jalan lingkungan primer 5 m.
- e. Jalan arteri sekunder 15 m.
- f. Jalan kolektor sekunder 5 m.
- g. Jalan lokal sekunder 3 m.
- h. Jalan lingkungan sekunder 2m.
- i. Jembatan 100 m ke arah hilir dan hulu.



Gambar 2.1 Bagian-bagian Jalan

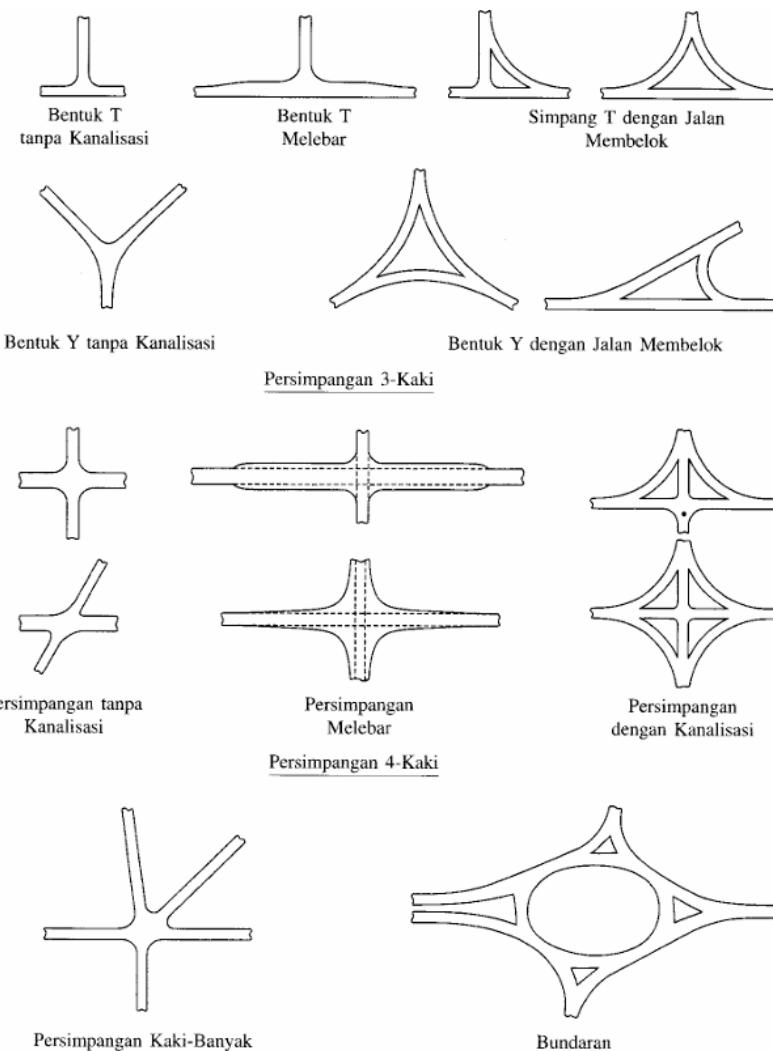
(Sumber: Pemerintah Indonesia, 2006)

2.4 Simpang

Simpang merupakan elemen penting dalam sistem jaringan jalan, khususnya di kawasan perkotaan. Di area ini, sebagian besar ruas jalan saling terhubung melalui simpang yang memungkinkan pengemudi untuk melanjutkan perjalanan

lurus, berbelok, atau berpindah jalur. Secara umum, persimpangan didefinisikan sebagai area tempat dua atau lebih jalan bertemu, termasuk seluruh bagian jalan dan fasilitas tepi jalannya yang digunakan untuk pergerakan lalu lintas (Khisty & Lall, 2005). Secara umum terdapat dua jenis persimpangan, yaitu:

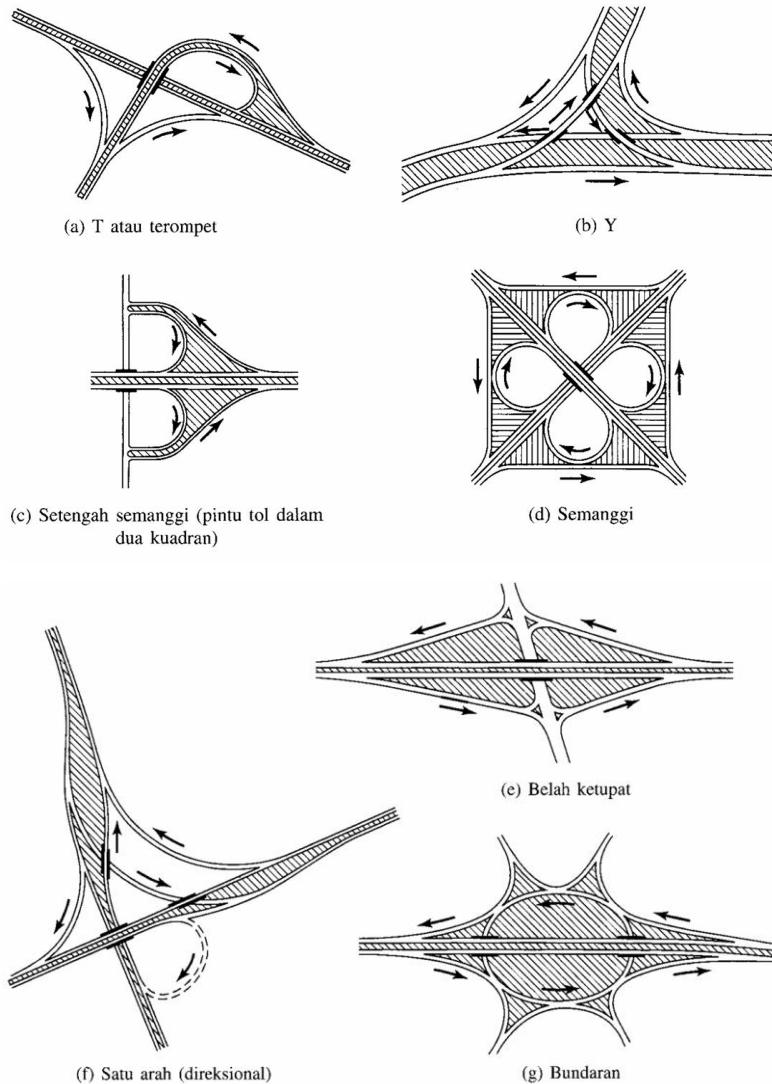
1. Persimpangan sebidang (*intersection at grade*), merupakan titik pertemuan dua atau lebih jalan yang berada pada elevasi yang sama. Jenis simpang ini memiliki karakteristik tertentu dalam hal fungsi dan keterbatasan operasionalnya. Berdasarkan sistem pengatur lalu lintasnya, simpang sebidang terbagi menjadi dua jenis, yaitu simpang bersinyal dan simpang tak bersinyal.



Gambar 2.2 Simpang Sebidang

(Sumber: Khisty & Lall, 2005)

2. Simpang susun (*interchange*), merupakan adalah sistem persimpangan bertingkat yang dirancang untuk mengakomodasi volume lalu lintas tinggi secara aman dengan memisahkan arus lalu lintas pada tingkat yang berbeda.



Gambar 2.3 Simpang Susun

(Sumber: Khisty & Lall, 2005)

2.5 Simpang Bersinyal

Simpang bersinyal merupakan pertemuan dua atau lebih ruas jalan sebidang yang dilengkapi alat pemberi isyarat lalu lintas (APILL) untuk pengaturan lalu lintasnya. APILL mengatur lalu lintas simpang dengan cara meminimalkan konflik dengan memisahkan waktu berjalananya arus. Tujuan utama penggunaan APILL pada persimpangan adalah:

1. Mengatur arus lalu lintas secara teratur, dengan membagi waktu pergerakan kendaraan dari berbagai arah secara bergantian untuk menghindari konflik langsung.
2. Mempertahankan kapasitas persimpangan saat jam puncak, melalui pengaturan waktu yang tepat sehingga jumlah kendaraan yang dilayani per siklus dapat dioptimalkan.
3. Mengurangi risiko tabrakan antar arah bertentangan, seperti konflik antara kendaraan yang belok kanan dan kendaraan dari arah berlawanan yang bergerak lurus.
4. Meningkatkan keselamatan pengguna jalan, khususnya pejalan kaki dan pengguna kendaraan tidak bermotor melalui penyediaan fase sinyal khusus.
5. Mengelola kepadatan dan mencegah kemacetan, dengan menerapkan siklus sinyal yang sesuai agar penumpukan kendaraan di simpang dapat dikendalikan secara berkelanjutan.

2.6 Kapasitas Simpang Bersinyal

Kapasitas simpang bersinyal adalah volume lalu lintas maksimum yang dapat dipertahankan pada persimpangan yang dilengkapi dengan alat pemberi isyarat lalu lintas (APILL) selama 1 jam dalam kondisi tertentu yang melingkupi geometri, lingkungan, dan lalu lintas. Kapasitas simpang bersinyal dihitung menggunakan persamaan yang mempertimbangkan faktor seperti arus jenuh, total waktu hijau dalam satu siklus, dan waktu siklus (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

$$C = J \times \frac{w_H}{s} \quad (2.1)$$

Keterangan:

C = kapasitas simpang bersinyal (SMP/jam)

J = arus jenuh (SMP/jam)

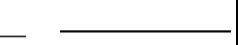
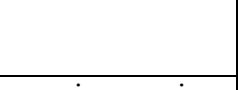
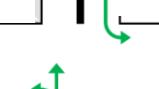
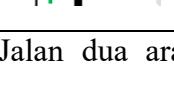
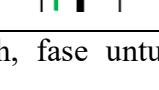
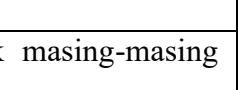
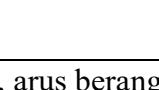
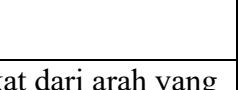
w_H = total waktu hijau dalam satu siklus (detik)

s = waktu siklus (detik)

2.6.1 Tipe Pendekat

Analisis kapasitas dilakukan secara terpisah untuk setiap pendekat atau sub-pendekat, bergantung pada fase sinyal dan kondisi fisik, seperti keberadaan pulau jalan. Hal ini juga berlaku apabila suatu pendekat memiliki tipe pendekat yang berbeda. Penentuan tipe pendekat dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Tipe Pendekat

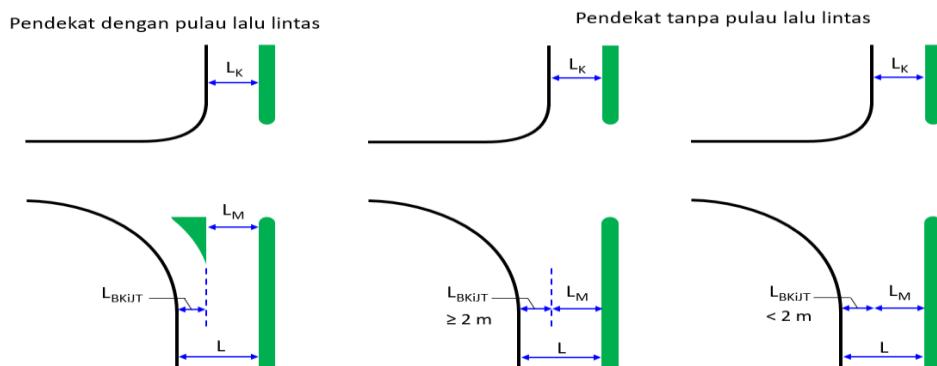
Tipe Pendekat	Keterangan	Contoh Pola-pola Pendekatan
Terlindung (Tipe P)	Arus berangkat tidak konflik dengan arus lalu lintas dari arah berlawanan	<p>Jalan satu arah</p>  <p>Jalan satu arah</p>  <p>Simpang-3</p>          
Terlawan (Tipe O)	Arus berangkat konflik dengan arus lalu lintas dari arah berlawanan	<p>Jalan dua arah, belok kanan dibatasi</p>       <p>Jalan dua arah, fase untuk masing-masing arah terpisah</p>      

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

2.6.2 Lebar Pendekat Efektif

Lebar pendekat efektif (L_E) dipengaruhi oleh lebar ruas pendekat awal (L), lebar masuk (L_M), dan lebar keluar (L_K). Lebar masuk (L_M) bergantung pada beberapa faktor, antara lain:

1. Jika pendekat memiliki pulau lalu lintas, arus belok kiri akan memiliki lajur sendiri dan L_M dihitung sebagai jarak antara tepi pulau lalu lintas dan median (Gambar 2.4 kiri).
2. Jika tidak ada pulau lalu lintas, arus belok kiri dapat memiliki lajur sendiri atau bergabung dengan arus lurus, tergantung ketersediaan ruang. Jika lebar jalur belok kiri (L_{BKijT}) lebih dari 2 meter, arus belok kiri dapat membentuk antrean sendiri, sehingga $L_M = L - L_{BKijT}$ (Gambar 2.4 tengah). Sebaliknya, jika L_{BKijT} kurang dari 2 meter, arus belok kiri akan menyatu dengan arus lurus (Gambar 2.4 kanan).



Gambar 2.4 Lebar Pendekat Dengan dan Tanpa Pulau Lalu Lintas

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

Lebar efektif (L_E) dapat dihitung berdasarkan kondisi berikut:

1. Jika $L_{BKijT} \geq 2$ meter atau merupakan lajur eksklusif

Pada kondisi ini, arus belok kiri (B_{KijT}) dapat mendahului antrean kendaraan lurus dan belok kanan saat sinyal merah. Perhitungan L_E dilakukan dengan langkah berikut:

- a. Arus B_{KijT} (q_{BKijT}) tidak dimasukkan dalam perhitungan, sehingga arus yang dihitung hanya terdiri dari arus lurus (q_{LRS}) dan arus belok

kanan (q_{BKa}). Tentukan lebar efektif dengan rumus:

$$L_E = \text{Min} \begin{cases} L - L_{BKijT} \\ L_M \end{cases} \quad (2.2)$$

- b. Periksa L_K untuk pendekat tipe P. Jika $L_K < L_M \times (1 - R_{BKa})$, maka $L_E = L_K$. Dalam kasus ini, analisis waktu isyarat hanya mempertimbangkan arus lurus (q_{LRS}).

2. Jika $L_{BKijT} < 2$ meter

Pada kondisi ini, arus belok kiri (B_{KijT}) dianggap tidak dapat mendahului antrean kendaraan lain saat sinyal merah. Perhitungan L_E dilakukan dengan langkah berikut:

- a. Arus B_{KijT} (q_{BKijT}) tetap dimasukkan dalam perhitungan. Tentukan lebar efektif dengan rumus:

$$L_E = \text{Min} \begin{cases} L \\ L_M + L_{BKijT} \\ L \times (1 + R_{BKijT}) - L_{BKijT} \end{cases} \quad (2.3)$$

- b. Periksa L_K untuk pendekat tipe P. Jika $L_K < L_M \times (1 - R_{BKa} - R_{BKijT})$, maka $L_E = L_K$ dan analisis waktu isyarat hanya mempertimbangkan arus lurus.

2.6.3 Arus Jenuh

Arus jenuh (J) adalah jumlah kendaraan yang keluar dari suatu pendekat dalam kondisi tertentu, dinyatakan dalam satuan SMP/jam. Nilai arus jenuh didapat dari hasil perkalian antara arus jenuh dasar (J_0) dengan faktor koreksi (F) yang menyesuaikan kondisi lapangan terhadap kondisi ideal (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

$$J = J_0 \times F_{HS} \times F_{UK} \times F_G \times F_P \times F_{BKi} \times F_{BKa} \quad (2.4)$$

Keterangan:

J = arus jenuh (SMP/jam)

J_0 = arus jenuh dasar (SMP/jam)

F_{HS} = faktor koreksi J_0 akibat hambatan samping lingkungan jalan

F_{UK} = faktor koreksi J_0 terkait ukuran kota

F_G = faktor koreksi J_0 akibat kelandaian memanjang pendekat

F_P = faktor koreksi J_0 akibat adanya jarak garis henti pada mulut pendekat terhadap kendaraan yang parkir pertama

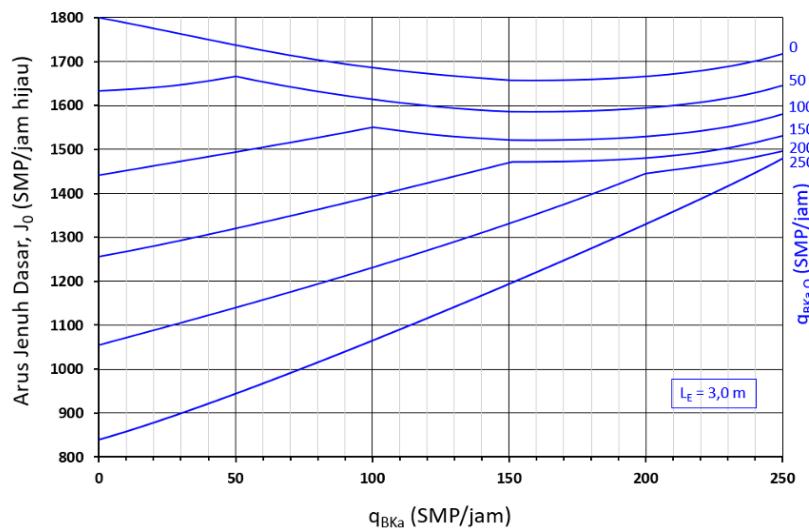
F_{BK_i} = faktor koreksi J_0 akibat arus lalu lintas yang membelok ke kiri

F_{BK_a} = faktor koreksi J_0 akibat arus lalu lintas yang membelok ke kanan

2.6.4 Arus Jenuh Dasar

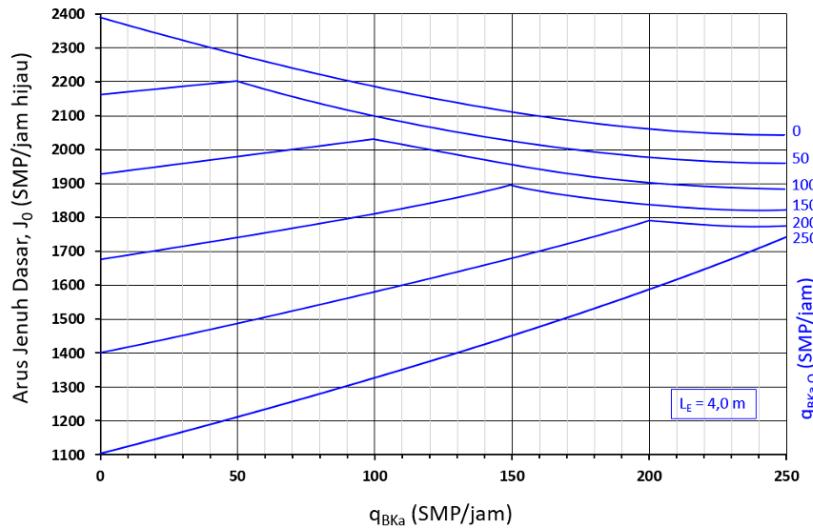
Arus jenuh dasar (J_0) adalah jumlah kendaraan yang keluar dari suatu pendekat dalam kondisi ideal, dinyatakan dalam satuan SMP/jam (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

Arus jenuh dasar untuk pendekat terlawan jika tidak ada lajur belok kanan terpisah, nilai J_0 diperoleh dari Gambar 2.5 hingga Gambar 2.7, dengan mempertimbangkan L_E , q_{BK_a} , dan $q_{BK_a,0}$ serta interpolasi dilakukan jika nilai yang dicari tidak tersedia langsung.



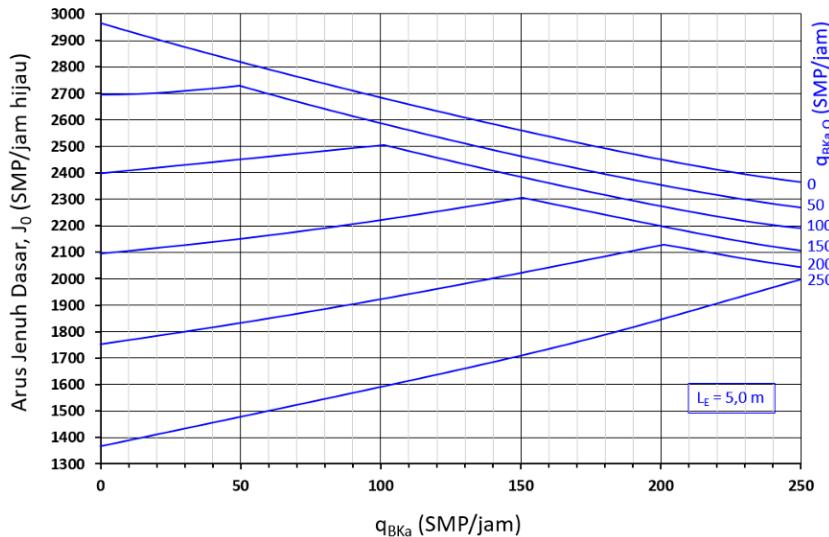
Gambar 2.5 Arus Jenuh Dasar untuk Pendekat Terlawan Tanpa Lajur Belok Kanan Terpisah dengan Lebar Efektif 3,0 m

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)



Gambar 2.6 Arus Jenuh Dasar untuk Pendekat Terlawan Tanpa Lajur Belok Kanan Terpisah dengan Lebar Efektif 4,0 m

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)



Gambar 2.7 Arus Jenuh Dasar untuk Pendekat Terlawan Tanpa Lajur Belok Kanan Terpisah dengan Lebar Efektif 5,0 m

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

Jika $q_{BKa,0} > 250$ SMP/jam, maka:

- $q_{BKa} < 250$: 1. Tentukan $J_{BKa,0}$ pada $q_{BKa,0} = 250$ SMP/jam
 2. Tentukan J sesungguhnya sebagai

$$J = J_{BKa,0} - \{(q_{BKa,0} - 250 \times 8)\} \text{ SMP/jam}$$

$q_{BKa} < 250$: 1. Tentukan $J_{BKa,0}$ pada $q_{BKa,0}$ and $q_{BKa} = 250$ SMP/jam

2. Tentukan J sesungguhnya sebagai

$$J = J_{BKa,0} - \{(q_{BKa,0} + q_{BKa} - 500) \times 2\} \text{ SMP/jam}$$

Jika $q_{BKa,0} < 250$ SMP/jam dan $q_{BKa} > 250$ SMP/jam, maka tentukan J seperti pada $q_{BKa} = 250$ SMP/jam.

Arus jenuh dasar untuk pendekat terlindung ditentukan berdasarkan lebar efektif (L_E).

$$J_0 = 600 \times L_E \quad (2.5)$$

Keterangan:

J_0 = arus jenuh dasar (SMP/jam)

L_E = lebar efektif pendekat (meter)

2.6.5 Faktor Koreksi Arus Jenuh Dasar

Faktor koreksi adalah variabel yang digunakan untuk menyesuaikan nilai arus jenuh dasar dengan kondisi lapangan, seperti faktor koreksi hambatan samping, faktor koreksi ukuran kota, faktor koreksi kelandaian, faktor koreksi parkir, faktor koreksi belok kiri, dan faktor koreksi belok kanan.

2.6.5.1 Faktor Koreksi Hambatan Samping (F_{HS})

Faktor koreksi hambatan samping merupakan faktor koreksi arus jenuh dasar yang dipengaruhi oleh tipe lingkungan, tingkat hambatan samping, tipe fase, dan rasio kendaraan tak bermotor.

Tabel 2.7 Faktor Koreksi Hambatan Samping

Tipe Lingkungan	Hambatan Samping	Tipe Fase	Rasio Kendaraan Tak Bermotor					
			0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	≥0,25
Komersial (KOM)	Tinggi	Terlawan	0,93	0,88	0,84	0,79	0,74	0,70
		Terlindung	0,93	0,91	0,88	0,87	0,85	0,81
	Sedang	Terlawan	0,94	0,89	0,85	0,80	0,75	0,71

Tipe Lingkungan	Hambatan Samping	Tipe Fase	Rasio Kendaraan Tak Bermotor					
			0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	$\geq 0,25$
Permukiman (KIM)	Rendah	Terlindung	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82
		Terlawan	0,95	0,90	0,86	0,81	0,76	0,72
		Terlindung	0,95	0,93	0,90	0,89	0,87	0,83
	Sedang	Terlawan	0,96	0,91	0,86	0,81	0,78	0,72
		Terlindung	0,96	0,94	0,92	0,99	0,86	0,84
		Terlawan	0,97	0,92	0,87	0,82	0,79	0,73
Akses Terbatas (AT)	Rendah	Terlindung	0,97	0,95	0,93	0,90	0,87	0,85
		Terlawan	0,98	0,93	0,88	0,83	0,80	0,74
		Terlindung	0,98	0,96	0,94	0,91	0,88	0,86
	Tinggi/ Sedang/	Terlawan	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
		Terlindung	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,88

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

2.6.5.2 Faktor Koreksi Ukuran Kota (F_{UK})

Faktor koreksi ukuran kota merupakan faktor koreksi arus jenuh dasar berdasarkan ukuran kota yang ditentukan oleh jumlah populasi.

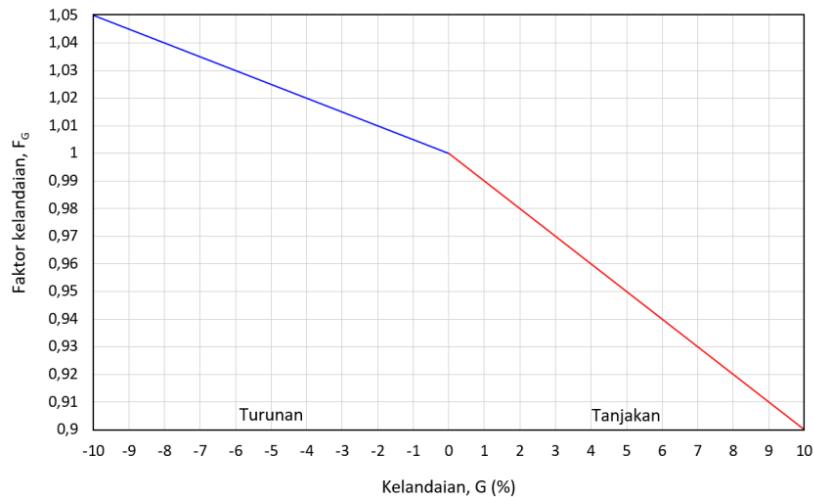
Tabel 2.8 Faktor Koreksi Ukuran Kota

Jumlah Penduduk Kota (Juta Jiwa)	Faktor Koreksi Ukuran Kota (F_{UK})
> 3,0	1,05
1,0 – 3,0	1,00
0,5 – 1,0	0,94
0,1-0,5	0,83
< 0,1	0,82

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

2.6.5.3 Faktor Koreksi Kelandaian (F_G)

Faktor koreksi kelandaian merupakan faktor koreksi arus jenuh dasar berdasarkan pada kelandaian lengan simpang yang ditentukan berdasarkan gambar berikut.



Gambar 2.8 Faktor Penyesuaian Kelandaian

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

2.6.5.4 Faktor Koreksi Parkir (F_P)

Faktor koreksi parkir merupakan faktor koreksi arus jenuh dasar berdasarkan jarak garis henti di mulut pendekat terhadap kendaraan yang terparkir pertama.

$$F_P = \frac{\left[\frac{L_P}{3} - \frac{(L - 2) \times \left(\frac{L_P}{3} - w_H \right)}{L} \right]}{w_H} \quad (2.6)$$

Keterangan:

L_P = jarak antara garis henti ke kendaraan yang parkir pertama pada lajur belok kiri atau panjang dari lajur belok kiri yang pendek (meter)

L = lebar pendekat (meter)

w_H = waktu hijau pada pendekat yang ditinjau

2.6.5.5 Faktor Koreksi Belok Kiri (F_{BK_i})

Faktor koreksi belok kiri merupakan faktor koreksi arus jenuh dasar berdasarkan rasio kendaraan yang belok kiri. Perhitungan ini berlaku untuk pendekat tipe P tanpa B_{Kijt} , lebar efektif ditentukan oleh lebar masuk. Faktor koreksi belok kiri dihitung dengan persamaan berikut:

$$R_{BK_i} = \frac{q_{BK_i}}{q_{Total}} \quad (2.7)$$

$$F_{BK_i} = 1,0 + (R_{BK_i} \times 0,16) \quad (2.8)$$

2.6.5.6 Faktor koreksi belok kanan (F_{BK_a})

Faktor koreksi belok kanan merupakan faktor koreksi arus jenuh dasar berdasarkan rasio kendaraan yang belok kanan. Faktor koreksi ini berlaku khusus untuk pendekat tipe P pada jalan dua arah tanpa median, di mana lebar efektif ditentukan oleh lebar masuk. Pada kondisi tersebut, kendaraan yang berbelok kanan cenderung memotong garis tengah sebelum melewati garis henti, sehingga menyebabkan peningkatan rasio belok kanan dan berdampak pada penurunan kapasitas arus jenuh. Faktor koreksi belok kanan dihitung dengan persamaan berikut:

$$R_{BK_a} = \frac{q_{BK_a}}{q_{Total}} \quad (2.9)$$

$$F_{BK_a} = 1,0 + (R_{BK_a} \times 0,26) \quad (2.10)$$

2.6.6 Rasio Arus Terhadap Arus Jenuh

Rasio arus terhadap arus jenuh ($R_{q/J}$) dihitung dengan persamaan berikut:

$$R_{q/J} = \frac{q}{J} \quad (2.11)$$

Rasio arus terhadap arus jenuh tertinggi pada masing-masing fase, yang diberi tanda sebagai rasio kritis ($R_{q/J \text{ kritis}}$), ditentukan berdasarkan nilai tertinggi dari rasio tersebut pada setiap fase. Rasio arus simpang APILL (R_{AS}) diperoleh dari penjumlahan seluruh nilai $R_{q/J \text{ kritis}}$ pada setiap fase.

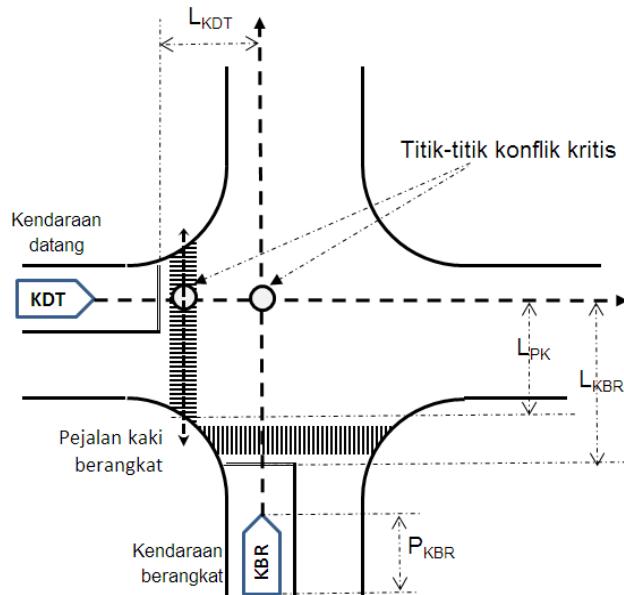
$$R_{AS} = \sum_i (R_{q/J \text{ kritis}})_i \quad (2.12)$$

Rasio fase (R_F) untuk masing-masing fase dihitung sebagai perbandingan antara $R_{q/J \text{ kritis}}$ dengan R_{AS} .

$$R_F = \frac{R_{q/J \text{ kritis}}}{R_{AS}} \quad (2.13)$$

2.6.7 Waktu Isyarat Pada Simpang Bersinyal

w_{MS} (waktu merah semua) diperlukan untuk pengosongan area konflik dalam simpang APILL pada akhir setiap fase. Waktu ini memberikan kesempatan bagi kendaraan terakhir (KBR) melewati garis henti pada akhir isyarat kuning sampai dengan meninggalkan titik konflik.



Gambar 2.9 Titik Konflik Kritis serta Jarak untuk Keberangkatan dan Kedatangan

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

Titik konflik kritis pada masing-masing fase (i) adalah titik yang menghasilkan w_{MS} terbesar. w_{MS} per fase dipilih yang terbesar dari dua hitungan waktu lintasan, yaitu kendaraan berangkat dan pejalan kaki. w_{MS} dihitung dengan persamaan berikut:

$$w_{MS} = \text{Max} \left\{ \frac{\frac{L_{KBR} + P_{KBR}}{V_{KBR}} - \frac{L_{KDT}}{V_{KDT}}}{\frac{L_{PK}}{V_{PK}}} \right\} \quad (2.14)$$

Keterangan:

L_{KBR}, L_{KDT}, L_{PK} = jarak dari garis henti ke titik konflik masing-masing untuk kendaraan yang berangkat, kendaraan yang datang, dan pejalan kaki (meter)

P_{KBR} = panjang kendaraan yang berangkat (meter)

V_{KBR} , V_{KDT} , V_{PK} = kecepatan untuk kendaraan berangkat, kendaraan datang, dan pejalan kaki (meter/detik)

Nilai-nilai V_{KBR} , V_{KDT} , dan P_{KBR} tergantung dari kondisi lokasi setempat. Nilai-nilai berikut ini dapat digunakan sebagai pilihan jika nilai baku tidak tersedia.

V_{KBR} = 10 meter/detik (kendaraan bermotor)

V_{KDT} = 10 meter/detik (kendaraan bermotor)

3 meter/detik (kendaraan tidak bermotor misalnya sepeda)

1,2 meter/detik (pejalan kaki)

P_{KBR} = 5 meter (MP atau KS)

2 meter (SM atau KTB)

Apabila periode w_{MS} untuk masing-masing akhir fase telah ditetapkan, maka waktu hijau hilang total (w_{HH}) untuk simpang APILL untuk setiap siklus dapat dihitung sebagai jumlah dari waktu-waktu antar hijau menggunakan persamaan berikut:

$$w_{HH} = \sum_i (w_{MS} + w_K)_i \quad (2.15)$$

Keterangan:

w_{HH} = waktu hijau hilang total (detik)

w_{MS} = waktu merah semua (detik)

w_K = waktu kuning (detik)

Panjang waktu kuning pada APILL di kota-kota Indonesia biasanya ditetapkan 3,0 detik. Untuk simpang APILL dengan area geometri yang luas dan kurang ideal, maka sebaiknya dihitung.

Waktu isyarat terdiri dari waktu siklus (s) dan waktu hijau (w_H). Tahap pertama adalah penentuan waktu siklus untuk sistem kendali waktu tetap yang dapat dilakukan menggunakan rumus Webster (1966). Rumus ini bertujuan meminimalkan tundaan total. Nilai waktu siklus ditetapkan menggunakan persamaan berikut:

$$s = \frac{(1,5 \times w_{HH} + 5)}{(1 - \sum R_{q/J \text{ kritis}})} \quad (2.16)$$

Keterangan:

- s = waktu siklus (detik)
 w_{HH} = jumlah waktu hijau hilang per siklus (detik)
 $R_{q/J}$ = rasio arus, yaitu arus dibagi arus jenuh, q/J
 $R_{q/J \text{ kritis}}$ = nilai $R_{q/J}$ yang tertinggi dari semua pendekat yang berangkat pada fase yang sama
 $\sum R_{q/J \text{ kritis}}$ = rasio arus simpang (sama dengan jumlah semua $R_{q/J \text{ kritis}}$ dari semua fase) pada siklus tersebut

Waktu siklus yang terlalu besar dapat meningkatkan tundaan rata-rata. Kondisi ini biasanya terjadi ketika nilai $\sum R_{q/J \text{ kritis}}$ mendekati atau melebihi satu. Jika melebihi satu, simpang bersinyal tersebut dianggap melampaui tingkat kejenuhan, dan rumus Webster (1966) cenderung menghasilkan nilai s yang tidak realistik baik sangat besar maupun negatif.

Tabel 2.9 Waktu Siklus (s) yang Layak

Tipe Pengaturan	Waktu Siklus yang Layak (detik)
Pengaturan dua-fase	40 – 80
Pengaturan tiga-fase	50 – 100
Pengaturan empat-fase	80 – 130

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

Waktu siklus yang terlalu pendek dapat menyulitkan pejalan kaki dalam menyeberang jalan. Sebaliknya, waktu siklus di atas 130 detik sebaiknya dihindari, kecuali pada simpang berskala besar, karena dapat menurunkan kapasitas total simpang bersinyal. Jika hasil perhitungan menunjukkan waktu siklus yang jauh melebihi batas tersebut, hal ini mengindikasikan bahwa kapasitas geometri simpang tidak mencukupi. Solusi yang dapat dilakukan mencakup penyesuaian pada desain geometri atau pengaturan fase sinyal.

Nilai waktu hijau ditetapkan menggunakan persamaan berikut:

$$w_{Hi} = (s - w_{HH}) \times \frac{R_{q/J \text{ kritis}}}{\sum_i (R_{q/J \text{ kritis}})_i} \quad (2.17)$$

Keterangan:

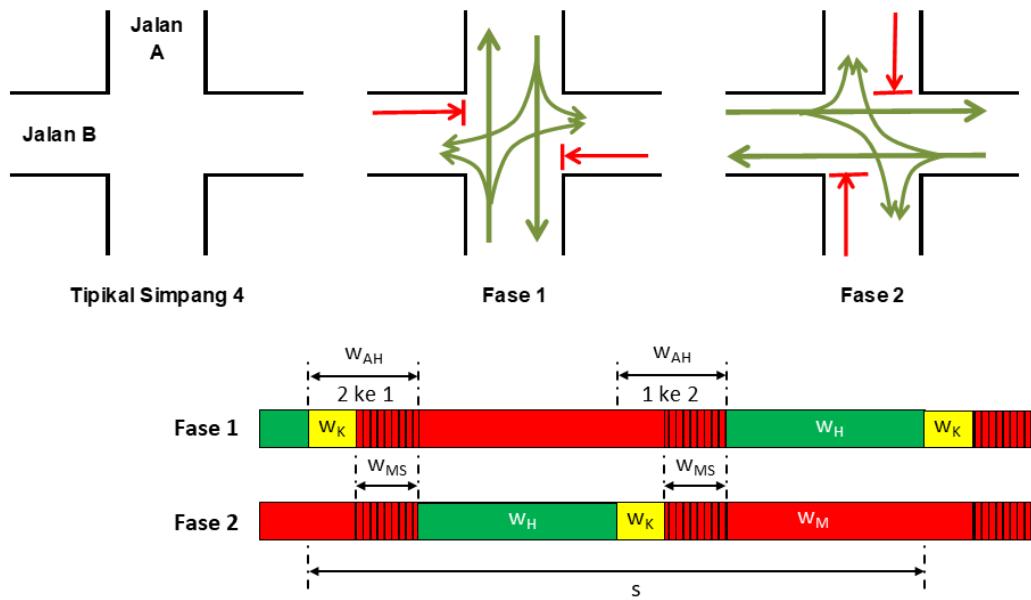
w_{Hi} = waktu hijau pada fase i (detik)

i = indeks untuk fase ke i

Adapun nilai normal waktu antar hijau dan urutan waktu menyala isyarat pada pengaturan simpang bersinyal dua fase sebagai berikut.

Tabel 2.10 Nilai Normal Waktu Antar Hijau

Ukuran Simpang	Lebar Jalan Rata-rata (meter)	Nilai Normal w_{AH} (detik/fase)
Kecil	6 sampai kurang dari 10	4
Sedang	10 sampai kurang dari 15	5
Besar	Lebih dari atau sama dengan 15	≥ 6



Gambar 2.10 Urutan Waktu Menyala Isyarat pada Pengaturan Simpang Bersinyal Dua Fase

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

2.7 Kinerja Simpang Bersinyal

Kinerja simpang bersinyal dinilai berdasarkan arus kendaraan yang diamati selama satu jam, yang merepresentasikan kondisi lalu lintas. Penilaian kinerja simpang bersinyal menggunakan derajat kejemuhan (D_J) dengan batas umum $D_J \leq 0,85$. Selain itu, terdapat beberapa parameter tambahan yang digunakan untuk menilai kinerja simpang bersinyal, meliputi panjang antrean (P_A) dan tundaan (T).

2.7.1 Arus Lalu Lintas dan Ekuivalensi Mobil Penumpang

Arus lalu lintas (q) dinyatakan dalam satuan SMP/jam dan diukur pada periode jam puncak, seperti pagi, siang, atau sore. Arus dalam kendaraan/jam dikonversi ke SMP/jam menggunakan nilai ekuivalensi mobil penumpang (EMP) yang sesuai dengan jenis pendekat, baik terlindung maupun terlawan.

Tabel 2.11 Ekuivalensi Mobil Penumpang

Jenis Kendaraan	EMP untuk Tipe Pendekat	
	Terlindung	Terlawan
Mobil Penumpang (MP)	1,00	1,00
Kendaraan Sedang (KS)	1,30	1,30
Sepeda Motor (SM)	0,15	0,40

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023)

2.7.2 Derajat Kejemuhan

Derajat kejemuhan (D_J) adalah rasio arus lalu lintas terhadap kapasitas (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

$$D_J = \frac{q}{C} \quad (2.18)$$

Keterangan:

D_J = derajat kejemuhan

C = kapasitas segmen jalan (SMP/jam)

q = volume lalu lintas (SMP/jam), terdiri dari $q_{eksisting}$ (hasil perhitungan lalu lintas) dan q_{JP} (hasil prediksi/perancangan)

2.7.3 Panjang Antrean

Jumlah rata-rata antrean kendaraan pada awal isyarat lampu hijau (N_q) diperoleh dengan menjumlahkan kendaraan terhenti yang tersisa dari fase hijau sebelumnya (N_{q1}) dengan jumlah kendaraan yang datang dan terhenti dalam antrean selama fase merah (N_{q2}) (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

$$N_q = N_{q1} + N_{q2} \quad (2.19)$$

Jika $D_J \leq 0,5$ maka

$$N_{q1} = 0 \quad (2.20)$$

Jika $D_J > 0,5$ maka

$$N_{q1} = 0,25 \times s \times \left\{ (D_J - 1) + \sqrt{(D_J - 1)^2 + \frac{8 \times (D_J - 0,5)}{s}} \right\} \quad (2.21)$$

$$N_{q2} = s \times \frac{(1 - R_H)}{(1 - R_H \times D_J)} \times \frac{q}{3600} \quad (2.22)$$

Panjang antrean (P_A) merupakan panjang kendaraan yang mengantre di suatu pendekat. Panjang antrean (P_A) diperoleh dengan mengalikan jumlah rata-rata antrean kendaraan (N_q) dalam satuan SMP dengan luas area rata-rata satu mobil penumpang yang diasumsikan sebesar 20 m^2 , kemudian dibagi dengan lebar masuk (m) (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

$$P_A = N_q \times \frac{20}{L_M} \quad (2.23)$$

2.7.4 Rasio Kendaraan Henti

Rasio kendaraan henti (R_{KH}) adalah rasio arus lalu lintas yang harus berhenti sebelum melewati garis henti akibat pengendalian isyarat lampu lalu lintas terhadap seluruh arus yang melewati persimpangan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

$$R_{KH} = 0,9 \times \frac{N_q}{q \times s} \times 3600 \quad (2.24)$$

Keterangan:

N_q = jumlah rata-rata antrean kendaraan (SMP) pada awal isyarat hijau

s = waktu siklus (detik)

q = arus lalu lintas dari pendekat yang ditinjau (SMP/jam)

Jumlah rata-rata kendaraan berhenti (N_{KH}) adalah jumlah total rata-rata kendaraan yang berhenti sebelum melintasi simpang bersinyal, termasuk kendaraan yang berhenti berulang dalam antrean.

$$N_{KH} = q \times R_{KH} \quad (2.25)$$

2.7.5 Tundaan

Tundaan adalah waktu tempuh tambahan yang digunakan pengemudi untuk melalui suatu persimpangan apabila dibandingkan dengan lintasan tanpa persimpangan. Tundaan pada suatu simpang bersinyal terjadi karena 2 hal, yaitu tundaan lalu lintas (T_{LL}) dan tundaan geometri (T_G) (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023). Tundaan rata-rata dihitung dengan persamaan berikut:

$$T_i = T_{LLi} + T_{Gi} \quad (2.26)$$

Tundaan lalu lintas adalah waktu tempuh tambahan yang digunakan pengemudi untuk melalui suatu persimpangan apabila dibandingkan dengan lintasan tanpa persimpangan yang disebabkan oleh interaksi antara arus lalu lintas yang berlawanan di persimpangan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

$$T_{LL} = s \times \frac{0,5 \times (1 - R_H)^2}{(1 - R_H \times D_J)} + \frac{N_{q1} \times 3600}{C} \quad (2.27)$$

Tundaan geometri adalah waktu tempuh tambahan yang digunakan pengemudi untuk melalui suatu persimpangan apabila dibandingkan dengan lintasan tanpa persimpangan yang disebabkan oleh perlambatan atau percepatan arus kendaraan yang membelok di persimpangan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023).

$$T_G = (1 - R_{KH}) \times P_B \times 6 + (R_{KH} \times 4) \quad (2.28)$$

Keterangan:

P_B = porsi kendaraan membelok pada suatu pendekat

2.7.6 Tingkat Pelayanan

Tingkat pelayanan persimpangan bersinyal ditentukan berdasarkan tambahan waktu tempuh yang diperlukan untuk melewati simpang dibandingkan dengan kondisi tanpa simpang, yang disebut tundaan (Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2015).

Hubungan antara tingkat pelayanan dan tundaan dikategorikan menjadi ke dalam 6 kelas, dengan tingkat pelayanan yang disimbolkan oleh huruf A hingga F. Tingkat pelayanan A menunjukkan kondisi operasi terbaik, sedangkan tingkat pelayanan F menunjukkan kondisi terburuk (Koloway, 2009).

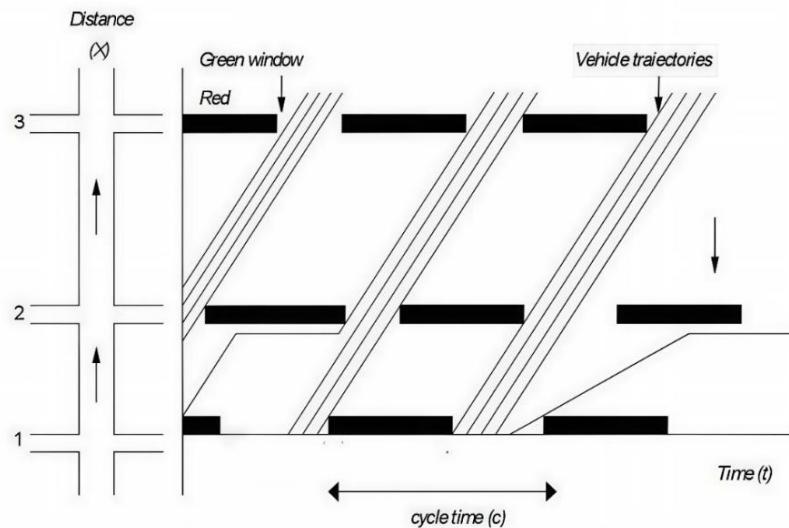
Tabel 2.12 Tingkat Pelayanan Simpang Bersinyal

Tingkat Pelayanan	Tundaan per Kendaraan
A	$\leq 5,0$
B	5,1 – 15,0
C	15,1 – 25,0
D	25,1 – 40,0
E	40,1 – 60,0
F	> 60

(Sumber: Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2015)

2.8 Koordinasi Antar Simpang Bersinyal

Koordinasi antar simpang bersinyal bertujuan untuk meningkatkan efisiensi jaringan jalan dengan mengurangi tundaan dan antrean kendaraan (Taylor et al., 2016). Salah satu sistem yang digunakan adalah *greenwave*, yaitu pengaturan sinyal lalu lintas yang memungkinkan kendaraan melaju tanpa berhenti di setiap simpang. Sinkronisasi sinyal pada simpang yang berdekatan membantu menjaga kelancaran arus lalu lintas dan meningkatkan kinerja jaringan jalan.



Gambar 2.11 Prinsip Koordinasi Antar Simpang Bersinyal dan *Greenwave*

(Sumber: Taylor et al., 2016)

Dalam koordinasi sinyal, terdapat 2 aspek utama yang perlu diperhatikan:

1. Waktu siklus pada setiap simpang disarankan untuk disamakan guna memudahkan sinkronisasi nyala sinyal hijau antar simpang.
2. Pola pengaturan sinyal yang disarankan adalah sistem waktu tetap (*fixed time signal*) agar koordinasi sinyal berlangsung lebih efektif dan berkelanjutan.

Dengan menerapkan kedua prinsip ini, tundaan dan antrean kendaraan dapat dikurangi, sehingga arus lalu lintas lebih lancar dan efisien.

2.8.1 Syarat Koordinasi Simpang Bersinyal

Kendaraan yang meninggalkan suatu simpang cenderung akan tetap membentuk kelompok (*platoon*) hingga mencapai simpang berikutnya. Oleh karena itu, koordinasi sinyal yang berdekatan harus memenuhi beberapa syarat agar arus lalu lintas tetap teratur dan efisien, di antaranya:

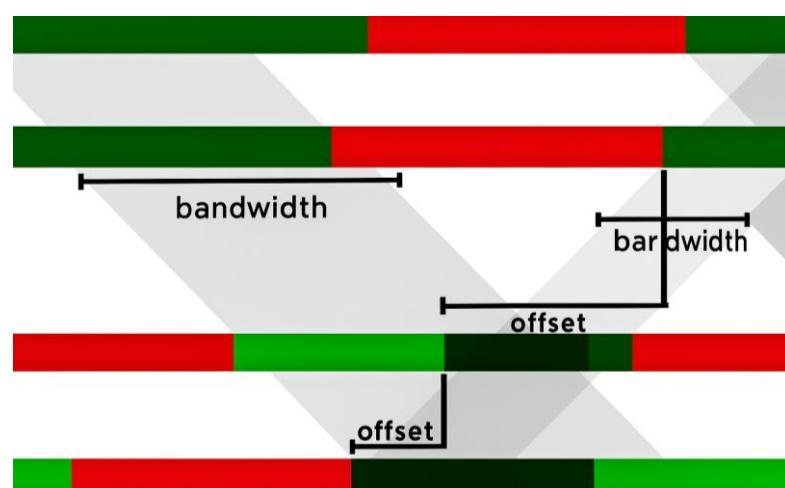
1. Jarak antara simpang yang dikoordinasikan sebaiknya tidak melebihi 800 meter agar koordinasi sinyal tetap efektif.
2. Semua sinyal yang dikoordinasikan harus memiliki waktu siklus (*cycle time*) yang sama.

3. Koordinasi sinyal umumnya diterapkan pada jaringan jalan utama, seperti jalan arteri dan kolektor.
4. Keberadaan sekelompok kendaraan (*platoon*) yang terbentuk akibat pengaturan lampu lalu lintas di bagian hulu simpang (Roess, Prassas, & McShane, 2019).

Sistem koordinasi sinyal bertujuan untuk mengakomodasi volume lalu lintas maksimum sehingga kendaraan dapat melewati simpang tanpa berhenti. Hal ini dilakukan dengan mengatur waktu nyala hijau (*green periods*) pada simpang berikutnya agar sesuai dengan kedatangan kelompok kendaraan (*platoon*). Dengan demikian, arus lalu lintas dapat mengalir lebih lancar dan efisien, sehingga mengurangi tundaan serta meningkatkan kapasitas jalan (Taylor et al., 2016).

2.8.2 *Offset* dan *Bandwidth*

Offset adalah perbedaan waktu antara dimulainya fase hijau pada simpang pertama dan simpang berikutnya, yang dapat dihitung melalui diagram koordinasi. *Offset* juga berperan dalam membentuk lintasan koordinasi agar arus lalu lintas lebih lancar. Sementara itu, *bandwidth* adalah selisih waktu antara fase hijau pada lintasan pertama dan terakhir dalam suatu sistem koordinasi sinyal, sehingga kendaraan dapat bergerak dengan kecepatan konstan tanpa terhambat sinyal merah. Kedua konsep ini berperan penting dalam sinkronisasi sinyal guna mengoptimalkan kelancaran arus lalu lintas (Papacostas & Prevedouros, 2009).



Gambar 2.12 *Offset* dan *Bandwidth* dalam Diagram Koordinasi

(Sumber: Papacostas & Prevedouros, 2009)

2.9 Perangkat Lunak PTV Vissim

Vissim merupakan perangkat lunak simulasi lalu lintas mikroskopis multimoda yang dapat menganalisis pergerakan kendaraan pribadi dan angkutan umum, dengan memperhitungkan faktor-faktor seperti konfigurasi jalur, tipe kendaraan, sinyal lalu lintas, dan lainnya. Oleh karena itu, vissim menjadi alat yang efektif untuk menilai berbagai alternatif dalam perencanaan dan rekayasa transportasi. Vissim dikembangkan oleh PTV (*Planung Transport Verkehr AG*) di Karlsruhe, Jerman. Vissim merupakan singkatan dari “*Verkehr Stadten – SIMulationsmodell*” yang artinya “Lalu Lintas di Kota – Model Simulasi”. Program ini menyediakan kemampuan animasi dengan perangkat tambahan dalam tiga dimensi (Romadhona, Ikhsan, & Prasetyo, 2019).

Dalam proses penggunaan vissim untuk melakukan simulasi lalu lintas, dibutuhkan beberapa data yang dimasukkan (*input*) yang akan digunakan dan diolah menjadi suatu model simulasi (*output*) dan akan dianalisis melalui program PTV Vissim 25.00.

1. Base Data untuk Simulasi Lalu Lintas

Kondisi lalu lintas di jalan raya dapat saling mempengaruhi satu sama lain, sehingga penting untuk menyediakan parameter-parameter di kondisi lalu lintas tersebut dalam pembuatan model simulasi lalu lintas menggunakan *software* PTV Vissim. Untuk itu, penelitian tersebut menggunakan beberapa parameter yaitu:

- a. *Vehicle Input* digunakan untuk memasukkan volume arus lalu lintas.
- b. *2D/3D Model* yaitu membuat model-model untuk kendaraan dan pejalan kaki.
- c. *Vechile Composition* adalah komposisi jenis kendaraan yang ada di dalam lalu lintas. Dalam sebuah jaringan jalan, terdapat berbagai jenis kendaraan yang berbeda, seperti mobil, bus, truk, sepeda motor, dan lain sebagainya. Komposisi kendaraan yang berbeda-beda ini mempengaruhi karakteristik lalu lintas, seperti kecepatan, kepadatan, dan kapasitas jalan.
- d. *Desired Speed Distribution* dapat diatur dan disesuaikan sesuai dengan karakteristik lalu lintas yang akan disimulasikan. *Desired speed*

distribution terdiri dari beberapa parameter, seperti nilai maksimum, nilai minimum, dan rata-rata kecepatan yang diinginkan oleh pengendara kendaraan dalam jaringan lalu lintas.

- e. *Vechile type, class and category* adalah klasifikasi kendaraan yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik kendaraan yang berbeda dalam simulasi lalu lintas. *Vehicle type* mengacu pada jenis kendaraan, seperti mobil penumpang, truk, bus, motor, atau sepeda. Setiap jenis kendaraan memiliki karakteristik yang berbeda, seperti kecepatan maksimum, akselerasi, dan ukuran fisik, yang perlu dipertimbangkan dalam simulasi lalu lintas. *Vehicle class* mengacu pada karakteristik fungsional kendaraan, seperti kendaraan pribadi, kendaraan angkutan umum, dan kendaraan niaga. Jenis kendaraan dalam kelas yang sama biasanya memiliki karakteristik yang serupa, seperti tingkat penggunaan jalan dan pola pergerakan. *Vehicle category* mengacu pada penggunaan kendaraan, seperti kendaraan pribadi, kendaraan dinas, kendaraan komersial, atau kendaraan darurat. Kategori ini dapat memengaruhi perilaku pengemudi dan mempengaruhi kecepatan, akselerasi, dan pola pergerakan kendaraan.
- f. *Driving Behaviour* yaitu parameter yang secara langsung mempengaruhi interaksi antar kendaraan sehingga bisa menyebabkan perbedaan yang signifikan pada hasil simulasi lalu lintas. *Driving behaviour* dihubungkan pada tiap lajur oleh jenis perilakunya. Untuk setiap kelas kendaraan, *driving behaviour* yang berbeda dapat diterapkan bahkan dalam lajur yang sama.
- g. *Signal Control* digunakan untuk mengatur *Traffic Light* pada jaringan jalan.

2. *Traffic Network*

Dalam pengembangan simulasi lalu lintas menggunakan *software* Vissim, elemen dasar yang harus dipahami adalah jaringan lalu lintas atau *Traffic Network*. Elemen dasar dari jaringan lalu lintas tersebut adalah *links* atau penghubung yang merepresentasikan segmen jalan dengan arah arus yang spesifik. Untuk membuat sebuah jaringan lalu lintas, *links* dapat

dihubungkan dengan *connectors*. Hanya *links* yang terhubung dengan *connectors* yang dapat digunakan untuk melanjutkan lalu lintas di dalam jaringan. Oleh karena itu, pemahaman akan elemen-elemen dalam *Traffic Network* sangat penting dalam pengembangan model simulasi lalu lintas. Beberapa elemen yang termasuk dalam *Traffic Network* meliputi:

- a. *Links* merupakan *input* geometri jaringan jalan seperti lebar jalan, panjang jalan dan jumlah lajur.
- b. *Connectors* yaitu *input* geometri jalan yang memiliki fungsi menghubungkan antar *links*.

3. *Evaluation*

Evaluation adalah proses penilaian atau evaluasi terhadap kinerja dari model simulasi lalu lintas yang telah dibuat ada parameter untuk mengevaluasi hasil pemodelan yaitu:

- a. *Configuration* ini berisi perintah untuk mengonfigurasi parameter parameter umum dalam model simulasi, seperti waktu simulasi, interval waktu, skala jaringan, dan sebagainya.
- b. *Database Configuration* ini berisi perintah untuk mengonfigurasi basis data yang digunakan dalam model simulasi, seperti database kendaraan, database pergerakan pejalan kaki, dan database objek-objek lainnya.
- c. *Measurement Definition* ini berisi perintah untuk mendefinisikan pengukuran-pengukuran kinerja dalam model simulasi, seperti pengukuran volume kendaraan, kecepatan rata-rata, waktu tempuh, dan sebagainya.
- d. *Windows* ini berisi perintah untuk membuka atau menutup tampilan jendela pada Vissim, seperti tampilan jendela animasi, tampilan jendela grafik, dan tampilan jendela tabel.
- e. *Result Lists* ini berisi perintah untuk menampilkan daftar hasil simulasi dalam bentuk tabel, seperti daftar volume kendaraan, kecepatan rata-rata, waktu tempuh, dan sebagainya.

2.10 Studi Literatur

Penelitian ini mencakup studi literatur tentang koordinasi antar simpang, di antaranya:

Tabel 2.13 Studi Literatur

No.	Judul	Penulis	Tujuan Penelitian	Sampel Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1	Rekayasa Koordinasi Simpang Bersinyal (Studi Kasus: Simpang Terminal Penggaron dan Simpang Pucang Gading, Semarang)	Fahmi Aminuddin Santoso dan Ibnu Dwi Andhika	Menganalisis kinerja simpang dengan mengkoordinasikan sinyal pada dua simpang bersinyal untuk memperlancar arus lalu lintas dan mengurangi kemacetan saat jam puncak	Simpang Terminal Penggaron dan Simpang Pucang Gading, Semarang	Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997	Waktu siklus baru 71 detik dengan <i>offset</i> 39 detik. <i>Bandwidth</i> 32 detik untuk arah Timur-Barat dan 18 detik untuk arah Barat-Timur. Panjang antrean menurun dari 119,37 m menjadi 80,33 m, derajat kejemuhan menurun dari 0,675 menjadi 0,631, dan tundaan menurun dari 42,39 detik/SMP menjadi 34,39 detik/SMP.

No.	Judul	Penulis	Tujuan Penelitian	Sampel Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
2	Analisis Koordinasi Sinyal Antar Simpang Jalan Ranugrati dan Simpang Jalan Mayjen M. Wiyono Kota Malang	Sadana Devita Hapsari	Menganalisis kinerja simpang dengan mengkoordinasikan sinyal di tiga persimpangan untuk mengurangi antrean dan tundaan	Simpang Jalan Ranugrati dan Simpang Jalan Mayjen M. Wiyono Kota Malang	Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997	Waktu siklus baru sebesar 130 detik dengan <i>offset</i> 77 detik untuk kedua arah. <i>Bandwidth</i> 43 detik ke arah Timur dan 56 detik ke arah Barat. Setelah koordinasi, derajat kejemuhan menurun dari 0,80 ke 0,64, panjang antrean menurun dari 244,45 m ke 229,02 m, tundaan menurun dari 75,10 detik ke 23,08 detik, dan tingkat pelayanan meningkat dari F ke C.
3	Koordinasi Antar Simpang Bersinyal (Studi	Almashavira Murtiyoso	Menganalisis koordinasi sinyal antar simpang di	Ruas Jalan Ki Ageng Gribig Kota Malang	Manual Kapasitas Jalan	Waktu siklus baru sebesar 50 detik. Setelah koordinasi sinyal, derajat kejemuhan

No.	Judul	Penulis	Tujuan Penelitian	Sampel Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
	Kasus: Ruas Jalan Ki Ageng Gribig Kota Malang)		ruas Jalan Ki Ageng Gribig untuk meningkatkan kinerja pada kedua simpang menjadi lebih baik		Indonesia (MKJI) 1997	menurun dari 0,57 menjadi 0,44, tundaan menurun dari 149,06 detik menjadi 16,67 detik, serta tingkat pelayanan meningkat dari kategori F ke kategori B.
4	Analisis Koordinasi Sinyal Antar Simpang Wirobrajan dan Simpang Ngabean Yogyakarta	Krisnandio Sepnanda Patrias	Menganalisis dan merancang koordinasi sinyal pada dua simpang dengan jarak yang dekat untuk mengurangi tundaan dan panjang antrean	Simpang Wirobrajan dan Simpang Ngabean Yogyakarta	Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997	Waktu sinyal baru sebesar 163 detik dengan <i>offset</i> 24 detik. Setelah koordinasi, derajat kejemuhan menurun dari 0,94 menjadi 0,88, panjang antrean berkurang dari 291,5 m menjadi 238 m, dan tundaan menurun dari 120 detik menjadi 79,68 detik.

No.	Judul	Penulis	Tujuan Penelitian	Sampel Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
5	Analisis Koordinasi Simpang Bersinyal Simpang Pasar Pon dan Simpang Nonongan Melalui Pendekatan PKJI 2023 Dan Vissim	Gede Dinar Wangsa	Mengurangi tundaan dan panjang antrean pada simpang Nonongan melalui koordinasi sinyal dengan mempertimbangkan kondisi lalu lintas di simpang Pasar Pon	Simpang Pasar Pon dan Simpang Nonongan Kota Surakarta	Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI 2023) dan PTV Vissim	Pendekat barat Simpang Nonongan mengalami penurunan panjang antrean sebesar 56,7% dan waktu tundaan sebesar 45,8%.