

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Data Masukan

Berdasarkan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (1997), arus lalu lintas (Q) merupakan jumlah kendaraan bermotor yang melewati suatu titik pada jalan per satuan waktu, dinyatakan dalam kend/jam (Q_{kend}), smp/jam (Q_{smp}) atau LHRT (Lalu-lintas Harian Rata-Rata Tahunan).

Menurut Abubakar dkk., (1995), karakteristik arus lalu lintas (Q) terdiri dari:

1. Karakteristik primer

Karakteristik primer dari arus lalu lintas terbagi menjadi tiga macam, yaitu: volume, kecepatan dan kepadatan.

2. Karakteristik sekunder

Karakteristik sekunder yang terpenting adalah jarak-antara. Ada dua parameter jarak-antara yaitu waktu-antara kendaraan dan jarak-antara kendaraan. Jika hanya arus lalu lintas harian (LHRT) saja yang ada tanpa diketahui distribusi lalu lintas pada setiap jamnya, maka arus rencana per jam dapat diperkirakan sebagai suatu persentase dari LHRT sebagai berikut:

Tabel 3.1 Arus Rencana Per Jam Suatu Persentase dari LHRT

Tipe Kota dan Jalan	Faktor persen k $k \times LHRT = \text{ arus rencana/jam}$
Kota-kota >1 juta penduduk	
- jalan-jalan pada daerah komersial dan jalan arteri	7-8%
- jalan pada daerah permukiman	8-9%
Kota-kota \leq 1 juta penduduk	
- jalan-jalan pada daerah komersial dan jalan arteri	8-10%
- jalan pada daerah permukiman	9-12%

Sumber: Manual Kapasitas Jalan Indonesia (1997)

$$q_{jd} = k \times LHRT \quad (3-1)$$

Keterangan:

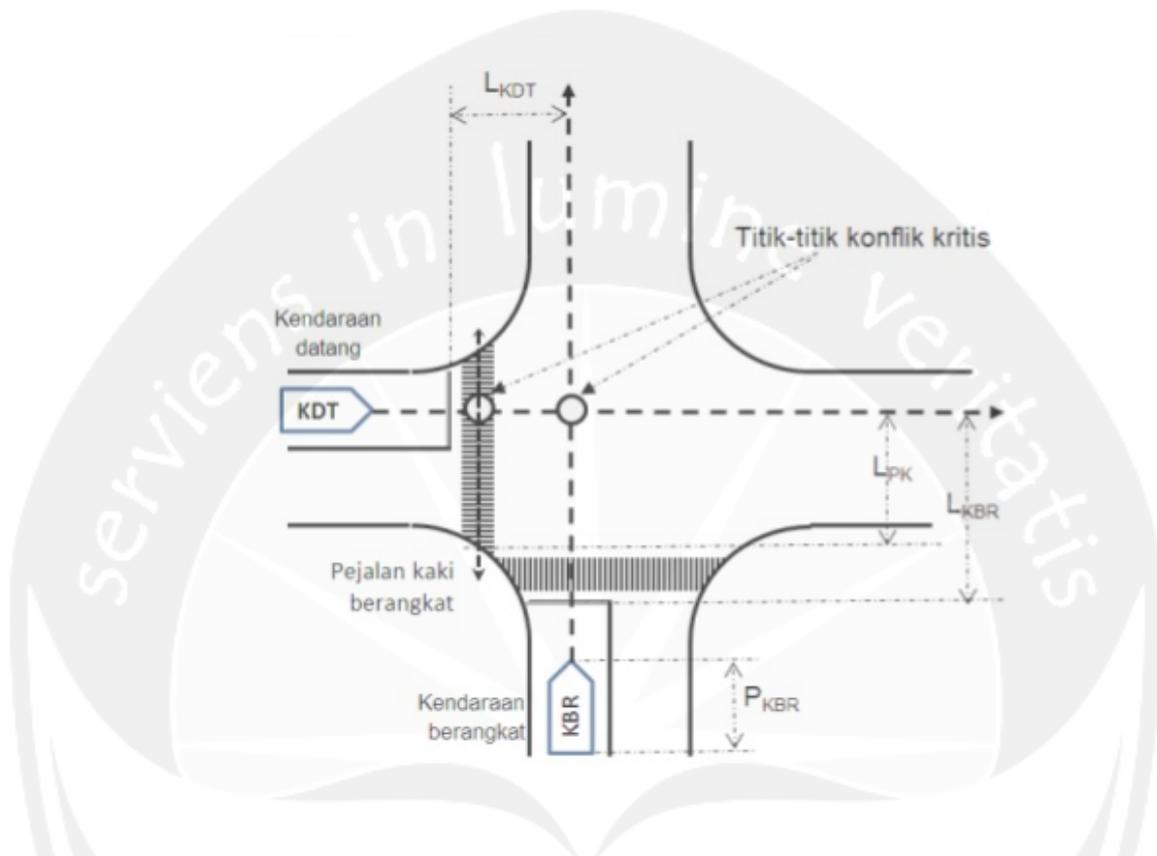
LHRT = volume lalu lintas harian rata-rata tahunan, dinyatakan dalam skr/hari.

K = faktor jam rencana, ditetapkan dari kajian fluktuasi arus lalu lintas jam-jaman selama satu tahun. Nilai k yang dapat digunakan untuk jalan perkotaan berkisar antara 7%-12%.

3.2 Penggunaan Sinyal

Waktu merah semua diperlukan untuk pengosongan pada area konflik pada akhir setiap fase untuk memberi kesempatan bagi kendaraan terakhir (KBR pada Gambar 3.1) melewati garis henti pada akhir sinyal kuning dari titik konflik

sebelum kedatangan yang pertama sampai fase berikutnya (melewati garis henti pada awal sinyal hijau) pada titik yang sama.



Gambar 3.1 Titik Konflik dan Jarak Untuk Keberangkatan dan Kedatangan (sumber: Manual Kapasitas Jalan Indonesia 1997)

Jarak ini adalah panjang lintasan keberangkatan (L_{EV}) ditambah panjang kendaraan berangkat (I_{EV}) sebelum kedatangan kendaraan pertama yang didatangi dari arah lain (KDT) pada fase berikutnya yang melewati garis henti pada awal isyarat hijau sampai ke titik konflik yang sama dengan jarak lintasan L_{AV} . Jadi, M_{semua} merupakan fungsi dari kecepatan dan jarak dari kendaraan yang berangkat dan yang datang dari garis henti masing-masing arah sampai ke titik konflik, serta panjang dari kendaraan yang berangkat (I_{ev}). Dalam hal waktu lintasan pejalan kaki (L_{PK}) lebih lama ditempuh dibandingkan L_{EV} , maka

L_{PK} yang menentukan panjang lintasan berangkat (Manual Kapasitas Jalan Indonesia 1997).

Titik konflik kritis pada masing-masing fase (i) adalah titik yang menghasilkan waktu merah semua terbesar. Merah semua per fase dipilih yang terbesar dari dua hitungan waktu lintasa, yaitu kendaraan berangkat dan pejalan kaki.

$$M_{semua_i} = \left[\frac{(L_{EV} + l_{ev})}{V_{EV}} - \frac{L_{AV}}{V_{AV}} \right] Max \quad (3-2)$$

Keterangan:

L_{EV}, L_{AV} = jarak dari garis henti ke konflik masing-masing untuk kendaraan yang berangkat dan yang datang (m)

l_{EV} = panjang kendaraan yang berangkat (m)

V_{EV}, V_{AV} = kecepatan masing-masing untuk kendaraan yang berangkat dan yang datang (m/det).

Nilai-nilai yang dipilih untuk V_{EV}, V_{AV} dan l_{EV} tergantung dari komposisi lalu lintas dan kondisi kecepatan pada lokasi. Nilai-nilai berikut dapat digunakan sebagai pilihan jika nilai baku tidak tersedia (Manual Kapasitas Jalan Indonesia 1997).

V_{AV} : 10 m/det (kendaraan bermotor)

V_{EV} : 10 m/det (kendaraan bermotor)

3 m/det (kendaraan tak bermotor misalnya sepeda)

1,2 m/det (pejalan kaki)

I_{EV} : 5 m (LV atau HV)

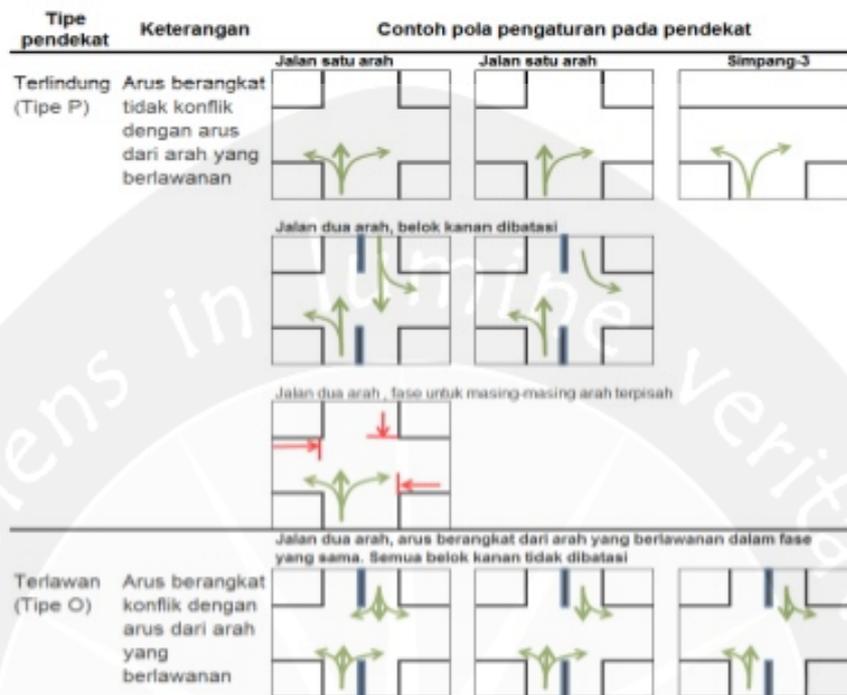
2 m (MC atau UM)

Panjang waktu kuning pada sinyal lalu lintas perkotaan di Indonesia biasanya adalah 3,0 detik.

3.3 Penentuan Waktu Sinyal

3.3.1 Tipe pendekat

Apabila arus lalu lintas pada suatu pendekat diberangkatkan pada fase yang berbeda harus dianalisis secara terpisah (misalnya lalu lintas lurus dan lalu lintas belok kanan dengan lajur terpisah), dan diperlakukan sebagai pendekat-pendekat terpisah dalam perhitungan selanjutnya. Apabila suatu pendekat mempunyai hijau pada dua fase, dimana pada keadaan tersebut tipe lajur dapat berbeda untuk masing-masing fase, satu baris sebaiknya digunakan untuk menganalisis data masing-masing fase, dan satu baris tambahan untuk memasukkan hasil gabungan untuk pendekat tersebut (Manual Kapasitas Jalan Indonesia 1997).



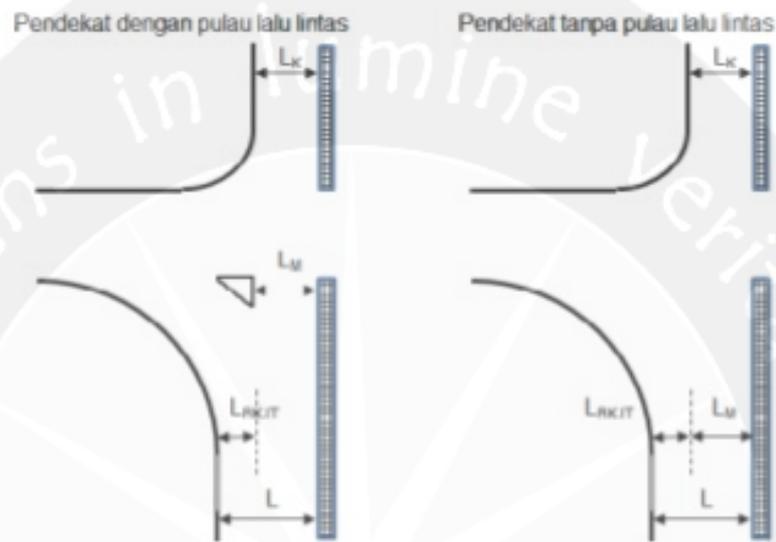
Gambar 3.2 Penentuan Tipe Pendekat

(Sumber: Manual Kapasitas Jalan Indonesia 1997)

3.3.2 Lebar pendekat efektif

Penentuan lebar efektif (W_e) dari setiap pendekat berdasarkan lebar pendekat (W_a), lebar masuk (W_{masuk}) dan lebar keluar (W_{keluar}). Untuk pendekat tanpa belok kiri langsung (LTOR), lebar keluar hanya untuk pendekat tipe P. Jika $W_{keluar} < W_e \times (1 - P_{RT} - P_{LTOR})$, W_e sebaiknya diberi nilai baru yang sama dengan W_{keluar} dan analisa penentuan waktu sinyal untuk pendekat ini dilakukan hanya bagian lalu lintas lurus saja yaitu, $Q = Q_{st}$. Untuk pendekat dengan belok kiri langsung (LTOR), lebar efektif (W_e) dapat dihitung untuk pendekat dengan pulau lalu lintas, penentuan lebar masuk (W_{masuk}) seperti

ditunjukkan pada Gambar 3.3 sebelah kiri. Jika untuk pendekat tanpa pulau lalu lintas yang ditunjukkan pada bagian kanan Gambar 3.3 maka $W_{masuk} = W_a - W_{LTOR}$ (Manual Kapasitas Jalan Indonesia 1997).



Gambar 3.3 Lebar Pendekat dengan dan Tanpa Pulau Lalu Lintas (sumber: Manual Kapasitas Jalan Indonesia 1997)

Jika $W_{LTOR} \geq 2 m$: Dalam hal ini kendaraan LTOR dapat mendahului antrian kendaraan lurus dan belok kanan dalam pendekat selama sinyal merah.

Langkah 1 : Keluarkan arus belok kiri langsung Q_{LTOR} dari perhitungan selanjutnya sehingga lebar pendekat efektif adalah sebagai berikut:

$$W_e = \text{Min} \begin{cases} W_a - W_{LTOR} \\ W_{masuk} \end{cases} \quad (3-3)$$

Langkah 2 : Periksa lebar keluar (hanya untuk pendekat tipe P)

Jika $W_{keluar} < W_e \times (1 - P_{RT})$, W_e sebaiknya diberi nilai baru yang sama dengan W_{keluar} dan analisa penentuan waktu sinyal untuk pendekat ini dilakukan hanya bagian lalu lintas lurus saja yaitu, $Q = Q_{st}$.

Jika $W_{LTOR} < 2m$: Dalam hal ini kendaraan LTOR tidak dapat mendahului antrian kendaraan lainnya dalam pendekat selama sinyal merah.

Langkah 1 : Sertakan Q_{LTOR} pada hitungan selanjutnya.

$$W_e = \min \begin{matrix} W_a \\ W_{masuk} + W_{LTOR} \\ W_a \times (1 - P_{LTOR}) - W_{LTOR} \end{matrix} \quad (3-4)$$

Langkah 2 : Periksa lebar keluar (hanya untuk pendekat tipe P).

Jika $W_{keluar} < W_e \times (1 - P_{RT} - P_{LTOR})$, W_e sebaiknya diberi nilai baru yang sama dengan W_{keluar} dan analisa penentuan waktu sinyal untuk pendekat ini dilakukan hanya bagian lalu lintas lurus saja yaitu, $Q = Q_{st}$.

3.3.3 Arus lalu lintas (Q)

Arus lalu lintas (kend/jam) adalah volume kendaraan yang terdiri dari kendaraan ringan (LV), kendaraan berat (HV) dan sepeda motor (MC) per jam dari hasil pengamatan di lapangan. Arus lalu lintas (smp/jam) adalah volume kendaraan yang terdiri dari kendaraan ringan (LV), kendaraan berat (HV) dan sepeda motor (MC) per jam yang telah dikalikan dengan emp untuk tipe pendekat.

Nilai arus lalu lintas (smp/jam) dapat dihitung dengan persamaan 3.5 sebagai berikut:

$$Q = Q_{LV} + Q_{HV} \times emp_{HV} + Q_{MC} \times emp_{MC} \quad (3-5)$$

3.3.4 Arus jenuh dasar (So)

Arus jenuh (S, smp/jam) adalah hasil perkalian antara arus jenuh dasar (So) dengan faktor-faktor penyesuaian untuk penyimpangan kondisi eksisting terhadap kondisi ideal. So adalah S pada keadaan lalu lintas dan geometrik yang ideal, sehingga faktor-faktor penyesuaian untuk So adalah satu.

1. Untuk pendekat tipe P (arus terlindung)

$$So = 600 \times We \text{ smp/jam hijau} \quad (3-6)$$

2. Untuk pendekat tipe 0 (arus berangkat terlawan)

Nilai So ditentukan dari gambar pada Manual Kapasitas Jalan Indonesia (1997) yang terbagi untuk pendekat tanpa lajur belok kanan terpisah dan untuk pendekat lajur belok kanan terpisah dengan fungsi dari We, Q_{RT}, Q_{LTOR} . Jika So diketahui pada keadaan dimana lebar pendekat lebih besar dan lebih kecil daripada W sebenarnya kemudian dihitung dengan cara interpolasi.

3.3.5 Arus jenuh yang telah disesuaikan (S)

Nilai arus jenuh yang telah disesuaikan (S) dapat dihitung dengan persamaan 3.7 sebagai berikut:

$$S = So \times F_{cs} \times F_{sf} \times F_g \times F_p \times F_{rt} \times F_{lt} \text{ smp/jam hijau} \quad (3-7)$$

Keterangan:

S = arus jenuh (smp/waktu hijau efektif)

- So = arus jenuh dasar (smp/waktu hijau efektif)
- Fcs = faktor koreksi arus jenuh akibat ukuran kota (jumlah penduduk)
- Fsf = faktor koreksi arus jenuh akibat adanya gangguan samping
- Fg = faktor koreksi arus jenuh akibat kelandaian jalan
- Fp = faktor koreksi arus jenuh akibat adanya kegiatan perpajakan dekat dengan lengan persimpangan
- Flt = faktor koreksi arus jenuh akibat adanya pergerakan belok kiri
- Frt = faktor koreksi arus jenuh akibat adanya pergerakan belok kanan

Tipe persimpangan mempengaruhi nilai besarnya setiap faktor koreksi arus jenuh. Penjelasan rinci mengenai setiap faktor koreksi arus jenuh dapat ditemukan dalam Manual Kapasitas Jalan Indonesia (1997).

Jika suatu pendekat mempunyai sinyal hijau lebih dari satu fase, yang arus jenuhnya telah ditentukan secara terpisah, maka nilai arus jenuh kombinasi harus dihitung secara proposional terhadap waktu hijau masing-masing fase. Contoh jika suatu pendekat bersinyal hijau pada kedua fase 1 dan fase 2 dengan waktu hijau g_1 dan g_2 dan arus jenuh S_1 dan S_2 , nilai kombinasi S_{1+2} dihitung dalam persamaan 3.8 sebagai berikut:

$$S_{1+2} = \frac{S_1 \times g_1 + S_2 \times g_1}{g_1 + g_2} \quad (3-8)$$

Jika salah satu dari fase tersebut adalah fase pendek, misalnya “waktu hijau awal”, dimana satu pendekat menyala hijau beberapa saat sebelum mulainya hijau pada arah berlawanan, disarankan untuk menggunakan hijau awal ini antara 1/4 sampai 1/3 dari total hijau pendekat yang diberi awal hijau. Perkiraan yang

sama dapat digunakan untuk “waktu hijau akhir” dimana nyala hijau pada satu pendekat diperpanjang beberapa saat setelah berakhirnya nyala hijau pada arah yang berlawanan. Lama waktu hijau awal dan akhir harus tidak lebih pendek dari 10 detik. Contohnya waktu hijau awal sama dengan 1/3 dari total waktu hijau dari pendekat dengan waktu hijau awal.

$$S_{1+2} = 0,33 \times S1 + 0,67 \times S1 \quad (3-9)$$

3.3.6 Rasio arus/rasio arus jenuh (FR)

Untuk menghitung rasio arus (FR) memperhatikan bahwa jika LTOR harus dikeluarkan dari analisa hanya arus lurus dan belok kanan saja yang dimasukkan dalam nilai Q. Jika lebar $We = W_{keluar}$ hanya arus lurus saja yang dimasukkan dalam nilai Q. Jika suatu pendekat mempunyai sinyal hijau dalam dua fase, yang satu untuk arus terlawan (O) yang lainnya arus terlindung (P). Maka, rasio arus (FR) masing-masing pendekat dapat dihitung dengan persamaan 3.10 sebagai berikut:

$$FR = \frac{Q}{S} \quad (3-10)$$

Rasio arus simpang (IFR) dihitung sebagai jumlah dari nilai-nilai FR kritis.

$$IFR = E (FR_{crit}) \quad (3.11)$$

Rasio fase (PR) dihitung masing-masing fase sebagai rasio antara FR_{crit} dan IFR.

$$PR = FR_{crit} / IFR \quad (3.12)$$

3.3.7 Waktu siklus

Waktu isyarat terdiri dari waktu siklus (c) dan waktu hijau (g). hitungan waktu siklus sebelum penyesuaian (Cua) untuk pengendalian waktu tetap.

$$Cua = (1,5 \times LTI + 5) / (1 - IFR) \quad (3.13)$$

Keterangan:

Cua = waktu siklus sebelum penyesuaian sinyal (det)

LTI = waktu hilang total per siklus (det)

IFR = rasio arus simpang

3.3.8 Waktu hijau

Waktu hijau (g) untuk masing-masing fase sebagai berikut:

$$Gi = (Cua - LTI) \times PRi \quad (3.14)$$

Keterangan:

gi = tampilan waktu hijau pada fase I (det)

Cua = waktu siklus sebelum penyesuaian (det)

LTI = waktu hilang total per siklus

PRi = rasio fase $FR_{crit} / \sum FR_{crit}$

Waktu hijau lebih pendek dari 10 detik harus dihindari, karena dapat mengakibatkan pelanggaran lampu merah yang berlebihan dan kesulitan bagi pejalan kaki untuk menyebrang jalan.

3.3.9 Derajat kejenuhan

Derajat kejenuhan (DS) dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$DS = Q/C \quad (3.15)$$

3.4 Kapasitas (C)

Kapasitas simpang APILL dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$C = S \times g/c \quad (3.16)$$

Keterangan:

C = kapasitas simpang APILL, smp/jam

S = arus Jenuh, smp/jam

G = total waktu hijau dalam satu siklus, detik

c = waktu siklus, detik

3.5 Kinerja Lalu Lintas Simpang APILL

3.5.1 Panjang antrian

Jumlah rata-rata antrian kendaraan (smp) pada awal isyarat lampu hijau (NQ) dihitung sebagai jumlah kendaraan terhenti (smp) yang tersisa dari fase hijau sebelumnya (NQ1) ditambah jumlah kendaraan (smp) yang datang dan terhenti dalam antrian selama fase merah (NQ2), dihitung dengan persamaan 3.17 Manual Kapasitas Jalan Indonesia (1997).

$$NQ = NQ1 + NQ2 \quad (3-17)$$

Untuk $DS > 0,5$ maka:

$$NQ1 = 0,25 \times C \times \left[(DS-1) + \sqrt{(DS-1)^2 + \frac{8 \times (DS-0,5)}{c}} \right] \quad (3.18)$$

Untuk $DS < 0,5$ maka : $NQ1 = 0$

$$NQ2 = c \times \frac{1-GR}{1-GR \times DS} \times \frac{Q}{3600} \quad (3.19)$$

Panjang antrian (QL) dengan mengalikan NQmax dengan luas rata-rata yang digunakan per smp (20 m²) kemudian dibagi dengan lebar masuknya. Seperti pada persamaan 3.20 sebagai berikut:

$$QL = \frac{NQ_{max} \times 20}{W_{masuk}} \quad (3.20)$$

3.5.2 Rasio kendaraan henti

Angka henti (NS) masing-masing pendekat yang didefinisikan sebagai jumlah rata-rata berhenti per smp (termasuk berhenti berulang dalam antrian), dihitung dengan persamaan 3.21 sebagai berikut:

$$NS = 0,9 \times \frac{NQ}{Q \times c} \times 3600 \quad (3.21)$$

Keterangan:

NQ = jumlah rata-rata antrian kendaraan (smp) pada awal isyarat hijau

C = waktu siklus (detik)

Q = arus lalu lintas (smp/jam)

Menghitung jumlah kendaraan terhenti (Nsv) masing-masing pendekat dengan persamaan 3.22 sebagai berikut:

$$Nsv = Q \times NS \text{ (smp/jam)} \quad (3.22)$$

Menghitung angka henti seluruh simpang dengan cara membagi jumlah kendaraan terhenti pada seluruh pendekat dengan arus simpang total Q dalam kendaraan/jam, pada persamaan 3.23 sebagai berikut:

$$N_{Stot} = \frac{\sum N_{sv}}{Q_{tot}} \quad (3.23)$$

3.5.3 Tundaan

Tundaan pada suatu simpang terjadi karena dua hal yaitu, tundaan lalu lintas (DT) dan tundaan geometri (DG). Tundaan rata-rata untuk satu pendekat i dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.24 sebagai berikut:

$$T_i = DT + DG \quad (3.24)$$

Tundaan lalu lintas rata-rata setiap pendekat (DT) dapat dihitung dengan persamaan 3.25 sebagai berikut:

$$DT = c \times A + \frac{NQ1 \times 3600}{C} \quad (3.25)$$

Keterangan:

DT = tundaan lalu lintas rata-rata (det/smp)

C = waktu siklus yang disesuaikan (detik)

$$A = \frac{0,5 \times (1 - GR)^2}{(1 - GR \times DS)} \quad (3.26)$$

GR = rasio hijau (g/c)

DS = derajat kejenuhan

NQ1 = jumlah smp yang tersisa dari fase hijau sebelumnya

C = kapasitas (smp/jam)

Tundaan geometri rata-rata masing-masing pendekat (DG) akibat perlambatan dan percepatan ketika menunggu giliran pada suatu simpang dan/atau ketika dihentikan oleh lampu merah, maka persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$DG_j = (1 - P_{sv}) \times P_t \times 6 \times (P_{sv} \times 4) \quad (3.27)$$

Keterangan:

DG_j = tundaan geometri rata-rata untuk pendekat j (detik/smp)

P_{sv} = rasio kendaraan terhenti pada pendekat = $\min(NS, 1)$

P_t = rasio kendaraan berbelok pada pendekat

3.6 Pertumbuhan Lalu Lintas (i)

Berdasarkan Manual Perkerasan Jalan (2017), faktor pertumbuhan lalu lintas berdasarkan data-data pertumbuhan series (*historical growth data*) atau formulasi korelasi dengan faktor pertumbuhan lain yang berlaku. Jika tidak tersedia data maka dapat digunakan data dalam Tabel 3.2 (2015-2035).

Tabel 3.2 Faktor Laju Pertumbuhan Lalu Lintas (i) (%)

	Jawa	Sumatera	Kalimantan	Rata-rata Indonesia
Arteri dan perkotaan	4,80	4,83	5,14	4,75
Kolektor rural	3,50	3,50	3,50	3,50
Jalan desa	1,00	1,00	1,00	1,00

sumber: Manual Perkerasan Jalan (2017)

Pertumbuhan lalu lintas selama umur rencana dihitung dengan faktor pertumbuhan kumulatif (*Cumulative Growth Factor*):

$$R = \frac{(1+0,01i)^{UR} - 1}{0,01i} \quad (3.28)$$

Keterangan:

R = faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif

i = laju pertumbuhan lalu lintas tahunan (%)

UR = umur rencana (tahun)