

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lokasi Penyempitan Ruas Jalan (LPRJ)

LPRJ adalah suatu segmen sebagai bagian dari ruas jalan yang ditutup pada sebagian lebar jalannya karena adanya suatu kegiatan di jalan. Pada umumnya LPRJ diakibatkan oleh kegiatan konstruksi atau perbaikan jalan, sehingga dapat dikatakan istilah lain untuk LPRJ adalah zona kerja (*work zone*).

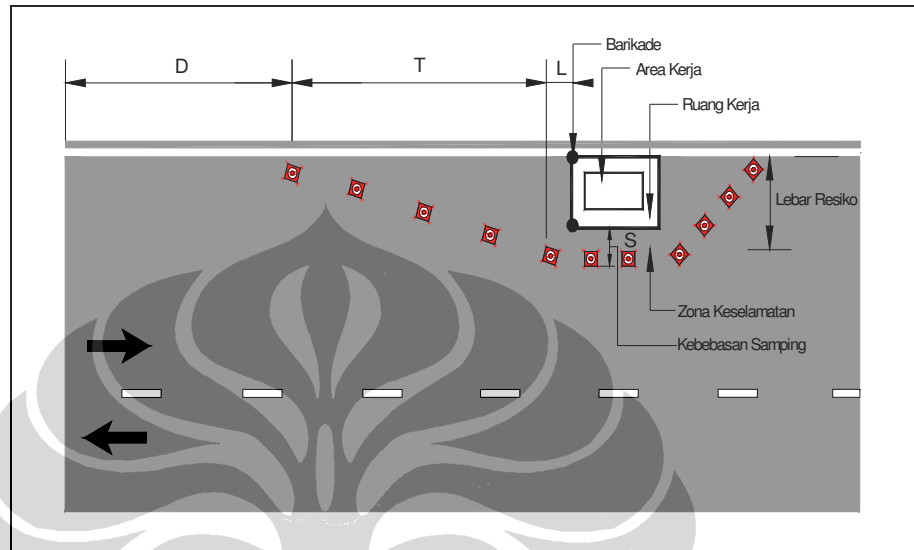
Zona Kerja (*Work Zone*)

Manual yang dikeluarkan oleh Inggris (*DTLR*, 2002) membagi bagian-bagian zona kerja sebagai berikut:

- a. Area kerja (*working area*) : adalah lokasi dimana pekerjaan berlangsung
- b. Ruang kerja (*working space*) : adalah ruang di sekitar lokasi kerja yang digunakan untuk menempatkan peralatan, material galian/timbunan, *batching plant*, dan lain lain. Ruang ini termasuk wilayah untuk sirkulasi pergerakan dalam bekerja.
- c. Zona keselamatan (*safety zone*) : adalah zona yang disediakan untuk melindungi pekerja dari lalu lintas dan juga melindungi kelancaraan lalu lintas dari pekerja. Wilayah ini tidak boleh dimasuki sepanjang berlangsungnya pekerjaan, dan dapat dimasuki hanya untuk kepentingan pemeliharaan/pemasangan kerucut lalu lintas dan rambu-rambu. Zona keselamatan meliputi:
 - Panjang taper (T), bervariasi sesuai dengan batas kecepatan dan luasan pekerjaan. Akhir taper selalu bersudut 45° terhadap garis kerb atau pinggir jalan.
 - Panjang ruang bebas (*clearance*) (L), merupakan panjang antara akhir taper masuk dari kerucut dan ruang kerja. Ini akan bervariasi tergantung dari batas kecepatan.
 - Kebebasan samping (S), merupakan ukuran dari batas terluar ruang kerja sampai ujung bagian kerucut dengan bagian terdekat lalu lintas. Ini akan

bervariasi tergantung dari batas kecepatan.

Tata letak zona kerja disajikan pada Gambar 2.1 dan dimensi zona keselamatan disajikan pada Tabel 2.1.



Gambar 2.1. Tata Letak Zona Kerja

Sumber: Code of Practice - Safety At Street Works And Road Works (DTLR,2002)

Sementara itu, definisi zona kerja di Amerika Serikat (NYSDOT, 2005) adalah jarak antara rambu-rambu peringatan yang pertama dengan titik di luar area kerja dimana lalu lintas tidak lagi terpengaruh. Gambaran masing-masing bagian zona kerja disajikan pada Gambar 2.2.

Kriteria panjang taper pada zona kerja ditentukan menurut lokasi zona kerja sebagai berikut:

- Taper Gabung (*merge taper/L*): jika satu lajur ditutup dan kendaraan pada lajur tersebut harus bergabung dengan lalu lintas pada lajur di sampingnya.
- Taper Perpindahan (*shifting taper/L/2*): bila terdapat penggunaan sebagian lajur namun tidak terjadi pengurangan jumlah lajur pergerakan
- Taper Bahu (*shoulder taper/L/3*): jika bahu tertutup untuk lalu lintas
- Satu lajur, Taper dua arah: jika satu lajur dari ruas jalan dua lajur dua arah ditutup untuk lalu lintas dan jika mengakibatkan operasi jalan bergantian pada satu lajur.

Tabel 2.1. Ukuran dan Jarak Pemasangan : Detail dari Rambu dan Dimensi Zona Keselamatan

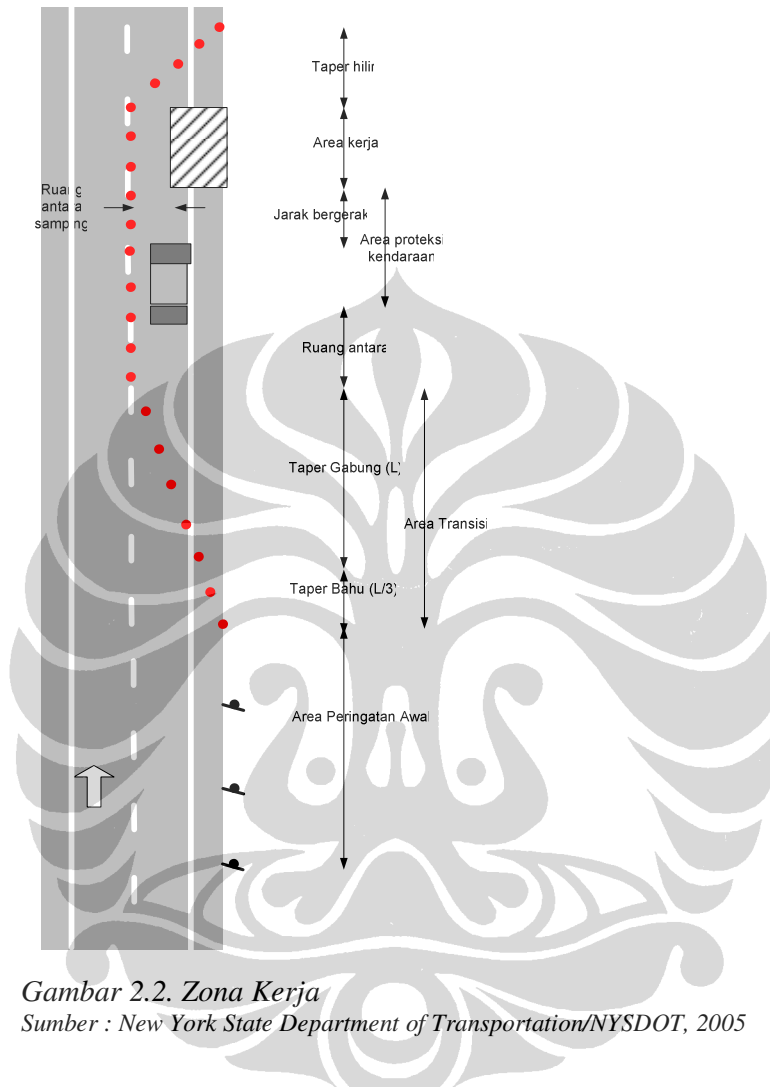
Tipe jalan	Jarak penempatan dari rambu pertama sampai awal masuk ke taper (D/meter)	Minimum pandangan bebas ke rambu pertama (meter)	Minimum ukuran dari rambu (mm)	Minimum tinggi kerucut (mm)	Zona keselamatan sisi jalan (S)	Panjang taper yang direkomendasikan	Lebar resiko (termasuk zona keselamatan/S) (meter)						
							1	2	3	4	5	6	7
Badan jalan tunggal, Kecepatan < 45 km/jam	20 sampai 25	60	600	450	0,5 m	Panjang taper (T) dalam meter	13	26	39	52	65	78	91
						Jumlah minimum kerucut	4	4	6	7	9	10	12
						Jumlah minimum lampu malam hari	3	3	5	6	8	9	11
Badan jalan tunggal, Kecepatan 46-60 km/jam	45 sampai 110	60	750	450	0,5 m	Panjang taper (T) dalam meter	24	40	60	80	100	120	140
						Jumlah minimum kerucut	4	6	8	10	13	15	17
						Jumlah minimum lampu malam hari	3	5	7	9	12	14	16
Seluruh badan jalan ganda, Kecepatan < 45 km/jam	110 sampai 275	60	750	450	0,5 m	Panjang taper (T) dalam meter	25	50	75	100	125	150	175
						Jumlah minimum kerucut	4	7	10	13	15	18	21
						Jumlah minimum lampu malam hari	3	6	9	12	14	17	20
Badan jalan tunggal, Kecepatan ≥ 60 km/jam	275 sampai 450	75	750	450	1,2 m	Panjang taper (T) dalam meter	25	50	75	100	125	150	175
						Jumlah minimum kerucut	4	7	10	13	15	18	21
						Jumlah minimum lampu malam hari	3	6	9	12	14	17	20
Seluruh badan jalan ganda, Kecepatan ≥ 45 km/jam	725 sampai 1600	105	1200	750	1,2 m	Panjang taper (T) dalam meter	32	64	96	128	160	192	224
						Jumlah minimum kerucut	5	9	12	16	19	23	26
						Jumlah minimum lampu malam hari	4	8	11	15	18	22	25

Batas kecepatan (km/jam)	45 atau kurang	60	75	90	115
Minimum panjang ruang bebas (L), meter	0,5	15	30	60	100

Sumber : Code of Practice - Safety At Street Works And Road Works (DTLR, 2002)

- Taper hilir: jika lalu lintas transisi kembali ke kondisi normal.

Standar panjang taper disajikan pada Tabel 2.2.



Gambar 2.2. Zona Kerja

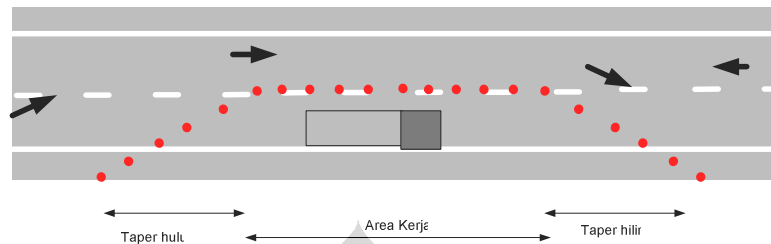
Sumber : New York State Department of Transportation/NYS DOT, 2005

Tabel 2.2. Standar Panjang Taper (L)

Lebar yang digunakan (meter)	kecepatan ke 85 pada ruas jalan (km/jam)								
	48	56	64	72	80	88	97	105	113
0.6	9	12	17	27	30	34	37	40	43
1.2	18	24	32	55	61	67	73	79	85
1.8	27	38	49	82	91	101	110	119	128
2.4	37	50	66	110	122	134	146	158	171
3.0	46	62	81	137	152	168	183	198	213
3.7	55	75	98	165	183	201	219	238	256

Sumber : New York State Department of Transportation/NYS DOT, 2005

Pada jalan dua lajur dua arah yang ditutup untuk lalu lintas dan mengakibatkan operasi jalan bergantian pada satu lajur, Taper hulu disarankan 15-30 meter, sedangkan taper hilir 30 meter seperti disajikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Taper Pada Lalu Lintas Satu Lajur Dua Arah
Sumber : New York State Department of Transportation/NYS DOT, 2005

2.2. Pemilihan Kontrol Lalu Lintas Pada Zona Kerja

Manual yang dikeluarkan oleh Inggris (*DTLR*, 2002) juga memberikan standar metode kontrol lalu lintas yang harus dipilih untuk meminimalkan gangguan lalu lintas akibat keluar/masuk kendaraan kerja bergantung pada batas kecepatan yang diijinkan dan arus lalu lintas yang melewati jalan tersebut. Pemilihan metode kontrol lalu lintas disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Pemilihan Metode Kontrol Lalu Lintas

Metode	Batas Kecepatan Maksimum (km/jam)	Panjang Pekerjaan (dari awal taper sampai akhir taper)	Arus Lalu Lintas (maksimum)	Catatan
Jalan Bergantian	40	≤ 50 meter	20 kend dalam 3 menit & 20 kendaraan berat per jam	Rambu
Prioritas	60	≤ 80 meter	42 kendaraan dalam 3 menit	Rambu
Papan Stop/Jalan	60	100 meter 200 meter 300 meter 400 meter 500 meter	70 kend / 3 menit 63 kend / 3 menit 53 kend / 3 menit 47 kend / 3 menit 42 kend / 3 menit	Perambuan [Konsultasi dengan pihak terkait bila berada dekat atau pada lokasi perlintasan sebidang dengan jalan KA]
Lampu lalu lintas Portabel	60	≤ 300 meter	Tidak ada batasan	Perambuan [Konsultasi dengan pihak terkait bila berada dekat atau pada lokasi perlintasan sebidang dengan jalan KA]
Rambu Stop- Ada Pekerjaan	60	Tidak ada batasan	Tidak ada batasan	Maks periode - 2 menit

Sumber : Code of Practice - Safety At Street Works And Road Works (*DTLR*, 2002)

Pada umumnya pengaturan lalu lintas bergantian secara manual dilakukan oleh dua orang petugas yang membawa bendera atau rambu papan berwarna merah yang berarti STOP dan hijau berarti JALAN. Namun demikian, petugas pengatur lalu lintas memiliki keterbatasan dalam pengambilan keputusan khususnya bila panjang pekerjaan semakin bertambah yang mengakibatkan jarak pandang terbatas dan volume lalu lintas kedua arah makin tinggi. Kesalahan dalam pengambilan keputusan akan menimbulkan peningkatan waktu tunggu atau tundaan yang dialami oleh kendaraan yang terindikasi dengan panjangnya antrian kendaraan.

Untuk mengatasi permasalahan di atas, maka pada kondisi tertentu pengaturan lalu lintas bergantian secara manual ini dapat digantikan oleh Alat Pemberi Isyarat Lalu Lintas (APILL) yang bersifat sementara atau dapat bersifat semi permanen apabila pekerjaan berlangsung cukup lama. Daniels Giner et al (2000) dalam penelitiannya memberikan usulan penambahan kriteria pada the Texas Manual on Uniform Traffic-Kontrol Devices (*TMUTCD*, 1996) tentang pemasangan APILL portabel untuk pekerjaan pada jalan dua lajur dua arah tidak hanya untuk pekerjaan jangka panjang, tetapi juga dengan waktu pendek.

Sementara itu, batasan kontrol lalu lintas pada LPRJ berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan oleh Widjajanti E (2006) menyimpulkan antara lain:

1. Kriteria kontrol lalu lintas pada LPRJ yang berada di jalan dua lajur dua arah adalah seperti disajikan pada Tabel 2.4

Tabel 2.4. Kriteria Kontrol Lalu Lintas Pada LPRJ

panjang LPRJ (meter)	Arus lalu lintas (kend/jam)	kontrol lalu lintas
<80	<250	Rambu-rambu, prioritas
>80	250-800	Diatur secara bergantian secara manual atau APILL dengan flashing (lampu merah berkedip)
>80	>800	Diatur secara bergantian secara manual atau APILL dengan operasi penuh

Sumber : Widjajanti E, 2006

2. Persamaan untuk menghitung arus lalu lintas maksimum yang dapat dilayani untuk mendapatkan waktu tunggu 240 detik di perkotaan (dengan asumsi

proporsi kendaraan berat 20% dan sepeda motor 40%) adalah (Widjajanti E, 2006):

$$y = 3895.3 - 610x_1 + 21.35x_2 - 0.97x_3. \quad (2.1)$$

3. Sedangkan persamaan untuk menghitung arus lalu lintas maksimum yang dapat dilayani untuk mendapatkan waktu tunggu 240 detik di jalan luar kota (dengan asumsi proporsi kendaraan berat 30% dan sepeda motor 20%) adalah (Widjajanti E, 2006):

$$y = 3090.6 - 484.5x_1 + 17.23x_2 - 0.78x_3 \quad (2.2)$$

dimana:

y = Arus maksimum yang menghasilkan waktu tunggu maksimum (240 detik)

x_1 = Lebar zona kerja (meter)

x_2 = Kecepatan (km/jam)

x_3 = Panjang zona kerja (meter)

4. Berdasarkan hasil simulasi kontrol lalu lintas APILL pada lokasi studi kasus, menunjukkan bahwa APILL dengan operasi aktuasi lalu lintas/*traffic actuated* menghasilkan tundaan yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan APILL dengan operasi waktu tetap/*pre-timed*. Tundaan untuk operasi waktu tetap berdasarkan data per 1 jam adalah 1,9 (satu koma sembilan) kali lebih besar dibanding operasi aktuasi lalu lintas.

2.3. Kontrol Lalu Lintas Bersinyal Pada LPRJ

2.3.1. Jenis Kontrol Lalu lintas Bersinyal Pada LPRJ

Karena sifatnya yang sementara, maka APILL yang dipasang pada LPRJ adalah APILL portabel. APILL portabel didesain untuk berbagai aplikasi pekerjaan di jalan, mulai dari instalasi jangka panjang pada jembatan dua lajur yang berkurang menjadi satu lajur selama pekerjaan konstruksi sampai kepada pekerjaan sementara yang bersifat jangka panjang. Dalam fungsinya untuk menggantikan petugas bendera, APILL portabel menggunakan indikasi sinyal warna hijau untuk menggantikan "JALAN", kuning untuk menyatakan waktu "JALAN" sudah habis dan merah untuk sama sekali dilarang melintasi zona kerja.

Beberapa jenis operasi kontrol lalu lintas bersinyal yang dapat dipilih untuk APILL portabel pada zona kerja, meliputi operasi sebagai berikut:

- a. Waktu Tetap (*Pre-timed*)
- b. Aktuasi Lalu Lintas (*Red Rest*)
- c. Aktuasi Lalu Lintas (Mengutamakan Arah tertentu)
- d. Aktuasi Lalu Lintas (Menggunakan waktu hijau minimum untuk kedua arah)
- e. Operasi secara Manual

a. Operasi Waktu Tetap (*Pretimed*)

Pada operasi ini, pengaturan APILL portabel ditetapkan berdasarkan waktu siklus yang terdiri atas waktu hijau yang diperlukan dan indikasi kuning pada kedua sisi zona kerja dan dua kali waktu *clearance* serta waktu antara (*buffer*). Dari siklus ke siklus, durasi waktu hijau tetap sama, tanpa memperhatikan kehadiran kendaraan pada antrian yang berhenti pada APILL. Waktu hijau awal untuk kedua pendekat ditetapkan berdasarkan pemahaman awal tentang jumlah dan variasi lalu lintas yang akan melintasi zona kerja. Operasi ini sesuai untuk volume lalu lintas yang dapat diperkirakan, baik pada intensitas rendah maupun tinggi, fluktuasi volume lalu lintas rendah.

b. Operasi Aktuasi Lalu Lintas (*Red Rest*)

Operasi APILL portabel pada mode aktuasi berhubungan dengan teknologi detektor yang digunakan untuk mengidentifikasi kehadiran kendaraan pada setiap pendekat zona kerja. Bentuk yang paling konservatif dari kontrol aktuasi adalah APILL memberikan indikasi merah untuk kedua pendekat sampai detektor mendeteksi kehadiran kendaraan. Jika waktu *clearance* sudah habis (yaitu kendaraan yang dilayani pada fase sebelumnya telah melintas dengan selamat), setiap kendaraan yang mendekati sinyal akan menerima indikasi hijau. Jika hanya satu kendaraan yang terdeteksi, waktu hijau yang diberikan sebesar waktu hijau minimum, kemudian terjadi transisi controller sinyal ke interval *clearance* kuning sebelum kembali menjadi merah. Jika lebih dari satu kendaraan berada pada antrian pada saat awal indikasi hijau, deteksi kendaraan multipel akan menghasilkan perpanjangan waktu hijau, dimana batas atas waktu hijau adalah waktu hijau maksimum.

Jika detektor mendeteksi sebuah kendaraan datang dari arah yang sama dengan kendaraan yang baru mendapatkan waktu hijau (akan tetapi controller telah kembali ke kondisi merah), *controller* akan segera memberikan waktu hijau bagi kendaraan yang mendekat. Serial kejadian ini tidak terjadi pada kendaraan kedua yang mendekati zona kerja dari arah lawan, karena Controller akan menunggu kendaraan pertama selesai melintasi zona kerja sebelum memberikan indikasi hijau bagi kendaraan dari arah lawan.

c. Operasi Aktuasi Lalu Lintas (Mengutamakan Satu Arah)

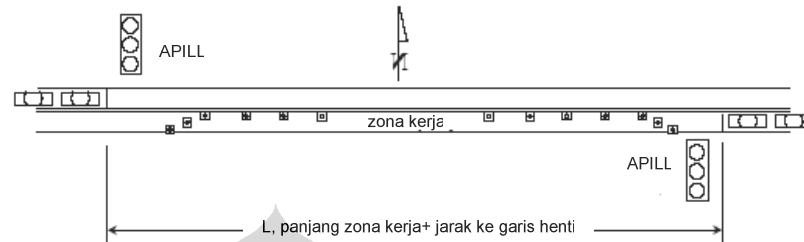
APILL diatur kembali ke hijau untuk pendekat dengan volume lalu lintas yang lebih tinggi, dan merah pada pendekat yang berlawanan, yang memiliki volume lalu lintas lebih rendah. Pada moda ini, controller APILL memberi indikasi hijau untuk pendekat dengan volume lalu lintas lebih tinggi, dan memberikan sinyal hijau pada pendekat lawan bila detektor pada pendekat lawan mendeteksi kehadiran satu kendaraan pada pendekat lawan tersebut. Jika lebih dari satu kendaraan antri pada pendekat lawan yang memiliki volume lebih rendah, waktu hijau pada pendekat ini dapat diperpanjang sampai waktu hijau maksimum.

d. Operasi Aktuasi Lalu Lintas (*Recall* ke Hijau Minimum Untuk Kedua Arah)

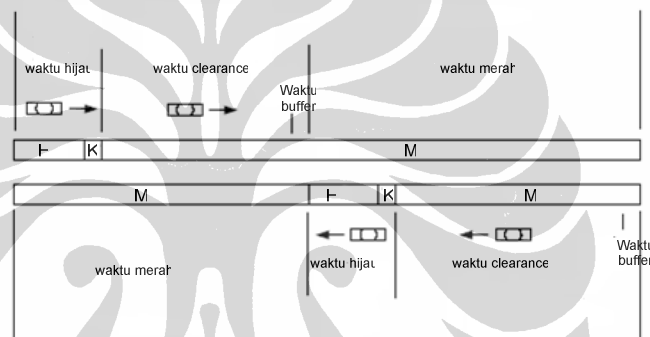
Kontroller APILL portabel juga dapat diatur untuk memberikan waktu hijau minimum, kuning dan waktu *clearance* merah untuk setiap pendekat. Mode bekerja hampir sama seperti operasi *pretimed*, tetapi waktu hijau pada setiap pendekat dapat diperpanjang jika terdapat banyak kendaraan menunggu pada pendekat tersebut. Seperti pada operasi aktuasi yang lain, batas atas waktu hijau untuk setiap pendekat yaitu waktu hijau maksimum, menjaga adanya antrian kendaraan panjang pada satu pendekat yang menahan waktu hijau terlalu panjang dan menyebabkan tundaan yang tidak dapat diterima terhadap lalu lintas pada pendekat lawan.

2.3.2. Komponen Waktu Siklus

Gambar 2.4. dan Gambar 2.5. menunjukkan instalasi APILL dan komponen waktu siklus pada kedua pendekat.



Gambar 2.4. Instalasi APILL Pada Zona Kerja



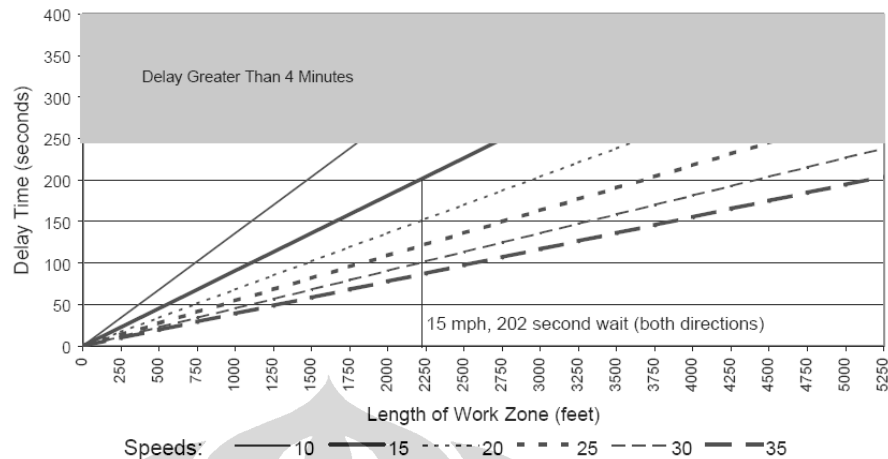
Gambar 2.5. Komponen Waktu Siklus Kontrol Lalu Lintas Bersinyal pada Zona Kerja

Parameter utama penentuan waktu siklus pada lokasi zona kerja adalah:

- Panjang zona kerja
- Jumlah dan jenis kendaraan yang datang pada kedua pendekat
- Kecepatan pada setiap pendekat
- Waktu tunggu maksimum pengguna kendaraan bermotor
- Rentang kecepatan pada zona kerja
- Waktu buffer yang digunakan untuk memisahkan lalu lintas yang dilepaskan dengan lalu lintas yang datang.

1. Waktu Tunggu Maksimum

Gambar 2.6. menunjukkan bahwa berdasarkan studi empiris, batas maksimum waktu tunggu adalah sekitar empat menit Daniels G et al (2000). Bila menggunakan operasi *traffic actuated* maka angka tersebut merupakan dasar dalam menghitung waktu hijau maksimum.



Gambar 2.6. Pengaruh Kecepatan dan Panjang Zona Kerja Terhadap Waktu Tunggu Maksimum. Sumber : Daniels G et al (2000)

Waktu hijau maksimum dan waktu *clearance* kuning pada arah berlawanan dan dua waktu *buffer* juga harus diperhitungkan dalam menghitung waktu tunggu maksimum.

$$\text{Maksimum waktu tunggu pendekatan 1: } Y_1 + R_{a1} + G_{2\max} + Y_2 + R_{a2} \quad (2.3)$$

$$\text{Maksimum waktu tunggu pendekatan 2: } Y_1 + R_{a1} + G_{1\max} + Y_2 + R_{a2} \quad (2.4)$$

dimana:

Y_1, Y_2 = Waktu *clearance* kuning pendekatan satu, dua, , detik

R_{a1}, R_{a2} = Waktu *clearance* merah untuk pendekatan satu dan dua, detik

$G_{1\max}$ = Waktu hijau maksimum pada pendekatan satu, detik

$G_{2\max}$ = Waktu hijau maksimum pada pendekatan dua, detik

b. Waktu Hijau (Waktu Tetap) atau Waktu Hijau Maksimum (Aktuasi)

Waktu hijau yang diberikan ke setiap pendekatan ditentukan berdasarkan perkiraan jumlah kendaraan yang datang sepanjang siklus. Hal yang perlu menjadi perhatian dalam penentuan waktu hijau maksimum adalah apabila mungkin waktu tunggu maksimum adalah 240 detik.

c. Waktu Hijau Minimum (*Operasi Actuated*)

Jika beroperasi *actuated*, sangat penting untuk ditentukan waktu hijau minimum, atau waktu indikasi hijau terkecil yang akan diberikan pada setiap pendekat. Waktu ini paling tidak merupakan waktu yang diperlukan oleh satu atau dua kendaraan untuk secara aman melintasi zona kerja.

d. Interval Ekstensi (*Operasi Actuated*)

Jika beroperasi *actuated*, juga diperlukan untuk menentukan interval ekstensi, atau jumlah waktu hijau yang ditambahkan terhadap fase waktu hijau yang aktif setiap interval waktu tertentu dimana kendaraan yang datang dideteksi.

e. Interval Perubahan waktu Kuning

Indikasi kuning selalu digunakan pada operasi normal untuk menghentikan indikasi hijau dan menginformasikan pengguna kendaraan bermotor bahwa terjadi perubahan hak pergerakan (*right of way*). Persamaan untuk menghitung interval perubahan kuning adalah:

$$y = t + \frac{v}{2a + 2Gg} \quad (2.5)$$

dimana

- y = Panjang interval waktu kuning , detik
- t = Waktu persepsi/reaksi pengemudi, disarankan 1 detik
- v = Kecepatan kendaraan datang, dalam m/detik
- a = Angka perlambatan, disarankan 3 m/detik²
- G = Percepatan, sebesar gaya gravitasi 10 m/detik²
- g = Kemiringan pendekat (0,02 atau 2%, bila turunan bernilai negatif)

f. Interval *Clearance* Merah

APILL protabel menimbulkan interval *clearance* merah, atau periode *all red* untuk mengijinkan kendaraan yang telah memasuki area zona kerja pada indikasi hijau atau kuning dapat melintas dengan aman dan keluar dari zona kerja. Indikasi merah diberikan terhadap lalu lintas kedua arah pendekat. Kecepatan yang digunakan untuk menghitung interval *clearance* merah akan bergantung pada sejumlah faktor, termasuk lokasi dan panjang zona kerja, perlambatan pada zona kerja, dan/atau rambu peringatan, kecepatan pada fasilitas dan durasi dan

jenis pekerjaan konstruksi. Persamaan berikut menggunakan kecepatan pada zona kerja dan panjang zona kerja untuk menghitung waktu tempuh melintasi zona kerja.

$$TT = \frac{3,6.L}{v} \quad (2.6)$$

dimana

TT = Waktu tempuh, detik

L = Panjang zona kerja, meter

V = Kecepatan kendaraan terendah yang mungkin pada zona kerja, km/jam

Interval *clearance* merah = waktu tempuh melintasi zona kerja + waktu buffer

g. Waktu Buffer

Waktu *buffer* adalah waktu keselamatan yang menggaransi bahwa kendaraan yang memasuki atau meninggalkan zona kerja pada arah yang berlawanan dipisahkan secara waktu. Waktu *buffer* ditetapkan berdasarkan pertimbangan teknis dan perilaku pengguna jalan.

h. Operasi Merah Berkedip

Pada APILL portabel yang digunakan untuk zona kerja yang panjang, tidak dimungkinkan untuk melihat sinyal dan lalu lintas yang menunggu pada pendekatan yang lain dari zona kerja, atau lalu lintas yang sedang melintasi zona kerja dari arah yang berlawanan. Pada kondisi ini, diberikan merah berkedip bagi kendaraan untuk merasakan apakah zona kerja sudah bersih dan aman untuk dilintasi.

2.4. Perencanaan Kontrol Lalu Lintas Pada Kondisi Arus Lalu Lintas Lewat Jenuh

Persimpangan bersinyal seringkali mengalami kondisi lewat jenuh (*oversaturated*) yang disebabkan oleh variasi arus lalu lintas yang bersifat spasial dan temporal. Pada kondisi lewat jenuh, model *steady-state* tidak dapat digunakan bila kedatangan kendaraan melebihi kapasitasnya. Pada kondisi ini diperlukan pelayanan untuk mengatasi antrian dari satu siklus ke siklus yang lain. Rancangan waktu kontrol lalu lintas untuk lalu lintas lewat jenuh lebih rumit dibandingkan dengan lalu lintas tidak jenuh.

Model matematis dengan variabel kontrol untuk perencanaan waktu sinyal pada kondisi lewat jenuh sudah dilakukan oleh beberapa peneliti. Beberapa diantaranya yang menggunakan pendekatan semi grafis adalah Gazis (1964) dan Gazis & Pott (1965). Sementara Chang & Lin (2000) dan Chang & Sun (2004) mengembangkan model diskrit dinamis dan pendekatan indeks kinerja untuk mengoptimasi parameter sinyal selama periode kondisi lewat jenuh.

Gazis (1964) mendefinisikan persimpangan dengan arus lewat jenuh sebagai persimpangan dimana gabungan tingkat kedatangan dari dua atau lebih pergerakan melebihi gabungan tingkat pelepasan kendaraan (*throughput*), sehingga akan membentuk antrian yang harus ditangani.

Gazis juga menurunkan formula optimasi yang didapat berdasarkan kriteria tundaan minimum didapatkan berhubungan dengan perpindahan dari pelayanan maksimum ke minimum dari salah satu arah dan dari minimum ke maksimum pada arah yang lain. Dengan memisalkan sebuah persimpangan melayani dua pergerakan dengan variasi waktu pada tingkat kedatangan $q_1(t)$, maka kondisi yang memenuhi untuk kondisi lewat jenuh adalah:

$$\frac{q_1}{s_1} + \frac{q_2}{s_2} > 1 - \left(\frac{L}{c}\right) \quad (2.7)$$

dimana

- s_1, s_2 = Arus jenuh fase 1 dan fase 2
- c = Waktu siklus, detik
- L = Waktu hilang per siklus, detik

Fungsi akumulasi kedatangan dan akumulasi pelepasan dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_i(t) = \int_0^t q_i(t).dt$$

$$G_i(t) = \int_0^t \gamma_i(t).dt \quad (2.8)$$

dimana

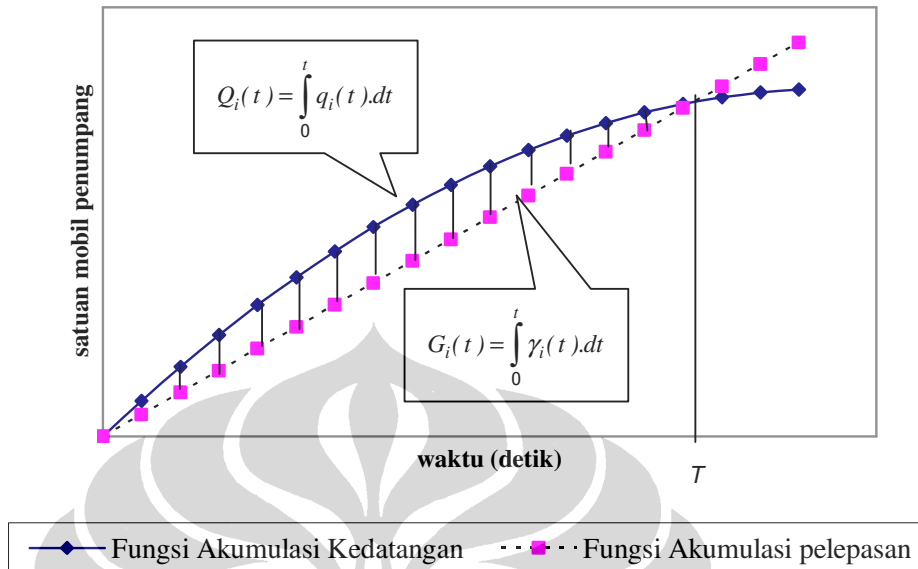
- $Q_i(t)$ = Fungsi akumulasi kedatangan
- $G_i(t)$ = Fungsi akumulasi pelepasan (pelayanan)
- q_i = Tingkat kedatangan per satuan waktu, smp/jam
- T = Periode waktu lewat jenuh, detik
- γ_i = Tingkat pelepasan kendaraan pada fase i , smp/jam

Luas diantara kurva $Q_i(t)$ dan $G_i(t)$ pada Gambar 2.7 menunjukkan besarnya tundaan total yang dialami kendaraan selama periode waktu lewat jenuh, dimana $G_i(t) < Q_i(t)$.

Tingkat pelepasan kendaraan dinyatakan dengan rumus berikut:

$$\gamma_i = \frac{g_i s_i}{c} \quad (2.9)$$

$$g_i = \frac{\gamma_i \cdot c}{s_i} \quad (2.10)$$



Gambar 2.7. Tundaan Total Selama Periode Lewat Jenuh

Permasalahan dalam melakukan optimasi kinerja APILL pada kondisi lewat jenuh pada persimpangan sederhana dengan 2 (dua) pergerakan utama diuraikan oleh Gazis sebagai berikut:

- Terdapat 2 (dua) *demand* yang berkompetisi untuk dilayani oleh APILL
- Tingkat pelepasan merupakan variabel kontrol dan ditentukan oleh pembagian waktu hijau dari durasi efektif yang tersedia diantara 2 (dua) pergerakan.
- Untuk alasan praktis, pembagian waktu pada setiap siklus bervariasi antara batas atas dan batas bawah. Hal ini terjadi karena akan banyak waktu yang terbuang bila waktu hijau terlalu pendek dan sebaliknya bila waktu hijau terlalu panjang, secara psikologis akan mengakibatkan kebosanan.

Kenyataan yang sering terjadi adalah lampu merah yang melebihi nilai maksimum, menimbulkan persepsi bagi pengguna jalan bahwa telah terjadi kerusakan pada APILL, sehingga pengguna jalan cenderung mengabaikan sinyal APILL. Karena itu, Gazis memperkenalkan suatu wilayah kontrol yang mengatur durasi waktu hijau berada pada suatu wilayah waktu hijau efektif minimum

(g_{\min}) dan waktu hijau efektif maksimum (g_{\max}). Waktu hijau g_i dapat bervariasi antara batas atas dan batas bawah dari waktu hijau.

$$g_{\min} \leq \frac{\gamma_i \cdot c}{s_i} \leq g_{\max} \quad i = 1, 2 \quad (2.11)$$

dimana :

g_{\min} = Waktu hijau efektif minimum, detik

g_{\max} = Waktu hijau efektif maximum, detik

Tingkat pelepasan gabungan ($\gamma_1 + \gamma_2$) juga bervariasi di antara 2 nilai ekstrim. Variasi waktu hijau di atas menyebabkan tingkat pelepasan gabungan juga bervariasi di antara dua ekstrim. Bila diasumsikan $s_1 > s_2$, maka nilai $\gamma_1 + \gamma_2$ berada pada rentang:

$$\frac{(s_1 g_{\min} + s_2 g_{\max})}{c} \leq (\gamma_1 + \gamma_2) \leq \frac{(s_1 g_{\max} + s_2 g_{\min})}{c} \quad (2.12)$$

dimana

g_1, g_2 = Waktu hijau actual dari fase 1 dan fase, detik

γ_1, γ_2 = Tingkat pelepasan kendaraan pada fase 1 dan fase 2, detik

Setiap strategi pelayanan harus memenuhi persamaan berikut:

$$\frac{\gamma_1(t)}{s_1} + \frac{\gamma_2(t)}{s_2} \leq 1 - \left(\frac{L}{c}\right) \quad (\text{konstan}) \quad (2.13)$$

Fungsi tundaan minimum menjadi:

$$D = \sum_{i=1}^2 \int_0^T [Q_i(t) - G_i(t)] dt \quad (2.14)$$

dimana:

$$G_i(t) = \int_0^t \gamma_i(t) dt \quad (2.15)$$

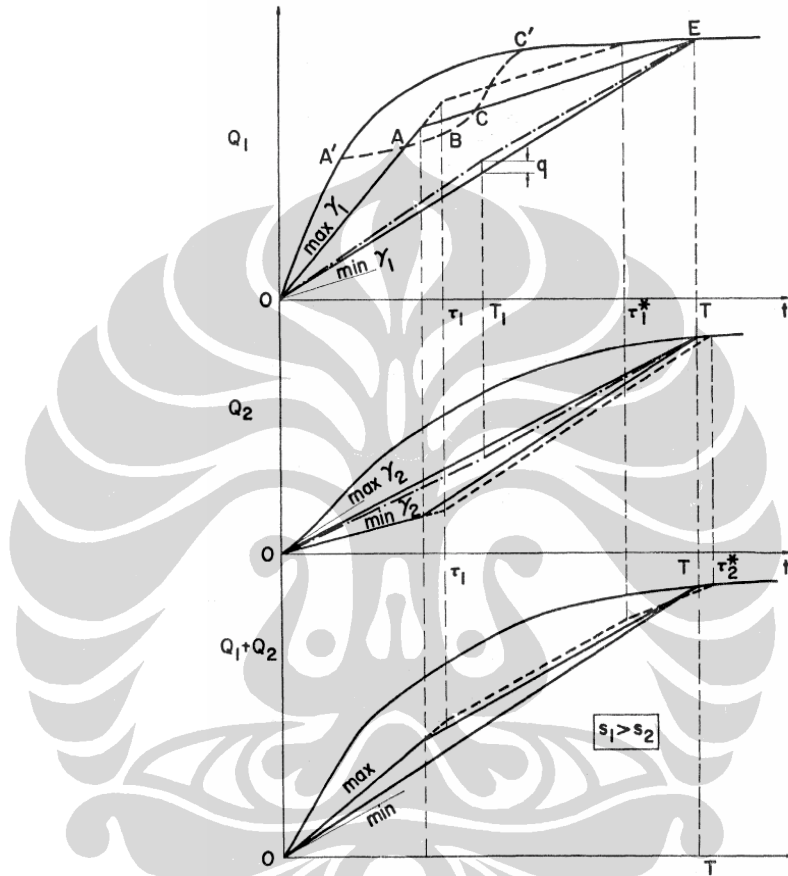
$$g_{\min} \leq \frac{\gamma_i \cdot c}{s_i} \leq g_{\max} \quad (2.16)$$

$$\frac{(s_1 g_{\min} + s_2 g_{\max})}{c} \leq (\gamma_1 + \gamma_2) \leq \frac{(s_1 g_{\max} + s_2 g_{\min})}{c}$$

Persamaan dengan batas waktu T didefinisikan sebagai :

$$G_i(T) = Q_i(T) \quad i = 1,2 \quad (2.17)$$

Pada waktu T , kapasitas dari pelayanan melampaui kedatangan, sehingga periode lewat jenuh berakhir (Gambar 2.8).



Gambar 2.8. Kontrol Optimal Persimpangan Tunggal Dua Pergerakan dengan Arus Jenuh berbeda. Sumber : Gazis (1964)

Untuk menentukan titik perubahan, Gazis (1964) mengasumsikan kurva kedatangan pada periode jenuh adalah mendekati garis lurus seperti Gambar 2.9. dengan persamaan :

$$Q_i(t) = A_i + B_i t \quad (2.18)$$

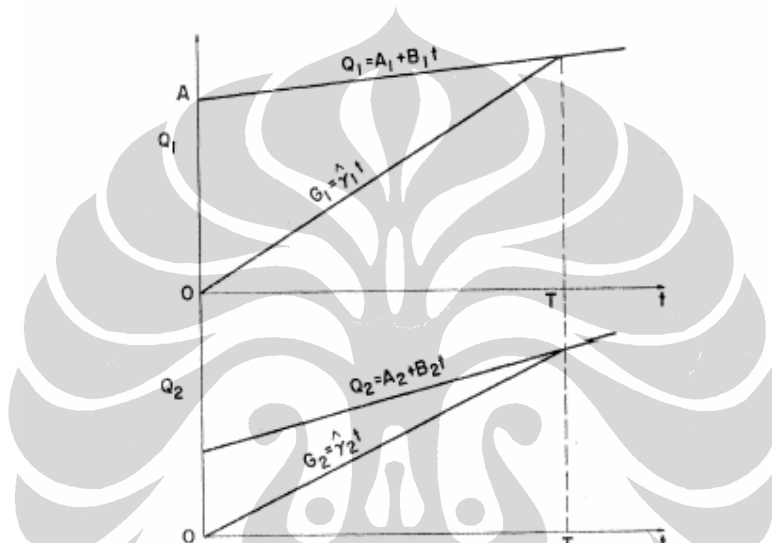
$$\gamma_i T = Q_i T \quad (i = 1,2) \quad (2.19)$$

sehingga,

$$T = \frac{(A_1 s_1 + A_2 s_2)}{[-(B_1 s_2 + B_2 s_1) + s_1 s_2 (1 - L/c)]} \quad (2.20)$$

$$\gamma_1 = \frac{s_1 [(B_1 A_2 - B_2 A_1) + A_1 s_2 (1 - L/c)]}{(A_1 s_2 + A_2 s_1)}$$

$$\gamma_2 = \frac{s_2 [(B_2 A_1 - B_1 A_2) + A_2 s_1 (1 - L/c)]}{(A_1 s_2 + A_2 s_1)}$$



Gambar 2.9. Penentuan Akhir Periode Lewat Jenuh Dengan Asumsi Kurva Kumulatif Kedatangan Asimtotis Linier

Sekarang duasumsikan bahwa γ_i , yang didapat dari persamaan (2.19) berada pada rentang yang ditentukan persamaan (2.16).

Strategi pengaturan tunggal bukan satu-satunya yang menghabiskan kedua antrian pada waktu yang sama T , tidak juga mengandung kontrol, yang meminimumkan tundaan agregat. Kurva pelayanan multi tahap direncanakan dengan bentuk yang disederhanakan berupa garis lurus yang berhubungan dengan setting tunggal, kesemuanya menghabiskan kedua antrian pada waktu T . Menurut Gazis (1964), pengurangan tundaan agregat dapat dicapai dengan melakukan 'trade off' beberapa tundaan untuk arus utama, yaitu satu berhubungan dengan arus jenuh maksimum s_1 , untuk besaran tundaan yang lebih kecil untuk arus yang lain. Strategi optimum yang tetap melayani kedua antrian diselesaikan pada waktu

T secara umum berhubungan dengan operasi dua tahap (Gambar 2.8). Selama tahap pertama arah 1 dilayani dengan waktu hijau maksimum dan arah 2 dengan waktu hijau minimum. Selama tahap dua pelayanan dibalik, waktu hijau minimum untuk arah 1 dan hijau maksimum untuk arah 2. Titik pergantian (*switch over point*) diberikan dengan persamaan:

$$\tau = \frac{[(c/s_1)Q_1(T) - g_{\min}T]}{(g_{\max} - g_{\min})} \quad (2.21)$$

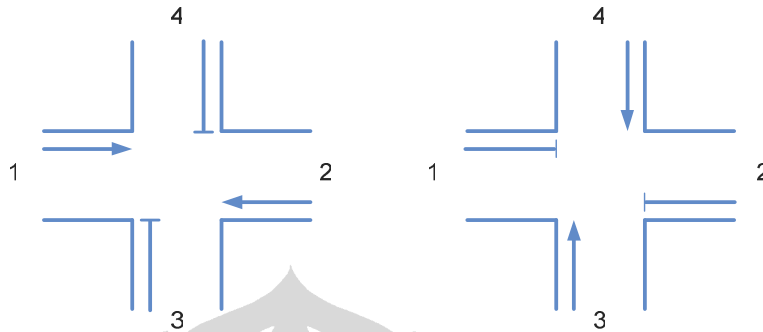
2.4.1. Model Optimasi Diskrit Dinamis (Chang & Lin, 2000)

Metode Optimasi Diskrit Dinamis melanjutkan penelitian Michalopoulos and Stephanopolos (1977, 1978) yang memperkenalkan metode dua tahap yang efisien, yang disebut '*bang-bang control*' untuk mengontrol sinyal dimana metode tersebut berusaha untuk mendapatkan titik perubahan (*bang-bang control*) yang optimal selama periode lewat jenuh. Metode ini bertujuan untuk memastikan waktu hijau tidak hilang pada setiap siklus selama periode kondisi arus lalu lintas lewat jenuh. Jenis kontrol ini akan berhenti bila antrian pada kedua pendekat telah habis dilewatkan. Misalnya, pada tahap pertama, prosedur mengatur waktu hijau maksimum pada pendekat yang memiliki angka kedatangan maksimum dan waktu hijau minimum pada pendekat yang memiliki angka kedatangan minimum.

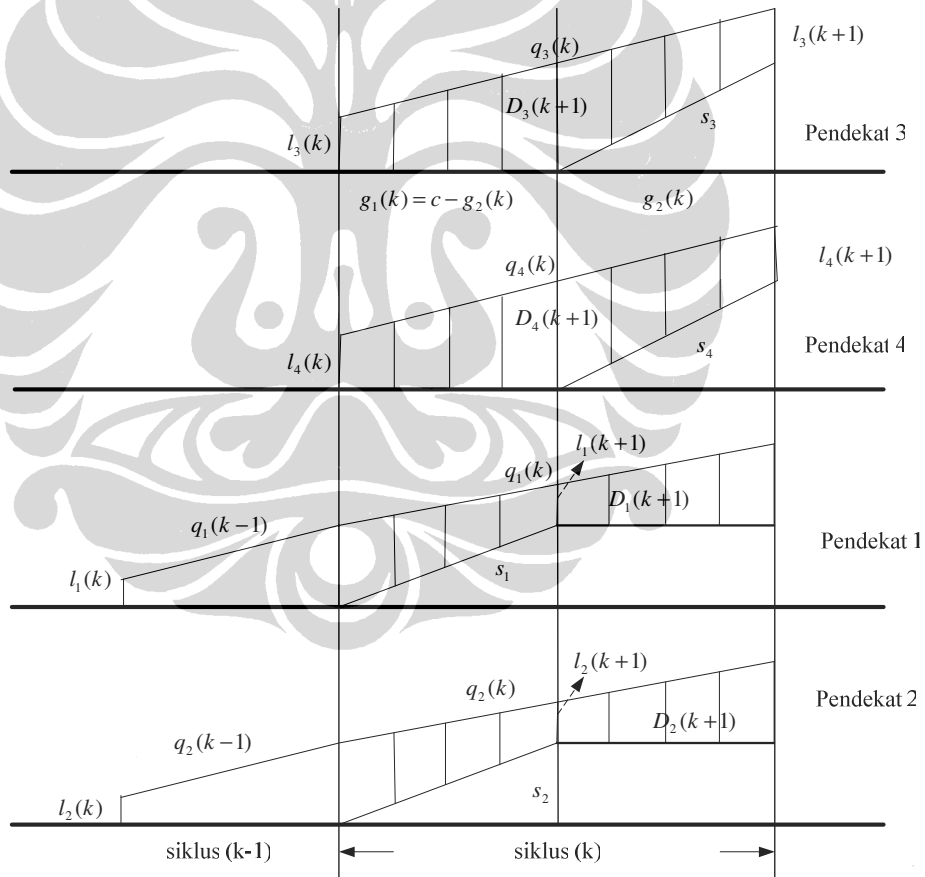
Pada titik perubahan (*switch-over point*), waktu hijau maksimum diberikan pada pendekat yang memiliki angka kedatangan minimum dan waktu hijau minimum pada pendekat yang memiliki angka kedatangan maksimum. Model kontinyu terbatas pada kondisi bahwa titik pergantian tidak perlu terjadi sampai akhir periode lewat jenuh. Untuk mengakomodasi kondisi tersebut, Chang (2000) memperkenalkan pendekatan dengan menghitung tundaan lebih sesuai untuk menghitung waktu siklus optimal dan menentukan waktu hijau optimal. Chang menyatakan bahwa model tundaan murni tidak efektif dalam mencari siklus optimal sehingga menyarankan penggunaan Model *Performance Index (PI)* dalam penyelesaian kontrol lalu lintas pada kondisi lewat jenuh.

Gambaran kondisi lewat jenuh pada persimpangan empat kaki dengan kontrol sinyal 2 fase disajikan pada Gambar 2.10. Antrian dan tundaan yang

terjadi disajikan pada Gambar 2.11. Kondisi pada Gambar 2.11 menunjukkan bahwa selalu terdapat antrian yang tersisa sebelum periode lewat jenuh diakhiri.



Gambar 2.10. Persimpangan Empat kaki Dengan Kontrol Sinyal 2 Fase



Gambar 2.11. Antrian dan Tundaan Pada Persimpangan Empat kaki Dengan Kontrol Sinyal 2 Fase. Sumber: Chang & Lin (2000)

Keterangan gambar :

- c : Waktu siklus
 l_i : Panjang antrian dari pendekat atau pergerakan i
 $l(k)$: Panjang antrian pada awal siklus k
 $l_i(k+1)$: Panjang antrian dari pendekat atau pergerakan i siklus k , sama dengan panjang antrian pada pendekat atau pergerakan i pada awal siklus $k+1$
 q : Arus kedatangan
 $q(k)$: Arus kedatangan pada siklus k
 $q_i(k)$: Arus kedatangan pada pendekat atau pergerakan i siklus k
 D : Tundaan total dalam 1 siklus
 $D(k)$: Tundaan total dalam siklus k
 a_j : Jumlah lajur dari pendekat atau pergerakan i

Model *Performance Index (PI)* yang dikembangkan mengakomodasi performance index dari dari kontrol sinyal yaitu :

$$PI = D + KF \quad (2.22)$$

yang diaplikasikan ke model tundaan diskrit minimal menjadi:

$$PI(k+1) = PI(k) + Bu(k) + Z(k) \quad (2.23)$$

dimana

- PI : *Performance Index*
 B : *the control gain*
 $PI(k)$: *Performance Index* pada kondisi k
 $PI_i(k)$: *Performance Index* pada pendekat atau pergerakan i , kondisi k
 $u(k)$: Variabel kontrol pada kondisi k
 $W_i(k)$: Variabel eksogen pada pendekat atau pergerakan i , kondisi k
 $Z(k)$: Variabel eksogen pada pendekat atau pergerakan i , kondisi k

Pada awalnya, fungsi obyektif ditetapkan hanya untuk meminimumkan tundaan total sepanjang periode lewat jenuh. Fungsi tersebut dibebankan dalam bentuk kuadrat sebagai berikut:

$$\text{MIN } J = \frac{1}{2} (D(N))^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^N (D(k))^2 \quad (2.24)$$

dimana, N kondisi terminasi dari periode lewat jenuh dan D adalah tundaan total dalam 1 waktu siklus.

Model *performance index* berbeda dalam beberapa hal dengan model tundaan minimum diskrit. Pada model ini waktu hijau optimal mungkin tidak berada pada batasan yang diberikan. Walaupun hasil tersebut jarang dijumpai, tapi mungkin terjadi pada kondisi lewat jenuh (hasil sangat bergantung pada faktor K). Hal ini menunjukkan mengapa *bang-bang like control* digunakan sebagai model kontrol untuk menggantikan *bang-bang control* yang sesungguhnya.

Penelitian Chang & Lin (2000) ini menyimpulkan beberapa hal, sebagai berikut:

1. Model *Performance Index* lebih sesuai untuk diterapkan pada perencanaan waktu kontrol lalu lintas pada arus jenuh dan memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan model tundaan minimum.
2. Model diskrit lebih mudah diaplikasikan dari pada model kontinyu. Pada model kontinyu dapat menimbulkan tidak terjadinya titik perubahan (*switch-over point*) sampai pada akhir siklus, sedangkan pada model diskrit, terjadinya titik perubahan sangat berkaitan dengan kondisi persimpangan.
3. Tidak seluruh waktu siklus dapat diaplikasikan untuk kontrol lalu lintas bersinyal pada kondisi arus lewat jenuh.

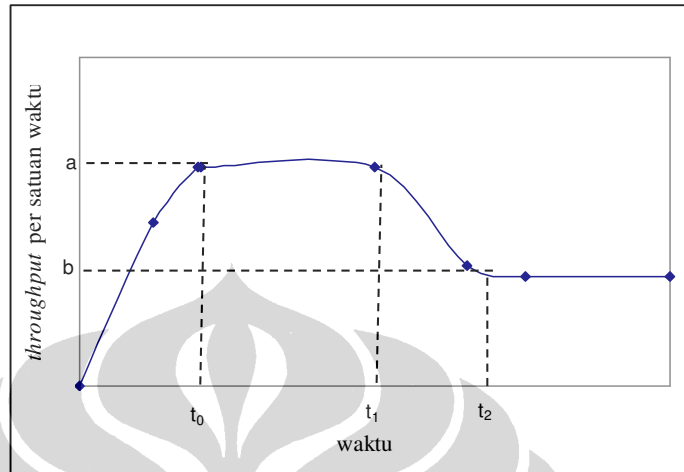
2.4.2. Metode Memaksimumkan Rata-rata Tingkat Pelepasan Kendaraan/ *Average Throughput* (Talmor & Mahalel, 2007)

Tujuan dari metode ini adalah memaksimumkan total *throughput* selama periode lewat jenuh. Rata-rata kapasitas dan rata-rata *throughput* digunakan sebagai kriteria desain untuk sinyal. Kapasitas membatasi *throughput* dan waktu siklus yang pendek menyebabkan perbedaan dalam nilai rata-rata untuk pengurangan. Studi ini menggunakan beberapa terminologi khusus, antara lain:

1. *Applied discharge flow* / arus pelepasan

Arus pelepasan pendekat adalah jumlah kendaraan yang secara riil dilepaskan dari antrian pada pendekat yang sangat panjang (tidak terbatas). Pola arus pelepasan berubah sesuai fungsi waktu: arus yang terbentuk sampai mencapai angka maksimum (yaitu arus jenuh), bertahan pada angka ini sementara waktu,

kemudian berkurang/menurun ke angka yang lebih rendah sementara terjadi proses penyebaran.



Gambar 2.12. Fungsi *adf* (Applied discharge-flow)
Sumber : Talmor & Mahalel (2007)

2. Throughput

Adalah angka aktual kendaraan per satuan waktu yang dapat melintasi persimpangan sesuai rencana sinyal. Nilainya sama dengan arus pelepasan dari fase selama waktu hijau setiap fase. Selama waktu hilang, nilainya sama dengan nol. *Throughput* siklus adalah integral *total throughput* pada siklus tertentu dan *throughput* rata-rata adalah *throughput* siklus dibagi waktu siklus

3. Periode lewat jenuh

Adalah waktu interval dimana pendekat mengalami kejenuhan untuk setiap rencana sinyal praktis. Fungsi obyektif dari model yang dibangun adalah memaksimalkan total *throughput* selama periode lewat jenuh T . Model dibangun berdasarkan beberapa asumsi, yaitu :

- a. antrian panjang dapat ditampung di persimpangan
- b. program fase telah ditentukan (*predetermined*)
- c. Selama periode macet, seluruh fase dalam kondisi lewat jenuh, dan setiap antrian dilepaskan menurut fungsi *adf*nya.
- d. Setiap fase m menerima lampu hijau pada setiap siklus dengan durasi sebesar nilai maksimum dari t_{0m} dan g_{\min} .
- e. fungsi *adf* dari fase yang berbeda adalah independen

Fungsi obyektif adalah hasil dari perkalian throughput siklus dengan jumlah siklus pada periode T , yaitu:

$$\frac{T}{c} \sum_{m=1}^M \int_0^{g_m} \gamma_m(t) dt$$

dimana

$$c = L + \sum_{m=1}^M g_m \quad (2.25)$$

$$A = \sum_{m=1}^M \int_0^{g_m} \gamma_m(t) dt$$

dimana

- M : Jumlah fase
- T : Periode lewat jenuh
- $\gamma_m(t)$: Nilai arus pelepasan fase m pada waktu t
- L : total waktu hilang per siklus
- t_{oj} : Waktu yang diperlukan arus fase j mencapai nilai maksimum
- g_{\max} : Durasi waktu hijau efektif maksimum
- g_{\min} : Durasi waktu hijau efektif minimum
- c : Waktu siklus
- g_j : Durasi waktu hijau fase j
- \bar{g} : Vektor waktu hijau efektif total, $\bar{g} = (g_1, g_2)$
- \bar{g}^k : Vektor waktu hijau efektif total pada iterasi k , atau $\bar{g}^k = (g_1^k, g_2^k)$
- $\psi(\bar{g})$: Rata-rata *throughput* for \bar{g} assignment
- δ : Nilai ambang batas (threshold)

T adalah parameter konstan, sehingga memaksimumkan ekspresi di atas adalah ekivalen dengan memaksimumkan *throughput* rata-rata $\Psi(\bar{g})$

$$\Psi(\bar{g}) = \frac{\sum_{m=1}^M \int_0^{g_m} \gamma_m(t) dt}{C} \quad (2.26)$$

Persamaan 2.29 adalah fungsi obyektif. Ketika seluruh fungsi adf adalah kontinyu dan dapat diturunkan, titik optimum dapat ditentukan langsung dengan membebankan nilai 0 ke gradiennya.

$$\Psi(\bar{g}) = \frac{\sum_{m=1}^M \int_0^{g_m} \gamma_m(t) dt}{(L + \sum_{m=1}^M g_m)} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial g_j} = \frac{\gamma_j(g_j)(L + \sum_{m=1}^M g_m) - \sum_{m=1}^M \int_0^{g_m} \gamma_m(t) dt}{(L + \sum_{m=1}^M g_m)^2} \quad (2.28)$$

$$= 0, \quad \forall j = 1, \dots, M$$

Setelah melalui manipulasi aljabar, solusi yang didapat untuk menentukan durasi g_j^* dari fase j :

$$\gamma_j(g_j^*) = \frac{\sum_{m=1}^M \int_0^{g_m^*} \gamma_m(t) dt}{L + \sum_{m=1}^M g_m^*} = \Psi(\bar{g}^*), \quad \forall j = 1, 2, \dots, M \quad (2.29)$$

Talmor dan Mahalel mencatat bahwa diperlukan periode waktu hijau lebih lama untuk menyeimbangkan hilangnya *throughput* pada persimpangan dengan waktu hilang yang pendek. Dari sudut pandang produktivitas, dapat disimpulkan bahwa waktu hilang yang panjang menurunkan tendensi untuk memberhentikan lampu hijau.

2.4.3. Kajian Perbandingan Model Dan Arahkan Metode Penelitian

Talmor & Mahalel (2007) membandingkan kinerja model *Throughput* maksimum dengan model Optimasi Diskrit Dinamis yang bertujuan meminimumkan tundaan dengan menggunakan data yang sama dengan contoh data yang digunakan oleh Chang & Lin (2000).

Contoh persimpangan adalah persimpangan dengan dua ruas jalan satu arah dengan kontrol dua fase dan tidak ada gerakan berbelok. Pendekat 1 memiliki arus jenuh 1400 kendaraan/jam, sementara pendekat 2 memiliki arus jenuh 1000 kendaraan/jam. Waktu siklus ditetapkan 150 detik, tidak ada waktu yang hilang. Batasan waktu hijau adalah : $g_{1max}=0.65C$, $g_{1min} =0.4C$, $g_{2max} =0.6C$, dan $g_{2min} =0.35C$.

Tabel 2.5. Data Kedatangan Kendaraan Kumulatif

Waktu Detik	kedatangan kumulatif kendaraan		waktu detik	kedatangan kumulatif kendaraan	
	approach 1	approach 2		approach 1	approach 2
	300	121		86	2400
600	205	147	2700	492	352
900	268	192	3000	523	373
1200	318	227	3300	552	394
1500	359	257	3600	582	415
1800	396	283	3900	611	436
2100	430	307	4200	640	457

Sumber: Chang and Lin, 2000

Dengan data kedatangan kendaraan di atas, hasil pada Tabel 2.8 menunjukkan model *throughput* maksimum mendapatkan besaran waktu hijau 83.1 detik untuk pendekat 1 dan 52.5 detik untuk pendekat 2 yang berlangsung selama 8 waktu siklus (1085 detik). Setelah siklus ke-8 alokasi waktu hijau mengikuti waktu hijau yang didapatkan oleh model diskrit dinamis. Rincian perhitungan antrian kendaraan dari siklus ke siklus dari kedua model disajikan pada Tabel 2.7 dan Tabel 2.8, sementara ringkasan hasil perbandingan disajikan pada Tabel 2.6. Pada Tabel 2.6 terlihat bahwa pada kasus data di atas, model *throughput* maksimum memberikan angka perbaikan untuk periode waktu lewat jenuh, rata-rata pelepasan/*throughput*, total jumlah kendaraan dalam antrian sepanjang periode lewat jenuh dan panjang maksimum antrian pada masing-masing pendekat.

Tabel 2.6. Perbandingan Model Tundaan Minimal Diskrit dan Model Throughput Maksimum

	Model Tundaan Minimal Diskrit	model maximum throughput	perbaikan (%)
Periode lewat jenuh (detik)	2400	2285	5.0
throughput rata-rata (kendaraan per jam)	1207	1246	3.1
Jumlah total kendaraan dalam antrian (siklus 1-16)	1612	1570	2.7
Antrian terpanjang - pendekat 1,2	63, 107	59, 98	6.3, 8.4

Sumber: Talmor I and Mahalel D, (2007)

Penerapan model *throughput* maksimum untuk menyelesaikan arus lalu lintas lewat jenuh di atas tidak mendefinisikan prosedur dan persyaratan titik perubahan (*switch over*) waktu hijau. Contoh penerapan tersebut di atas hanya menjelaskan bahwa perubahan waktu hijau dilakukan pada siklus ke delapan dan besaran waktu hijau yang baru mengikuti besaran waktu hijau dari model yang dikembangkan Chang & Lin (2000), yaitu g_1 berubah dari g_{1max} menjadi g_{1min} dan g_2 berubah dari g_{2min} menjadi g_{2max} .

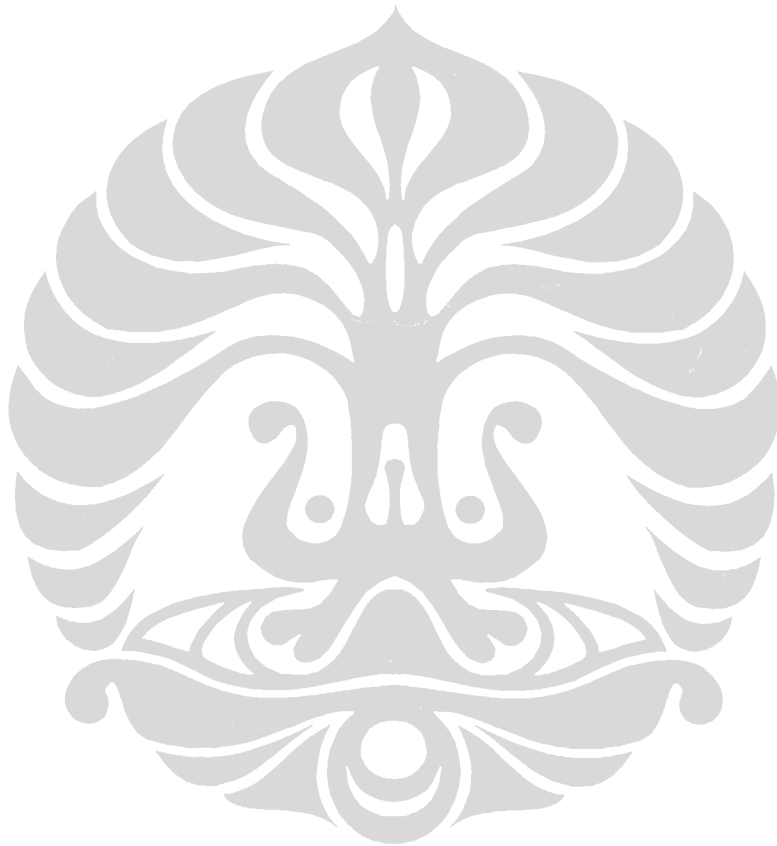
Ringkasan perbandingan model diskrit dinamis dengan tujuan meminimumkan tundaan total (Chang & Lin, 2000) dengan model memaksimalkan arus yang dapat dilepas (Talmor & Mahalel, 2007) disajikan pada Tabel 2.9.

Berdasarkan berbagai metode perencanaan kontrol lalu lintas dengan APILL pada periode lewat jenuh yang telah dikaji di atas, analisis yang diperlukan dalam penelitian kontrol lalu lintas dengan APILL di LPRJ pada kondisi arus lewat jenuh meliputi :

1. Melanjutkan metode perencanaan kontrol lalu lintas multi tahap dengan perubahan waktu hijau pada titik tertentu yang disebut titik perubahan (*switch-over point*)
2. Menentukan variabel kontrol sebagai penentu titik perubahan (*switch over*) agar didapatkan kinerja yang optimal.
3. Menentukan waktu hijau optimal yang dapat menyelesaikan antrian akibat arus lewat jenuh pada waktu atau siklus yang sama. Waktu hijau optimal adalah waktu hijau dengan kinerja terbaik (tundaan total dan *throughput* rata-rata) diantara waktu hijau yang memenuhi tujuan dapat menyelesaikan antrian

akibat arus lewat jenuh pada waktu/siklus yang sama.

4. Menerapkan model *penelitian* untuk Lokasi Penyempitan Ruas Jalan (LPRJ) pada jalan dua lajur dua arah tak terbagi (2/2UD)
5. Melakukan analisis hasil kinerja pada penerapan model *penelitian* untuk Lokasi Penyempitan Ruas Jalan (LPRJ) pada jalan dua lajur dua arah tak terbagi (2/2UD)



Tabel 2.7. Volume Kumulatif dan Panjang Antrian - Model Tundaan Diskrit Minimum

no.siklus	waktu siklus	Pendekat 1	$g11=97,5$ detik	pnj antrian	kend.yg dilepas/siklus	kumulatif kend.yg dilepas	Pendekat 2	$g12=52,5$ detik	pnj antrian	kend.yg dilepas/siklus	kumulatif kend.yg dilepas
		kumulatif volume kendr datang	Perkiraan Volume/siklus				kumulatif volume kendr datang	Perkiraan Volume/siklus			
	detik	kendaraan	kendaraan	kendaraan	kendaraan	kendaraan	kendaraan	kendaraan	kendaraan	kendaraan	kendaraan
1	150	61	61	26	35	35	43	43	28	15	15
2	300	121	60	48	39	73	86	43	57	15	29
3	450	163	42	59	31	104	117	31	73	15	44
4	600	205	42	63	38	142	147	31	89	15	58
5	750	237	32	60	35	177	170	23	97	15	73
6	900	268	32	53	39	215	192	23	105	15	88
7	1050	293	25	43	35	250	210	18	107	15	102
			$g12=60$ detik					$g22=90$ detik			
8	1200	318	25	38	30	280	227	18	100	25	127
9	1350	339	21	38	21	301	242	15	90	25	152
10	1500	359	21	35	24	324	257	15	80	25	177
11	1650	378	19	32	22	346	270	13	68	25	202
12	1800	396	19	27	24	369	283	13	56	25	227
13	1950	413	17	21	23	392	295	12	43	25	252
14	2100	430	17	15	23	415	307	12	30	25	277
15	2250	446	16	9	22	437	319	12	16	25	302
16	2400	462	16	1	24	461	330	12	3	25	327
17	2550	477	15	-7	23	477	341	11	-11	25	341
				(tidak ada antrian)					(tidak ada antrian)		

Sumber: Talmor I and Mahalel D (2007)

Tabel 2.8. Volume Kumulatif dan Panjang Antrian - Model Maximum Throughput

no.siklus	waktu	Pendekat 1		pnj antrian	kend.yg dilepas/siklus	kumulatif kend.yg dilepas	Pendekat 2		pnj antrian	kend.yg dilepas/siklus	
		Volume Kumulatif Pendekat 1	kend yg dilepas				Volume Kumulatif Pendekat 1	kend yg dilepas			
	detik	smp	smp	smp	smp	smp	smp	smp	smp	smp	
1	135,6	55	55	23	32	32	39	39	24	15	
2	271,2	109	54	45	32	65	78	39	49	15	
3	406,8	151	42	54	32	97	108	30	64	15	
4	542,4	189	38	60	32	129	135	28	77	15	
5	678,0	221	33	60	32	162	159	23	86	15	
6	813,6	250	28	56	32	194	179	20	92	15	
7	949,2	276	26	50	32	226	199	20	97	15	
8	1084,8	299	23	40	32	259	214	14	97	15	
			<i>g12=60 detik</i>					<i>g22=90 detik</i>			
9	1234,8	323	24	41	23	282	230	17	89	25	
10	1384,8	343	21	38	23	305	245	15	79	25	
11	1534,8	363	20	35	23	329	260	15	68	25	
12	1684,8	382	19	30	23	352	273	13	56	25	
13	1834,8	400	18	25	23	375	286	13	44	25	
14	1984,8	417	17	18	23	399	298	12	31	25	
15	2134,8	434	17	12	23	422	310	12	18	25	
16	2284,8	450	16	5	23	445	321	11	5	25	
17	2434,8	465	16	-3	23	465	333	12	-9	25	
				<i>(tidak ada antrian)</i>					<i>(tidak ada antrian)</i>		

Sumber: Talmor I and Mahalel D (2007)

Tabel 2.9. Ringkasan Perbandingan Model Minimum Tundaan Diskrit dan Maximum Throughput

Peneliti	Chang TH and Lin JT (2000).	Talmor I and Mahalel D, (2007),
Tujuan	meminimumkan total tundaan persimpangan selama periode lewat jenuh	memaksimumkan total throughput selama periode lewat jenuh
Kondisi arus kedatangan	kedua pendekatan dalam kondisi lewat jenuh	kedua pendekatan dalam kondisi lewat jenuh
Metodologi	menurunkan model tundaan minimum diskrit dan midel indeks kinerja (<i>performance index</i>) untuk perencanaan kontrol lalu lintas dengan APILL dua fase pada kondisi lewat jenuh	menggunakan <i>applied discharge flow</i> sebagai dasar perhitungan
	Model Tundaan Minimum Diskrit: $D(k+1) = D(k) + Bu(k) + W(k)$ $D(k) = a_1D_1(k) + a_2D_2(k) + a_3D_3(k) + a_4D_4(k)$ $B = \frac{1}{2}(a_1s_1 + a_2s_2 - a_3s_3 - a_4s_4)$ $u(k) = g_2^2(k)$ $W(k) = a_1W_1(k) + a_2W_2(k) + a_3W_3(k) + a_4W_4(k)$	rata-rata throughput maksimum dicapai jika nilai marjinal dari fungsi adf seluruhnya sama dengan rata-rata throughput
	Model <i>performance index</i> : $PI(k+1) = PI(k) + Bu(k) + Z(k)$ $PI(k) = a_1PI_1(k) + a_2PI_2(k) + a_3PI_3(k) + a_4PI_4(k)$ $B = \frac{1}{2}(a_1s_1 + a_2s_2 - a_3s_3 - a_4s_4)$ $u(k) = (g_2(k) + G(k))^2$ $Z(k) = -\frac{1}{2}(a_1s_1 + a_2s_2 - a_3s_3 - a_4s_4)G^2(k) + a_1W_1(k) + a_2W_2(k) + a_3W_3(k) + a_4W_4(k) + K(a_1Y_1(k) + a_2Y_2(k) + a_3Y_3(k) + a_4Y_4(k))$	Maksimumkan : $\Psi(\bar{G}) = \frac{\int_0^{G_1} \gamma_1.t.dt + \int_0^{G_2} \gamma_2.t.dt}{C}$
	Minimumkan : $MINJ = \frac{1}{2}(D(k))^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^N (D(k))^2$ $H = \frac{1}{2}(D(k))^2 + \lambda(k+1) [D(k) + Bu(k) + W(k)]$	

Peneliti	Chang TH and Lin JT (2000).	Talmor I and Mahalel D, (2007),
keunikan	memberikan metodologi dalam memutuskan perencanaan waktu secara keseluruhan yang mengatasi seluruh periode arus jenuh	fungsi <i>applied discharge flow</i> lebih sesuai untuk diterapkan dibandingkan fungsi arus keberangkatan jenuh (<i>saturation discharge flow</i>)
kesimpulan	Model <i>performance index</i> lebih sesuai untuk penentuan waktu sinyal pada kondisi jenuh dan lebih baik dibandingkan model tundaan minimum murni.	Waktu siklus hasil perhitungan menurut pendekatan ini memaksimalkan tingkat keberangkatan pada persimpangan, sehingga periode jenuh menjadi lebih pendek dan tundaan menurun.
	Model jenis diskrit lebih dapat diterapkandi lapangan dibanding model kontinyu. Model kontinyu dapat mengaktifkan titik switch-over pada akhir siklus, sedangkan model diskrit dapat bersamaan mengaktifkan titik switch-over pada waktunya.	

