

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Lalu Lintas

Studi terhadap arus lalu-lintas dimulai pada tahun 1930-an. Pada tahun 1936 Adams menggunakan teori peluang untuk mendeskripsikan keadaan lalu-lintas jalan. Pada tahun 1935 Bruce D. Greenshields melakukan studi mengenai model yang berhubungan dengan volume dan kecepatan di *Yale Bureau of Highway Traffic*, Bruce juga melakukan investigasi terhadap kinerja lalu-lintas di persimpangan pada tahun 1947. Gartner, Messer, dan Rathi (2001:1-1) menyatakan bahwa setelah perang dunia kedua, semakin meningkatnya penggunaan mobil dan ekspansi dari sistem jalan raya meningkat pula studi mengenai karakteristik lalu-lintas dan pengembangan dari teori arus lalu-lintas. Menurut Gartner, Messer, dan Rathi (2001:1-1) teori arus lalu-lintas berusaha untuk mendeskripsikan hubungan antara kendaraan dan pengendaranya (komponen yang bergerak) dengan infrastruktur (komponen yang tidak bergerak) secara presisi.

Kendaraan menurut Undang Undang No. 14 Tahun 1992 adalah suatu alat yang dapat bergerak di jalan, terdiri dari kendaraan bermotor dan kendaraan tidak bermotor. Komponen tidak bergerak terdiri dari sistem jalan dan semua elemen operasionalnya: alat pengontrol seperti lampu Arah Penunjuk Intruksi Lalu Lintas (APILL) yang diatur dalam Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Darat Nomor : 273/HK.105/DJRD/96, rambu-rambu seperti yang diatur dalam Peraturan

Menteri Perhubungan Nomor 13 Tahun 2014, dan tanda seperti marka jalan yang diatur dalam Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 34 Tahun 2014. Menurut Roess, Prassas dan McShane (2011:96) parameter arus lalu-lintas secara umum adalah volume dan arus, kecepatan serta densitas.

1. Volume dan Arus (*Volume and Rate of Flow*)

Menurut Luttinen (2004:17) volume adalah jumlah kendaraan yang melewati suatu titik pada suatu lajur atau jalan raya selama interval waktu tertentu. Dalam *Highway Capacity Manual* (2000:5-18) volume sering dihitung dalam interval 1 jam dan tidak terbatas pada kendaraan saja, dapat juga berupa orang. Arus adalah adalah ratio per jam kendaraan atau orang yang melewati suatu titik atau ruas pada suatu lajur atau jalan raya pada interval kurang dari satu jam, biasanya menggunakan interval 15 menit yang kemudian dikonversi ke dalam satuan jam (*Highway Capacity Manual*, 2000:5-6). Perbedaan mendasar dari volume dan arus adalah interval waktu yang digunakan. Sebagai contoh dari hasil observasi selama 4 kali 15 menit diperoleh jumlah kendaraan 1.000, 1.200, 1.100, dan 1.000. Diperoleh volume :

$$1.000 + 1.200 + 1.100 + 1.000 = 4.300 \text{ kendaraan/jam}$$

sedangkan arus diperoleh :

$$1.000 \text{ kend} / 0,25 \text{ jam} = 4.000 \text{ kend} / \text{jam} \text{ untuk 15 menit pertama}$$

$$1.200 \text{ kend} / 0,25 \text{ jam} = 4.800 \text{ kend} / \text{jam} \text{ untuk 15 menit kedua}$$

$$1.100 \text{ kend} / 0,25 \text{ jam} = 4.400 \text{ kend} / \text{jam} \text{ untuk 15 menit ketiga dan}$$

$$1.000 \text{ kend} / 0,25 \text{ jam} = 4.000 \text{ kend} / \text{jam} \text{ untuk 15 menit keempat}$$

(*Highway Capacity Manual*, 2000:7-1).

Selain satuan *kend/jam* arus juga dapat direpresentasikan dalam *satuan mobil penumpang(smp)/jam*.

2. Kecepatan (*Speed*)

Menurut Roess, Prassas dan McShane (2011:100) kecepatan atau *speed* didefinisikan sebagai rasio pergerakan dalam jarak per satuan waktu

$$v = \frac{d}{t} \quad (1)$$

dengan v adalah kecepatan, d adalah jarak dan t adalah waktu.

Roess, Prassas dan McShane (2011:100-101) juga menyebutkan bahwa kecepatan dihitung sebagai kecepatan rata-rata (*average speed*). Perhitungan kecepatan rata-rata dapat dihitung dengan dua cara yaitu *time mean speed (TMS)* dan *space mean speed (SMS)*. *TMS* adalah kecepatan rata-rata dari semua kendaraan yang melewati sebuah titik di jalan raya atau sebuah lajur pada interval waktu tertentu. *SMS* adalah kecepatan rata-rata dari semua kendaraan yang menempati sebuah ruas jalan raya atau lajur tertentu selama interval waktu tertentu.

3. Densitas (*Density*)

Densitas atau kepadatan menurut Kerner (2009:12) didefinisikan sebagai jumlah kendaraan pada setiap unit panjang jalan. Densitas dapat diestimasi dengan

$$\rho = \frac{q}{v} \quad (2)$$

dengan ρ adalah densitas, q adalah arus, dan v adalah kecepatan

B. Simpang

Simpang merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari jaringan jalan. Pada saat di simpang pengemudi dapat memutuskan untuk berjalan lurus atau berbelok dan pindah jalan untuk mencapai satu tujuan. Simpang dapat didefinisikan sebagai daerah dimana dua jalan atau lebih bergabung atau bertemu (Khisty dalam Juniardi, 2006:7). Pergerakan menyeberang dan berbelok pada persimpangan memunculkan peluang adanya konflik antar kendaraan-kendaraan, kendaraan-pejalan kaki, dan kendaraan-pesepeda (Neuman *et al*, 2003:I-1).

Di dalam *Highway Capacity Manual (HCM)* maupun dalam Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) simpang dibedakan menjadi dua macam yaitu simpang bersinyal dan simpang tak bersinyal. Sinyal adalah lampu pengatur lalu-lintas yang disebut lampu APILL. Menurut Ruskin dan Wang (2002:381) ada dua tipe simpang tak bersinyal yang menjadi fokus dalam pemodelan simpang tak bersinyal yaitu *two-way stop-controlled intersection (TWSC)* dan *all-way stop-controlled intersection (AWSC)*. *TWSC* adalah simpang tak bersinyal yang memiliki perbedaan prioritas untuk setiap pergerakan, sedangkan *AWSC* semua pergerakan dianggap memiliki prioritas yang sama (Li *et al*, 2009:129). Penilaian kinerja simpang tak bersinyal meliputi kapasitas, derajat kejenuhan, tundaan, dan peluang antrian (MKJI,1997:3-3).

1. Kapasitas

Kapasitas merupakan arus lalu-lintas maksimum yang dapat dipertahankan (tetap) pada suatu bagian jalan dalam kondisi tertentu. Di Indonesia perhitungan kapasitas menggunakan suatu manual, yaitu MKJI 1997. Untuk memudahkan pembahasan, berikut istilah-istilah yang sering digunakan dalam penentuan kapasitas (MKJI, 1997: 3-4).

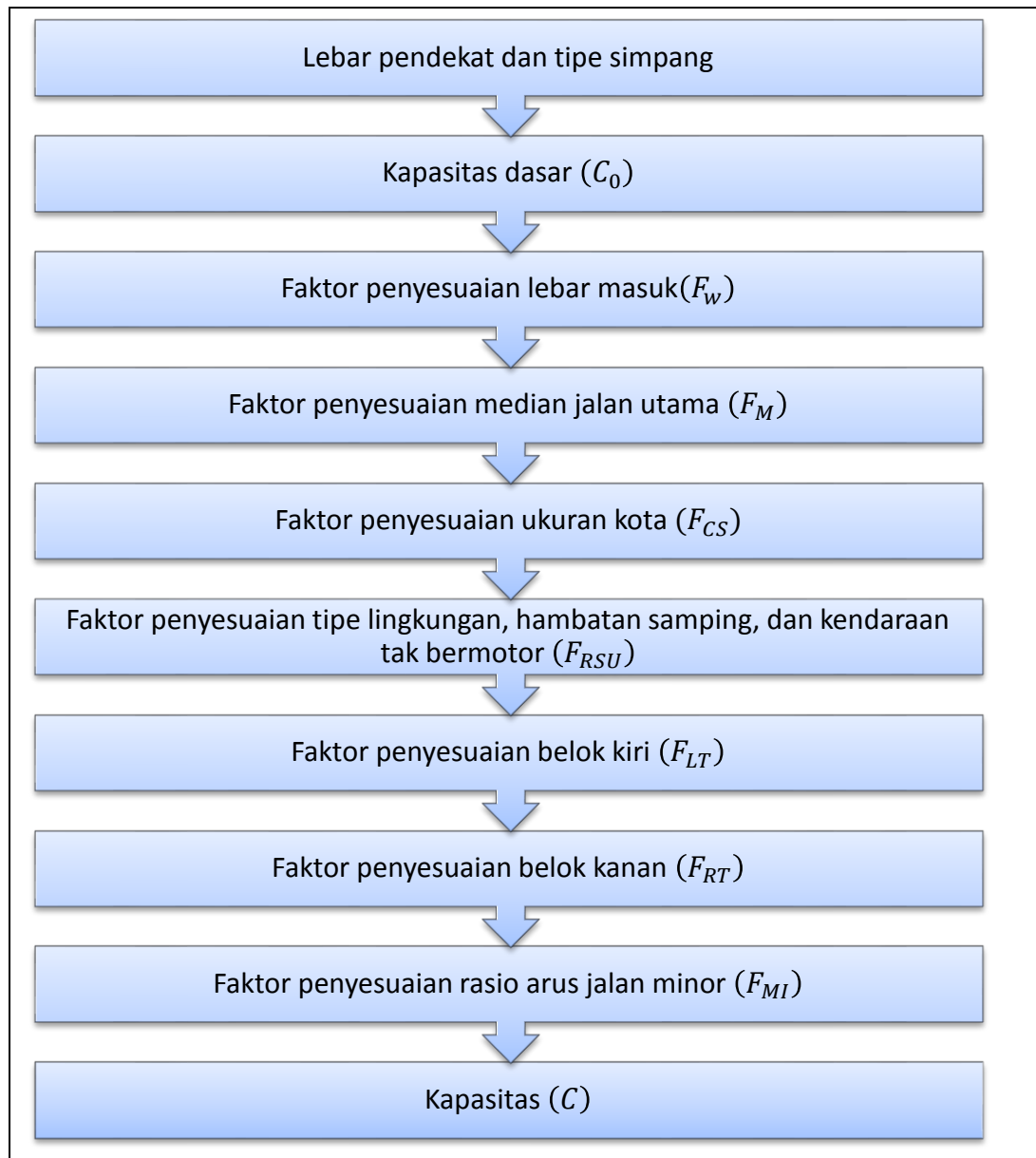
Tabel 1. Notasi, Istilah, dan Definisi Pada Lebar Pendekat dan Tipe Simpang

Notasi	Istilah	Definisi
	Jalan utama	Jalan utama adalah jalan yang paling penting pada persimpangan jalan, misalnya dalam hal klasifikasi jalan. Pada suatu simpang-3 jalan yang menerus selalu ditentukan sebagai jalan utama.
A, B, C, D	Pendekat	Tempat masuknya kendaraan dalam suatu lengan persimpangan jalan. Pendekat jalan utama disebut B dan D, jalan minor A dan C dalam arah jarum jam.
W_x	Lebar masuk pendekat x (meter)	Lebar dari bagian pendekat yang diperkeras, diukur dibagian tersempit, yang digunakan oleh lalu lintas yang bergerak. X adalah nama pendekat.
W_i	Lebar pendekat simpang rata-rata	Lebar efektif rata-rata dari seluruh pendekat pada simpang
W_{AC}	Lebar pendekat jalan rata-rata (meter)	Lebar rata-rata pendekat pada simpang. AC untuk pendekat minor dan BD untuk pendekat utama.
W_{BD}		
	Median	Daerah yang memisahkan arah lalu-lintas pada suatu segmen jalan.

Tabel 2. Notasi, Istilah, dan Definisi Pada Lebar Pendekat dan Tipe Simpang
(lanjutan)

Notasi	Istilah	Definisi
<i>LT</i>	Belok kiri	Indeks untuk lalu-lintas belok kiri.
<i>ST</i>	Lurus	Indeks untuk lalu-lintas lurus.
<i>RT</i>	Belok kanan	Indeks untuk lalu-lintas belok kanan.
<i>LV</i>	Kendaraan ringan	Kendaraan bermotor ber as dua dengan 4 roda dan dengan jarak as 2,0-3,0 m (meliputi: mobil penumpang, oplet, mikrobis, pick-up dan truk kecil sesuai sistem klasifikasi Bina Marga).
<i>MC</i>	Sepeda motor	Kendaraan bermotor dengan 2 atau 3 roda (meliputi sepeda motor dan kendaraan roda 3 sesuai sistem klasifikasi Bina Marga).
<i>HV</i>	Kendaraan berat	Kendaraan bermotor dengan lebih dari 4 roda (meliputi bis, truk 2 as, truk 3 as dan truk kombinasi sesuai sistem klasifikasi Bina Marga).
<i>UM</i>	Kendaraan tak bermotor	Kendaraan dengan roda yang digerakkan oleh orang atau hewan (meliputi : sepeda, becak, kereta kuda, dan kereta dorong sesuai sistim klasifikasi Bina Marga).
	Jalan Utama	Jalan yang paling penting pada persimpangan jalan, misalnya dalam hal klasifikasi jalan. Pada suatu simpang-3 jalan yang menerus selalu ditentukan sebagai jalan utama
	Jalan Minor	Jalan dengan prioritas lebih rendah dari jalan utama

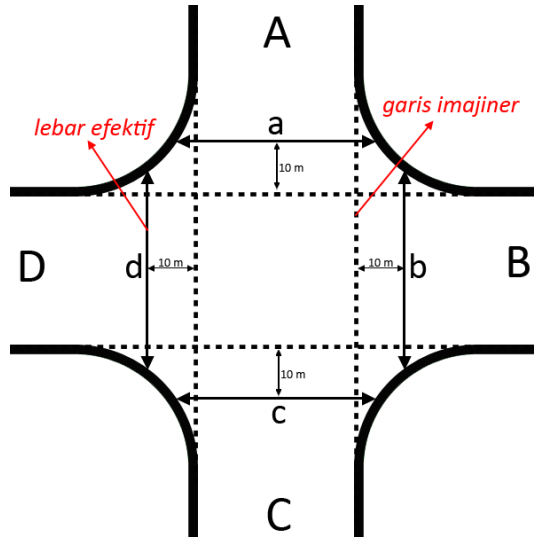
Perhitungan kapasitas memiliki beberapa tahapan. Gambar 2 adalah prosedur perhitungan kapasitas simpang tak bersinyal (MKJI, 1997: 3-30).



Gambar 2. Alur Perhitungan Kapasitas Simpang Tak Bersinyal

a. Lebar pendekat dan tipe simpang

Langkah ini digunakan untuk mendapatkan parameter geometrik dari simpang. Lebar pendekat diukur pada jarak 10 m dari garis imajiner yang menghubungkan tepi perkerasan dari jalan berpotongan, yang dianggap mewakili lebar pendekat efektif untuk masing-masing pendekat, lihat Gambar 3.



Gambar 3. Garis imajiner dan lebar efektif pada simpang

Hitung lebar rata-rata pendekat pada jalan minor

$$W_{AC} = \frac{W_A + W_C}{2} \quad (3)$$

dengan

$$W_A = a$$

$$W_C = c$$

Hitung lebar rata-rata pendekat pada jalan utama

$$W_{BD} = \frac{W_B + W_D}{2} \quad (4)$$

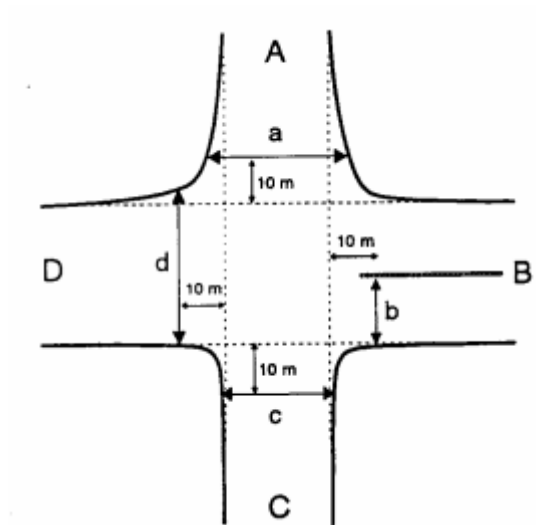
dengan

$$W_B = b$$

$$W_D = d$$

Hitung lebar rata-rata pendekat

$$W_I = \frac{W_A + W_B + W_C + W_D}{4} \quad (5)$$



Gambar 4 Simpang dengan median pada lengan B

Sumber : MKJI. Departemen Pekerjaan Umum Ditjen Bina Marga. 1997. Hal 3-31

Jika simpang memiliki median, lebar rata-rata pendekat adalah

$$W_I = \frac{\left(\frac{a}{2} + b + \frac{c}{2} + \frac{d}{2}\right)}{4} \quad (5.1)$$

dengan W_I : Lebar rata-rata pendekat dengan median pada lengan B

Jika lengan A hanya untuk ke luar, maka $a = 0$:

$$W_I = \frac{\left(b + \frac{c}{2} + \frac{d}{2}\right)}{3} \quad (5.2)$$

dengan W_I : Lebar rata-rata pendekat dengan median pada lengan

B

dan lengan A hanya untuk keluar

Lebar rata-rata pendekat minor dan pendekat utama jika lengan B terdapat median

$$W_{AC} = \frac{\left(\frac{a}{2} + \frac{c}{2}\right)}{2} \quad (3.1)$$

$$W_{BD} = \frac{\left(b + \frac{d}{2}\right)}{2} \quad (4.1)$$

Jumlah lajur yang digunakan untuk keperluan perhitungan ditentukan dari lebar rata-rata pendekat jalan minor dan jalan utama seperti pada tabel 2 (MKJI, 1997:3-32).

Tabel 1 Jumlah Lajur dan Lebar Rata-Rata Pendekat Minor dan Utama

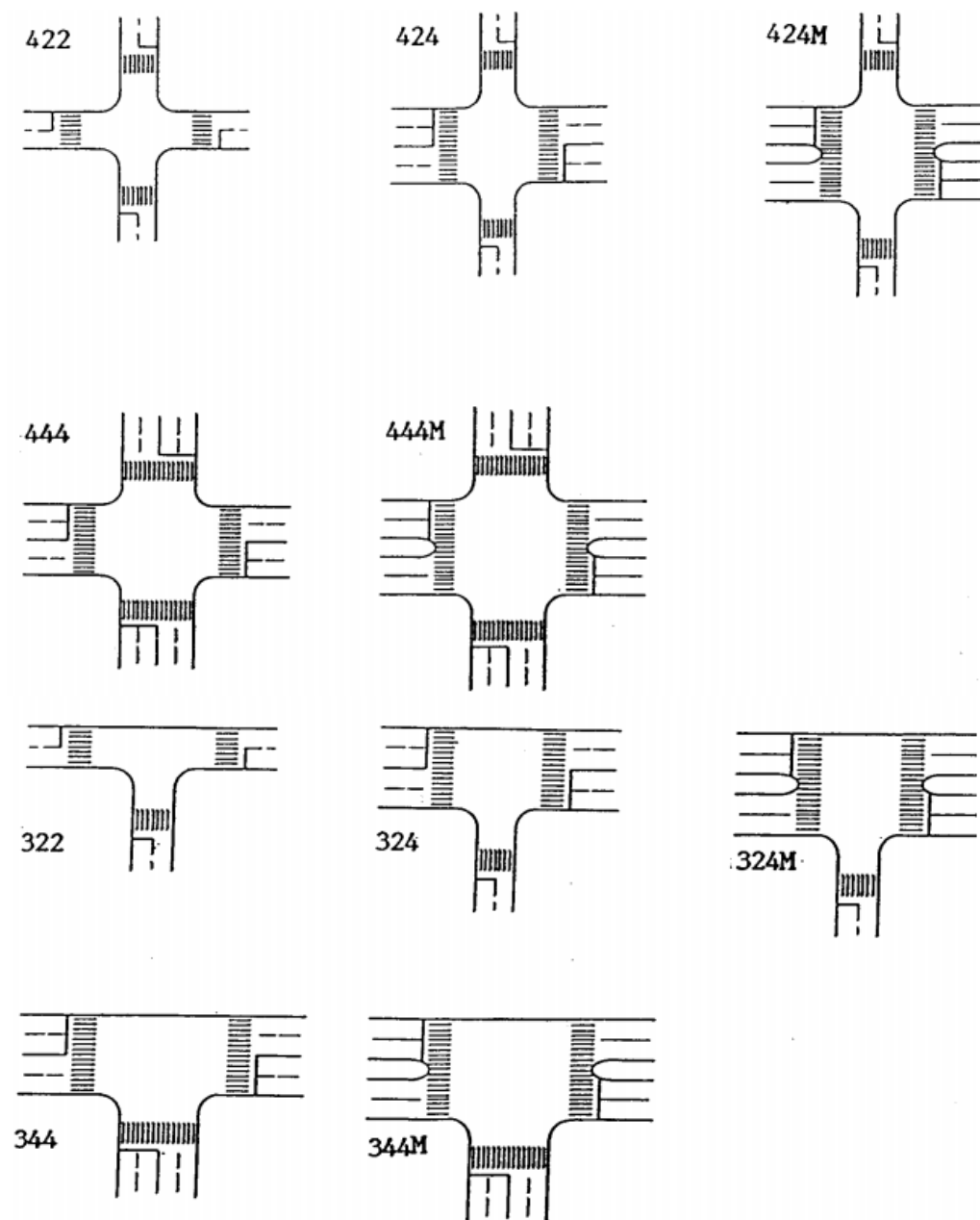
Lebar rata-rata pendekat minor dan utama		Jumlah lajur (total untuk kedua arah)
W_{BD}	$0 < 5,5$	2
	$\geq 5,5$	4
W_{AC}	$0 < 5,5$	2
	$\geq 5,5$	4

Tipe simpang (IT) menentukan jumlah lengan simpang dan jumlah lajur pada jalan utama dan jalan minor pada simpang tersebut dengan kode tiga angka. Pada tabel 3 adalah daftar kode simpang beserta karakteristiknya (MKJI, 1997: 3-32).

Tabel 3. Kode Tipe Simpang

Kode (IT)	Jumlah lengan simpang	Jumlah lajur jalan minor	Jumlah lajur jalan utama
322	3	2	2
324	3	2	4
342	3	4	2
422	4	2	2
424	4	2	4

Dalam tabel 3 tidak terdapat simpang tak bersinyal yang kedua jalan utama dan jalan minornya mempunyai empat lajur, yaitu tipe simpang 344 dan 444. Jika analisa kapasitas harus dikerjakan untuk simpang seperti ini, simpang tersebut dianggap sebagai 324 dan 424. Ilustrasi tipe simpang 4 dan 3 diberikan pada gambar 5.



Gambar 5. Ilustrasi Tipe Simpang Tak Bersinyal 4 Lengan dan 3 Lengan
 Sumber : MKJI. Departemen Pekerjaan Umum Ditjen Bina Marga. 1997. Hal 3-14

b. Kapasitas dasar

Langkah awal perhitungan kapasitas adalah menentukan kapasitas dasar. Kapasitas dasar adalah kapasitas persimpangan jalan total untuk suatu kondisi tertentu yang sudah ditentukan sebelumnya atau kondisi dasar (MKJI, 1997:3-7). Nilai kapasitas dasar ditentukan dari Tabel 4 dengan variabel masukan tipe simpang (MKJI, 1997:3-33).

Tabel 4. Kapasitas Dasar Menurut Tipe Simpang

Tipe simpang (IT)	Kapasitas dasar (<i>smp/jam</i>)
322	2700
342	2900
324 atau 344	3200
422	2900
424 atau 444	3400

c. Faktor penyesuaian lebar pendekat

Penyesuaian lebar pendekat (F_W), diperoleh dari Tabel 5. Variabel masukan adalah lebar rata-rata semua pendekat W_I , dan tipe simpang IT (MKJI, 1997:3-33)

Tabel 5. Faktor Penyesuaian Lebar Pendekat

Tipe simpang IT	Penyesuaian lebar pendekat F_W
422	$0,70 + 0,0866 W_I$
424 atau 444	$0,61 + 0,0740 W_I$
322	$0,73 + 0,0760 W_I$
324 atau 344	$0,62 + 0,0646 W_I$
342	$0,67 + 0,0698 W_I$

d. Faktor penyesuaian median jalan utama

Pertimbangan teknik lalu-lintas diperlukan untuk menentukan faktor penyesuaian median jalan utama (F_M). Median disebut lebar jika kendaraan ringan standar dapat berlindung pada daerah median tanpa mengganggu arus berangkat pada jalan utama. Faktor penyesuaian median jalan utama diperoleh dengan menggunakan Tabel 6. Penyesuaian hanya digunakan untuk jalan utama dengan 4 lajur. Variabel masukan adalah tipe median jalan utama (MKJI, 1997:3-34).

Tabel 6. Faktor Penyesuaian Median Jalan Utama

Uraian	Tipe median	Faktor penyesuaian median (F_M)
Tidak ada median jalan utama	Tidak ada	1,00
Ada median jalan utama, lebar $< 3 m$	Sempit	1,05
Ada median jalan utama, lebar $\geq 3 m$	Lebar	1,20

e. Faktor penyesuaian ukuran kota

Faktor penyesuaian ukuran kota ditentukan dari Tabel 7. Variabel masukan adalah ukuran kota, CS (MKJI, 1997:3-34).

Tabel 7. Faktor Penyesuaian Ukuran Kota

Ukuran kota CS	Penduduk (juta)	Faktor penyesuaian ukuran kota F_{CS}
Sangat kecil	$< 0,1$	0,82
Kecil	$0,1 - 0,5$	0,88
Sedang	$0,5 - 1,0$	0,94
Besar	$1,0 - 3,0$	1,00
Sangat besar	> 3	1,05

f. Faktor penyesuaian tipe lingkungan jalan, hambatan samping dan kendaraan tak bermotor

Sebelum menentukan faktor penyesuaian tipe lingkungan jalan, hambatan samping dan kendaraan tak bermotor perlu dicari terlebih dahulu tipe lingkungan jalan RE , kelas hambatan samping SF dan rasio kendaraan tak bermotor P_{UM} . Lingkungan jalan diklasifikasikan dalam kelas menurut tata guna tanah dan aksesibilitas jalan tersebut dari aktivitas sekitarnya. Hal ini ditetapkan secara kualitatif dari pertimbangan teknik lalu-lintas dengan bantuan Tabel 8 (MKJI, 1997:3-29)

Tabel 8. Tipe Lingkungan Jalan

Komersial	Tata guna lahan komersial (misalnya pertokoan, rumah makan, perkantoran) dengan jalan masuk langsung bagi pejalan kaki dan kendaraan.
Pemukiman	Tata guna lahan tempat tinggal dengan jalan masuk langsung bagi pejalan kaki dan kendaraan.
Akses terbatas	Tanpa jalan masuk atau jalan masuk langsung terbatas (misalnya karena adanya penghalang fisik atau jalan samping).

Hambatan samping menunjukkan pengaruh aktivitas samping jalan di daerah simpang pada arus berangkat lalu-lintas, misalnya pejalan kaki berjalan atau menyeberangi jalur, angkutan kota dan bis berhenti untuk menaikkan dan menurunkan penumpang, kendaraan masuk dan keluar halaman dan tempat parkir di luar jalur. Hambatan samping ditentukan secara kualitatif dengan pertimbangan teknik lalu-lintas sebagai Tinggi, Sedang atau Rendah. Perhitungan rasio kendaraan tak bermotor adalah

$$P_{UM} = \frac{q_{UM}}{q_{MV}} \quad (6)$$

dengan P_{UM} : rasio kendaraan tak bermotor
 q_{UM} : arus kendaraan tak bermotor (*kend/jam*)
 q_{MV} : arus kendaraan bermotor (*kend/jam*)

Setelah tipe lingkungan jalan, kelas hambatan samping dan rasio kendaraan tak bermotor diperoleh ditentukan faktor penyesuaian tipe lingkungan jalan, hambatan samping dan kendaraan tak bermotor dengan menggunakan Tabel 9 (MKJI, 1997:3-35).

Tabel 9. Faktor Penyesuaian Tipe Lingkungan Jalan, Hambatan Samping dan Kendaraan Tak Bermotor

Kelas tipe lingkungan jalan <i>RE</i>	Kelas hambatan samping <i>SF</i>	Rasio kendaraan tak bermotor <i>P_{UM}</i>					
		0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	≥ 0,25
Komersial	Tinggi	0,93	0,88	0,84	0,79	0,74	0,70
	Sedang	0,94	0,89	0,85	0,80	0,75	0,70
	Rendah	0,95	0,90	0,86	0,81	0,76	0,71
Pemukiman	Tinggi	0,96	0,91	0,86	0,82	0,77	0,72
	Sedang	0,97	0,92	0,87	0,82	0,77	0,73
	Rendah	0,98	0,93	0,88	0,83	0,78	0,74
Akses terbatas	Tinggi/sedang/rendah	1,00	0,94	0,90	0,85	0,80	0,75

g. Faktor penyesuaian belok kiri

Sebelum menentukan faktor penyesuaian belok kiri, perlu dihitung rasio belok kiri P_{LT} dengan

$$P_{LT} = \frac{q_{LT}}{q_{TOTAL}} \quad (7)$$

dengan P_{LT} : rasio belok kiri
 q_{LT} : arus belok kiri dari semua arah pendekat

(*smp/jam*)

q_{TOTAL} : arus total dari semua arah dan semua belok kiri,
belok kanan, dan lurus (*smp/jam*)

Kemudian faktor penyesuaian belok kiri ditentukan dengan

$$F_{LT} = 0,84 + 1,61 P_{LT} \quad (8)$$

h. Faktor penyesuaian belok kanan

Sebelum menentukan faktor penyesuaian belok kanan, perlu dihitung rasio belok kanan P_{RT} dengan

$$P_{RT} = \frac{q_{RT}}{q_{TOTAL}} \quad (9)$$

dengan P_{RT} : rasio belok kanan

q_{RT} : arus belok kanan dari semua arah pendekat
(*smp/jam*)

q_{TOTAL} : arus total dari semua arah dan semua belok kiri, belok
kanan, dan lurus (*smp/jam*)

Kemudian faktor penyesuaian belok kanan ditentukan dengan

$$F_{LT} = 1,09 - 0,922 P_{RT} \quad \text{Untuk simpang 3 lengan} \quad (10.1)$$

$$F_{LT} = 1,0 \quad \text{Untuk simpang 4 lengan} \quad (10.2)$$

i. Faktor penyesuaian rasio arus jalan minor

Sebelum menentukan faktor penyesuaian rasio arus jalan minor perlu ditentukan dulu rasio arus jalan minor P_{MI} dengan

$$P_{MI} = \frac{q_{MI}}{q_{TOTAL}} \quad (11)$$

dengan P_{MI} : rasio arus jalan minor

q_{MI} : total arus jalan minor (*smp/jam*)

q_{TOTAL} : arus total dari semua arah dan semua belok kiri,
belok kanan, dan lurus (*smp/jam*)

Kemudian ditentukan faktor penyesuaian rasio arus jalan minor F_{MI} dengan menggunakan Tabel 10 (MKJI, 1997:3-38)

Tabel 10. Faktor Penyesuaian Rasio Arus Jalan Minor

IT	F_{MI}	P_{MI}
422	$1,19 \times P_{MI}^2 - 1,19 \times P_{MI} + 1,19$	0,1 – 0,9
424	$16,6 \times P_{MI}^4 - 3,33 \times P_{MI}^3 + 25,3 \times P_{MI}^2 - 8,6 \times P_{MI} + 1,95$	0,1 – 0,3
444	$1,11 \times P_{MI}^2 - 1,11 \times P_{MI} + 1,11$	0,3 – 0,9
322	$1,19 \times P_{MI}^2 - 1,19 \times P_{MI} + 1,19$	0,1 – 0,5
	$-0,595 \times P_{MI}^2 + 0,595 \times P_{MI}^3 + 0,74$	0,5 – 0,9
342	$1,19 \times P_{MI}^2 - 1,19 \times P_{MI} + 1,19$	0,1 – 0,5
	$2,38 \times P_{MI}^2 - 2,38 \times P_{MI} + 1,49$	0,5 – 0,9
324	$16,6 \times P_{MI}^2 - 33,3 \times P_{MI}^3 + 25,3 \times P_{MI}^2 - 8,6 \times P_{MI} + 1,95$	0,1 – 0,3
344	$1,11 \times P_{MI}^2 - 1,11 \times P_{MI} + 1,11$	0,3 – 0,5
	$-0,555 \times P_{MI}^2 + 0,555 \times P_{MI} + 0,69$	0,5 – 0,9

j. Kapasitas

Setelah semua faktor penyesuaian diketahui, kapasitas C dihitung dengan rumus berikut

$$C = C_0 \times F_w \times F_M \times F_{CS} \times F_{RSU} \times F_{LT} \times F_{RT} \times F_{MI} \quad (12)$$

2. Derajat Kejenuhan

Derajat kejenuhan (DS) adalah rasio arus lalu-lintas terhadap kapasitas. Derajat kejenuhan dihitung dengan rumus berikut

$$DS = \frac{q_{TOTAL}}{C} \quad (13)$$

dengan q_{TOTAL} : arus total dari semua arah dan semua belok kiri, belok kanan, dan lurus (*smp/jam*)

C : kapasitas

3. Tundaan

Tundaan adalah waktu tempuh tambahan yang diperlukan untuk melewati suatu simpang dibandingkan terhadap situasi tanpa simpang. Tundaan terdiri dari tundaan lalu-lintas DT yang disebabkan pengaruh kendaraan lain; dan tundaan geometrik DG yang disebabkan perlambatan dan percepatan untuk melewati fasilitas (misalnya akibat lengkung horisontal pada persimpangan).

a. Tundaan lalu-lintas simpang

Tundaan lalu-lintas simpang DT_I adalah tundaan lalu-lintas rata-rata untuk semua kendaraan bermotor yang masuk simpang. DT_I ditentukan dengan

$$DT_I = 2 + 8,2078 DS - 2(1 - DS) \quad \text{untuk } DS \leq 0,6 \quad (14.1)$$

$$DT_I = \frac{1,0504}{0,2742 - 0,2042 DS} - 2(1 - DS) \quad \text{untuk } DS > 0,6 \quad (14.2)$$

dengan DS :derajat kejenuhan

b. Tundaan lalu-lintas jalan utama

Tundaan lalu-lintas jalan-utama DT_{MA} adalah tundaan lalu-lintas rata-rata semua kendaraan bermotor yang masuk persimpangan dari jalan-utama. DT_{MA} dihitung dengan

$$DT_{MA} = 1,8 + 5,8234 DS - 1,8(1 - DS) \quad \text{untuk } DS \leq 0,6 \quad (15.1)$$

$$DT_{MA} = \frac{1,05034}{0,346 - 0,246 DS} - 1,8(1 - DS) \quad \text{untuk } DS > 0,6 \quad (15.2)$$

c. Tundaan lalu-lintas jalan minor

Tundaan lalu lintas rata-rata jalan minor DT_{MI} ditentukan berdasarkan tundaan lalu-lintas rata-rata DT_I dan tundaan lalu lintas rata-rata jalan major DT_{MA} . DT_{MI} dihitung dengan rumus berikut.

$$DT_{MI} = \frac{q_{TOTAL}DT_I - q_{MA}DT_{MA}}{q_{MI}} \quad (16)$$

dengan q_{TOTAL} : arus total (*smp/jam*)

DT_I : Tundaan lalu-lintas simpang

q_{MA} : arus jalan utama (*smp/jam*)

DT_{MA} : Tundaan lalu-lintas jalan utama

q_{MI} : arus jalan minor (*smp/jam*)

d. Tundaan geometrik simpang

Tundaan geometrik simpang DG adalah tundaan geometrik rata-rata seluruh kendaraan bermotor yang masuk simpang. Sebelum penentuan tundaan geometrik perlu dihitung terlebih dahulu rasio arus belok P_T dengan rumus berikut

$$P_T = \frac{q_T}{q_{TOTAL}} \quad (17)$$

dengan q_T : arus yang berbelok dari semua jalan (*smp/jam*)

q_{TOTAL} : arus total (*smp/jam*)

DG dihitung dari rumus berikut

$$DG = (1 - DS)(6P_T + 3(1 - P_T)) + 4DS \quad \text{untuk } DS < 1 \quad (17.1)$$

$$DG = 4 \quad \text{untuk } DS \geq 1 \quad (17.2)$$

dengan DS : derajat kejenuhan

P_T : rasio arus belok

e. Tundaan simpang

Tundaan simpang D dihitung sebagai berikut

$$D = DG + DT_l \quad (18)$$

dengan DG : tundaan geometric simpang
 DT_l : tundaan lalu-lintas simpang

4. Peluang Antrian

Peluang antrian ($QP\%$) yang dimaksud adalah peluang antrian dengan lebih dari dua kendaraan di daerah pendekat yang mana saja, pada simpang tak bersinyal. Rentang peluang antrian diperoleh dengan

$$\text{Batas atas} \quad QP\% = 47,71 DS - 24,68 DS^2 + 56,47 DS^3 \quad (19.1)$$

$$\text{Batas bawah} \quad QP\% = 9,02 DS + 20,66 DS^2 + 10,49 DS^3 \quad (19.2)$$

dengan DS : derajat kejenuhan

5. Perhitungan Arus Lalu-Lintas dalam Satuan Mobil Penumpang

Data arus lalu-lintas yang sudah diklasifikasikan¹ dengan satuan *kend/jam* dikonversikan ke satuan mobil penumpang dengan mengalikan data arus dengan ekuivalensi mobil penumpang (*emp*) seperti pada tabel 11 (MKJI, 1997:3-26).

Tabel 11. Nilai Ekuivalensi Mobil Penumpang

Klasifikasi kendaraan	emp
<i>LV</i>	1,0
<i>HV</i>	1,3
<i>MC</i>	0,5

¹ Diperlukan data arus kendaraan menurut jenis kendaraan yaitu kendaraan ringan *LV*, kendaraan berat *HV*, dan sepeda motor *MC*, dalam perhitungan kapasitas kendaraan tanpa motor tidak dianggap sebagai kendaraan, namun sebagai hambatan.

C. *Cellular Automata*

Menurut Wolfram (1983:602) *Cellular Automata* adalah idealisasi matematis dari sistem fisik dimana ruang dan waktu adalah diskret, dan kuantitas fisik mengambil himpunan berhingga dari nilai diskret. *Cellular Automata* terdiri dari *lattice* yang uniform, dengan variabel diskret pada setiap *cell*-nya. Keadaan dari suatu *Cellular Automata* ditentukan oleh variabel-variabel pada tiap *cell*-nya. *Cellular Automata* berevolusi pada langkah waktu (*time step*) diskret, dimana nilai dari variabel di suatu *cell* dipengaruhi oleh nilai dari variabel-variabel *cell* tetangga (*neighbourhood*) *cell* tersebut saat *time step* sebelumnya. *Neighbourhood* suatu *cell* terdiri dari *cell* itu sendiri dan *cell-cell* sekitarnya. Variabel pada setiap *cell* akan di-*update* secara bersamaan, berdasarkan nilai dari variabel *neighbourhood* pada *time step* sebelumnya dan sekumpulan aturan.

Burzyński *et al* (2009:28-29) merangkum *cellular automata* ke dalam poin-poin sebagai berikut :

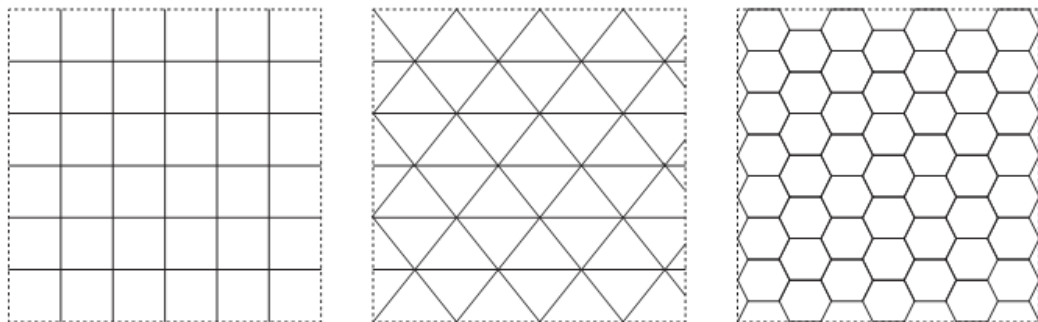
- CA berkembang dalam bidang dan waktu
- CA adalah metode simulasi diskrit, dimana bidang dan waktu terdefinisi dalam langkah (*steps*) diskrit
- CA terdiri dari *cell-cell* yang berbaris pada suatu garis untuk CA satu dimensi, atau tersusun pada suatu *lattice* dua dimensi atau lebih untuk CA dua dimensi atau lebih.
- Banyaknya status suatu *cell* berhingga
- Status dari setiap *cell* adalah diskrit dan semua *cell* identik

- Status masa depan dari setiap *cell* tergantung hanya dari status *cell* saat ini dan status *cell* dari *cell-cell* tetangganya.
- Perkembangan dari setiap *cell* didefinisikan oleh himpunan aturan deterministik atau probabilistik yang sama

Secara umum menurut Maerivoet dan Moor (2005:4) terdapat empat unsur pembentuk CA, yaitu lingkungan fisik dimana pada tulisan ini akan disebut lingkungan geometri, status *cell*, *neighbourhood*, dan aturan transisi. Bar-Yam(1997:116) menyebutkan bahwa pemilihan status awal adalah aspek penting dalam operasi CA. Status awal dapat ditentukan sebelumnya atau dipilih secara random.

1. Lingkungan geometri

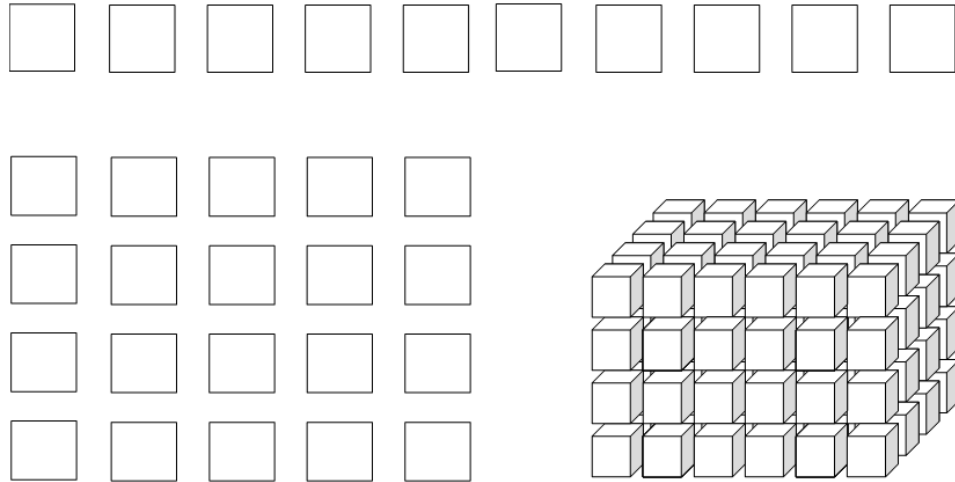
Lingkungan geometri merepresentasikan sistem yang dipelajari. Lingkungan geometri tersusun atas *cell-cell* berbentuk segi empat, segi enam atau bentuk yang lainnya (Maerivoet dan Moor, 2005:4).



Gambar 6. Berbagai Lingkungan 2 Dimensi

Sumber : S. Maerivoet, B. De Moor, *Cellular automata Models of Road Traffic*, Physics Reports 419, 2005, hal:5

Lingkungan geometri dapat memiliki dimensi berapapun, namun yang biasa digunakan adalah 1,2, dan 3 dimensi.



Gambar 7. Berbagai Dimensi Lingkungan Geometri

Sumber : Harald Niesche, *Introduction to Cellular automata Seminar "Organic Computing"*, 2006, hal 2

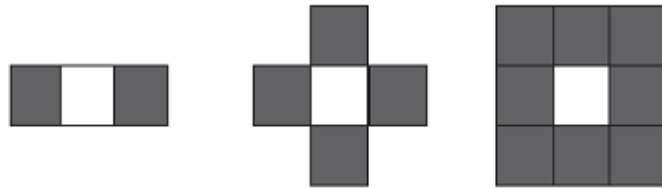
2. Status Cell

Setiap *cell* dapat berada di suatu status tertentu, dimana biasanya digunakan bilangan bulat untuk merepresentasikan status suatu *cell*. Status dari *cell-cell* tidak terbatas hanya pada bilangan bulat saja. Status dari *cell-cell* secara kolektif disebut konfigurasi global CA (*CA's global configuration*). Status merujuk pada *cell* tertentu dan bersifat lokal, sedangkan konfigurasi adalah global dan merujuk pada lingkungan geometri. (Maerivoet dan Moor, 2005:5).

3. Neighbourhood

Untuk setiap *cell*, kita menentukan *neighbourhood* (*cell-cell* tetangga dari *cell* yang dimaksud) yang mempengaruhi evolusi dari *cell* secara local. Ukuran dari

neighbourhood sama untuk setiap *cell* di dalam lingkungan. Sebagai contoh pada lingkungan 2 dimensi dengan *cell* berbentuk segiempat *neighbourhood* terdiri dari *cell* itu sendiri ditambah *cell-cell* disekitarnya dengan radius 1 *cell* di utara, timur, selatan dan barat (Von Neuman *neighbourhood*) atau ditambah dengan *cell-cell* pada arah tenggara, barat daya, barat laut, dan timur laut (Moree *neighbourhood*). Sedangkan pada lingkungan 1 dimensi *neighbourhood* paling sederhana adalah Wolfram *neighbourhood* (Karayiannis, 2005:9).



Gambar 8. *Neighbourhood* Wolfram, *Neighbourhood* von Neumann dan *Neighbourhood* Moore

Sumber : K. Maeda dan C. Sakama, Identifying *Cellular automata* Rules, Journal of *Cellular automata*, Vol. 2, 2007, hal 3

4. Aturan Transisi

Aturan ini (atau juga disebut fungsi) bekerja pada suatu *cell* dan *neighbourhood*, dimana status *cell* berubah dari satu *time step* ke *time step* selanjutnya (iterasi sistem). Secara umum aturan transisi yang sama digunakan untuk seluruh *cell* di dalam lingkungan. Ketika tidak ada komponen stokastik dalam aturan ini maka model disebut CA deterministik, jika ada maka disebut CA stokastik. (Maerivoet dan Moor, 2005:5). Contoh aturan transisi adalah

Aturan 1: kecepatan

$$v_n(t + 1) = \min\{v_{max}, v_n(t) + 1, d_n(t)\}$$

Aturan 2 : perpindahan posisi

$$x_n(t + 1) = x_n(t) + v_n(t + 1)$$

Wu *et al* (2005:266)

$v_n(t)$ adalah kecepatan subjek n pada saat time step t , v_{max} adalah kecepatan maksimum, $d_n(t)$ adalah jarak dengan kendaraan di depannya dan $x_n(t)$ adalah posisi subjek saat *time step* t . CA digunakan dalam berbagai disiplin ilmu, salah satunya pemodelan lalu-lintas yang disebut *Traffic Cellular Automata (TCA)*.

D. Traffic Cellular Automata (TCA)

Dalam TCA, posisi, kecepatan, akselerasi dan waktu dianggap sebagai variabel diskrit. Pada pendekatan CA sebuah lajur jalan direpresentasikan dengan *lattice*² satu dimensi dan setiap unit dari *lattice* merepresentasikan *cell* dimana dapat kosong atau terisi paling sedikit satu kendaraan atau bagian dari kendaraan pada suatu waktu (Pal dan Mallikarjuna, 2010:53). Jika dalam satu *cell* hanya terisi suatu bagian dari kendaraan saja maka satu kendaraan dapat menempati beberapa *cell* sekaligus, model ini dikenal dengan *multi-cell model*.

1. Notasi

Berikut adalah notasi yang biasa digunakan dalam teori CA

$$CA = (\mathcal{L}, \Sigma, \mathcal{N}, \delta)$$

Dimana \mathcal{L} adalah lingkungan dari sistem, Σ adalah himpunan dari status *cell*. Setiap *cell* ke- i memiliki status $\sigma_i(t) \in \Sigma$ pada saat *time step* t . Kemudian *cell-cell* yang menjadi *neighbourhood* dari *cell* i adalah $\mathcal{N}_i(t)$ dimana merupakan himpunan dari beberapa *cell*. Dan aturan transisi yang direpresentasikan sebagai berikut

$$\delta: \Sigma^{\mathcal{N}} \rightarrow \Sigma$$

² *Lattice* adalah suatu bidang yang terbagi-bagi menjadi beberapa bagian, sebagai contoh kertas gambar dengan garis *grid*

Dimana $\Sigma^{\mathcal{N}}$ adalah himpunan status dari *cell-cell* di dalam *neighbourhood* \mathcal{N} pada *time step* t dan Σ adalah himpunan status pada *time step* $t + 1$. (Maerivoet dan Moor, 2005:7-8).

2. Traffic Cellular Automata Deterministik

Pada model deterministik, aturan-aturan transisi tidak memiliki komponen stokastik dimana pergerakan dari kendaraan ditentukan dari aturan transisi sebagai berikut

Aturan transisi 1 : akselerasi/percepatan

$$v(i) < v_{maks} \text{ dan } g(i) \geq v(i) + 1 \rightarrow v(i) = v(i) + 1 \quad (20.1)$$

dengan $v(i)$: kecepatan kendaraan (status) di *cell* ke- i pada saat *time step* t

Kecepatan ini bukan kecepatan sebenarnya namun kecepatan yang direpresentasikan dalam bilangan bulat, contoh :

angka 1 berarti kecepatannya 27 km/jam , angka 2 berarti 54 km/jam dan seterusnya

v_{maks} : kecepatan maksimum dari kendaraan yang diperbolehkan pada sistem

$g(i)$: jumlah *cell* kosong (*gap*) di depan kendaraan di *cell* ke- i

Aturan transisi 2 : perlambatan karena kendaraan lain

$$g(i) < v(i) + 1 \rightarrow v(i) = g(i) \quad (20.2)$$

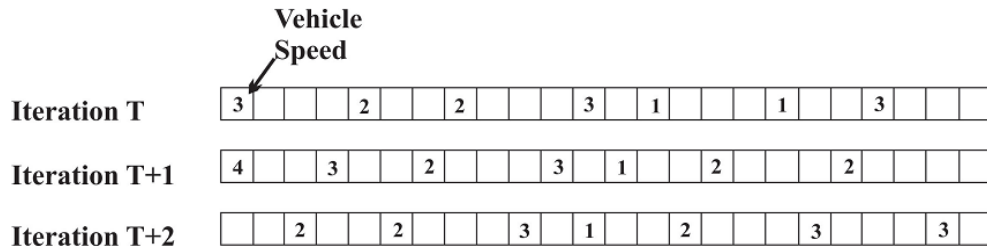
Aturan transisi 3 : pergerakan kendaraan

$$\text{kendaraan maju sebanyak } v(i) \text{ setiap time step} \quad (20.3)$$

Atau dapat ditulis

$$i \rightarrow i + v(i)$$

Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar 9.



Gambar 9. Contoh Pergerakan Kendaraan Berdasarkan Aturan Transisi

Sumber: S. Rajeswaran dan S. Rajasekaran, *A Realistic Approach to the Traffic Flow Behaviors by Cellular automata Models*, *International Journal of Computer Applications*, vol 56, 2012, hal 32

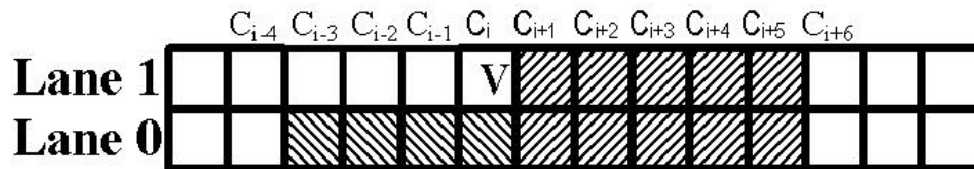
TCA deterministik adalah versi sederhana dari lalu-lintas nyata dimana terdapat percepatan dan perlambatan kendaraan. (Rajeswaran dan Rajasekaran, 2012:32).

Pada aturan transisi 1, jika kecepatan kendaraan yang menempati *cell i* pada *time step t* lebih kecil dari v_{maks} dan *gap* di depan *cell i* lebih besar dari atau sama dengan $v(i) + 1$ maka kendaraan akan mempercepat laju kendaraan menjadi $v(i) + 1$. Pada aturan transisi 2, jika *gap* di depan *cell* jumlahnya kurang dari $v(i) + 1$ maka kendaraan akan menurunkan kecepatan menjadi $g(i)$. Aturan transisi 3 digunakan supaya setiap *time step* kendaraan bergerak maju.

3. Traffic Cellular Automata pada Jalan dengan Multi Lajur

Pada model di atas jalan hanya direpresentasikan dengan satu lajur saja, kondisi ini tidak memungkinkan bagi kendaraan untuk menyalip (*overtake*) kendaraan di depannya. Jika kendaraan-kendaraan memiliki kecepatan maksimum yang berbeda namun dimodelkan dengan model satu lajur maka akan menimbulkan antrian yang parah. Pada model cellular automata dengan dua lajur menurut Chen *et al* (2013:1414) untuk berpindah lajur kendaraan harus memenuhi dua syarat. Syarat pertama yaitu motivasi untuk berpindah lajur

dimana apakah kendaraan ingin berpindah lajur atau tidak. Syarat kedua adalah kondisi keselamatan, apakah aman untuk menyalip kendaraan di depannya tanpa menimbulkan kecelakaan.



Gambar 10. Contoh Lingkungan Pada model TCA dengan dua lajur
 Sumber : *Automata-2008 Theory and Applications of Cellular Automata, Development of CA model of highway traffic*, 2008, hal 533

E. Klasifikasi Kendaraan

Klasifikasi kendaraan memiliki banyak jenis. Ada klasifikasi yang dibuat oleh majalah otomotif seperti klasifikasi *AMS (Auto Motor und Sport)* dan *Teknikens Värld*. Klasifikasi oleh kerjasama industri otomotif, klasifikasi kendaraan bermotor menurut *English-System* seperti *ACS (Amerika)* dan *BCS (Inggris)* (Opland, 2007:43-53). Di Indonesia juga terdapat klasifikasi kendaraan seperti diatur dalam Keputusan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 370/KPTS/M/2007 tentang penetapan golongan jenis kendaraan bermotor pada ruas jalan tol yang sudah beroperasi dan besarnya tarif tol pada beberapa ruas jalan tol dimana kendaraan bermotor dibagi menjadi 5 golongan. Pada klasifikasi tersebut golongan 4 dan 5 adalah kendaraan bermotor yang memiliki 4 as dan 5 as dimana tidak terdapat pada simpang Samirono, sehingga klasifikasi ini tidak cocok untuk digunakan.

Dalam survei lalu-lintas di Indonesia digunakan 3 jenis klasifikasi yaitu *IRMS (Integrated Road Management System)*, DJBM 1992 (Direktorat Jenderal Bina

Marga) dan MKJI 1997. Tabel 12 adalah klasifikasi dan padanannya (Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil, Kapasitas Simpang APILL, 2014: 13).

Tabel 12. Klasifikasi Jenis Kendaraan

IRMS (11 kelas)			DJBM 1992 (8 kelas)		MKJI 1997 (5 kelas)	
1.		Sepeda motor, Skuter, Kendaraan roda tiga	1.	Sepeda motor, Skuter, Sepeda kumbang, dan Sepeda roda tiga	1.	SM: Kendaraan bermotor roda 2 dan 3 dengan panjang tidak lebih dari 2,5m
2.		Sedan, Jeep, Station wagon	2.	Sedan, Jeep, Station Wagon	2.	KR: Mobil penumpang (Sedan, Jeep, Station wagon, Opelet, Minibus, Mikrobus), Pickup, Truk Kecil, dengan panjang tidak lebih dari atau sama dengan 5,5m
3.		Opelet, Pickup-opelet, Suburban, Kombi, dan Minibus	3.	Opelet, Pickup-opelet, Suburban, Kombi, dan Minibus		
4.		Pikup, Mikro-truk, dan Mobil hantaran	4.	Pikup, Mikro-truk, dan Mobil hantaran		
5.	a.	Bus Kecil	5.	Bus		
	b.	Bus Besar				
6.		Truk 2 sumbu	6.	Truk 2 sumbu	3	KS: Bus dan Truk 2 sumbu, dengan panjang tidak lebih dari atau sama dengan 12,0m
7.	a.	Truk 3 sumbu	7.	Truk 3 sumbu atau lebih dan Gandengan		
	b.	Truk Gandengan				
	c.	Truk Tempelan (Semi trailer)				
8.		KTB: Sepeda, Becak, Dokar, Keretek, Andong.	8.	KTB: Sepeda, Becak, Dokar, Keretek, Andong.	5.	KTB: Sepeda, Becak, Dokar, Keretek, Andong.

Catatan: *) Dalam jalan perkotaan, KB dikategorikan KS

F. Ukuran Cell

Beberapa ukuran *cell* telah digunakan oleh para peneliti tergantung dari jenis kendaraan yang digunakan dalam simulasi, namun belum ada prosedur pasti dalam menentukan ukuran dari *cell*. Sing (1990) menggunakan *cell* berukuran $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, Roy (2000) menggunakan ukuran $0,28\text{ m} \times 0,28\text{ m}$ dalam model *TCA* heterogen. Lan dan Chang menggunakan ukuran $1,25\text{ m} \times 1,25\text{ m}$, Gundaliya *et al* (2004) menggunakan ukuran $0,9\text{ m} \times 1,9\text{ m}$ (Gundaliya, Mathew, dan Dhingra, 2005:72).