

Bab 3

KARAKTERISTIK ARUS LALU LINTAS

Karakteristik dasar arus lalu lintas adalah arus, kecepatan, dan kerapatan. Karakteristik ini dapat diamati dengan cara makroskopik atau mikroskopik. Tabel 3.1 menggambarkan kerangka dasar dari karakteristik arus lalu lintas.

Tabel 3.1. Kerangka Dasar Karakteristik Arus Lalu Lintas

Karakteristik Lalu Lintas	Mikroskopik	Makroskopik
Arus	Waktu Antara (Time headway)	Tingkat Arus (Flow Rate)
Kecepatan	Kecepatan Individu	Kecepatan Rata-rata
Kerapatan	Jarak Antara (Distance headway)	Tingkat Kerapatan

Pada tingkat mikroskopik analisis dilakukan secara individu sedangkan pada tingkat makroskopik analisis dilakukan secara kelompok. Dalam bab ini hanya akan dibahas mengenai analisis makroskopik. Karakteristik arus makroskopik dinyatakan dengan tingkat arus dan pembahasan akan ditekankan pada pola variasi dalam waktu, ruang, dan jenis kendaraan.

Karakteristik kecepatan makroskopik menganalisis kecepatan dari kelompok kendaraan yang melintas suatu titik pengamat atau suatu potongan jalan pendek selama periode waktu tertentu. Penekanan diberikan pada variasi waktu, ruang, dan jenis kendaraan dan juga pada analisis statistik dari pengamatan kecepatan kelompok. Juga termasuk waktu perjalanan dan tundaan.

Karakteristik kerapatan makroskopik dinyatakan sebagai sejumlah kendaraan yang menempati suatu potongan jalan. Akan dijelaskan teknik pengukuran kerapatan dan penekanan diberikan pada peta kontur kerapatan. Selain itu akan dijelaskan juga teknik analitis dengan menggunakan peta kontur kerapatan.

3.1 Jenis Fasilitas

Fasilitas lalu lintas terbagi dalam dua kategori utama, yaitu fasilitas arus tak terganggu dan fasilitas arus terganggu. Kategori ini didasarkan pada interaksi antar elemen arus lalu lintas yang mengatur perilaku umum dari arus di sepanjang fasilitas tersebut.

3.1.1 Fasilitas arus tak terganggu

Pada fasilitas arus tak terganggu tidak ada faktor luar yang menyebabkan gangguan secara periodik terhadap arus lalu lintas. Arus yang demikian terdapat di jalan bebas hambatan dan fasilitas lain yang aksesnya dibatasi, dimana tidak ada sinyal lalu lintas, rambu STOP atau YIELD, atau persimpangan sebidang yang mengganggu arus.

Pada fasilitas arus tak terganggu, arus lalu lintas merupakan hasil interaksi antar kendaraan secara individu dan dengan geometrik dan lingkungan jalan. Pola arus sepanjang fasilitas hanya diatur oleh karakteristik tata guna lahan yang membangkitkan perjalanan kendaraan di fasilitas tersebut. Meskipun terjadi kemacetan, hal ini merupakan interaksi antar kendaraan dalam arus dan tidak ada penyebab dari luar. Jadi meskipun pengemudi mengalami kemacetan, fasilitas tetap dikategorikan sebagai arus tak terganggu.

3.1.2 Fasilitas arus terganggu

Fasilitas arus terganggu, merupakan fasilitas yang mempunyai pengatur luar dimana secara periodik mengganggu arus. Pengatur utama yang secara periodik menghentikan arus adalah sinyal lalu lintas. Pengatur lain, seperti rambu STOP dan rambu YIELD dan juga persimpangan tanpa pengatur, juga mengganggu arus.

Pada fasilitas arus terganggu, arus tidak saja tergantung pada interaksi antar kendaraan dan lingkungan jalan tetapi juga pengaturan waktu sinyal. Sebagai contoh, sinyal lalu lintas memungkinkan pergerakan tertentu bergerak hanya sebagian waktu. Karena gangguan periodik terhadap arus pada suatu fasilitas, arus yang terjadi berbentuk “peleton”. Peleton adalah sekelompok kendaraan bergerak di sepanjang fasilitas secara bersama, dengan jarak antara (gap) yang cukup dengan kelompok berikutnya. Pada fasilitas sinyal lalu lintas, peleton ini terbentuk oleh pola dari fase hijau di persimpangan yang berurutan.

Dengan menjauhnya peleton dari persimpangan bersinyal, antar kendaraan cenderung untuk saling menjauh (dispersi). Jika jarak antar persimpangan cukup jauh, pengembangan

dispersi memungkinkan terjadinya arus tak terganggu di beberapa bagian dari jalan diantara dua persimpangan tersebut. Tidak ada kriteria pasti untuk menentukan jarak antar persimpangan dimana hal ini terjadi. Banyak variabel yang mempengaruhi dispersi peleton, termasuk kualitas progresi sinyal dan jumlah dan pola kendaraan yang masuk ke arus lalu lintas dari persimpangan tak bersinyal atau jalan diantara dua persimpangan.

3.2 Karakteristik Arus

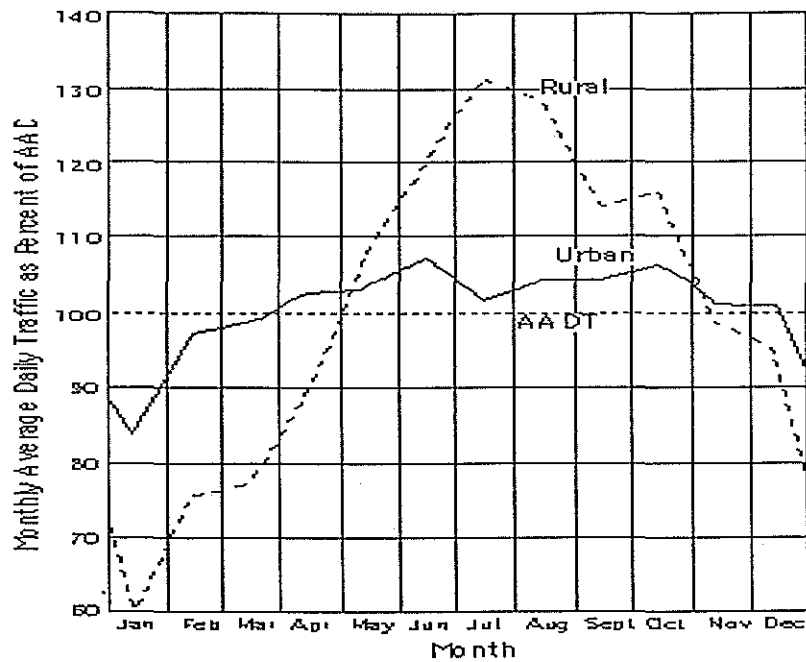
3.2.1 Variasi arus dalam waktu

Tingkat arus lalu lintas bervariasi dalam waktu, yaitu bulanan, harian, jam, dan variasi dalam jam. Sangat penting untuk mengetahui variasi arus dalam waktu untuk memperkirakan tingkat arus pada periode yang ditentukan berdasarkan pada tingkat arus yang telah diketahui dari periode waktu yang lain.

3.2.1.1 *Variasi arus lalu lintas bulanan.*

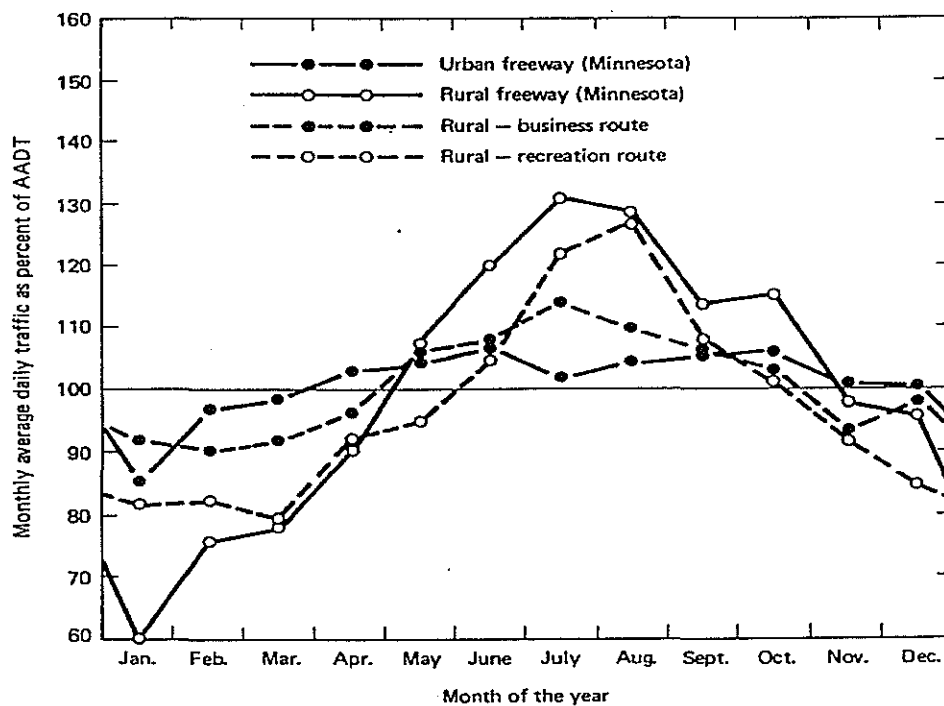
Di negara lain variasi bulanan ini tergantung dari musim dan iklim setempat. Di Indonesia perubahan iklim tidak begitu besar seperti di negara-negara yang mempunyai empat musim, dan grafik untuk Indonesia juga lebih datar. Jenis fasilitas jalan yang berbeda mempunyai variasi bulanan yang berbeda. Variasi arus bulanan berbeda antara jalan perkotaan dan jalan antar kota, jalan ke daerah rekreasi dan bukan, kondisi iklim yang sedang dan yang buruk. **Gambar 3.1.** menunjukkan variasi arus bulanan tipikal untuk berbagai jenis fasilitas jalan yang berbeda. April-Mei dan Oktober-Nopember umumnya mempunyai kondisi rata arus lalu lintas, dan umumnya survey lalu lintas dilakukan sepanjang bulan-bulan ini. Jalan bebas hambatan perkotaan yang terletak di daerah beriklim sedang mempunyai arus lalu lintas paling seragam selama satu tahun sedangkan jalan antar kota yang melayani daerah rekreasi musiman mempunyai variasi bulanan yang paling besar.

Di jalan antar kota dalam **Gambar 3.1.** mempunyai volume bulan-puncak pada musim panas lebih dua kali volume bulan-minimum. Fasilitas harus dirancang untuk mengatasi variasi musiman ini untuk menjamin kelangsungan ekonomi di daerah yang dilayani. Variasi di jalan perkotaan kurang menonjol, dengan lalu lintas bulan-puncak sekitar 20% lebih tinggi dari lalu lintas bulan-minimum.



Sumber : Muranyi, seperti dikutip dari HCM (2000)

Gambar 3.1. Variasi Bulanan dalam Volume Lalu Lintas



Sumber : HCM (2000)

Gambar 3.2. Variasi Bulanan Untuk Berbagai Jenis Fasilitas Jalan

Gambar 3.2. juga menunjukkan variasi bulanan beberapa jenis fasilitas jalan. Terlihat bahwa jalan bebas hambatan dalam kota mempunyai variasi yang kecil antara bulan-

puncak dan bulan-minimum, dibandingkan dengan jalan bebas hambatan antar kota. Jalan menuju tempat rekreasi mempunyai bulan-puncak pada bulan Agustus, tetapi bulan minimum terjadi pada beberapa bulan (Desember s.d. Maret).

3.2.1.2 Variasi arus lalu lintas harian

Tingkat arus lalu lintas juga bervariasi terhadap hari dalam satu minggu. Variasi harian dalam seminggu sangat dipengaruhi oleh kegiatan manusia yang umumnya mempunyai suatu jadwal yang tetap dalam seminggu, variasi harian ini mempunyai kecenderungan untuk konstan. Variasi harian jalan perkotaan berbeda dengan jalan antar kota, dan jalan rekreasi berbeda dengan jalan bukan di daerah rekreasi. **Gambar 3.3.** menunjukkan variasi harian tipikal untuk berbagai jenis fasilitas jalan. Dapat dilihat bahwa variasi terbesar adalah jalan menuju tempat rekreasi, yang mencapai puncaknya pada hari Jumat, Sabtu, dan Minggu. Jalan antar kota yang melayani perjalanan ke tempat rekreasi dan juga perjalanan lain, juga mempunyai puncak pada akhir minggu tetapi variasi harian pada tengah minggu kurang dibandingkan dengan jalan menuju tempat rekreasi.

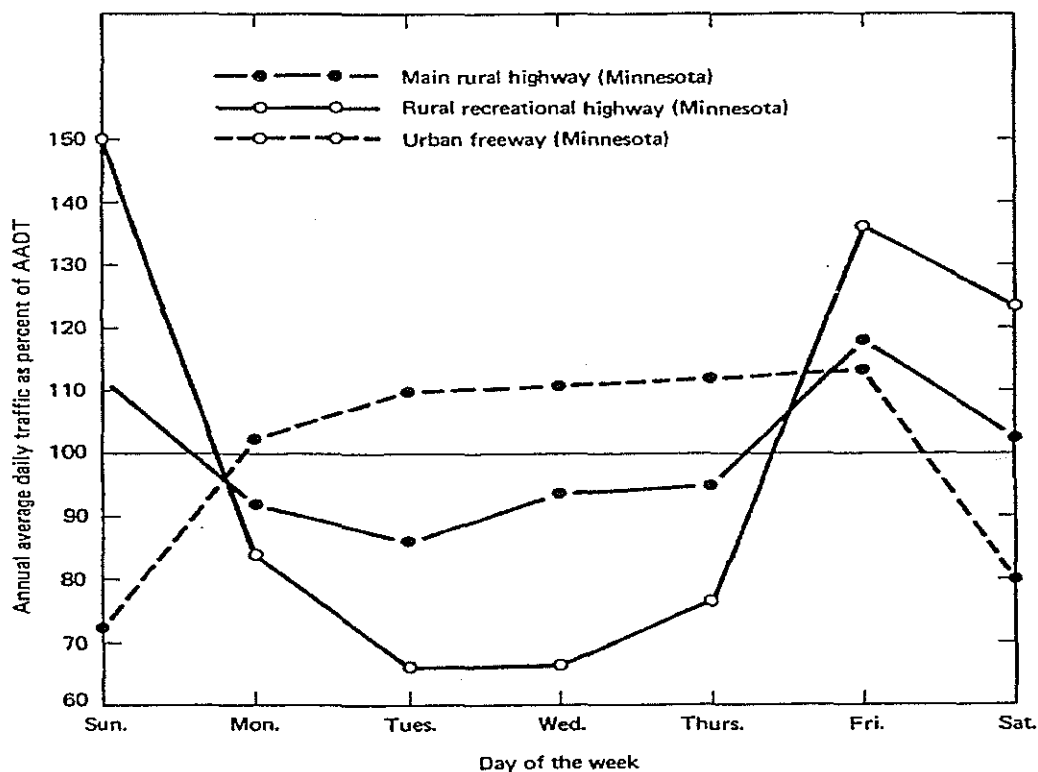
Variasi volume lalu lintas di jalan perkotaan adalah kurang dibandingkan dengan jalan menuju tempat rekreasi dan jalan antar kota. Sebagian besar perjalanan dalam kota adalah merupakan perjalanan berulang, mulai dari perjalanan komuter dua-kali pada hari kerja sampai perjalanan berbelanja dua-kali dalam satu minggu. Pola perjalanan yang berulang ini memudahkan dalam mengamati dan menganalisa. Rencana penyediaan fasilitas yang cukup untuk mengatasi terjadinya permintaan puncak adalah lebih kepada masalah ekonomi, lingkungan, dan kemudahan dan bukan pada efisiensi pemakaian sumber daya.

Interval waktu yang umum untuk volume adalah hari. Volume harian seringkali digunakan sebagai dasar untuk perencanaan dan pengamatan umum dari kecenderungan. Proyeksi volume lalu lintas seringkali didasarkan pada pengukuran volume harian. Ada empat parameter volume harian yang banyak digunakan:

- Lalu lintas harian rata-rata tahunan (LHRT) atau *average annual daily traffic* (AADT) adalah volume lalu lintas 24-jam rata-rata di suatu lokasi tertentu selama 365 hari penuh, yaitu jumlah total kendaraan yang melintas lokasi dalam satu tahun dibagi 365.
- Lalu lintas hari kerja rata-rata tahunan (LHKRT) atau *average annual weekday traffic* (AAWT) adalah volume lalu lintas 24-jam rata-rata terjadi pada hari kerja

selama satu tahun penuh. Volume ini cukup menarik dimana lalu lintas akhir minggu aalah sedikit, sehingga merata-ratakan volume hari kerja yang tinggi selama 365 hari akan menutupi pengaruh lalu lintas hari kerja.

- Lalu lintas harian rata-rata (LHR) atau *average daily traffic* (ADT) adalah volume lalu lintas 24-jam rata-rata di suatu lokasi untuk periode waktu kurang dari satu tahun. Sementara AADT dihitung selama satu tahun, ADT mungkin hanya dihitung selama enam bulan, satu musim, satu bulan, satu minggu, atau bahkan selama dua hari. ADT hanya berlaku untuk periode dimana nilai tersebut diukur.
- Lalu lintas hari kerja rata-rata (LHKR) atau *average weekday traffic* (AWT) adalah volume lalu lintas 24-jam rata-rata terjadi pada hari kerja selama periode kurang dari satu tahun, seperti misalnya selama satu bulan atau satu periode.



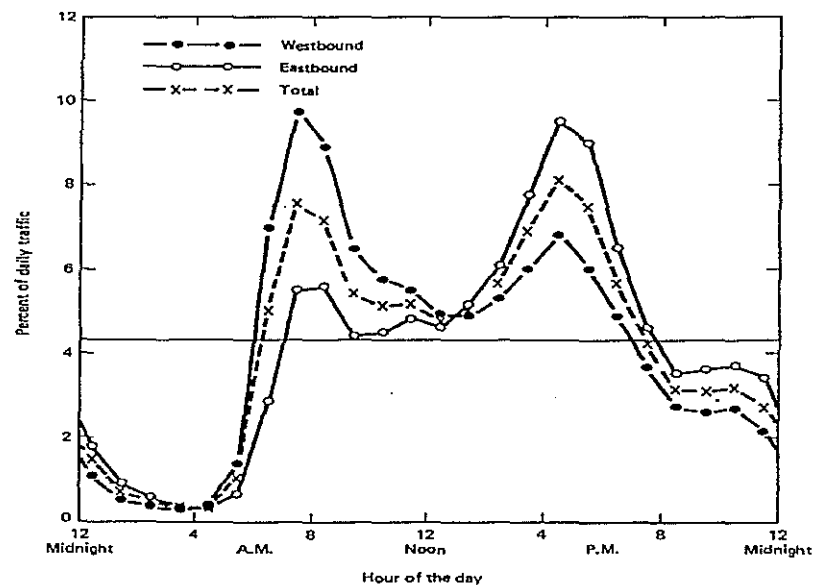
Sumber: HCM (2000)

Gambar 3.3. Variasi Harian Untuk Berbagai Jenis Fasilitas Jalan

3.2.1.3 Variasi arus lalu lintas Jam-jaman

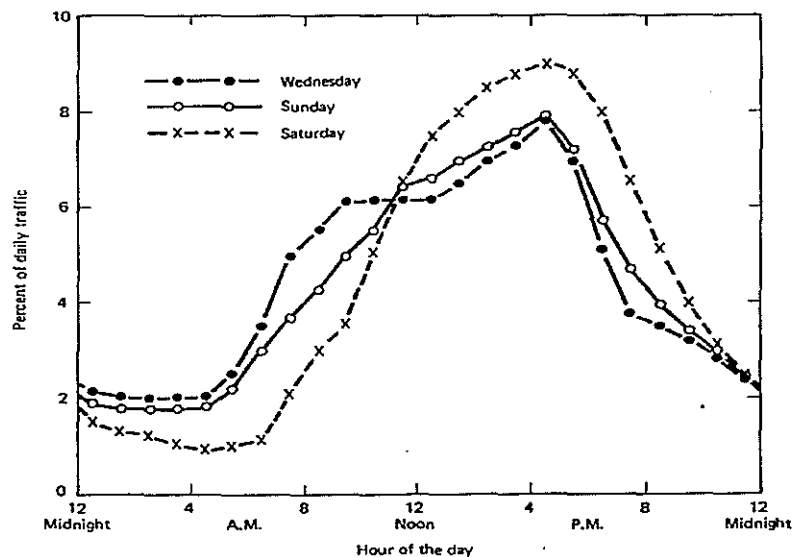
Tingkat arus lalu lintas juga bervariasi terhadap waktu dalam satu hari dan ini erat hubungannya dengan jadwal kegiatan manusia. Pola jam puncak bervariasi terhadap hari dalam satu minggu, arah arus, dan jenis jalan (perkotaan atau antar kota). **Gambar 3.4.** menunjukkan pola arus jam-jaman di San Fransisco-Oackland Bay Bridge berdasarkan

arah arus. Dapat dilihat adanya puncak tunggal ketika arus dipisahkan menurut arah dan dua puncak ketika arus digabungkan. Puncak yang datar mengidentifikasikan bahwa permintaan melebihi kapasitas dan periode arus puncak menjadi lebih panjang. Pola arus harian di jalan antar kota umumnya cukup berbeda, seperti pada **Gambar 3.5**. Arus jam-jaman digabung untuk kedua arah, dan periode arus puncak tunggal dapat diamati pada sore hari. **Gambar 3.5**. juga mengidentifikasikan bahwa pola arus jam-jaman mungkin berbeda untuk hari yang berbeda.



Sumber : ITS Berkeley, seperti dikutip dari May (1990)

Gambar 3.4. Variasi Jam-jaman di San Fransisco-Oakland Bay Bridge



Sumber : ITS Berkeley, seperti dikutip dari May (1990)

Gambar 3.5. Pola Arus Jam-jaman di Jalan Antar Kota

3.2.1.4 Variasi arus lalu lintas kurang dari satu jam

Tingkat arus lalu lintas juga bervariasi di dalam periode satu jam. Di dalam periode satu jam dapat ditemui tiga pola arus lalu lintas, yaitu acak, konstan, dan diantara keduanya. Pola arus lalu lintas acak dapat dilihat ketika permintaan lalu lintas adalah kecil dibandingkan dengan kapasitas fasilitas, dan tidak ada permintaan tambahan didekatnya yang tergantung pada jadwal, seperti misalnya lokasi dekat pabrik selama periode awal dan akhir waktu kerja. Pola acak ini seringkali terjadi di jalan antar kota dengan volume rendah.

Gambar 3.6 menunjukkan contoh variasi arus lalu lintas 15-menit.

Tingkat arus konstan dapat dilihat ketika permintaan melebihi kapasitas dan tingkat arus menggambarkan kapasitas dan bukan permintaan. Tingkat arus lalu lintas mendekati konstan dapat diamati di bagian hilir dari leher botol dimana output diatur atau di bagian hulu leher botol dalam proses antrian. Tingkat keseragaman dari arus tergantung pada periode waktu dimana permintaan melebihi kapasitas.

Pola arus lalu lintas ketiga dapat dikatakan kasus diantara pola acak dan konstan dimana permintaan tidak melebihi kapasitas tetapi arus tidak acak disebabkan karena perjalanan yang terjadwal. HCM Amerika mengatasi hal ini dengan memperkenalkan faktor jam puncak (PHF = peak hour factor). Variasi dalam satu jam dapat diperoleh dengan mencatat pengamatan volume untuk interval 5 menit, 10 menit, atau 15 menit. Makin singkat interval waktu makin tepat atau makin halus hasil pengamatannya. Meskipun volume jam digunakan dalam perancangan dan analisis lalu lintas, variasi di dalam jam tersebut juga perlu diperhatikan. Kualitas dari arus lalu lintas seringkali berhubungan dengan fluktuasi permintaan lalu lintas pada periode singkat. Suatu fasilitas mungkin cukup untuk melayani permintaan jam puncak, tetapi arus puncak pada periode yang singkat dalam jam puncak mungkin melebihi kapasitas, sehingga menyebabkan kemacetan.

Hubungan antara volume jam dan tingkat arus maksimum di dalam jam di definisikan oleh

faktor jam puncak (PHF), seperti berikut:
$$PHF = \frac{VolumJamPuncak}{TingkatArusMaksimum} \quad (3-1)$$

Untuk arus periode 15-menit, persamaan di atas menjadi
$$PHF = \frac{q_{60}}{4 \times q_{15}} \quad (3-2)$$

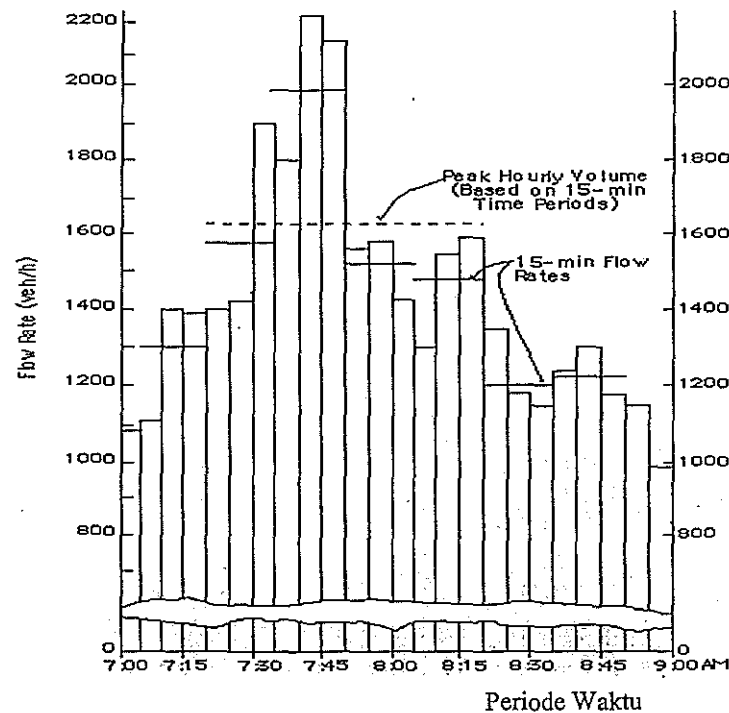
dimana:

q_{60} = tingkat arus jam

q_{15} = tingkat arus puncak 15-menit

PHF = faktor jam puncak

Jadi untuk memperkirakan tingkat arus 15-menit, diamati (diperkirakan) arus satu jam dan dipilih faktor jam puncak. Secara teoritis *PHF* dapat bervariasi dari 0,25 (yang berarti bahwa lalu lintas melintas selama satu periode 15-menit) sampai 1,00 (yang berarti setiap periode 15-menit melintas sejumlah lalu lintas yang sama). *PHF* umumnya tidak kurang dari 0,80 untuk arus acak dan tidak lebih dari 0,98 untuk arus seragam.



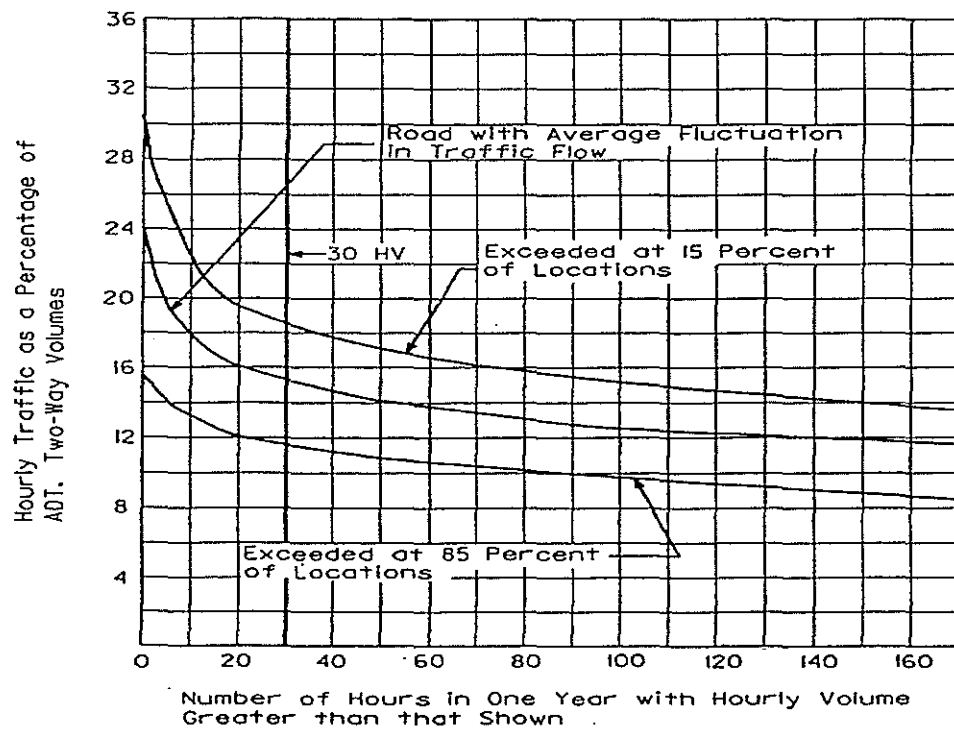
Sumber: Minnesota Department of Transportation, seperti dikutip dari HCM (2000)

Gambar 3.6. Variasi Volume Lalu Lintas 15-Menit

3.2.1.5 Volume Jam Rancangan

Gambar 3.7. menunjukkan hubungan antara volume jam tertinggi dan LHR di jalan antar kota. Gambar ini dihasilkan dari analisis data perhitungan lalu lintas yang meliputi rentang besar dari volume dan kondisi geografis. Kurva ini meliputi volume jam selama satu tahun, yang dinyatakan dalam persen LHR. Dalam hal ini AASTHO menetapkan volume jam rancangan pada jam ke-30, yaitu 15 persen LHR. Apakah nilai ini terlalu rendah untuk perencanaan dapat dijelaskan bahwa 29 jam dalam satu tahun akan melebihi volume jam perencanaan. Volume jam maksimum adalah mendekati 25 persen LHR, melebihi jam ke-30 sekitar 65 persen. Apakah jam ke-30 terlalu tinggi ditinjau secara ekonomi dapat dijelaskan dengan kecenderungan dalam volume jam lebih kecil dari jam ke-30. Kurva tengah dari **Gambar 3.7** menunjukkan bahwa selama 170 jam dalam satu tahun volume

lalu lintas melebihi 11,5 persen LHR. Volume jam terendah dalam rentang ini adalah sekitar 23 persen kurang dari jam ke-30.



Sumber: AASHTO (1994)

Gambar 3.7. Hubungan antara Volume Jam Puncak dan LHR

Dalam perancangan geometrik volume jam rancangan ini seringkali diperkirakan dari volume harian, dengan menggunakan **Persamaan 3.3**.

$$VJR = k \times LHRT \quad (3-3)$$

dimana:

VJR = volume jam perencanaan

LHRT = lintas harian rata-rata tahunan

k = proporsi lalu lintas harian yang terjadi selama periode puncak, dinyatakan dalam nilai pecahan

3.2.1.6 *Perkiraan Volume Perancangan Menurut Arah*

Perencana jalan baru atau perancangan fasilitas eksisting umumnya disediakan data untuk mengantisipasi data permintaan lalu lintas berdasarkan pada lalu lintas harian rata-rata tahunan (LHRT/AADT). LHRT tidak dapat digunakan secara langsung untuk perencanaan atau perancangan karena variasi bulanan, harian, jam-jamam, dan pola lalu lintas

berdasarkan pembagian arah adalah sangat besar, seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Oleh karena itu diperlukan untuk mengkonversikan LHRT pada tahun perancangan ke volume jam perancangan per arah. Untuk itu persamaan berikut dapat digunakan:

$$VJRA = D \times k \times LHRT \quad (3.4)$$

dimana:

VJRA = volume jam perencanaan per arah

LHRT = lintas harian rata-rata tahunan

k = proporsi lalu lintas harian yang terjadi selama periode puncak, dinyatakan dalam nilai pecahan

D = proporsi dari lalu lintas jam puncak yang bergerak dalam arah puncak, dinyatakan dalam nilai pecahan.

Beberapa negara telah menempatkan stasiun tetap untuk mencatat volume lalu lintas dan telah memperkirakan faktor D dan k untuk berbagai jenis fasilitas. Di Indonesia, dalam hal ini Bina Marga juga telah menetapkan besarnya faktor D dan k, masing-masing untuk jalan perkotaan dan antar kota.

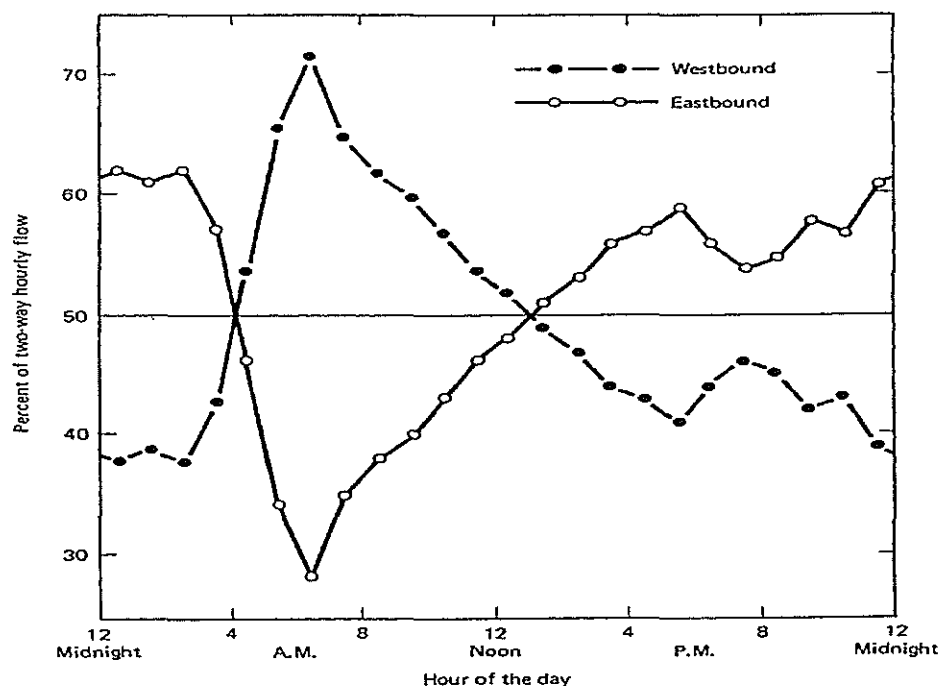
3.2.2 Variasi arus dalam ruang

Tingkat arus lalu lintas bervariasi terhadap ruang, sehingga variasi linier, jaringan, arah, penggunaan lajur merupakan konsep yang penting untuk dimengerti. Arus lalu lintas sepanjang rute melingkar suatu kota sama dengan arus air di sepanjang sungai. Selama awal periode puncak pagi, pengendara dengan asal paling jauh dari pusat kota memulai perjalanannya di sepanjang rute melingkar kota, dan dengan berlalunya waktu pengendara lain dengan asal yang lebih dekat ke pusat kota akan bergabung. Arus lalu lintas dapat disamakan dengan gelombang, dan arus lalu lintas dengan intensitas tertinggi bergerak ke pusat kota, menghasilkan pola permintaan lalu lintas linier. Jadi periode puncak masuk kota dialami pertama-tama di pinggiran kota dan dengan berlalunya waktu periode puncak masuk kota bergerak ke pusat kota. Periode puncak sore terjadi dengan bentuk serupa tetapi dalam arah berlawanan. Pekerja meninggalkan pusat kota pada awal periode puncak sore dan sementara bergerak ke luar di sepanjang rute melingkar kota, beberapa waktu kemudian lalu lintas lain akan bergabung. Jadi periode puncak keluar kota pertama-tama dialami di dekat pusat kota, dan secara bertahap gelombang ini bergerak keluar kota. Gelombang ini mungkin menjadi penting jika permintaan melebihi kapasitas dan

permintaan lalu lintas tertunda sampai periode berikutnya. Sekali lagi terlihat analogi arus di sungai dengan serangkaian dam (leher botol) dan arus masuk melebihi arus keluar.

Hampir semua fasilitas jalan, khususnya di daerah perkotaan, dihubungkan dengan jaringan padat dari fasilitas jalan. Karena pengemudi mempunyai kebebasan memilih rutanya dan pertama-tama dibimbing dengan rute paling sedikit hambatan (umumnya waktu tempuh minimum), akan terjadi interaksi yang kuat antara rute yang sejajar. Sekali pola spasial terbentuk yaitu bahwa rute dengan kualitas lebih tinggi mulai menjadi macet, pengemudi berpindah ke rute dengan kualitas lebih rendah yang sejajar. Sebagai contoh, pengemudi mungkin berpindah dari jalan bebas hambatan ke jalan samping dan jalan arteri utama, dan pengemudi dari jalan arteri utama mungkin berpindah ke jalan kolektor dan jalan-jalan di sekitarnya. Fenomena spasial ini mempengaruhi pola arus pada rute tertentu dalam jaringan dan harus diperhitungkan jika terjadi kemacetan di suatu tempat di dalam jaringan.

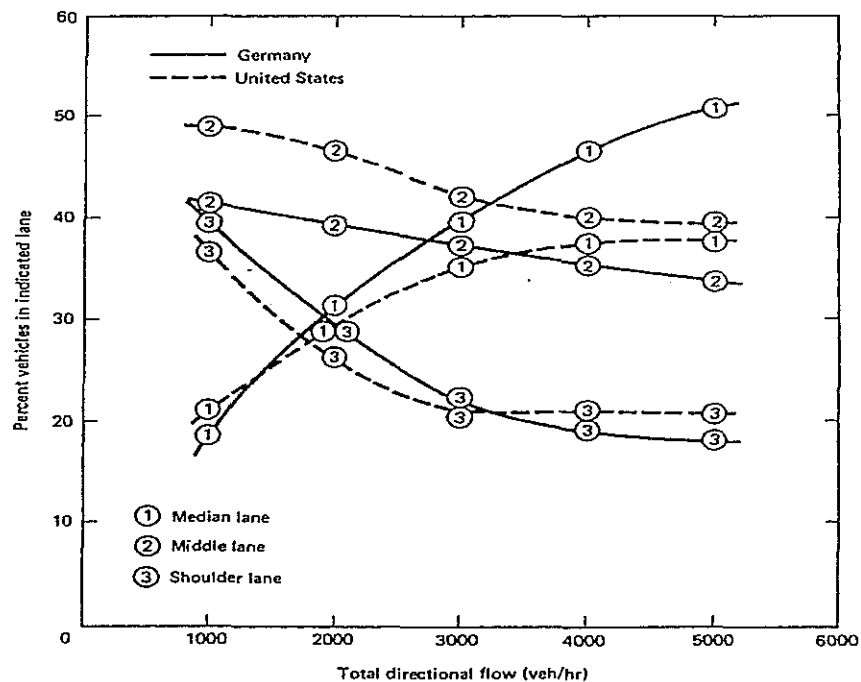
Pola arus spasial adalah pola arus menurut arah di sepanjang rute tertentu. **Gambar 3.8.** menunjukkan bahwa arus lalu lintas selama periode puncak pagi yang dominan adalah arah ke Barat, sedangkan pada periode puncak sore arus lalu lintas yang dominan adalah arah ke Timur. Data lalu lintas yang sama digunakan untuk menghitung pembagian arah, dan hasilnya digambarkan dalam **Gambar 3.9.**



Sumber: ITS – Berkeley, seperti dikutip dari May (1990)

Gambar 3.8. Pembagian Arah di San Fransisco-Oakland Bay Bridge

Pola arus spasial terakhir adalah distribusi lalu lintas diantara lajur jika tersedia beberapa lajur untuk digunakan. Hal penting untuk jalan bebas hambatan dimana tersedia banyak lajur dan lokasi *on-ramp* dan *off-ramp* mungkin menyebabkan masing-masing lajur menjadi padat. **Gambar 3.9.** menunjukkan distribusi volume lajur tipikal untuk jalan bebas hambatan di Jerman Barat dan Amerika. Perlu diperhatikan bahwa dengan meningkatnya arus total per arah, persentase lalu lintas di lajur median meningkat sedangkan persentase lalu lintas di lajur bahu menurun. Lajur median di Jerman memikul persentase lalu lintas lebih besar dari pada di Amerika karena di Jerman ada larangan menyiap dari kanan, perbedaan kecepatan yang cukup besar antara mobil dan truk, dan jarak antar jalan masuk yang lebih besar.



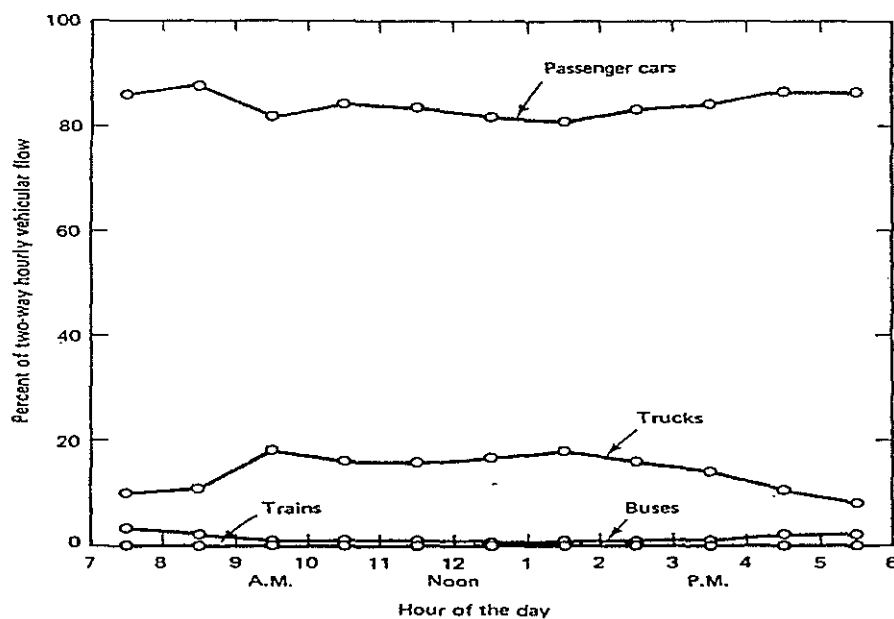
Sumber: May (1990)

Gambar 3.9. Distribusi Volume Lajur Tipikal

3.2.3 Variasi arus terhadap jenis kendaraan

Berbagai jenis kendaraan menggunakan fasilitas jalan seperti truk, mobil penumpang, kereta, bus, dan sepeda motor. **Gambar 3.10** menunjukkan distribusi arus kendaraan dua-arah dalam jam terhadap waktu dalam hari dan jenis kendaraan. Mobil penumpang membuat 80 sampai 90 % dari seluruh perjalanan, dengan rata-rata harian 87 %. Truk membuat 10 sampai 20 % dari perjalanan, dengan rata-rata harian 12 %. Bus dan kereta hanya membuat 1 % dari perjalanan dan meningkat sampai 3 % selama periode puncak.

Dengan adanya kendaraan yang lebih besar dan kinerja lebih rendah di dalam arus lalu lintas, seperti truk, kendaraan rekreasi, dan bus, mengurangi kapasitas fasilitas jalan. Oleh karena itu digunakan ekivalensi mobil penumpang untuk jenis kendaraan tersebut. Ekivalensi mobil penumpang untuk persimpangan bersinyal dan jalan perkotaan tak terbagi dari Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) berturut-turut dicantumkan dalam Tabel 3.2. dan 3.3.



Sumber: ITS – Berkeley, seperti dikutip dari May (1990)

Gambar 3.10. Distribusi Arus Kendaraan Jam-jaman di Jalan Dua-arah

Tabel 3.2: Smp untuk Persimpangan Bersinyal

Jenis Kendaraan	Smp	
	Pendekat Terlindung	Pendekat Terlawan
Kendaraan Ringan (KR)	1,0	1,0
Kendaraan Berat (KB)	1,3	1,3
Sepeda Motor (SM)	0,2	0,4

Tabel 3.3.: Smp untuk Jalan Perkotaan Tak Terbagi

Tipe jalan: Jalan tak terbagi	Arus lalu lintas Total dua-arah (kend/jam)	smp		
		KB	SM	
			Lebar Jalan W_{Ce} (m)	
			≤ 6	>6
Dua-lajur tak-terbagi (2/2 UD)	0	1,3	0,5	0,40
	≥ 1800	1,2	0,35	0,25
Empat-lajur tak-terbagi (4/2UD)	0	1,3	0,40	
	≥ 3700	1,2	0,25	

3.3 Karakteristik Kecepatan

Karakteristik kecepatan makroskopik adalah karakteristik kecepatan dari sekelompok kendaraan yang memotong suatu titik atau potongan jalan. Kecepatan dan waktu tempuh adalah pengukuran fundamental dari kinerja lalu lintas dari sistem jalan eksisting, dan kecepatan adalah variabel kunci dalam perancangan ulang (redesign) atau perancangan dari fasilitas baru. Hampir semua model analitis dan simulasi lalu lintas memperkirakan kecepatan dan waktu tempuh sebagai kinerja pengukuran dengan memberikan perancangan, permintaan, dan pengatur sepanjang sistem jalan. Model yang berkembang lebih lanjut kemudian menggunakan kecepatan dan waktu tempuh sebagai masukan untuk memperkirakan pemakaian bahan bakar, emisi kendaraan, dan polusi lalu lintas. Kecepatan juga digunakan sebagai indikasi tingkat pelayanan, dalam analisis kecelakaan, dalam studi ekonomi, dan dalam semua studi rakayasa lalu lintas. Jadi karakteristik kecepatan serta teknik analisis statistik perlu dimengerti dengan benar.

Kecepatan merupakan kebalikan dari waktu yang digunakan untuk menempuh suatu jarak tertentu, atau

$$u = \frac{d}{t} \quad (3.5)$$

dimana:

u = kecepatan (km/jam atau m/detik)

d = jarak tempuh (km atau m)

t = waktu tempuh (jam atau detik)

3.3.1 Variasi Kecepatan dan Waktu Tempuh

Kecepatan dan waktu tempuh bervariasi terhadap waktu, ruang, dan antar moda. Variasi terhadap waktu mungkin disebabkan karena perubahan arus lalu lintas, bercampurnya jenis kendaraan dan kelompok pengemudi, penerangan, cuaca, dan kejadian lalu lintas. Variasi menurut ruang mungkin melintang (antar lajur dan/atau arah) dan/atau memanjang, disebabkan perbedaan dalam arus lalu lintas, perancangan geometrik, dan/atau pengatur lalu lintas. Variasi menurut jenis kendaraan mungkin disebabkan perbedaan keinginan pengemudi dikombinasikan dengan kemampuan kinerja kendaraan.

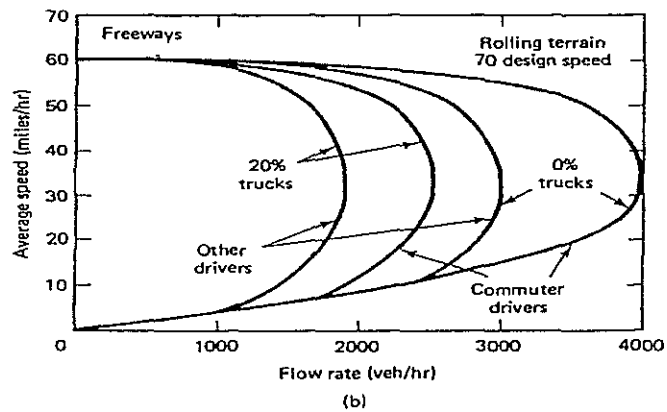
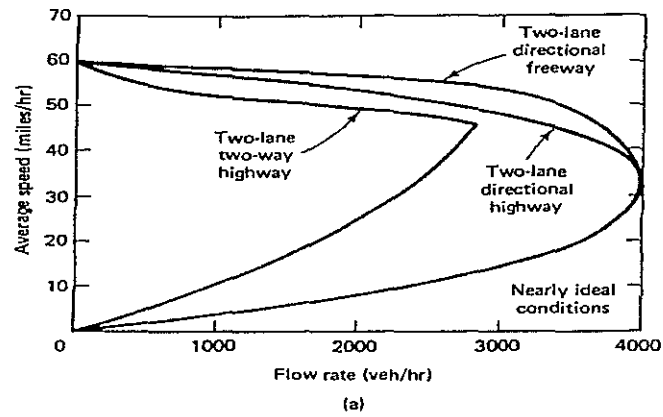
3.3.1.1 Variasi kecepatan menurut waktu

Kecepatan bervariasi terhadap waktu di lokasi tertentu di dalam sistem jalan. Banyak faktor mempengaruhi variasi kecepatan ini. Faktor pertama yang mempengaruhi adalah arus lalu lintas yang dinyatakan sebagai tingkat arus atau sebagai rasio volume-kapasitas. Faktor lainnya termasuk bercampurnya jenis kendaraan dan kelompok pengemudi, penerangan, cuaca, dan kejadian lalu lintas. Sudah tentu kecepatan rencana dan batas kecepatan mempengaruhi batas atas kecepatan.

HCM-2000 menyediakan prosedur untuk memprediksi kecepatan sebagai fungsi dari arus, variasi kendaraan dan variasi pengemudi untuk lokasi tertentu di sepanjang jalan bebas hambatan, jalan banyak lajur, dan jalan dua lajur. **Gambar 3.11.a.** menunjukkan hubungan kecepatan dan arus untuk berbagai jenis jalan, sedangkan **Gambar 3.11.b.** menunjukkan hubungan antara kendaraan dan populasi pengemudi. Perlu dicatat bahwa kapasitas jalan dua lajur dua arah pada kondisi ideal adalah 2800 kend/jam, sedangkan kapasitas jalan bebas hambatan dua lajur pada kondisi ideal adalah 4000 kendaraan/jam. Dari **Gambar 3.11.a.** dapat dilihat bahwa adanya truk dan pengemudi bukan komuter di jalan bebas hambatan bukan saja mengurangi kapasitas tetapi juga menurunkan bagian atas dari kurva kecepatan-arus.

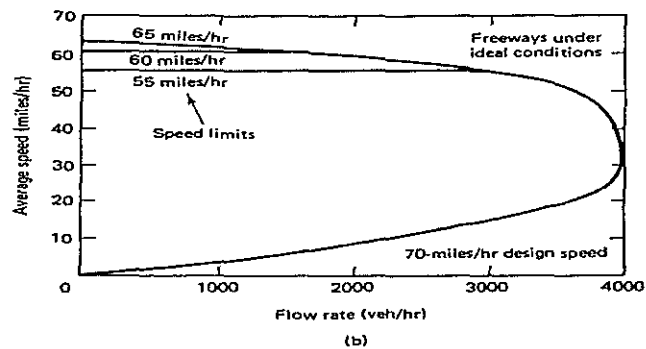
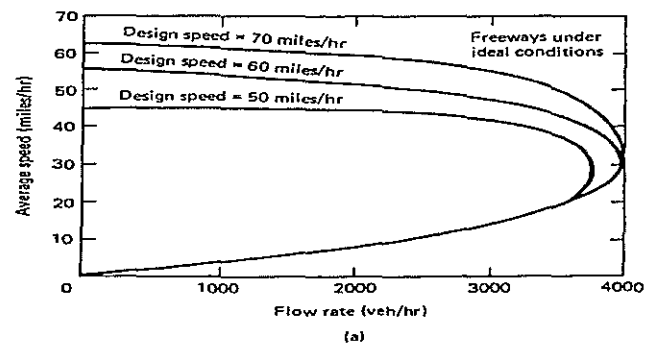
Kecepatan rencana dan batas kecepatan mempengaruhi batas atas pada kecepatan lalu lintas. Pengaruh ini dijelaskan dalam **Gambar 3.12**. **Gambar 3.12.a.** menunjukkan pengaruh kecepatan rencana pada kurva hubungan kecepatan-arus untuk jalan bebas hambatan 4-lajur. **Gambar 3.12.b.** menunjukkan pengaruh batas kecepatan pada kurva hubungan kecepatan-arus untuk jalan bebas hambatan 4-lajur dengan kecepatan rencana 70 mph (112 kph). Hubungan ini mengasumsikan 50% pengemudi compliance dan batas kecepatan 55, 60, dan 65 mph (88, 96, 104 kph).

Perlu dicatat bahwa penurunan kecepatan rencana menurunkan keseluruhan bagian atas dari kurva kecepatan-arus, sedangkan ini hanya menurunkan kapasitas sedikit jika kecepatan rencana diturunkan sampai 50 mph (80 kph). Di lain pihak, pengurangan batas kecepatan hanya menurunkan sebagian bagian atas dari kurva kecepatan-arus dan tidak ada pengaruh pada kapasitas (kecuali batas kecepatan kurang dari 30 mph (48 kph)).



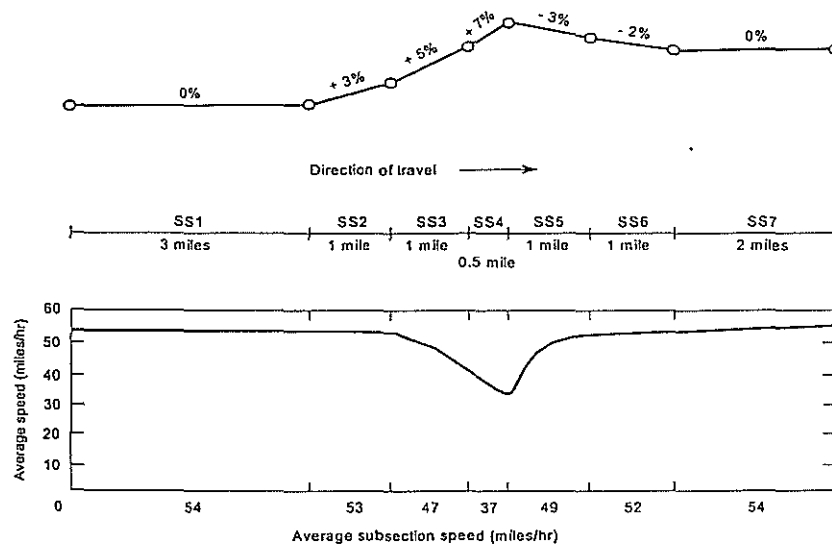
Sumber: HCM (2000)

Gambar 3.11. Pengaruh Arus, Jenis Kendaraan, dan Populasi Pengemudi Pada Kecepatan .

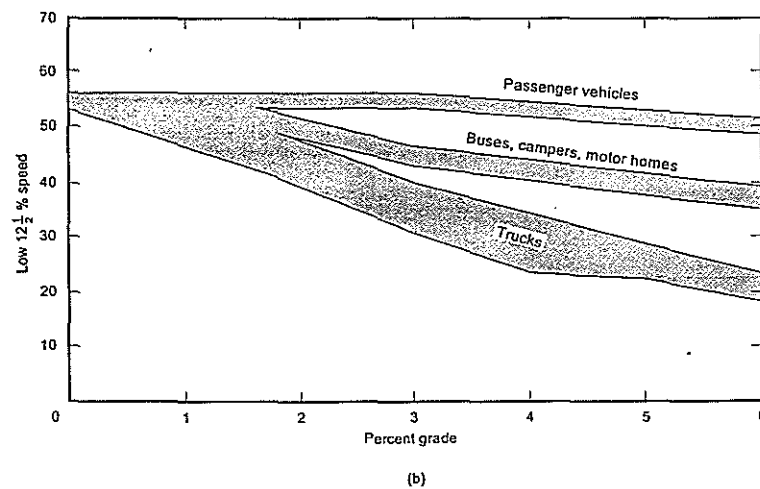
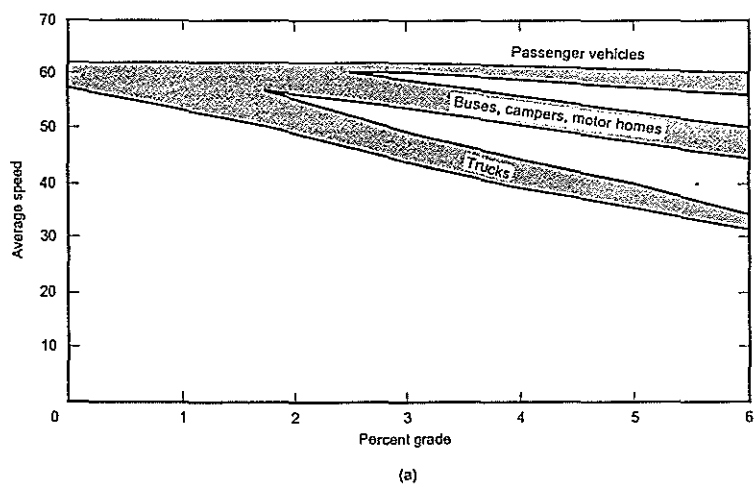


Sumber: HCM (2000)

Gambar 3.12 Pengaruh dari Kecepatan Rencana dan Batas kecepatan pada Kecepatan



Gambar 3.13 Kecepatan Rata-rata di Sepanjang Jalan Natar Kota Dua-lajur Dua-Arah



Gambar 3.14. Kecepatan di Daerah Tanjakan Dari Berbagai Jenis Kendaraan

3.3.1.2 Variasi kecepatan terhadap ruang

Kecepatan mungkin bervariasi dalam arah melintang jalan antar lajur atau antar arah pergerakan, dan arah memanjang sepanjang jalan. Meskipun suatu variasi belum secara tepat dimodelkan, telah banyak studi lapangan dilakukan untuk keadaan empiris dari suatu variasi.

Kecepatan juga bervariasi dalam arah memanjang di sepanjang jalan karena perubahan dalam permintaan lalu lintas dan atau perancangan geometrik dan juga adanya pengatur lalu lintas. Dapat dibedakan dalam dua kondisi: kondisi lalu lintas tak terganggu dan lalu lintas terganggu. Untuk kondisi arus tak terganggu, perhatikan arah tunggal dari jalan antar kota dua-lajur dua-arah yang melewati tanjakan curam dan menerus diikuti oleh turunan. Potongan memanjang jalan ini dapat dilihat pada bagian atas **Gambar 3.13**. dan bagian bawah merupakan profil kecepatan dan kecepatan rata-rata per sub-seksi dari kendaraan yang bergerak di sepanjang jalan dari kiri ke kanan.

3.3.1.3 Variasi kecepatan terhadap jenis kendaraan

Semua arus kendaraan terdiri dari berbagai jenis yang mungkin mempunyai perbedaan dalam karakteristik dan pola kecepatan. Oleh karena kemampuan kendaraan berbeda, jenis kendaraan berbeda bergerak pada kecepatan berbeda di kemiringan tajam yang panjang. **Gambar 3.14** menunjukkan secara grafis pengaruh kemiringan tajam yang panjang pada kecepatan rata-rata. Ada tiga kelompok kendaraan yaitu: mobil penumpang, kendaraan jenis diantaranya, mis. bus dan mobil karavan, dan truk yang didefinisikan sebagai kendaraan yang mengangkut barang dengan enam ban atau lebih yang menyentuh perkerasan jalan. Pada kemiringan lebih landai dari 2 persen karakteristik dan keinginan pengemudi semakin tidak terpengaruh oleh keterbatasan kemampuan kinerja kendaraan. Dapat disimpulkan bahwa variasi kecepatan terhadap jenis kendaraan disebabkan karena perbedaan karakteristik dan keinginan pengemudi dikombinasikan dengan kemampuan kinerja, hal ini terutama terjadi di daerah dengan kemiringan tinggi.

3.3.2 Kecepatan Rata-rata Waktu dan Ruang (Time Mean Speed dan Space Mean Speed)

Kecepatan rata-rata dari pengukuran kecepatan individu dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 3.6**.

$$\overline{u_t} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} \quad (3.6)$$

Kecepatan rata-rata ini disebut sebagai kecepatan rata-rata waktu (time mean speed) karena kecepatan individu diukur untuk kendaraan yang melintas suatu titik potongan jalan atau sepenggal jalan selama periode waktu tertentu. Jika kecepatan individu dikonversikan ke dalam waktu tempuh, kemudian dihitung waktu tempuh rata-rata dan akhirnya dihitung kecepatan rata-rata, maka kecepatan rata-rata menjadi kecepatan rata-rata ruang.

$$\overline{u_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n t_i / n} = \frac{1}{1/n \sum_{i=1}^n t_i} \quad (3.7)$$

Sebagai contoh, jika tiga kendaraan melintas suatu titik di dalam daerah studi melintas pada kecepatan 30, 60, dan 60 km/jam, kecepatan rata-rata waktu adalah 50km/jam sedangkan kecepatan rata-rata ruang menjadi

$$\overline{u_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n t_i / n} = \frac{1}{[0,0333 + 2(0,01667)]/3} = 45 \text{ km / jam}$$

Contoh lain untuk perbedaan kecepatan rata-rata waktu dan ruang adalah menempatkan dua kendaraan (satu dengan kecepatan 30 km/jam dan yang lain dengan kecepatan 60 km/jam) pada lintasan lingkaran 1 km. Jika pengamat berdiri di satu titik melakukan pengamatan selama 1 jam dan mencatat kecepatan setiap kendaraan melintas titik pengamatan, dia akan mencatat 60 kendaraan bergerak dengan kecepatan 60 km/jam dan 30 kendaraan bergerak dengan kecepatan 30 km/jam sehingga kecepatan rata-rata waktu menjadi

$$\overline{u_s} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} = \frac{60.60 + 30.30}{90} = 50 \text{ km / jam} \quad (3.8)$$

Contoh yang lain didapatkan dari dua foto udara yang diambil berurutan beberapa detik jauhnya dari lintasan lingkaran, akan tercatat dua kecepatan kendaraan pada suatu ruang, dan kecepatan rata-rata ruang.

$$\overline{u_s} = \frac{30 + 60}{2} = 45 \text{ km / jam} \quad (3.9)$$

Wardrop, pada tahun 1952 menurunkan persamaan yang menghubungkan kecepatan rata-rata waktu dan ruang seperti terlihat pada Persamaan 3.10.

$$\overline{u_i} = \overline{u_s} + \frac{s_s^2}{\overline{u_s}} \quad (3.10)$$

Pada contoh lintasan lingkaran, kecepatan rata-rata ruang didapatkan sebesar 45 km/jam dan variance dari dua contoh kendaraan dapat dihitung sebesar 225. Masukkan nilai ini ke dalam **Persamaan 3.10**, kecepatan rata-rata menjadi **Persamaan 3.11**.

$$\overline{u_i} = 45 + \frac{225}{45} = 50 \text{ km / jam} \quad (3.11)$$

Hal ini sesuai dengan hasil perhitungan sebelumnya.

Perlu dicatat bahwa kecepatan rata-rata ruang sama dengan kecepatan rata-rata waktu hanya jika variance kecepatan rata-rata ruang sama dengan nol, yaitu hanya jika semua kendaraan dalam arus lalu lintas bergerak pada kecepatan yang benar-benar sama. Jika variance dari kecepatan rata-rata ruang lebih besar dari nol, kecepatan rata-rata ruang selalu lebih kecil dari kecepatan rata-rata waktu. Kecepatan rata-rata ruang tidak pernah lebih besar dari kecepatan rata-rata waktu.

3.3.3 Kecepatan Rata-rata Perjalanan dan Kecepatan Rata-rata Lari

Kecepatan rata-rata perjalanan dan kecepatan rata-rata lari adalah dua bentuk kecepatan rata-rata ruang yang sering digunakan dalam analisis rekayasa lalu lintas. Keduanya dihitung sebagai jarak dibagi dengan waktu rata-rata untuk melintas suatu potongan jalan. Keduanya berbeda dalam komponen waktu yang digunakan dalam perhitungan kecepatan.

Waktu perjalanan didefinisikan sebagai waktu total untuk melintas suatu potongan jalan. Waktu lari didefinisikan sebagai waktu total selama kendaraan dalam keadaan bergerak selama melintas suatu potongan jalan. Perbedaan antara keduanya adalah bahwa waktu lari tidak termasuk tundaan henti, sedangkan waktu perjalanan termasuk tundaan henti. Kecepatan rata-rata perjalanan tergantung pada waktu rata-rata perjalanan, sedangkan kecepatan rata-rata lari tergantung pada waktu rata-rata lari. Perhatikan kasus dari suatu potongan jalan dengan panjang satu-kilometer. Rata-rata kendaraan menempuh potongan jalan tersebut adalah tiga menit, satu menit diantaranya adalah waktu henti akibat adanya persimpangan bersinyal. Maka kecepatan rata-rata perjalanan kendaraan adalah

$$u_p = \frac{1 \text{ km}}{3 \text{ menit}} \times 60 \text{ menit / jam} = 20 \text{ km / jam}$$

dan kecepatan rata-rata lari adalah

$$u_1 = \frac{1\text{km}}{2\text{menit}} \times 60\text{menit} / \text{jam} = 30\text{km} / \text{jam}$$

Perbedaan kedua perhitungan adalah pengukuran waktu henti dalam waktu perjalanan total. Bila tidak ada tundaan henti di potongan jalan, waktu lari dan waktu perjalanan adalah sama dan perhitungan kedua kecepatan adalah sama.

3.4 Karakteristik Kerapatan

Kerapatan lalu lintas adalah karakteristik makroskopik fundamental dari arus lalu lintas. Kerapatan merupakan karakteristik penting yang dapat digunakan dalam menilai kinerja lalu lintas dari sudut pandang pemakai jalan dan pengelola jalan. Ini juga digunakan sebagai variabel pengatur utama dalam pengaturan jalan bebas hambatan dan sistem pengawasan. HCM 2000 menggunakan kerapatan lalu lintas sebagai ukuran utama untuk menentukan tingkat pelayanan untuk situasi arus takterganggu.

Kerapatan lalu lintas didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang menggunakan suatu panjang jalan, pada umumnya ditentukan panjang 1 km dan satu lajur jalan. Cara paling mudah menampilkan kerapatan lalu lintas adalah dengan membuat foto udara dari potongan jalan dan menghitung jumlah kendaraan pada lajur tunggal dengan panjang 1 km. Kerapatan lalu lintas bervariasi dari nol (tidak ada kendaraan di suatu lajur sepanjang 1 km) sampai nilai yang menyatakan antrian kendaraan yang cukup rapat dan tidak dapat bergerak. Batas atas ini disebut sebagai kerapatan macet, dan umumnya antara 115 sampai 156 kendaraan per km. Sebagai contoh, jika *distance headway* rata-rata pada kondisi ini (jarak antar bumper depan dua kendaraan berurutan) adalah 8 meter, dan kerapatan macet menjadi 125 kendaraan per km-lajur. Kerapatan macet yang disebutkan di atas pada rentang antara 115 sampai 156 kendaraan per km menyatakan *distance headway* rata-rata antara 8,6 sampai 6,4 meter per kendaraan. Hubungan antara kerapatan *distance headway* rata-rata dapat dengan mudah dihitung dari Persamaan 3.12.

$$k = \frac{5280}{d} \quad (3.12)$$

Parameter penting lain pada skala kerapatan dari nol sampai 115-156 disebut kerapatan optimum dan didefinisikan sebagai tingkat kerapatan yang terjadi bila lalu lintas mengalir pada kapasitas. Kerapatan optimum umumnya berkisar antara 26 sampai 42 kendaraan per km, yang sama dengan *distance headway* rata-rata antara 26,3 sampai 23,8 meter.

Persen okupansi digunakan sebagai indikator dari karakteristik kerapatan makroskopik dalam sistem pengatur jalan bebas hambatan karena lebih mudah mengukur persen okupansi dari pada mengukur kerapatan. Persen okupansi didefinisikan sebagai persen waktu dipakainya suatu titik atau sepenggal jalan. Umumnya digunakan lajur tunggal dan okupansi dapat bervariasi dari 0 persen (tidak ada kendaraan melintas titik potongan jalan) sampai 100 persen (kendaraan betul-betul berhenti di suatu potongan jalan). Kerapatan akan dapat diperkirakan dari persen okupansi dengan menggunakan **Persamaan 3.13**.

$$k = \frac{10}{\overline{L_v} + L_D} \%OCC \quad (3.13)$$

dimana:

k = kerapatan (kendaraan per km-lajur)

$\overline{L_v}$ = panjang rata-rata kendaraan (meter)

L_D = panjang daerah pengamatan (meter)

$\%OCC$ = persen okupansi

3.4.1 Sejarah Pengembangan

Tahap perkembangan dari analisis kerapatan dipengaruhi oleh teknik pengukuran. Sebelum tahun 1950an hanya digunakan teknik fotografi. Mulai tahun 1960an tiga cara dilakukan bersamaan: perhitungan kerapatan dari pengukuran kecepatan dan arus, perhitungan kerapatan dari perhitungan input-output, dan pengukuran persen okupansi.

Perhatian dalam studi lapangan dari hubungan kecepatan-arus-kerapatan pada tahun 1950an dan 1960an dipusatkan pada kerapatan. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, kerapatan dihitung berdasarkan pada pengukuran lapangan dari kecepatan dan arus dengan menggunakan persamaan berikut.

$$k = \frac{q}{u} \quad (3.14)$$

dimana

k = kerapatan (kendaraan per km-lajur)

q = tingkat arus (kendaraan per jam)

u = kecepatan rata-rata ruang (km per jam).

Keuntungan yang paling berarti dalam pengukuran dan analisis kepadatan adalah adanya perkembangan *presence-type detector* dan proses dari pulsa untuk menghitung persen okupansi pada awal tahun 1960an. Menyebarnya penggunaan *presence-type detector* dan perhitungan persen okupansi telah membawa kepada penerapan baru. Sebagai contoh, penelitian di jalan bebas hambatan sekarang menggunakan persen okupansi sebagai dasar untuk memperkirakan terjadinya sesuatu atau kecelakaan. Pada umumnya *presence-type detector* digunakan dalam sistem lampu lalu lintas untuk mendeteksi ada atau tidak adanya kendaraan sehingga fasa hijau diperpanjang, dihentikan, atau dihapuskan. Konsep kepadatan (jumlah kendaraan yang berhenti di lengan jalan) digunakan dalam pengukuran lapangan dari tundaan henti di persimpangan.

3.4.2 Teknik Pengukuran Kepadatan

Karakteristik kepadatan makroskopik termasuk kepadatan dan persen okupansi. Teknik pengukuran yang ada meliputi fotografi, pencacahan input-ouput, perhitungan kecepatan-arus, dan pengukuran okupansi.

Teknik fotografi merupakan teknik pertama yang digunakan dan lambat laun digantikan dengan teknik perhitungan kecepatan-arus dan pengukuran okupansi. Penelitian pada saat ini menggunakan kamera video atau kamera yang dipasang di pesawat terbang. Kecepatan pesawat dan panjang jalan yang diamati dalam setiap foto menentukan frekuensi foto. Panjang jalan yang diamati tergantung dari kecepatan pesawat dan interval waktu antar serangkaian foto. Selain itu harus dilakukan perhitungan manual jumlah kendaraan yang menggunakan potongan jalan pada saat pengambilan foto. Tambahan informasi dapat ditemukan dengan menghitung jumlah kendaraan berdasarkan lajur, membedakan antara jenis kendaraan, dan menghitung panjang antrian di *on-ramp* dan *off-ramp*.

Teknik perhitungan *input-ouput* merupakan pendekatan yang agak langsung dimana perhitungan awal ditentukan dari jumlah kendaraan sepanjang jalan antara dua stasiun penghitung, dan jumlah kendaraan yang masuk potongan jalan secara menerus ditambahkan dan jumlah kendaraan yang meninggalkan potongan jalan secara menerus dikurangkan dari perhitungan awal. Jika setiap detektor dari dua stasiun penghitung ketelitiannya 100 persen, perhitungan awal diperlukan hanya satu waktu dan teknik perhitungan input-output ini akan sesuai. Masalahnya adalah bahwa kepadatan dihitung berdasarkan perbedaan antara dua jumlah besar (input dan output), dan kesalahan detektor

meskipun hanya pada tingkat 1 persen tidak dapat ditoleransi tanpa pengaturan awal yang cukup sering. Teknik ini praktis hanya jika detektor sangat handal dan teliti, dan dapat sering dilakukan pengaturan awal.

Teknik ketiga adalah menghitung kerapatan dari pengukuran kecepatan dan arus menggunakan **Persamaan 3.14**. Perhitungan ini memerlukan dua detektor, arus dan kecepatan, atau dua detektor yang diletakkan berdekatan dengan perangkat lunak untuk mengkonversikan waktu tempuh menjadi kecepatan. Kemudian kerapatan dapat dihitung di lapangan dengan menggunakan microprocessor atau disalurkan melalui jalur komunikasi dengan perhitungan kerapatan pada komputer sentral. Salah satu masalah dengan pendekatan ini adalah bahwa umumnya dihitung kecepatan rata-rata waktu untuk pengukuran satu titik, sedangkan **Persamaan 3.14** memerlukan rata-rata kecepatan ruang.

Teknik keempat untuk menentukan kerapatan didasarkan pada pengukuran okupansi dan menggunakan **Persamaan 3.13**. Ini memerlukan panjang kendaraan rata-rata dan panjang daerah pengamatan. **Persamaan 3.13** sekarang diturunkan dari perhitungan kerapatan dari pengukuran okupansi. Kecepatan dari masing-masing kendaraan adalah fungsi dari jarak tempuh dibagi dengan waktu tempuh. Satu kendaraan melintas diatas *presence-type detector* menempuh jarak sama dengan panjang kendaraan (L_v) ditambah panjang daerah pengamatan (L_D) selama waktu okupansi detektor (t_0) dan dilihat dalam persamaan

$$v_i = \frac{L_v + L_D}{t_0} \quad (3.15)$$

dimana

v_i = kecepatan masing-masing kendaraan (meter per detik)

L_v = panjang masing-masing kendaraan (meter)

L_D = panjang daerah pengamatan (meter)

t_0 = waktu okupansi masing-masing kendaraan (detik)

Persamaan 3.15 dapat dikonversi kedalam tingkat makroskopik dengan menggunakan nilai rata-rata dari panjang kendaraan dan waktu okupansi untuk N kendaraan yang melintas detektor selama periode waktu T. Perlu dicatat bahwa kecepatan rata-rata adalah kecepatan rata-rata ruang karena didasarkan pada waktu okupansi kendaraan rata-rata,

tidak pada kecepatan rata-rata individu. Bila panjang diganti dalam km dan waktu dalam jam, maka Persamaan 3.15 menjadi

$$\bar{V}_s = \frac{3600}{1000} \left[\frac{\bar{L}_v + L_D}{t_0} \right] \quad (3.16)$$

Waktu total dimana detektor digunakan (T_0) dalam periode waktu T , pada saat N kendaraan melintas detektor, adalah

$$T_0 = N \left(\frac{\bar{t}_0}{3600} \right) \quad (3.17)$$

dimana

T_0 = waktu okupansi total selama periode waktu T (jam)

N = jml. kendaraan yang melintas diatas detektor selama periode waktu T

T = periode waktu pengamatan (jam)

Selesaikan t_0 dalam Persamaan 3.16 dan masukkan kedalam Persamaan 3.17 menjadi

$$T_0 = \frac{N}{\bar{V}_s} \left(\frac{\bar{L}_v + L_D}{1000} \right) \quad (3.18)$$

Persen okupansi (% OCC) selama periode waktu T adalah

$$\%OCC = 100 \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (3.19)$$

Masukkan T_0 dari Persamaan 3.18 kedalam Persamaan 3.19

$$\%OCC = \frac{N}{T} \left(\frac{100}{\bar{V}_s} \right) \frac{\bar{L}_v + L_D}{1000} \quad (3.20)$$

Karena tingkat arus (q) dalam kendaraan per jam sama dengan N/T dan $k = \frac{q}{\bar{V}_s}$, maka

$$\%OCC = \frac{\bar{L}_v + L_D}{10} \left(\frac{q}{\bar{V}_s} \right) = \frac{\bar{L}_v + L_D}{10} k \quad (3.21)$$

$$k = \frac{10}{\bar{L}_v + L_D} (\%OCC) \quad (3.22)$$

Jadi kerapatan dapat dihitung dari pengukuran waktu okupansi untuk panjang kendaraan rata-rata dan panjang daerah pengamatan. Nomograf dari hubungan ini ditunjukkan dalam **Gambar 3.15**. Sebagai ilustrasi, jika panjang daerah pengamatan adalah 6 kaki (1,83 m), panjang kendaraan rata-rata adalah 18 kaki (5,49 m), dan persen okupansi adalah 20 %,

maka kerapatan adalah 44 kend/mil-lajur (27,5 kend/km-lajur). Skala vertikal merupakan faktor konversi, yang dalam hal ini adalah 2,2.

Perlu dicatat bahwa hampir semua sistem pengatur lalu lintas yang menggunakan karakteristik kerapatan makroskopik sebagai variabel pengontrol, menggunakan persen okupansi pengukuran langsung tanpa mengkonversikan ke kerapatan. Walaupun demikian, kerapatan penting dalam memperkirakan waktu tempuh dan permintaan lalu lintas, seperti akan disajikan dalam sub-bab 3.4.4 dan 3.4.5.

3.4.3 Peta Kontur Kerapatan

Peta kontur kerapatan sangat membantu untuk mengerti fenomena arus lalu lintas pada fasilitas lalu lintas padat tak terganggu seperti jalan bebas hambatan. Peta ini juga merupakan pendahuluan tentang gelombang kejut dan pangkalan data yang digunakan dalam membuat peta ini adalah penting untuk memperkirakan waktu tempuh dan permintaan lalu lintas. Pada mulanya hanya dibuat peta kontur kerapatan, kemudian perancangan peta kontur dikembangkan juga untuk kecepatan dan arus.

Peta kontur kerapatan pada **Gambar 3.16**, skala horisontal adalah jarak dengan pergerakan lalu lintas dari kiri ke kanan. Potongan jalan yang akan diamati dipilih sedemikian rupa sehingga meliputi kemacetan di hulu, daerah leher botol, dan kondisi arus-bebas di hilir. Studi ruas jalan dibagi dalam beberapa sub-seksi dengan batas sub-seksi terjadi jika permintaan dan/atau kapasitas berubah. Sehingga batas antar potongan jalan direncanakan di setiap *off-ramp* dan *on-ramp*, di lokasi dimana jumlah lajur berubah, dan sebagainya. Total ada 22 sub-seksi di sepanjang 6,4 mil ruas jalan yang di studi. Panjang sub-seksi bervariasi dari 0,12 mil (0,192 km) sampai 0,64 mil (1,024 km) dengan rata-rata 0,29 mil (0,4646 km). Skala vertikal adalah waktu mulai jam 3,40 sore di bawah sampai 6.30 sore diatas sehingga total 3 jam. Periode studi dipilih sedemikian rupa sehingga termasuk kondisi sebelum-puncak arus-bebas, periode puncak, dan kondisi setelah-puncak arus-bebas.

Barisan angka dalam gambar adalah nilai kerapatan dinyatakan sebagai jumlah kendaraan per lajur-mil dalam setiap sub-seksi satu penerbangan. Lintasan pesawat dengan mudah dapat dilihat. Sebagai contoh, jam 3.40 sore pesawat mulai terbang ke selatan dari utara ujung ruas studi. Pesawat mencapai ujung selatan dari daerah studi pada jam 3.43 sore.

kerapatan lebih dari 60 (40 kend/km-lajur). Garis kontur kerapatan antara 40 dan 60 (24 dan 40 kend/km-lajur) dibuat berdasarkan pada baris sub-seksi kerapatan yang dihitung. Daerah yang tidak diarsir pada peta menandakan kondisi arus-bebas, daerah yang diarsir tipis menandakan kondisi arus mendekati kapasitas, dan daerah yang diarsir tebal menandakan kondisi arus macet. Tidak ada kejadian atau kecelakaan mempengaruhi arus lalu lintas yang diamati. Perlu diperhatikan bahwa kerapatan tertinggi hanya sedikit diatas 100 (60 kend/km-lajur).

Tabel 3.4. Kondisi Arus Lalu Lintas Berdasarkan Pada Kerapatan dan Persen Okupansi

Kerapatan		Persen Okupansi ^a	Tingkat Pelayanan	Kondisi Arus	
(kend/km-lajur)	(kend/mil-lajur)				
0 – 7	0 – 12	0 – 5	A	<i>Free-flow</i>	Kondisi Tidak Macet
8 – 12	12 – 20	5 – 8	B	<i>Reasonable free-flow</i>	
12 – 17	20 – 30	8 – 12	C	<i>Stable</i>	
17 – 24	30 – 42	12 – 17	D	<i>Borders on unstable</i>	
24 – 40	42 – 67	17 – 28	E	<i>Exremely unstable flow</i>	Dekat kondisi kapasitas
42 – 60	67 – 100	28 – 42	F	<i>Forced or breakdown</i>	Kondisi arus macet
> 60	>100	> 42		<i>Incident situation</i>	

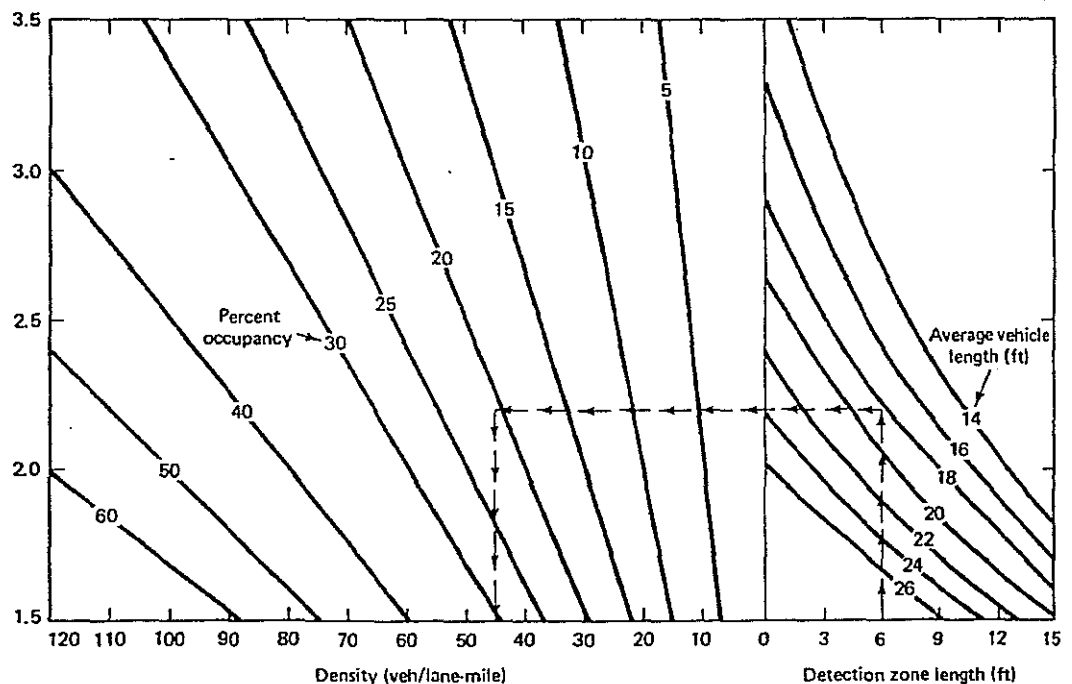
^a Diasumsikan bahwa $(\overline{L_v} + L_D) = 7,0$ meter

Meskipun perhatian sebagian besar akan diberikan pada bagian hilir dari seksi studi dalam diskusi berikut, keterangan singkat akan dibuat untuk kondisi arus lalu lintas dalam 1-km pertama bagian hulu dari ruas studi. Kondisi arus-bebas terjadi sampai hampir jam 04.00 dan setelah jam 05.30 sore. Kondisi mendekati kapasitas terjadi dari jam 04.00 sampai jam 05.30 sore hampir seluruh bagian 1-mil (1,6 km). Sedikit kemacetan terjadi selama 15 menit didekat persimpangan tak sebidang dimana tiga jalan bebas hambatan bertemu. Dua hal penting harus diperhatikan. Pertama, kemacetan di bagian hilir tidak mempengaruhi kondisi arus lalu lintas didekat persimpangan tak sebidang. Kedua, Pengaruh penuh dari situasi leher botol di persimpangan tak sebidang tidak dapat secara penuh dievaluasi karena terbatasnya daerah studi di bagian hulu.

Sekarang perhatikan bagian tengah dan hilir dari daerah studi yang merupakan perhatian utama dari studi ini. Kondisi arus-bebas terjadi sampai sedikit lewat jam 4.00 sore. ketika bagian antara Bronson dan Odin mulai beroperasi mendekati kapasitas. Sesaat setelah jam

Total dilakukan 29 kali penerbangan, dengan foto terakhir diambil di ujung selatan daerah studi pada jam 6.23 sore.

Dalam penelitian ini digunakan jenis kamera militer. Pesawat udara terbang sepanjang tepi jalan bebas hambatan, karena tidak perlu mengambil foto tepat vertikal. Foto diambil secara otomatis dengan mekanisme *time-lapse*, dan waktu di set untuk menyediakan *overlap* 10 sampai 20 persen. Penghitungan kendaraan dalam setiap foto untuk setiap sub-seksi diambil dan kerapatan lajur dihitung berdasarkan panjang sub-seksi dan jumlah lajur. Lintasan penerbangan dibuat pada peta, dan kemudian kerapatan lajur diletakkan sepanjang lintasan penerbangan dalam sub-seksi dan lokasi waktu yang sesuai. Barisan nilai kerapatan sepanjang lintasan penerbangan dapat dilihat pada **Gambar 3.16**.



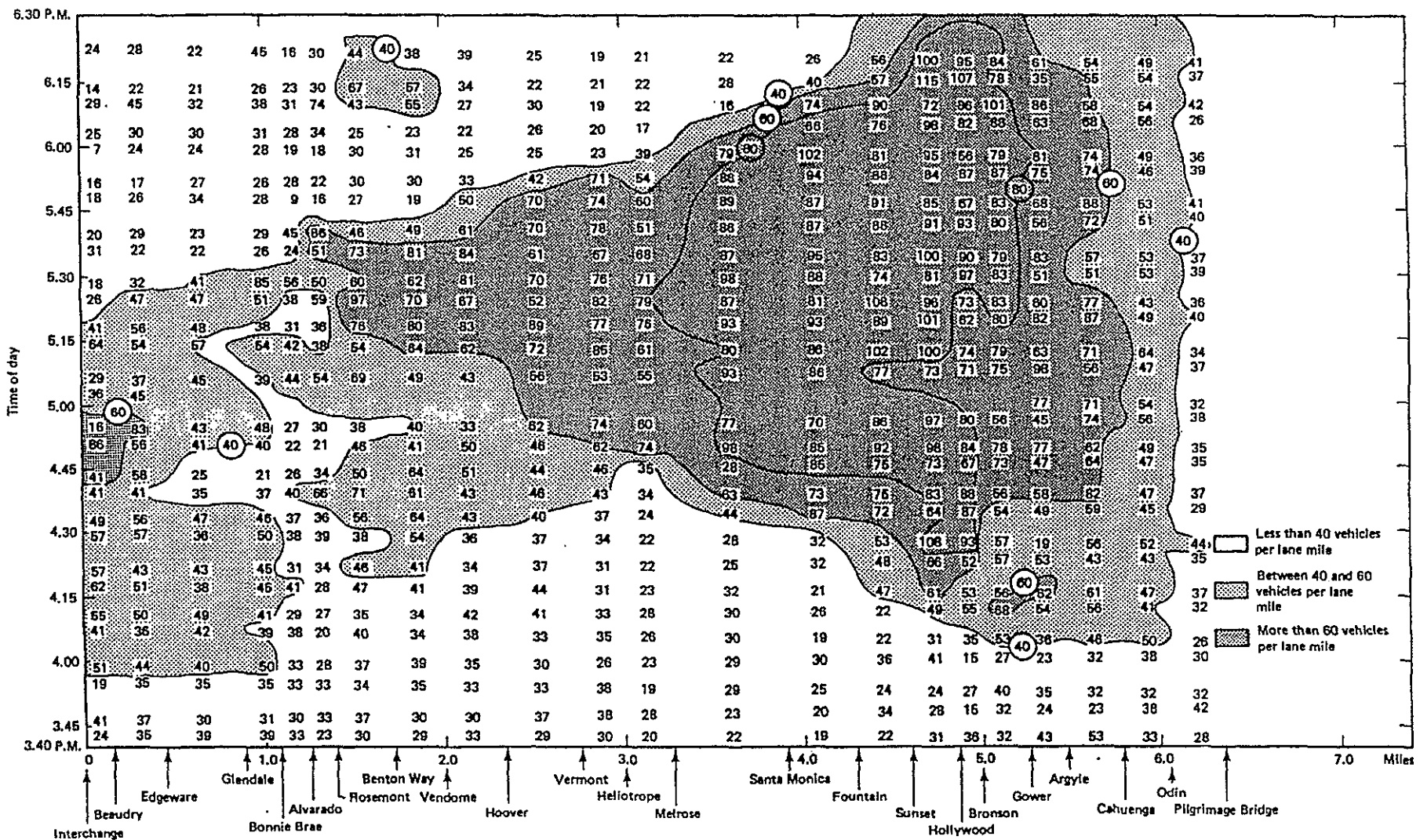
Gambar 3.15. Hubungan antara Kerapatan dan Persen Okupansi Sebagai Fungsi dari Rata-rata Panjang Kendaraan dan Panjang Daerah Pengamatan

Tiga kondisi lalu lintas dibedakan berdasarkan pada kerapatan dapat dilihat dalam **Tabel 3.4**. Perlu diperhatikan bahwa perbedaan kecil nilai kerapatan digunakan untuk membedakan antara kondisi arus lalu lintas. Kondisi lalu lintas tidak macet atau arus-bebas ditandai dalam daerah waktu-ruang dari peta kontur kerapatan jika kerapatan kurang dari 40 (24 kend/km-lajur). Kondisi arus mendekati kapasitas ditandai dengan kerapatan antara 40 dan 60 (24 dan 40 kend/km-lajur), sedangkan kondisi arus macet ditandai dengan

4.15 kemacetan terjadi antara Sunset dan Hollywood, menandakan leher botol antara Hollywood dan Bronson. Leher botol disebabkan oleh permintaan di *on-ramp* Hollywood dan penurunan kapasitas karena suatu perbaikan. Pada jam 4.35 sore kemacetan berkembang sampai 1-mil ke arah hulu. Sesaat setelah itu pola kemacetan yang agak unik berkembang disebabkan karena adanya truk dalam arus lalu lintas dan situasi perbaikan dari Hollywood ke Cahuenga. Sementara kemacetan terus berkembang ke arah hulu (ke Melrose pada jam 4.45 sore), ujung hilir dari kemacetan bergerak ke arah hilir dari Bronson ke Cahuenga sekitar jam 4.35 sampai 4.40 sore. Hal ini disebabkan oleh tiga faktor. Pertama, bagian antara Bronson dan Cahuenga telah beroperasi dekat kapasitas, dan kondisi arus tidak stabil. Kedua faktor lain, adalah adanya truk dan perbaikan, terjadi bersamaan dalam keadaan ini. Truk berjalan melalui bagian hulu daerah kemacetan dari Hollywood dengan kecepatan rendah (10 sampai 20 mil per jam) dan pada saat sampai di bagian perbaikan tidak mempunyai kemungkinan untuk menaikkan cukup tinggi kecepatannya sehingga bagian perbaikan dapat dipertahankan pada kapasitasnya. Sebagai konsekuensinya, peleton acak dari kendaraan terbentuk dibelakang truk dalam arus lalu lintas, dan kondisi kerapatan-tinggi kapasitas-rendah bergerak ke arah hilir ke Cahuenga, dimana kapasitas jalan cukup meningkat disebabkan karena tambahan lajur dan perubahan kemiringan.

Kecuali situasi yang dijelaskan diatas, bentuk dari daerah kemacetan (daerah yang diarsir tebal) adalah segitiga dan ini bentuk khusus dari leher botol tunggal. Batas dari daerah segitiga menandakan perubahan berarti dalam kondisi arus lalu lintas, dan masing-masing perjalanan melintas batas ini siap merasakan perubahan ini. Batas ini dapat ditetapkan sebagai gelombang kejut karena menyatakan diskontinyu dalam kondisi arus.

Gelombang kejut pertama, dinamakan gelombang kejut bentukan mundur, kemiringan ke atas dan ke kiri, semakin berkembang ke arah hulu terhadap waktu. Penamaan "bentukan mundur" diberikan karena gelombang kejut bergerak ke arah hulu terhadap waktu pada arah berlawanan dengan lalu lintas dan merupakan jenis bentukan karena terhadap waktu daerah kemacetan bertambah. Gelombang kejut bentukan mundur berakhir dekat Rosemont pada jam 5.35 sampai 5.40 sore setelah bergerak sekitar 3,5 mil dalam 1,3 jam. Gelombang kejut ini mempunyai kecepatan sebesar $-2,7$ mil per jam dan diberikan tanda negatif karena bergerak dalam arah berlawanan dengan arah lalu lintas.



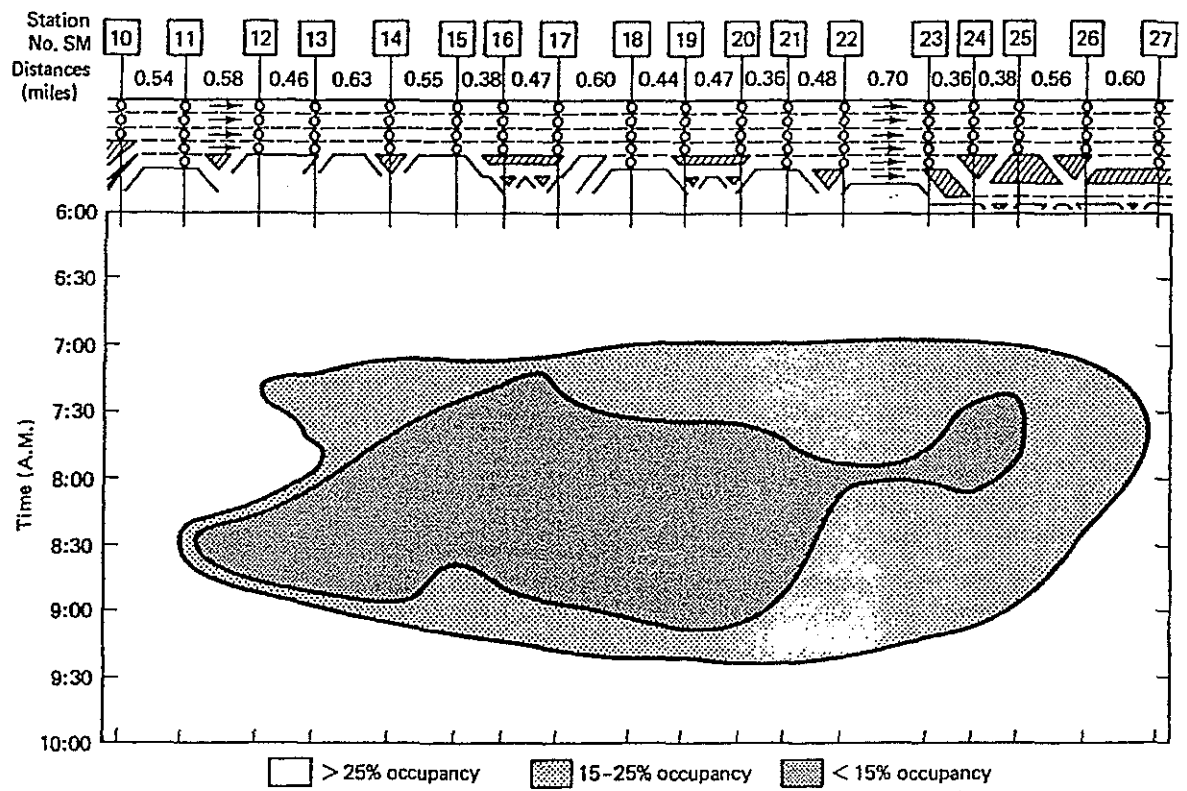
Sumber: May (1962), seperti dikutip dari May (1990)

Gambar 3.16. Peta Kontur Kerapatan Jalan Bebas Hambatan Hollywood

Gelombang kejut kedua, dinamakan gelombang kejut pemulihan maju, kemiringan ke atas dan ke kanan, semakin berkembang ke arah hilir terhadap waktu. Penamaan "pemulihan maju" diberikan karena gelombang kejut bergerak ke arah hilir terhadap waktu dalam arah yang sama dengan arah lalu lintas dan merupakan jenis pemulihan karena terhadap waktu daerah kemacetan berkurang. Gelombang kejut pemulihan maju berakhir dekat Gower kira-kira jam 6.45 sore setelah bergerak sekitar 4,0 mil dalam waktu 1,1 jam. Gelombang kejut ini mempunyai kecepatan +3.6 mil per jam dan diberikan tanda positif karena bergerak searah arah lalu lintas.

Gelombang kejut ketiga, dinamakan gelombang kejut diam depan, adalah batas vertikal di ujung hilir dari daerah kemacetan yang tetap sepanjang waktu. Gelombang kejut mulai di Cahuenga pada jam 4.35 sore dan menerus di lokasi sampai kira-kira jam 6.15. Terlihat ada penggeseran dalam leher botol dari Cahuenga ke belakang sampai sub-potongan Bronson-Gower dari jam 6.15 sampai 6.45 sore. Jenis gelombang kejut diam mempunyai kecepatan nol.

Keseluruhan daerah kemacetan berkembang sampai sejarak 4,5 mil dan berakhir untuk 2,5 jam. Dengan menggunakan pengukuran sistem jalan bebas hambatan Chicago untuk kemacetan, yang merupakan perkalian dari panjang kemacetan dan waktu kemacetan, pengukuran kemacetan untuk leher botol khusus pada hari tertentu ini adalah 330 menit-mil dari kemacetan. Kekuatan peta kontur kerapatan adalah hubungan yang jelas dari kerapatan terhadap waktu dan ruang. Sebagai contoh, seseorang berdiri di Vermont *overpass* jam 5.15 sore akan mengamati kemacetan tetapi tanpa memperhatikan problem leher botol 3 mil ke arah hilir dan mulai 1 jam sebelumnya. Atau perhatikan kendaraan yang memasuki Hollywood jalan bebas hambatan di bagian hulu dari simpang susun-empat pada jam 5.30. Pada saat dan tempat itu kondisi arus-bebas terjadi tetapi pengemudi tidak mengetahui bahwa terdapat kemacetan sejarak 4 mil didepannya. Peta kontur kerapatan di jalan bebas hambatan telah dikembangkan dari studi foto udara. Contoh diberikan dalam **Gambar 3.17**. Penerapan peta kontur kerapatan sebagai pendahuluan gelombang kejut, dan juga digunakan untuk memperkirakan waktu tempuh dan permintaan lalu lintas.



Sumber: May (1990)

Gambar 3.17 Peta Kontur Persen Okupansi Dari Jalan Bebas Hambatan Santa Monica