

## PENDAHULUAN

### 1.1. LATAR BELAKANG MASALAH

Kemacetan arus lalu-lintas di sekitar persimpangan jalan pada jam sibuk sering kali tidak dapat dihindarkan. Terjadi antrian kendaraan yang panjang di satu jalur jalan, sedangkan jalur lain yang berlawanan arah tampak lengang. Pengaturan lamanya lampu merah dan hijau menyala di suatu ruas jalan tidak sesuai dengan jumlah kendaraan yang lewat saat itu. Lampu hijau yang menyala terlalu singkat pada jalur yang sibuk akan menyebabkan semakin panjangnya antrian kendaraan di jalur yang bersangkutan.

Keadaan demikian itu umumnya diatasi dengan bantuan polisi lalu-lintas yang mengatur kembaliarus di sekitar persimpangan tersebut. Polisi bertugas menyesuaikan pengaturan giliran jalan dan berhenti untuk setiap ruas jalan sesuai dengan keadaan saat itu. Dengan pengaturan kembali panjangnya kesempatan untuk jalan pada jalur yang sibuk, dapat diharapkan berkurangnya antrian kendaraan di jalur bersangkutan. Penyelesaian demikian itu sangatlah tidak praktis, selain itu kelancaran arus lalu-lintas di sekitar persimpangan jalan tersebut harus selalu tergantung pada adanya polisi lalu-lintas.

Pengaturan kembali periode menyala merah/hijau lampu lalu-lintas pada persimpangan jalan dapat pula dilakukan secara coba-coba hingga diperoleh periode yang optimal. Metode ini akan memerlukan waktu pengujian yang lama serta biaya yang sangat mahal.

Simulasi terhadap sistem arus lalu-lintas dapat mengatasi kendala tersebut di atas. Analisis terhadap tingkah laku sistem dengan berbagai nilai variabel yang berbeda dapat dilakukan dengan mudah. Selanjutnya hasil analisis terhadap simulator dapat dikonfirmasi kembali pada sistem sebenarnya.

## 1.2. PERMASALAHAN ADLN - Perpustakaan Universitas Airlangga

Berdasarkan pada keadaan tersebut di atas perlulah kiranya mendapatkan penyelesaian atas persoalan pengaturan lampu lalu-lintas sebagai berikut :

- a. Bagaimana menentukan jumlah fase dan pengelompokannya ? Arus dari arah mana dan ke arah mana yang dapat berjalan bersamaan dan yang tidak boleh jalan bersamaan. Jumlah fase harus ditentukan sekecil mungkin.
- b. Bagaimana bentuk distribusi kedatangan kendaraan pada setiap ruas jalan ?
- c. Bagaimana membuat sebuah simulator dengan komputer untuk mensimulasi sistem arus lalu-lintas ? Simulator demikian ini harus fleksibel terhadap perubahan nilai variabel sistem.
- d. Bagaimana melakukan analisis terhadap tingkah laku sistem melalui simulator.
- e. Apakah tingkah laku sistem simulasi sudah sesuai dengan sistem sebenarnya.

## 1.2. TUJUAN PENELITIAN

1. Membuat program komputer untuk melakukan simulasi sistem pengaturan arus lalu-lintas.
2. Menerapkan program simulasi pada pengaturan lalu-lintas di salah satu persimpangan jalan yang sering macet di kota Surabaya.

## 1.3. MANFAAT PENELITIAN

1. Meningkatkan efisiensi analisis arus lalu-lintas.
2. Optimalisasi pengaturan lalu-lintas di persimpangan jalan.

## 2.1. FUNGSI KEPADATAN PROBABILITAS

Fungsi kepadatan probabilitas adalah fungsi yang memetakan peubah bebas  $X$  ke bilangan real non negatif  $R^+$  sedemikian hingga fungsi tersebut memiliki sifat sebagai berikut, [Hogg77]

$$f(X) \geq 0 \text{ untuk semua nilai } X$$

$$\int f(X) dX = 1$$

Berikut ini disajikan beberapa bentuk distribusi dari suatu peubah bebas  $X$  beserta fungsi kepadatan probabilitasnya yang akan digunakan selama penelitian ini.

### 2.1.1. DISTRIBUSI SERAGAM

Distribusi probabilitas yang paling sederhana adalah peubah acak yang memiliki probabilitas sama untuk semua nilainya. Distribusi probabilitas seperti itu disebut distribusi seragam atau uniform yang didefinisikan sebagai berikut : [Triv82]

Peubah acak  $X$  yang nilainya

$$f(X) = 1/k \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_k \\ = 0 \text{ , yang lain}$$

Sedangkan untuk peubah acak  $X$  yang nilainya  $a, X, b$ , dikatakan memiliki fungsi kepadatan probabilitas  $f(X) = 1/(b-a)$  ,  $a < X < b$   
 $= 0$  yang lain

### 2.1.2. DISTRIBUSI NORMAL

Distribusi probabilitas yang cukup penting adalah distribusi normal. Pada tahun 1733 De Moivre menemukan persamaan matematika kurva normal yang menjadi dasar banyak teori statistika induktif. Distribusi normal sering pula disebut distribusi Gauss untuk menghormati Gauss (1777-1855), yang juga menemukan persamaannya waktu meneliti galat dalam pengukuran yang berulang-ulang mengenai bahan yang sama [Dwa870]. Peubah acak  $X$  memiliki fungsi kepadatan probabilitas [Hogg77]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < x < \infty$$

$$0, \text{ yang lain}$$

Jika distribusi normal dengan mean  $\mu=0$  dan varians  $\sigma^2=1$ , maka  $x$  dikatakan berdistribusi normal baku.

Jika peubah acak  $x$  berdistribusi normal dengan mean  $\mu$  dan varians  $\sigma^2$  maka peubah acak  $z = (x-\mu)/\sigma$  berdistribusi normal baku.

### 2.1.3. DISTRIBUSI EKSPONENTIAL

Walaupun distribusi normal dapat digunakan untuk memecahkan banyak masalah dalam bidang rekayasa dan ilmu sosial, namun masih banyak masalah yang memerlukan fungsi kepadatan probabilitas jenis lain, diantaranya distribusi eksponensial. Distribusi eksponensial banyak digunakan dalam bidang statistika, terutama sekali teori antrian dan pengawasan kualitas.

Peubah acak  $X$  dikatakan berdistribusi eksponensial, jika  $X$  memiliki fungsi kepadatan probabilitas [Hogg77]

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \exp(-x/\beta), x > 0$$

$$= 0, x \text{ yang lain}$$

Mean dari peubah acak yang berdistribusi eksponensial adalah  $\beta$ , sedangkan variansnya adalah  $\beta^2$  [Triv82].

Bentuk lain dari fungsi kepadatan probabilitas distribusi eksponensial adalah  $f(x) = \delta \exp(-\delta x)$ ,  $x > 0$   
 $= 0$ ,  $x$  yang lain

### 2.1.4. DISTRIBUSI ERLANG

Distribusi Erlang [Triv82] merupakan distribusi yang terjadi jika terdapat  $r$  kejadian independen dengan masing-masing kejadian berdistribusi eksponensial. Peubah acak  $T$  dikatakan berdistribusi Erlang jika peubah acak tersebut memiliki fungsi kepadatan probabilitas  $f(t) = (\beta^r t^{r-1} e^{-\beta t}) / (r-1)!$ ,  $t > 0$ ;  $\beta > 0$ ;  $r=1,2, \dots$   
 $= 0$ , yang lain

### 2.1.5. DISTRIBUSI HYPOEKSPONENTIAL

Banyak proses yang terjadi dalam alam dapat dibagi menjadi phase yang berurutan. Jika waktu proses dari masing-masing phase independen dan berdistribusi eksponensial, maka waktu proses

keseluruhan berdistribusi hypoexponential. Peubah acak  $X$  dikatakan berdistribusi hypoexponential, jika peubah acak  $X$  memiliki fungsi kepadatan probabilitas dengan bentuk sebagai berikut. [Hog77]

$$f(x) = (\beta_1\beta_2)/(\beta_1 - \beta_2)(e^{-\beta_1x} - e^{-\beta_2x}), \quad x > 0$$

$$= 0, \quad x \text{ yang lain}$$

## 2.2. TEORI ANTRIAN

Sistem ekonomi dan dunia usaha sebagaimana besar beroperasi dengan sumber daya yang relatif terbatas. Sering terjadi orang, barang, komponen dan kertas kerja harus menunggu untuk mendapatkan jasa layanan. Garis garis tunggu tersebut sering disebut dengan antrian (queue) yang berkembang karena fasilitas pelayanan (server) adalah relatif mahal untuk memenuhi permintaan pelayanan dan sangat terbatas.

Teori antrian diciptakan pada tahun 1909 oleh ahli matematika berkebangsaan Denmark A.K. Erlang. Ia mengembangkan model antrian untuk menentukan model antrian untuk menentukan jumlah yang optimal dari fasilitas telepon switching yang digunakan untuk melayani permintaan yang ada. Penggunaan ini makin meluas, tepatnya akhir Perang Dunia II [Kley85].

### 2.2.1. ELEMEN ANTRIAN

Elemen elemen pokok dalam sistem antrian adalah adalah

#### a. Sumber masukan (input)

Sumber masukan dari suatu sistem antrian dapat terdiri atas suatu populasi orang, barang, komponen, atau kertas kerja yang datang pada sistem untuk dilayani. Jika populasi relatif cukup besar, sering dianggap bahwa hal itu merupakan sumber yang terbatas. Alasan ini didasarkan karena perumusan sumber yang terbatas lebih sederhana daripada sumber yang tak terbatas [Coop87].

#### b. Pola Kedatangan

Cara individu individu memasuki sistem disebut pola kedatangan (arrival pattern). Individu individu mungkin datang dengan

tingkat kedatangan (arrival rate) yang konstan atau acak.

Distribusi Poisson adalah salah satu dari pola kedatangan yang paling sering terjadi apabila kedatangan berdistribusi secara acak [Kley85]. hal ini terjadi karena distribusi Poisson menggambarkan banyaknya kedatangan per unit waktu, jika sejumlah besar peubah acak mempengaruhi tingkat kedatangan.

Jika pola kedatangan berdistribusi Poisson, maka waktu antar kedatangan atau inter-arrival time adalah acak dan mengikuti distribusi eksponensial [Triv82].

#### c. Panjang antrian

Banyak sistem antrian dapat menampung jumlah individu individu yang relatif besar, tetapi ada beberapa sistem yang memiliki kapasitas yang terbatas. Jika kapasitas antrian menjadi faktor pembatas besarnya jumlah individu yang dapat dilayani dalam sistem secara nyata, berarti sistem memiliki panjang antrian yang terbatas. Sebagai contoh, sistem yang memiliki panjang antrian terbatas adalah tempat parkir, tempat minum di rumah makan dan tempat tidur rumah sakit.

#### d. Tingkat pelayanan

Waktu yang digunakan untuk melayani individu individu dalam suatu sistem disebut waktu pelayanan (service time) Waktu ini mungkin konstan, tetapi mungkin pula acak dan berdistribusi tertentu. Distribusi pelayanan umumnya normal dengan mean  $\mu$  dan variansi  $\sigma^2$  [Wagn85].

#### e. Disiplin antrian

Disiplin antrian menunjukkan pedoman keputusan yang digunakan untuk menyeleksi individu yang memasuki antrian untuk dilayani lebih dahulu. Disiplin antrian yang paling umum adalah pedoman First In First Served. Disiplin lain yang mungkin terjadi pada sistem antrian adalah First In Last Served, antrian dengan disiplin demikian ini disebut stack [Kley85].

### 2.2.2. STRUKTUR ANTRIAN

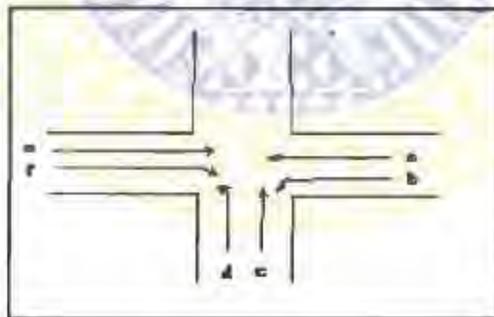
Atas dasar sifat proses pelayanannya, sistem antrian dapat diklasifikasikan menurut fasilitas pelayanan dalam susunan saluran atau channel dan phase yang akan membentuk suatu struktur



### 2.3. TEORI GRAPH ADLN - Perpustakaan Universitas Airlangga

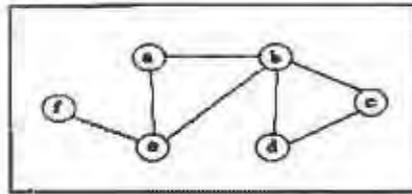
Graph  $G$  adalah himpunan tidak kosong yang terdiri atas elemen-elemen yang disebut titik dan suatu daftar pasangan tidak terurut elemen-elemen itu yang disebut sisi. Himpunan titik dari graph  $G$  disebut himpunan titik graph  $G$  dan disimbolkan dengan  $V(G)$  sedangkan himpunan semua sisinya disimbolkan dengan  $E(G)$ . Suatu sisi berbentuk  $(v,w)$  atau  $(w,v)$  diartikan sebagai titik  $v$  dan  $w$  terhubung [DeoN87].

Subgraph dari graph  $G$  adalah graph yang semua titiknya anggota  $V(G)$  dan semua sisinya anggota  $E(G)$ . Salah satu penerapan dari graph adalah penggunaannya dalam pemecahan masalah yang melibatkan pengaturan data dalam urutan tertentu. Pada terapan semacam ini titik titiknya menunjukkan obyek yang akan diatur, dan sisinya menunjukkan pasangan obyek yang kompatibel [DeoN87]. Pengaturan lalu lintas merupakan salah satu permasalahan yang cukup kompleks jika pada persimpangan jalan tersebut kepadatan lalu lintasnya cukup tinggi. Dengan bantuan teori graph maka pengaturan lalu lintas tersebut dapat dibuat seoptimal mungkin. Sebagai contoh, dalam persimpangan jalan arah lalu lintas digambarkan sebagai berikut



Beberapa arah kendaraan pada persimpangan di atas adalah kompatibel, artinya arus itu dapat bergerak pada waktu yang bersamaan tanpa saling membahayakan. Contoh, arus  $a$  kompatibel dengan arus  $b$  dan  $e$  tetapi tidak kompatibel dengan arus  $d$  dan  $f$ . Kompatibilitas ini dapat ditunjukkan dengan graph kompatibilitas yang titiknya mewakili arus lalu lintas dan sisinya menghubungkan pasangan titik yang arusnya kompatibel. Graph kompatibilitas arus lalu

lintas di atas dapat digambarkan sebagai berikut



Dari graph kompatibilitas di atas dicari subgraph lengkap yaitu subgraph yang memuat semua titik dari graphnya. Sebagai contoh untuk graph di atas, daftar sisi sub graph lengkapnya adalah, { abc, bcd, ef } atau { ab, bcd, ef } atau { ab, ae, ef, bcd }. Untuk menentukan sub graph yang optimal masih bergantung pada beberapa faktor, misalkan kepadatan arus kendaraan pada masing masing lajur serta panjang interval lampu hijau menyala pada setiap lajur [Deo87].

Secara umum, untuk mengatur arus lalu lintas pada suatu persimpangan jalan dapat dilakukan sebagai berikut.

- Gambarkan graph kompatibilitasnya
- Cari sub graph lengkap terbesar yang memuat semua titik kompatibilitasnya.
- Bagi waktu yang tersedia dengan banyaknya sub graph lengkap pada langkah [b] dan alokasikan sub graph lengkap untuk setiap periode waktu

## 2.4. SIMULASI

### 2.4.1. PEMBANGKIT BILANGAN RANDOM

Bilangan random atau bilangan acak adalah suatu bilangan yang keberadaannya tidak saling bergantung satu sama lain. Umumnya bilangan random dapat diperoleh melalui tabel bilangan random. Tabel bilangan random terdiri atas deretan bilangan bulat 0 sampai dengan 9 yang telah tersusun sedemikian hingga kemungkinan munculnya setiap angka adalah sama. Dengan teknik pengambilan tertentu maka dapat dihasilkan bilangan random lain yang terdiri

atas lebih dari satu angka.

Dengan menggunakan tabel bilangan random dapat diperoleh n buah bilangan yang terdiri atas 2 angka (00 - 99) dengan kemungkinan setiap bilangan itu terpilih sama. Bilangan random yang diperoleh dengan kemungkinan yang sama disebut berdistribusi uniform. Untuk contoh di atas, berdistribusi uniform(0,99). Membangkitkan bilangan random pada program komputer dengan menggunakan tabel tentu saja sangat tidak efisien. Tabel bilangan random memerlukan memori terlalu besar serta penggunaannya hanya terbatas pada bilangan random yang berdistribusi uniform saja. Untuk keperluan tersebut perlu dibuat suatu sistem pembangkit bilangan random tersendiri yang tidak memerlukan tabel dalam pemakaiannya serta dapat membangkitkan tak hingga banyak bilangan random sesuai dengan kebutuhan.

Beberapa compiler termasuk Turbo C Versi 2.0 yang dikeluarkan oleh Borland International, telah menyediakan pembangkit bilangan random yang dapat membangkitkan bilangan random (integer) berdistribusi uniform(0,MAX RAND); MAX RAND = 32767. Pada compiler Turbo C Ver.2.0 fungsi pembangkit bilangan random ini dapat dipanggil dengan perintah rand() [Borb89]. Bilangan random yang dihasilkan oleh komputer sebenarnya tidak benar-benar random karena pada suatu keadaan, dalam program pengambilan yang sangat kecil, bilangan yang dihasilkan akan berulang ataupun membentuk suatu pola tertentu. Oleh karena itu bilangan random yang dihasilkan oleh generator semacam ini disebut pseudo random.

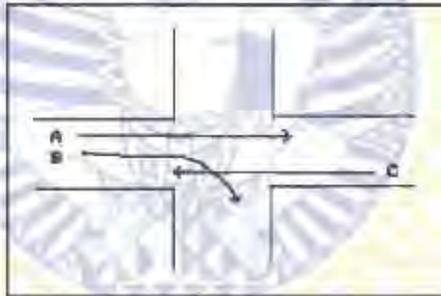
Untuk keperluan simulasi dibutuhkan pembangkit bilangan random dengan berbagai berdistribusi; misalkan uniform continue, exponential, normal, erlang dan hypo exponential. Apabila x adalah bilangan random yang dibangkitkan oleh generator yang berdistribusi uniform(0,MAX RAND) maka dengan mudah terlihat bahwa  $y = x / \text{MAX\_RAND}$  adalah bilangan random yang berdistribusi uniform(0,1) [Triv82]. Adapun bilangan random dengan distribusi lain dapat dilakukan dengan cara transformasi seperti terlihat pada tabel di bawah. [Gord78]

01.	RAND()	$x$
02.	UNIFORM(0,1)	$y = 1/x$
03.	NORMAL( $\mu, \sigma$ )	$z = u + \sigma * (\sum y_i - 6) ; i=1..12$
04.	EXPONENTIAL( $\theta$ )	$e = -\theta * \ln(1-y)$
05.	ERLANG( $\theta, k$ )	$r = \sum e_i ; i=1..k$
06.	HYPO-EXPONENTIAL( $\theta_1, \theta_2$ )	$h = \text{EXPONENTIAL}(\theta_1)$ $+ \text{EXPONENTIAL}(\theta_2)$

Dengan, cara seperti di atas maka dapat dibuat fungsi baru berdasar pada fungsi pembangkit bilangan random standard rand() untuk membangkitkan bilangan random dengan berbagai distribusi.

#### 2.4.2. SISTEM PERSIMPANGAN JALAN

Sistem persimpangan jalan dapat digambarkan seperti berikut.

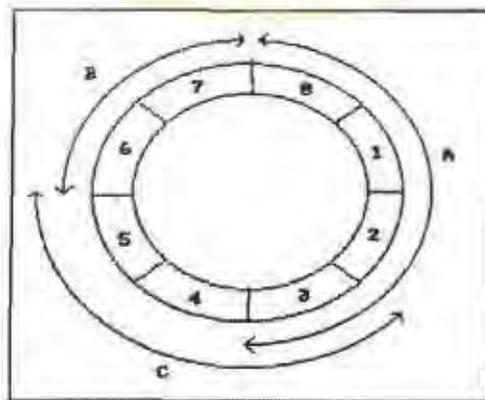


Pada suatu sistem persimpangan jalan; lajur A, B dan C disebut sub-sistem. Jumlah sub-sistem pada suatu sistem persimpangan jalan sangat bervariasi dan bergantung pada kebijakan arus yang terdapat pada sistem tersebut. Gambar di atas hanya menunjukkan beberapa contoh sub-sistem yang ada dan tidak menggambarkan seluruh sub-sistem. Lajur yang searah, misalkan arus dari jalan I menuju jalan II terdiri atas dua atau lebih lajur dapat diwakili oleh satu sub-sistem. Hal demikian ini dimungkinkan karena sub sistem yang memiliki arus sama dapat diharapkan memiliki sifat yang sama pula.

Setiap sub-sistem memiliki periode lampu merah dan hijau

yang berbeda sesuai dengan kepadatan arus yang terdapat pada sub-sistem yang bersangkutan. Pergantian nyala lampu merah dan hijau disebut shift. Periode satu putaran suatu lampu pada sub-sistem menyala hijau lalu merah dan kemudian hijau kembali dinamakan maximum shift. Maximum shift untuk setiap sub-sistem selalu sama untuk suatu sistem tertentu. Untuk memudahkan pembicaraan selanjutnya maximum shift yang digunakan adalah maximum shift pada sub-sistem A, dengan-demikian penghitungan waktu sub-sistem lain akan dihitung relatif terhadap waktu pada sub-sistem A. Satuan waktu yang digunakan pada suatu sistem dapat ditentukan dengan pertimbangan dapat membagi habis periode waktu shift. Satuan waktu yang berlaku pada sistem tidak harus satu detik atau satu menit, namun boleh menggunakan 5", 10" ataupun 17".

Tenggang waktu relatif (terhadap A) lampu hijau menyala pada sub-sistem B disebut shift pertama, sedangkan tenggang waktu relatif (terhadap A) lampu hijau padam pada sub-sistem B disebut shift kedua; demikian pula berlaku untuk seluruh sub-sistem pada sistem persimpangan yang bersangkutan. Gambar di bawah ini menunjukkan hubungan antara maximum shift, shift pertama dan shift kedua pada setiap sub sistem. Sistem persimpangan jalan terdiri atas tiga sub sistem; Maksimum shift adalah ----. Sub sistem pertama; lampu hijau menyala pada waktu ke 0 (nol) dan padam pada waktu ke ----. Sub sistem kedua; lampu hijau menyala pada waktu ke ---- dan padam pada waktu ke ----. Sub sistem ketiga; lampu hijau menyala pada waktu ke ---- dan padam pada waktu ke ----.



Distribusi kedatangan kendaraan pada setiap subsistem dapat ditentukan melalui pengamatan lapangan. Umumnya waktu antar kedatangan kendaraan pada suatu sub-sistem berdistribusi exponential dengan parameter  $\lambda$ . Kebenaran bentuk distribusi serta besarnya parameter ditentukan melalui data lapangan. Andaikan bentuk distribusi antar kedatangan. Dengan diketahuinya distribusi antar kedatangan kendaraan pada suatu sub-sistem, maka selama simulasi berjalan dapat dibangkitkan generator kendaraan dengan distribusi antar kedatangan yang sama [Gord78].

Kendaraan yang datang pada suatu sub-sistem akan selalu masuk pada sistem antrian yang terdapat pada sub-sistem yang bersangkutan. Apabila lampu hijau menyala maka server akan mengambil sejumlah kendaraan sebesar bilangan random yang dihasilkan dari pembangkit bilangan random pada server untuk dikeluarkan dari antrian. Distribusi waktu pelayanan biasanya Normal dengan mean  $\mu$  dan simpangan baku  $\sigma$ . Bilangan random ini dapat dihasilkan dengan cara yang sama seperti konsep pembangkit kedatangan kendaraan.

Sifat sub sistem yang menarik untuk diamati adalah panjang antrian setiap saat, rata rata panjang antrian, maksimum panjang antrian yang pernah terjadi, rata rata waktu tunggu di dalam antrian serta maksimum waktu tunggu yang pernah terjadi. Karakteristik sub sistem ini dapat digunakan untuk analisis lanjutan pada penentuan kebijakan arus selanjutnya.