

BAB II

DASAR TEORI

Dalam bab ini akan dibahas penjelasan tentang sinyal lalu lintas beserta sifat dan komponennya, terutama yang digunakan dalam penelitian ini. Pada bab ini diberikan juga penjelasan tentang teori antrian, graf kompatibel, serta model optimisasi sistem lampu lalu lintas yang digunakan untuk meneliti keoptimalan secara teori di Persimpangan Jembatan Baru UGM.

A. Persimpangan Jalan

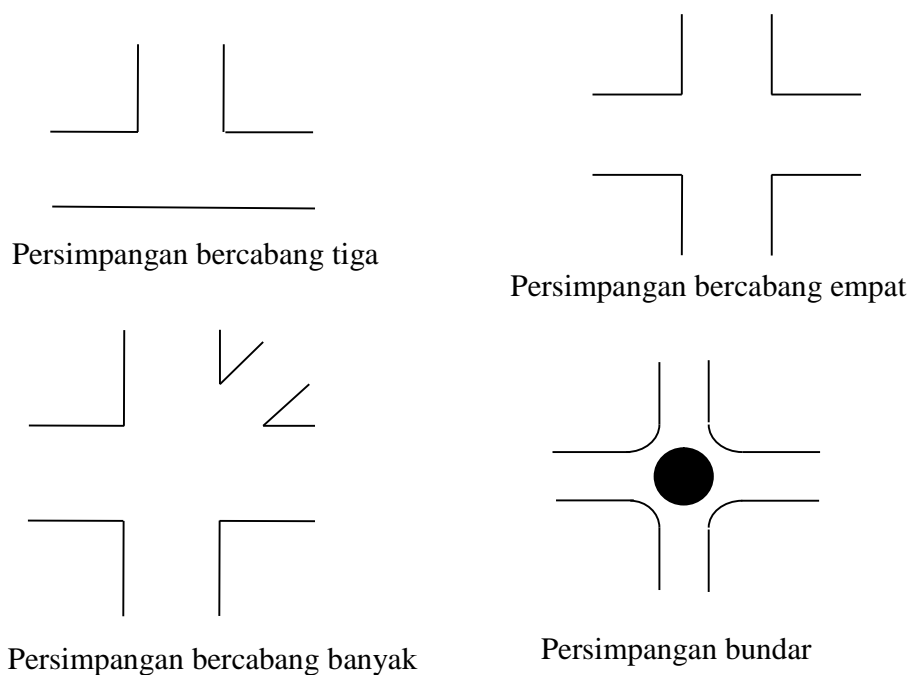
Persimpangan jalan adalah suatu daerah umum di mana dua atau lebih ruas jalan (*link*) saling bertemu atau berpotongan yang mencakup fasilitas jalur jalan (*roadway*) dan tepi jalan (*road side*), dimana lalu lintas dapat bergerak di dalamnya. Untuk mengendalikan arus lalu lintas, maka ditetapkan aturan lalu lintas yang menetapkan siapa yang mempunyai hak terlebih dahulu untuk menggunakan persimpangan. Hak utama pada persimpangan merupakan ketentuan berlalu lintas yang diberlakukan di persimpangan, dengan atau tanpa lampu lalu lintas ataupun pada perlintasan sebidang dengan rel kereta api.

Pada persimpangan sebidang yang tidak dikendalikan dengan lampu lalu lintas, pengemudi wajib memberikan hak utama kepada:

1. Kendaraan yang datang dari arah depan atau dari arah cabang persimpangan yang lain jika hal itu dinyatakan dengan rambu lalu atau marka jalan,
2. Kendaraan dari jalan utama apabila pengemudi tersebut datang dari cabang persimpangan yang kecil atau dari pekarangan yang berbatasan dengan jalan,

3. Kendaraan yang datang dari arah cabang persimpangan sebelah kirinya apabila cabang persimpangan 4 (empat) atau lebih dan sama besar,
4. Kendaraan yang datang dari arah cabang sebelah kirinya di persimpangan 3 (tiga) yang tegak lurus,
5. Kendaraan yang datang dari arah cabang persimpangan yang lurus pada persimpangan 3 (tiga) tegak lurus.

Menurut Hariyanto (2004), beberapa jenis persimpangan sebidang dapat dilihat pada gambar-gambar berikut.

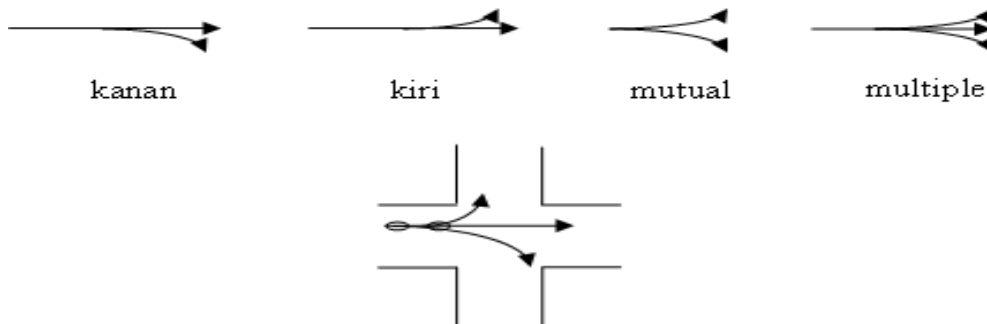


Gambar 2.1 Persimpangan Sebidang

Pergerakan lalu lintas dilihat dari sifat dan tujuan gerakan di daerah persimpangan, dikenal beberapa bentuk alih gerak (*manuver*), di antaranya yaitu:

a. Memisah (*Diverging*)

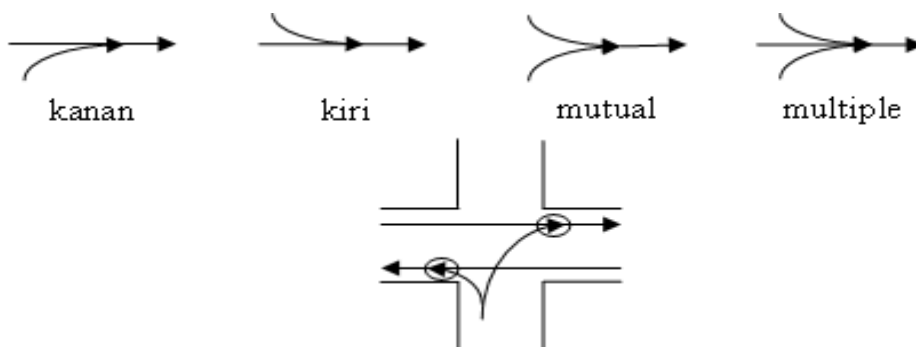
Memisah adalah peristiwa memisahkan kendaraan dari suatu arus yang sama ke jalur yang lain.



Gambar 2.2 Arus memisah (*Diverging*)

b. Menggabung (*Merging*)

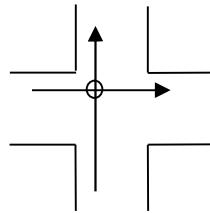
Menggabung adalah peristiwa menggabungnya arah kendaraan melaju dari satu jalur ke jalur yang lain.



Gambar 2.3 Arus menggabung (*Merging*)

c. Memotong (*Crossing*)

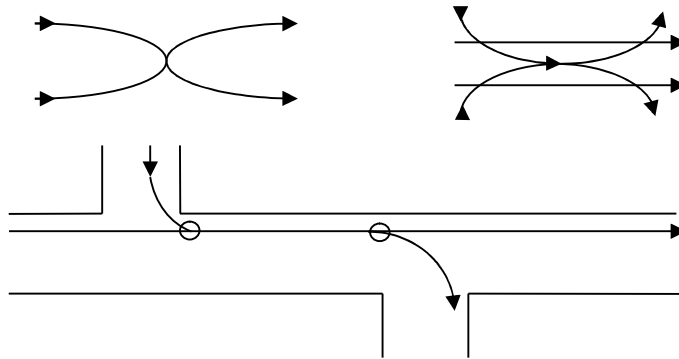
Memotong adalah peristiwa perpotongan antara arus kendaraan dari satu jalur ke jalur yang lain pada persimpangan dimana keadaan yang demikian akan menimbulkan titik konflik pada persimpangan.



Gambar 2.4 Arus memotong (*Crossing*)

d. Menyilang (*Weaving*)

Menyilang adalah pertemuan dua arus lalu lintas atau lebih yang berjalan menurut arah yang sama sepanjang suatu lintasan di jalan tanpa bantuan rambu lalu lintas. Gerakan ini sering terjadi pada suatu arah kendaraan yang berpindah dari suatu jalur ke jalur lain misalnya pada saat kendaraan masuk kesuatu jalan raya dari jalan masuk, kemudian bergerak ke jalur lainnya untuk mengambil jalan keluar dari jalan tersebut. Keadaan ini akan menimbulkan titik konflik pada persimpangan.



Gambar 2.5 Arus menyilang (*Weaving*)

B. Sinyal Lalu lintas

Di dalam UU no. 22/2009 tentang lalu lintas dan angkutan jalan: alat pemberi isyarat lalu lintas (APILL) adalah lampu yang mengendalikan arus lalu lintas yang terpasang di persimpangan jalan, tempat penyeberangan pejalan kaki, dan tempat arus lalu lintas lainnya. Lampu ini yang menandakan kapan kendaraan harus berjalan dan berhenti secara bergantian dari berbagai arah. Pengaturan lalu lintas di persimpangan jalan dimaksudkan untuk mengatur pergerakan kendaraan pada masing-masing kelompok pergerakan kendaraan agar dapat bergerak secara bergantian sehingga tidak saling mengganggu antar arus yang ada.

1. Karakter Sinyal Lalu Lintas

Ada banyak kondisi yang perlu dipertimbangkan dalam analisis kapasitas simpang bersinyal. Kondisi tersebut meliputi:

- a. Kondisi lalu lintas, seperti volume lalu lintas dimasing-masing jalur, distribusi kendaraan bermotor oleh pergerakan kendaraan baik ke kiri, kanan, atau lurus

melewati persimpangan, kompetisi dari jenis kendaraan dalam setiap pergerakan tersebut.

- b. Kondisi sinyal lalu lintas, mencakup jenis lampu lalu lintas apa yang dipakai di persimpangan.

Kondisi-kondisi di atas berpengaruh terhadap kapasitas dan kinerja lalu lintas pada persimpangan. Oleh karena itu diperlukan suatu sistem pengaturan lalu lintas sedemikian rupa sehingga mampu mendistribusikan waktu kepada masing-masing kelompok pergerakan kendaraan secara proporsional sehingga tujuan dari pengaturan lampu lalu lintas dapat tercapai.

Sistem pengaturan tersebut diterapkan untuk memisahkan pergerakan lalu lintas berdasarkan waktu. Pemisahan ini diperlukan khususnya untuk jenis konflik primer. Konflik primer adalah pertemuan aliran kelompok kendaraan dari persilangan arus kendaraan (*crossing*). Pengaturan fase pada pemisahan jenis konflik primer dapat dilakukan dengan dua fase yang masing-masing fase untuk jalan yang berpotongan. Pengaturan fase ini juga dapat digunakan apabila terdapat larangan belok kanan pada suatu simpang. Pengaturan sinyal lalu lintas dengan dua fase ini akan memberikan kapasitas yang lebih besar, sehingga pengaturan ini dapat digunakan sebagai dasar dari analisa sinyal lalu lintas.

Sistem lampu lalu lintas menggunakan beberapa jenis nyala lampu di antaranya sebagai berikut.

- a) Lampu hijau (*green*): kendaraan yang mendapat isyarat harus bergerak maju.

- b) Lampu kuning (*yellow*): kendaraan yang mendapatkan isyarat harus melakukan antisipasi, apabila memungkinkan harus mengambil keputusan untuk berlakunya isyarat lampu hijau.
- c) Lampu merah (*red*): kendaraan yang mendapatkan isyarat harus berhenti pada sebelum garis berhenti (*stop line*).

Pada umumnya sinyal lalu lintas dipergunakan untuk satu atau lebih dari alasan berikut.

- a) Untuk menghindari kemacetan persimpangan akibat adanya konflik arus lalu lintas, sehingga terjamin bahwa suatu kapasitas tertentu dapat ditahan, bahkan selama kondisi lalu lintas jam puncak.
- b) Untuk memberi kesempatan kepada kendaraan untuk melintasi persimpangan tersebut.
- c) Untuk mengurangi jumlah kecelakaan lalu lintas akibat benturan antar kendaraan dari arah berlawanan.

2. Jenis-jenis Sistem Pengaturan Lampu Lalu Lintas

Jenis sistem pengaturan lampu lalu lintas berdasarkan cara pengoperasiannya dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu:

- a. Lampu Lalu Lintas Waktu Tetap (*Fixed Time Traffic Signal*)

Lampu lalu lintas yang pengoperasiannya menggunakan waktu yang tepat dan tidak mengalami perubahan.

- b. Lampu Lalu Lintas Waktu Tak Tetap (*Actuated Traffic Signal*)

Lampu lalu lintas yang pengoperasiannya dengan pengaturan waktu tertentu dan mengalami perubahan dari waktu ke waktu sesuai kedatangan kendaraan dari berbagai persimpangan.

Jenis sistem pengaturan lampu lalu lintas berdasarkan cakupannya dikelompokkan menjadi 3 macam, yaitu:

- a. Lampu lalu lintas terpisah (*isolated traffic signals*), yaitu lampu lalu lintas yang perhitungannya hanya didasarkan pada satu tempat persimpangan saja tanpa mempertimbangkan persimpangan lain yang terdekat.
- b. Lampu lalu lintas terkoordinasi (*coordinated traffic signals*), yaitu lampu lalu lintas yang perhitungannya mempertimbangkan beberapa simpang yang terdekat pada suatu jalur/arah tertentu.
- c. Lampu lalu lintas jaringan (*networking traffic signals*), yaitu lampu lalu lintas yang perhitungannya mempertimbangkan beberapa simpang yang terdapat dalam suatu jaringan yang masih dalam satu kawasan.

3. Definisi-definisi pada Lampu Lalu Lintas

- a. Jalan Utama (*Main Road atau Major Street*)

Jalan utama adalah arah bagian dari pendekat dari kaki simpang yang memiliki arus lalu lintas yang lebih besar dari arah lainnya yang biasanya diwujudkan dalam bentuk geometrik dengan lebar kaki simpang yang lebih lebar dari kaki simpang yang lain.

- b. Jalan Minor (*Minor Street*)

Jalan minor adalah bagian dari pendekat dari kaki simpang yang memiliki arus lalu lintas yang lebih kecil dari arah lainnya yang biasanya diwujudkan dalam bentuk geometrik dengan lebar kaki simpang yang lebih sempit dari kaki simpang yang lain.

c. Waktu Siklus (*Cycle Time*)

Waktu siklus adalah jumlah waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan satu putaran dari sinyal pada suatu simpang.

d. Fase (*Phase*)

Fase adalah bagian dari waktu siklus yang dialokasikan bagi sembarang lalu lintas untuk mengadakan pergerakan.

e. Waktu Antara (*Change Interval*)

Waktu interval adalah total waktu periode kuning dan semua merah yang terjadi pada akhir periode hijau yang dimaksudkan untuk membersihkan atau mengosongkan simpang sebelum pergerakan berikutnya dimulai.

f. Waktu Hijau (*Display Green*)

Waktu hijau adalah waktu nyala lampu hijau pada lampu lalu lintas dari suatu pendekat.

g. Waktu Hijau Efektif (*Effective Green*)

Waktu hijau efektif adalah waktu dalam satu fase yang efektif diijinkan mengalirkan pergerakan. Secara umum waktu hijau efektif adalah waktu hijau ditambah waktu antara dikurang dengan waktu hilang.

h. Waktu Hilang (*Lost Time*)

Waktu hilang adalah waktu dimana simpang tidak efektif digunakan untuk pergerakan yang dalam hal ini terjadi selama waktu antara dan awal dari masing-masing fase dimana kendaraan dalam antrian mengalami kelambatan.

i. Rasio Hijau Efektif (*Green Time Ratio*)

Rasio hijau efektif adalah perbandingan antara waktu hijau efektif dengan panjang siklus.

j. Waktu Merah Efektif (*Effective Red*)

Waktu merah efektif adalah waktu efektif dimana tidak diijinkan adanya pergerakan, yakni merupakan panjang siklus dikurangi dengan waktu hijau efektif untuk fase tertentu.

C. Volume Lalu Lintas

Volume lalu lintas adalah jumlah kendaraan yang melewati suatu penampang tertentu pada suatu ruas jalan tertentu dalam satuan waktu tertentu. Volume lalu lintas rata-rata adalah jumlah kendaraan rata-rata dihitung menurut satu satuan waktu tertentu, bisa harian yang dikatakan sebagai volume lalu lintas harian rata-rata (LHR) atau volume lalu lintas harian rata-rata tahunan (LHRT). Kemampuan ruas jalan untuk menampung arus atau volume lalu lintas yang ideal dalam satuan waktu tertentu disebut kapasitas jalan. Kapasitas jalan sering dinyatakan dalam jumlah kendaraan yang melewati potongan jalan tertentu dalam satu jam (kend/jam), atau dengan mempertimbangkan berbagai jenis kendaraan yang melalui suatu jalan digunakan satuan mobil penumpang sebagai satuan kendaraan dalam perhitungan kapasitas.

D. Graf

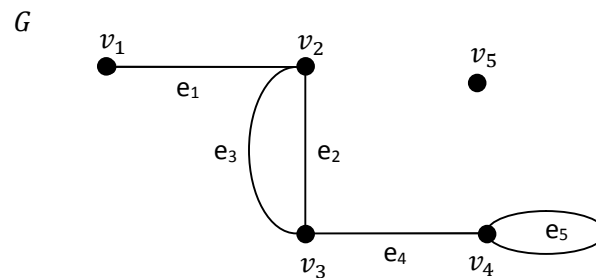
Teori Graf pertama kali dikenalkan pada tahun 1736 oleh matematikawan terkenal dari Swiss yang bernama Euler. Pada awal munculnya, Teori Graf kurang begitu diperhatikan, karena hanya dipakai untuk memecahkan teka-teki (*puzzle*), tetapi pada akhirnya mengalami perkembangan pesat karena begitu banyak aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari, maupun dalam bidang ilmu lainnya seperti ilmu komputer, teknik, sains, bisnis, dan sebagainya.

Definisi 2.1. Graf (Ali Mahmudi: 2011, 3)

Suatu graf G terdiri atas dua himpunan, yaitu suatu himpunan berhingga yang tak kosong $V(G)$, yang unsur-unsurnya disebut simpul (*vertices*) dan suatu himpunan yang mungkin kosong $E(G)$, yang unsur-unsurnya disebut rusuk (*edges*). Biasanya, graf tersebut dilambangkan dengan $(V(G), E(G))$. Jika u dan v adalah dua simpul di G dan $e = \{u, v\}$, sering juga ditulis $e = uv$, adalah sebuah rusuk di G , maka:

- a. Simpul u dan v disebut simpul-simpul ujung rusuk e .
- b. Simpul u dan v berikatan (*adjacent*).
- c. Simpul u dan v hadir (*incident*) pada rusuk e , demikian pula sebaliknya, dikatakan rusuk e hadir (*incident*) pada simpul u dan v .

Gambar 2.9 merupakan contoh suatu graf G . $G = (V(G), E(G))$ dengan $V(G) = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ dan $E(G) = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$



Gambar 2.6 Graf G

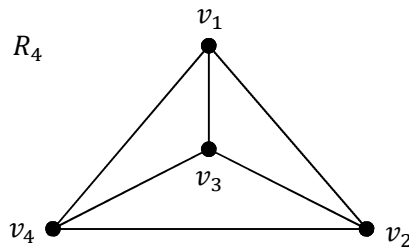
Pada graf G di atas, simpul v_1 dan v_2 berikatan, simpul v_2 dan v_3 berikatan, simpul v_3 dan v_4 juga berikatan, sedangkan simpul v_4 dan v_5 tidak berikatan. Demikian juga, simpul v_2 dan v_4 tidak berikatan. Rusuk e_1 hadir pada simpul v_1 dan v_2 . Simpul v_5 yang tidak dihubungkan dengan simpul-simpul lainnya disebut simpul terasing (terisolasi). Dengan kata lain, simpul terasing adalah simpul yang tidak hadir pada sebarang rusuk di suatu graf.

Pada graf G terdapat 2 rusuk yang menghubungkan 2 simpul yang sama, yaitu e_2 dan e_3 . Rusuk semacam ini disebut rusuk ganda/rusuk rangkap (*multi-edges*). Rusuk yang menghubungkan simpul tertentu dengan dirinya sendiri disebut gelang (*loop*), seperti e_5 pada graf G . Graf yang memuat gelang atau rusuk ganda disebut graf ganda. Sebaliknya, graf yang tidak memuat rusuk ganda dan gelang disebut graf sederhana.

Definisi 2.2. Graf Teratur (Ali Mahmudi: 2011, 7)

Graf teratur adalah graf yang setiap simpulnya mempunyai derajat yang sama. Apabila derajat setiap simpul adalah r , maka graf tersebut disebut sebagai graf teratur

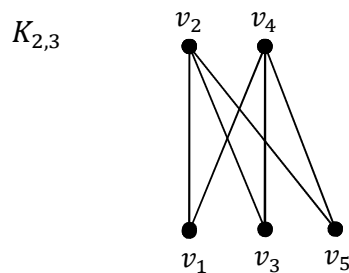
derajat r . Jumlah rusuk pada graf teratur derajat r dengan n buah titik adalah $\frac{nr}{2}$ (Munir, 2005: 378). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7 Graf Teratur R_4

Definisi 2.3. Graf Bipartisi Lengkap (Ali Mahmudi: 2011, 8)

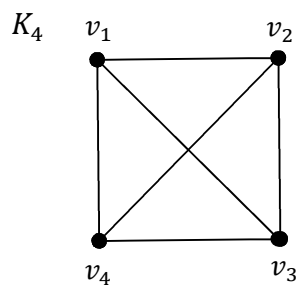
Misal G graf sederhana dan bipartisi dengan partisi (X, Y) , sedemikian sehingga setiap simpul di X berikatan dengan setiap simpul di Y , maka G disebut graf bipartisi lengkap, dan dinotasikan dengan $K_{m,n}$, dengan $|X| = m$ dan $|Y| = n$. Dapat ditunjukkan banyaknya rusuk dari $K_{m,n}$ adalah mn . Berikut adalah contoh graf bipartisi $K_{2,3}$.



Gambar 2.8 Graf $K_{2,3}$

Definisi 2.4. Graf Lengkap (Graf Komplit) (Ali Mahmudi: 2011, 9)

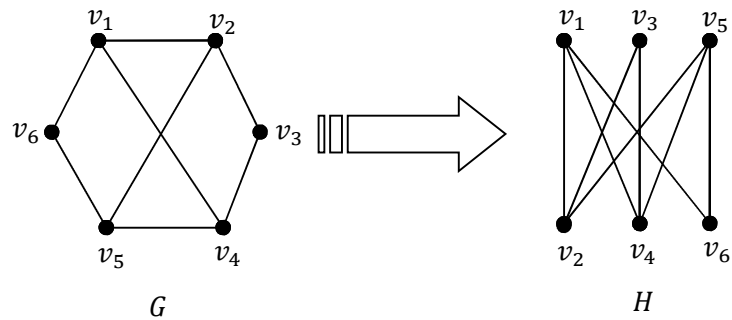
Graf sederhana G disebut graf lengkap jika untuk setiap 2 simpul yang berbeda di G terdapat rusuk yang hadir pada 2 simpul tersebut. Graf lengkap dengan n simpul dinotasikan dengan K_n . Berikut adalah contoh graf lengkap.



Gambar 2.9 Graf Lengkap K_4

Definisi 2.5. Graf Bipartisi (Graf Bipartit) (Ali Mahmudi: 2011, 10)

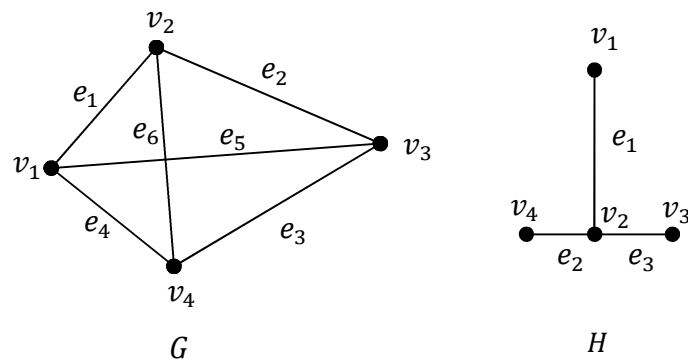
Sebuah graf G disebut graf bipartisi jika himpunan simpul G , $V(G)$, dapat dipartisi menjadi dua himpunan, misal X dan Y , sedemikian sehingga setiap rusuk G menghubungkan sebuah simpul di X dan sebuah simpul di Y . Graf H berikut adalah graf bipartisi karena himpunan simpulnya dapat dipartisi menjadi dua bagian, misalnya $X = \{v_1, v_3, v_5\}$ dan $Y = \{v_2, v_4, v_6\}$ sedemikian sehingga rusuk-rusuknya menghubungkan simpul-simpul di dua partisi tersebut.



Gambar 2.10 Graf H adalah Graf Bipartisi dari Graf G

Definisi 2.6. Graf Terhubung dan Graf Tak Terhubung (Ali Mahmudi: 2011, 13)

Sebuah graf G disebut terhubung jika untuk setiap dua simpul u dan v di G , terdapat lintasan di graf G yang menghubungkan kedua simpul tersebut. Sebaliknya, dinamakan graf tak terhubung jika dalam graf G tidak terhubung atau tidak terdapat lintasan untuk setiap dua simpul u dan v . Berikut adalah contoh graf terhubung dan graf tak terhubung.

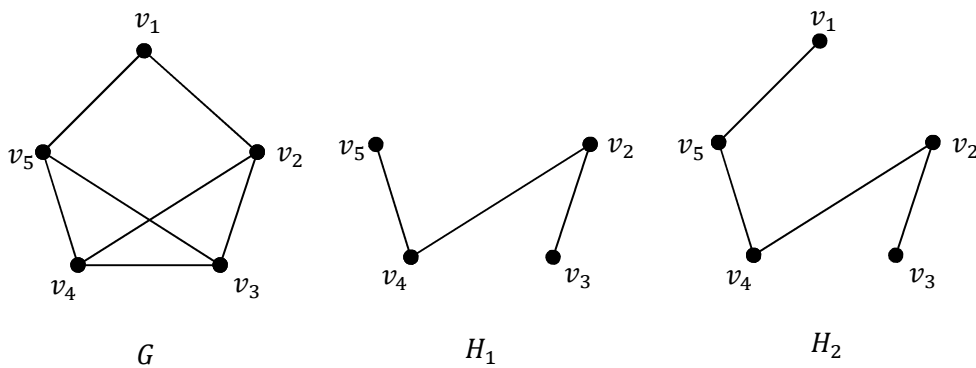


Gambar 2.11 Graf Terhubung G dan Graf Tak Terhubung H

Definisi 2.7. Graf Bagian (Ali Mahmudi: 2011, 16)

Sebuah graf H disebut graf bagian (*subgraf*) dari graf G , ditulis $H \subseteq G$, jika $V(H) \subseteq V(G)$ dan $E(H) \subseteq E(G)$. Jika $H \subseteq G$ dan $V(H) = V(G)$, maka H disebut graf bagian perentang (*spanning subgraf*). Sebagai akibatnya dari definisi tersebut berlaku hal-hal berikut ini:

- a. Graf trivial merupakan graf bagian dari sebarang graf.
- b. Setiap graf merupakan graf bagian dari dirinya sendiri.
- c. Misal H adalah graf bagian dari graf G dan H_1 adalah graf bagian dari graf H , maka graf H_1 juga merupakan graf bagian graf G .

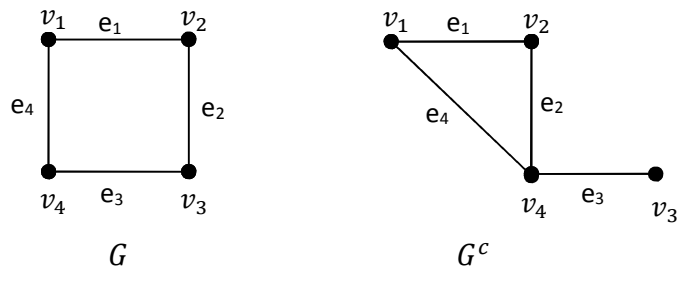


Gambar 2.12 Graf H_1 dan H_2 adalah Graf Bagian G

Pada gambar di atas, H_1 adalah graf bagian dari G dan H_2 adalah graf bagian perentang dari G . H_1 juga graf bagian dari H_2 .

Definisi 2.8. Komplemen Suatu Graf (Ali Mahmudi: 2011, 17)

Misal G adalah graf sederhana. Komplemen graf G , dinotasikan dengan G^c , adalah graf sederhana yang himpunan simpulnya sama dengan himpunan simpul $G(V(G) = V(G^c))$ dan dua simpul u dan v di G^c berikatan jika dan hanya jika u dan v di G tidak berikatan. Perhatikan contoh G berikut, G^c adalah komplemen graf G .



Gambar 2.13 Graf G^c adalah Komplemen Graf G

E. Graf Kompatibel

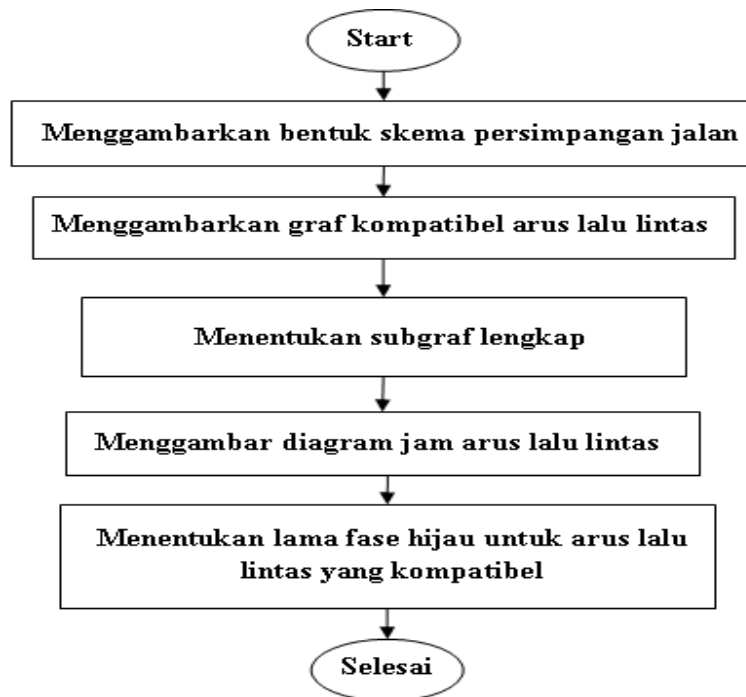
Kompatibilitas jika diartikan adalah sejauh mana suatu kinerja dianggap kompatibel (sesuai) dengan sistem yang mempunyai nilai, pengalaman, dan kebutuhan, tanpa mengubah apa pun dari sistem konsumen yang sudah ada. Graf kompatibel adalah suatu graf dimana simpul dan rusuknya menunjukkan pasangan objek yang kompatibel (sesuai). Penerapan graf kompatibel sering digunakan untuk mengatur arus lalu lintas pada suatu persimpangan. (Ririn, 2013)

Pada proses perubahan bentuk arus lalu lintas di persimpangan ke dalam bentuk graf kompatibel, dicari terlebih dahulu dua buah arus lalu lintas yang kompatibel (kedua arus dapat berjalan bersamaan dengan aman atau tidak

menyebabkan konflik). Langkah memodelkan arus lalu lintas dengan graf kompatibel adalah sebagai berikut.

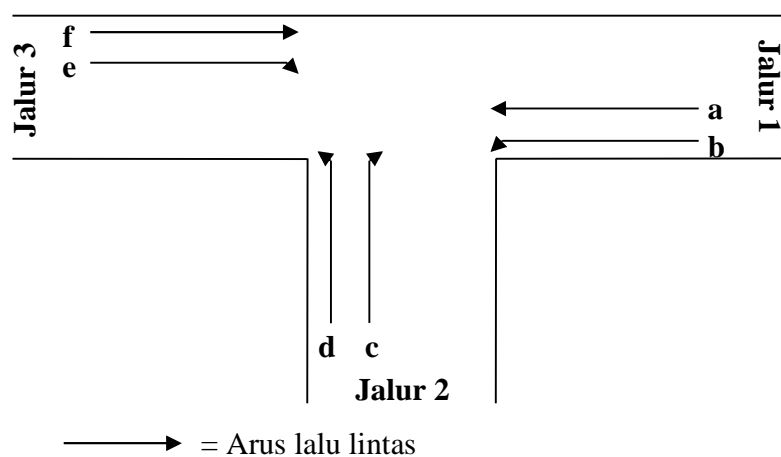
1. Memodelkan pengaturan pergerakan arus lalu lintas yang ada ke dalam bentuk graf kompatibel, dimana simpul-simpulnya menunjukkan arus lalu lintas yang akan diatur, dan rusuk-rusuknya menunjukkan pasangan objek yang kompatibel. Dua buah simpul dihubungkan dengan rusuk, jika dua arus lalu lintas tersebut kompatibel (tidak menyebabkan konflik).
2. Menentukan subgraf lengkap. Subgraf lengkap adalah suatu graf lengkap yang didapat dari graf sederhana dengan setiap simpulnya mempunyai rusuk ke semua simpul. Subgraf lengkap menunjukkan arus lalu lintas mana saja dari jalur A yang kompatibel dengan arus lalu lintas dari jalur lainnya, sehingga dapat berjalan bersamaan.
3. Menentukan lama fase hijau untuk arus lalu lintas yang kompatibel dengan cara membuat diagram jam dari hasil subgraf lengkap kompatibel dan graf kompatibel arus lalu lintas di persimpangan. Diagram jam adalah penyajian data statistik dengan memakai gambar yang berbentuk lingkaran jam. Lingkaran tersebut dibagi dalam beberapa bagian yang menyatakan nilai dalam bentuk waktu.

Pengolahan data hasil pengamatan merupakan bagian penting untuk menerjemahkan data dari hasil pengamatan ke dalam bentuk matematika yaitu graf kompatibel. Proses pengoptimalan fase hijau untuk arus lalu lintas yang kompatibel dapat digambarkan dengan diagram alur seperti yang terdapat pada gambar 2.13 berikut.



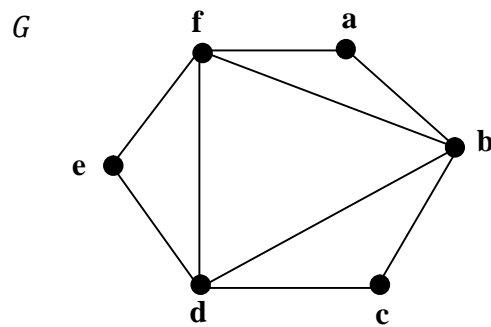
Gambar 2.13 Diagram Alur Pengoptimalan Fase Hijau untuk Arus Lalu Lintas Kompatibel

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat gambar 2.14 untuk contoh pengoptimalan arus lalu lintas simpang 3 berikut.



Gambar 2.14 Contoh Skema Persimpangan Jalan (3 simpang)

Dari contoh skema persimpangan jalan pada gambar 2.14, diketahui arus lalu lintas yang kompatibel. Beberapa contoh arus lalu lintas yang kompatibel yaitu arus kendaraan a kompatibel dengan arus kendaraan b dan f, sedangkan arus kendaraan b kompatibel dengan arus kendaraan a, c, d, dan f. Arus lalu lintas yang kompatibel dari gambar 2.14 dapat ditunjukkan dalam graf kompatibel, yang simpulnya mewakili arus lalu lintas dan rusuknya menghubungkan pasangan simpul yang arusnya kompatibel. Graf kompatibel dari arus lalu lintas persimpangan jalan di atas dapat dilihat pada gambar 2.15 berikut.

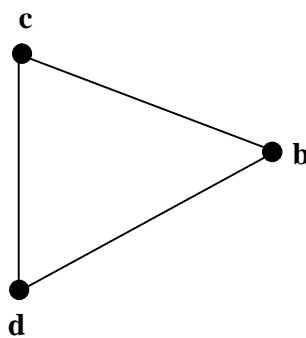


Gambar 2.15 Bentuk Graf Arus Lalu Lintas pada Gambar 2.14

Untuk simpul a dan b menunjukkan arus lalu lintas di jalur 1, simpul c dan d menunjukkan arus lalu lintas di jalur 2, dan simpul e dan f menunjukkan arus lalu lintas di jalur 3. Sebagai contoh, jika total lama menyala lampu hijau pada setiap jalur di persimpangan jalan gambar 2.14 beroperasi selama 60 detik, maka setiap jalur mendapatkan fase lampu hijau selama 20 detik ($60\text{detik}/3\text{jalur}$). Dengan kata lain masing-masing arus lalu lintas dari setiap jalur mendapat waktu untuk lampu hijau selama 20 detik, baik untuk arus kendaraan yang akan lurus, belok kiri, atau belok

kanan. Penyelesaian tersebut masih kurang optimal dalam membebaskan semua kendaraan di setiap jalurnya, karena semakin banyak kendaraan yang terhenti untuk menunggu gilirannya bergerak tidak sebanding dengan lama menyala lampu hijau di setiap jalurnya.

Salah satu pengaturan yang mungkin untuk mengurangi penumpukan jumlah antrian kendaraan di setiap jalur yaitu dengan membebaskan arus kendaraan yang kompatibel (tidak menyebabkan konflik) dengan arus kendaraan di jalur lainnya. Arus kendaraan yang kompatibel dapat diketahui dengan mencari subgraf lengkap dari graf kompatibel pada gambar 2.15. Sebagai contoh arus kendaraan b di jalur 1 dapat berjalan bersamaan dengan arus kendaraan c dan d dari jalur 2. Berikut adalah gambar salah satu subgraf lengkap kompatibel.

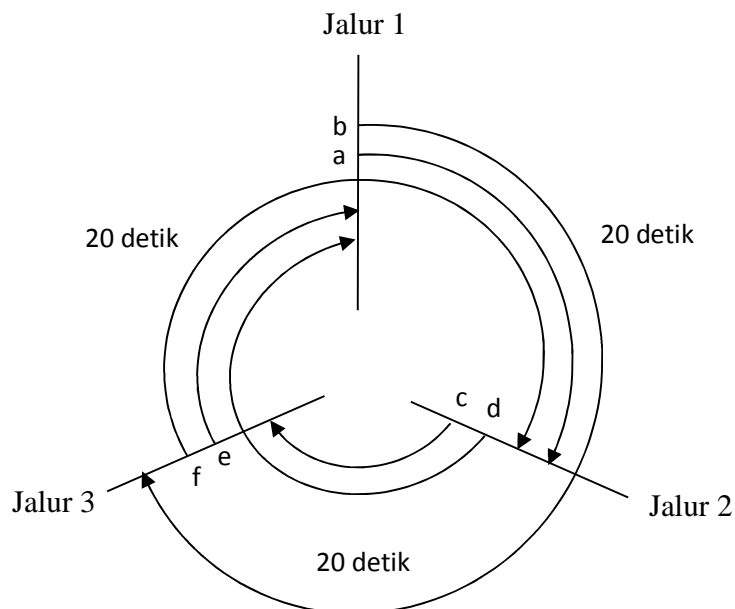


Gambar 2.16 Contoh Salah Satu Subgraf Lengkap Kompatibel dari Gambar 2.15

Setelah didapatkan contoh subgraf lengkap kompatibel yang menunjukkan tiga simpul atau arus kendaraan yang dapat berjalan bersamaan, maka dapat dicari arus kendaraan yang kompatibel di jalur 2 dan jalur 3. Pada jalur 2 didapat arus kendaraan

d yang dapat berjalan bersamaan dengan arus kendaraan e dan f dari jalur 3. Pada jalur 3 didapat arus kendaraan f yang dapat berjalan bersamaan dengan arus kendaraan a dan b dari jalur 1.

Untuk membebaskan arus lalu lintas yang kompatibel, maka yang perlu dirubah adalah durasi fase lampu hijau. Pengoptimalan durasi fase hijau di setiap arus kendaraan dapat dilihat dengan diagram jam yang menunjukkan waktu (detik) durasi fase lampu hijau setiap arus lalu lintas sebagai berikut.



Gambar 2.17 Diagram Jam Fase Hijau Arus Lalu Lintas

Jika setiap arus lalu lintas dari setiap jalurnya mendapatkan fase hijau selama 20 detik, maka jumlah keseluruhan waktu fase hijau dari setiap jalurnya adalah 60 detik. Dari gambar 2.17 di atas dapat dijelaskan bahwa arus lalu lintas yang tidak kompatibel (dapat menyebabkan konflik jika berjalan bersamaan dengan arus lalu

lintas dari jalur lain) hanya mendapatkan fase hijau selama 20 detik, sedangkan arus lalu lintas yang kompatibel (dapat berjalan bersamaan dengan arus lalu lintas dari jalur lainnya tanpa menyebabkan konflik) mendapatkan fase hijau selama 40 detik. Pengoptimalan durasi fase lampu hijau pada arus lalu lintas yang kompatibel diharapkan dapat mengurangi jumlah antrian kendaraan di setiap jalurnya dan dapat mengurangi terjadinya konflik antar arus kendaraan yang akan melewati persimpangan.

F. Proses Antrian

1. Definisi Proses Antrian

Menurut Bronson (1996: 310), proses antrian merupakan proses yang berhubungan dengan kedatangan pelanggan pada suatu fasilitas pelayanan, menunggu panggilan dalam baris antrian jika belum mendapat pelayanan dan akhirnya meninggalkan fasilitas pelayanan setelah mendapat pelayanan. Proses ini dimulai saat pelanggan yang memerlukan pelayanan mulai datang. Menurut Hillier dan Lieberman (1980: 401), proses antrian adalah suatu proses yang berhubungan dengan kedatangan pelanggan ke suatu sistem antrian, kemudian menunggu dalam antrian hingga pelayan memilih pelanggan sesuai dengan disiplin pelayanan, dan akhirnya pelanggan meninggalkan sistem antrian setelah selesai pelayanan.

Sistem antrian adalah himpunan pelanggan, pelayan, dan suatu aturan yang mengatur kedatangan para pelanggan dan pelayanannya. Sistem antrian merupakan “proses kelahiran – kematian” dengan suatu populasi yang terdiri atas para pelanggan yang sedang menunggu pelayanan atau yang sedang dilayani. Kelahiran terjadi jika

seorang pelanggan memasuki fasilitas pelayanan, sedangkan kematian terjadi jika seorang pelanggan meninggalkan fasilitas pelayanan.

2. Komponen Dasar Proses Antrian

Menurut Taha (1997: 609), suatu sistem antrian bergantung pada tujuh komponen yaitu pola kedatangan, pola kepergian, kapasitas sistem, desain pelayanan, disiplin pelayanan, ukuran sumber pemanggilan, dan perilaku manusia.

a. Pola Kedatangan

Menurut Wagner (1972: 840), pola kedatangan adalah pola pembentukan antrian akibat kedatangan pelanggan dalam selang waktu tertentu. Jika tidak disebutkan secara khusus pelanggan datang secara individu ke dalam sistem antrian.

b. Pola Kepergian

Pola kepergian adalah jumlah kepergian pelanggan selama periode waktu tertentu. Pola kepergian biasanya dicirikan oleh waktu pelayanan, yaitu waktu yang dibutuhkan pelayan untuk melayani pelanggan. Waktu pelayanan dapat bersifat deterministik dan dapat berupa suatu variabel acak dengan distribusi peluang tertentu (Bronson, 1996: 310).

Waktu pelayanan bersifat deterministik berarti bahwa waktu yang dibutuhkan untuk melayani pelanggan selalu tetap, sedangkan waktu pelayanan yang berupa variabel acak adalah waktu yang dibutuhkan untuk melayani pelanggan berbeda-beda.

c. Kapasitas Sistem

Menurut Bronson (1996: 310), kapasitas sistem adalah jumlah maksimum pelanggan, baik pelanggan yang sedang berada dalam pelayanan maupun pelanggan

dalam antrian, yang ditampung oleh fasilitas pelayanan pada waktu yang sama. Suatu sistem antrian yang tidak membatasi jumlah pelanggan dalam fasilitas pelayanannya disebut sistem kapasitas tak berhingga, sedangkan suatu sistem yang membatasi jumlah pelanggan dalam fasilitas pelayanannya disebut sistem kapasitas berhingga.

d. Desain Pelayanan

Pelayanan pada antrian juga dapat berupa *single* atau *batch* (berkelompok). Secara umum, suatu kendaraan dilayani pada suatu waktu oleh satu server yang telah ditentukan, tapi dalam antrian lampu lalu lintas dan beberapa situasi lainnya, beberapa pelanggan dilayani secara bersamaan oleh server yang sama.

Berdasarkan pola kedatangan para pelanggan, pelayanan dapat dibagi menjadi *stationary* atau *nonstationary*. Ada pelayanan dari server yang dapat mempercepat waktu yang dibutuhkan untuk melayani pelanggan pada saat jumlah pelanggan semakin meningkat. Bentuk pelayanan ini disebut pelayanan *nonstationary*. Ada pula pelayanan yang tidak memperhatikan jumlah pelanggan yang ada dalam antrian. Bentuk pelayanan seperti ini merupakan bentuk pelayanan *stationary*.

Walaupun tingkat pelayanannya tinggi, sangat mungkin bila beberapa pelanggan akan menunggu dalam antrian. Secara umum, pelanggan datang pada waktu yang tidak beraturan, sehingga panjang antrian tidak mengikuti pola tertentu kecuali pola kedatangan dan pola keberangkatan kendaraannya bersifat deterministik.

e. Disiplin Pelayanan

Disiplin pelayanan dalam sebuah antrian mengacu pada kondisi pelanggan dalam antrian tersebut. Bentuk disiplin pelayanan antrian yang cukup dikenal dan mudah ditemui sehari-hari adalah *First Come First Served* (FCFS) atau biasa disebut juga dengan *First In First Out* (FIFO). Pola ini merupakan pola antrian yang pelayanannya mendahulukan pelanggan yang datang ke dalam antrian terlebih dahulu.

Disiplin pelayanan antrian lainnya yang juga biasa digunakan adalah *Last Come First Served* (LCFS). Berlawanan dengan FCFS, pelayanan dalam disiplin antrian LCFS atau *Last In First Out* (LIFO) akan mendahulukan pelanggan yang terakhir datang dalam antrian.

Selain itu, ada pula pemilihan pelayanan dalam urutan acak yang tidak bergantung pada waktu masuk antrian. Dalam disiplin pelayanan tidak memperhatikan waktu kedatangan para pelanggan. Pelayanan diberikan kepada pelanggan secara acak.

Disiplin pelayanan antrian dengan skema prioritas yaitu disiplin pelayanan yang diberikan terlebih dahulu kepada pelanggan yang memiliki prioritas yang lebih tinggi tanpa memperhatikan waktu kedatangan mereka. Pelanggan yang memiliki prioritas lebih tinggi akan didahulukan mendapatkan pelayanan dibandingkan pelanggan lainnya walaupun terakhir masuk dalam antrian.

f. Sumber Pemanggilan

Menurut Taha (1996: 177), ukuran sumber pemanggilan adalah banyaknya populasi yang membutuhkan pelayanan dalam suatu sistem antrian. Ukuran sumber

pemanggilan dapat terbatas maupun tak terbatas. Sumber pemanggilan terbatas misalnya mahasiswa yang akan melakukan registrasi ulang di suatu universitas, dimana jumlahnya sudah pasti. Sedangkan sumber pemanggilan yang tak terbatas misalnya jumlah kendaraan yang akan melewati suatu persimpangan, jumlahnya bisa tak terbatas.

g. Perilaku Manusia

Perilaku manusia merupakan suatu sikap yang mempengaruhi suatu sistem antrian ketika manusia mempunyai peran dalam sistem baik sebagai pelanggan maupun pelayan. Jika manusia sebagai pelayan, dapat melayani pelanggan dengan cepat atau lambat sesuai kemampuannya sehingga mempengaruhi lamanya waktu tunggu (Taha, 1996: 178).

3. Elemen Sistem Antrian

Elemen sistem antrian merupakan komponen yang merupakan bagian atau anggota dari sistem antrian, yaitu:

a. Pelanggan

Pelanggan adalah orang atau barang yang menunggu untuk dilayani. Arti dari pelanggan tidak harus berupa orang misalnya saja antrian pada loket pembayaran di supermarket, orang yang menunggu giliran membayar termasuk pelanggan, begitu juga barang-barang yang menunggu untuk dihitung oleh kasir juga dapat dikatakan sebagai pelanggan.

b. Pelayanan

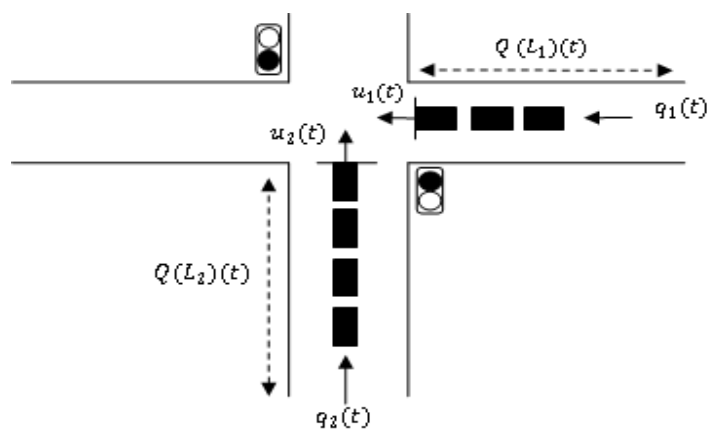
Pelayan adalah orang atau suatu alat yang memberikan pelayanan. Seperti halnya pelanggan, pelayan juga tidak harus berupa orang. Misalnya pada pengambilan uang melalui ATM, mesin ATM dalam hal ini merupakan pelayanan.

c. Antrian

Antrian merupakan kumpulan pelanggan yang menunggu untuk dilayani. Antrian tidak harus merupakan garis tunggu yang memanjang. Misalnya saja antrian pada panggilan telepon, tidak berupa garis tunggu seperti yang kita jumpai pada antrian dipembelian tiket bioskop atau tiket bis.

d. Panjang antrian

Panjang antrian ($Q(L)$) adalah jarak antara muka kendaraan terdepan hingga ke bagian belakang kendaraan yang berada paling belakang dalam suatu antrian yang disebabkan oleh sinyal lalu lintas. Secara sederhana dapat ditunjukkan seperti gambar 2.18 berikut.



Gambar 2.18 Tundaan pada Persimpangan

dengan,

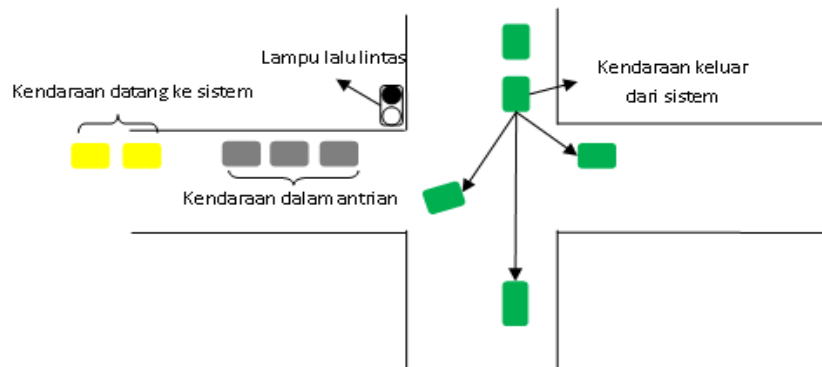
$q_i(t)$ = Laju kedatangan (*demand*) pada jalur ke- i pada waktu t , $i = 1, 2$,

$u_i(t)$ = Laju aliran keberangkatan (*service*) pada jalur ke- i pada waktu ke t ,

$Q(L_i)(t)$ = Panjang antrian pada jalur ke- i pada waktu t .

G. Pemodelan Persimpangan dengan Teori Antrian

Antrian kendaraan pada lampu merah merupakan salah satu contoh dari teori antrian. Pemodelan lampu lalu lintas pada suatu jalur di persimpangan merupakan pemodelan dari sistem antrian jalur tunggal (*single chanel, single server*) yang berarti bahwa dalam sistem antrian tersebut hanya terdapat satu pemberi layanan serta satu jenis layanan yang diberikan. Gambar desain sistem antrian jalur tunggal pada pemodelan lalu lintas adalah sebagai berikut.



Gambar 2.19 Sistem Antrian Arus Lalu Lintas

Dari gambar 2.19 di atas dapat dijelaskan bahwa kendaraan datang ke sistem adalah kendaraan yang akan melewati persimpangan tetapi harus mengantri dengan kendaraan yang datang dari jalur lain pada persimpangan tersebut. Antrian kendaraan diatur dengan lampu lalu lintas yang ada di setiap sudut kaki simpang. Kendaraan

keluar dari sistem adalah kendaraan yang bergerak melewati persimpangan setelah mengantri untuk mendapatkan fase hijau lampu lalu lintas pada persimpangan tersebut.

H. Model Waktu Tunggu Kendaraan

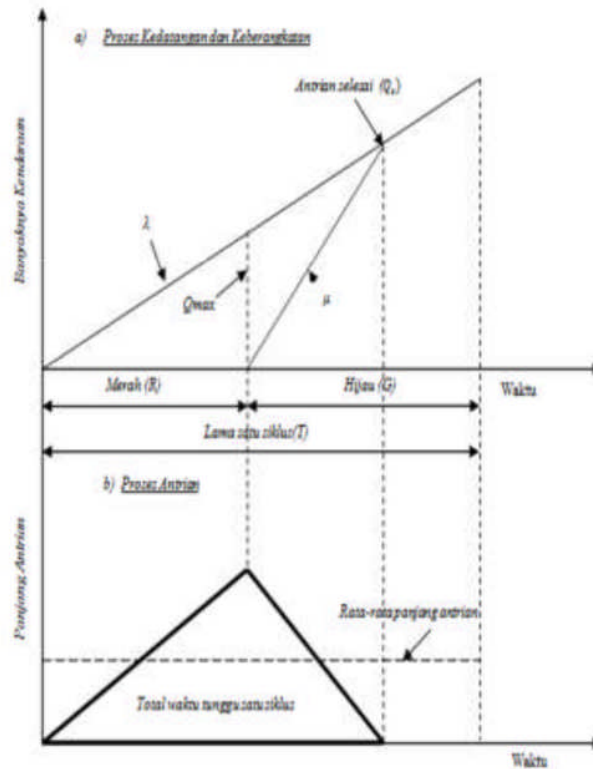
Masalah mendasar dari teori lampu lalu lintas dalam matematika adalah mendapatkan ekspektasi lama waktu tunggu dari setiap kendaraan yang ada dalam antrian kendaraan lalu lintas di persimpangan (Mc Neil, 1968). Lamanya kendaraan berada dalam antrian tersebut tidak terjadi penumpukan antrian. Ketika antrian kendaraan tidak dapat terselesaikan dalam satu siklus lampu lalu lintas, maka hal tersebut dapat menimbulkan antrian yang lebih panjang pada siklus selanjutnya. Pada skripsi ini, persimpangan lampu lalu lintas adalah suatu persimpangan dengan lampu lalu lintas sebagai pengatur lalu lintas di persimpangan.

Konsep dasar dalam pemodelan waktu tunggu kendaraan dalam antrian di persimpangan lampu lalu lintas pada durasi waktu tertentu yang bersifat deterministik. Dalam konsep tersebut ada beberapa hal yang harus diperhatikan yaitu (Rouphail, Tarko & Li, 2001:9-2):

1. Pada awal fase lampu hijau, seluruh kendaraan dalam antrian mulai bergerak meninggalkan antrian.
2. Adanya keseragaman dari pola rata-rata kedatangan kendaraan selama satu siklus.
3. Kedatangan kendaraan tidak melebihi dari kapasitasnya, yang ditentukan oleh batas maksimum jumlah kendaraan dalam antrian.

4. Adanya keseragaman dari pola keberangkatan kendaraan ketika meninggalkan antrian.

Berikut komponen model waktu tunggu yang bersifat deterministik.



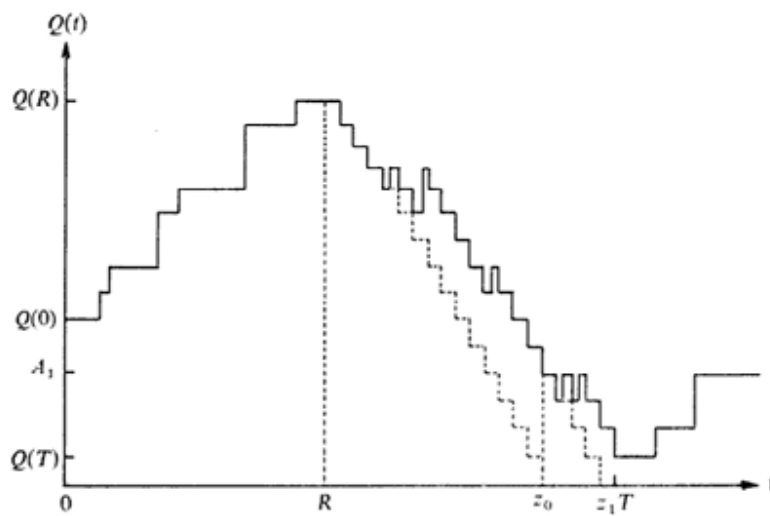
Gambar 2.20 Komponen Model Waktu Tunggu yang Bersifat Deterministik

Menurut Mc Neil (1968), terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi waktu tunggu kendaraan dalam antrian, antara lain:

1. Lama waktu lampu merah menyala dinotasikan R .
2. Lama durasi satu siklus dinotasikan T .
3. Banyaknya kendaraan yang masuk ke dalam antrian pada waktu t dinotasikan $N(t)$.

4. Banyaknya kendaraan yang berada dalam antrian pada saat t (panjang antrian) dinotasikan $Q(t)$.

Kondisi banyaknya kendaraan dalam antrian lalu lintas diharapkan dapat memenuhi kondisi seperti gambar berikut dengan notas-notasi yang digunakan sesuai dengan definisi di atas.



Gambar 2.21 Proses Antrian Dalam Satu Siklus Menurut Mc Neil (1968)

Berdasarkan gambar 2.21, menunjukkan grafik banyaknya kendaraan dalam interval $0 \leq t \leq T$ pada antrian di suatu persimpangan lampu lalu lintas yang dipengaruhi oleh waktu t . Interval $0 \leq t \leq T$ dibagi menjadi dua fase, yaitu fase lampu merah pada interval $0 \leq t \leq R$ dan fase lampu hijau pada interval $R \leq t \leq T$.

Pada fase lampu merah yaitu pada interval $0 \leq t \leq R$, saat $t = 0$, banyaknya kendaraan dalam antrian merupakan sisa antrian dari siklus sebelumnya yaitu $Q(0)$. Selanjutnya, banyaknya kendaraan yang berada dalam antrian lalu lintas dinotasikan dengan $Q(t)$. Fungsi $Q(t)$ akan bertambah secara bertahap berdasarkan penambahan

dari kendaraan yang datang memasuki antrian $N(t)$. Banyaknya kendaraan akan mencapai maksimum pada akhir fase menyalanya lampu merah yang dinotasikan dengan $Q(R)$.

Kendaraan yang datang memasuki persimpangan akan mengantri untuk melewati garis henti (pelayanan). Kendaraan dikatakan memasuki antrian apabila kendaraan tersebut sudah memasuki pendekat. Pendekat merupakan daerah dari lengan persimpangan jalan untuk kendaraan mengantri sebelum keluar melewati garis henti.

Pada fase lampu hijau yaitu pada interval $R \leq t \leq T$, saat $T = R$, seluruh kendaraan yang berada dalam antrian mulai bergerak meninggalkan antrian di persimpangan lampu lalu lintas. Berdasarkan asumsi, model yang akan dibahas menggunakan disiplin antrian FCFS (*First Come First Serve*). Artinya, kendaraan yang terdepan akan keluar antrian terlebih dahulu disusul kendaraan yang berada di belakangnya. Pada fase lampu hijau, jumlah kendaraan yang meninggalkan antrian harus lebih banyak dibandingkan jumlah kendaraan yang masuk ke dalam antrian sehingga jumlah kendaraan dalam antrian sebanyak $Q(R)$ akan terus berkurang hingga akhir fase lampu hijau. Pada akhir fase lampu hijau yaitu saat $t = T$, diharapkan jumlah kendaraan yang tersisa di dalam antrian lampu lalu lintas tidak lebih banyak dari jumlah kendaraan sebelumnya, atau dengan kata lain $Q(T) \leq Q(0)$.

Misalkan λ adalah kendaraan yang masuk dalam antrian di persimpangan lalu lintas dinyatakan dengan kendaraan per detik (kend/detik) dan μ adalah kendaraan

yang keluar meninggalkan antrian di persimpangan lalu lintas dinyatakan dengan kendaraan per detik (kend/detik), maka untuk dapat memenuhi kondisi berdasarkan grafik pada gambar 2.21, harus memenuhi persamaan berikut (Sutrisno, 2011).

$$\lambda \leq \mu \quad (3.1)$$

dengan,

λ = Laju kedatangan kendaraan masuk dalam antrian (kend/detik)

μ = Laju keluar kendaraan meninggalkan antrian (kend/detik)

I. Penelitian yang Relevan

Penelitian mengenai pengoptimalan sistem lampu lalu lintas untuk mengurangi kemacetan arus lalu lintas di persimpangan banyak dilakukan. Diantaranya memanfaatkan pemodelan graf kompatibel. Seperti yang dilakukan oleh Ririn Dwi Hardianti pada tahun 2013 dalam skripsi yang berjudul "*Penerapan Graf Kompatibel Pada Penentuan Waktu Tunggu Total Optimal Lampu Lalu Lintas di Persimpangan Jalan*". Pada penelitian tersebut menggunakan graf kompatibel untuk mengoptimalkan waktu tunggu total dengan pengaturan yang sudah diterapkan. Dalam perhitungan waktu tunggu optimal tersebut yang dilihat hanya dari satu variabel yaitu waktu. Selanjutnya Muhammad Fitrahadi Akbar pada tahun 2014 dalam tugas akhir skripsi yang berjudul "*Penerapan Graf Kompatibel Pada Penentuan Waktu Siklus dan Fase Eksisting Simpang Jambo Tape Kota Banda Aceh*". Metode penelitian yang digunakan yaitu metode graf kompatibel. Tujuan dari penelitian tersebut adalah menerapkan graf kompatibel pada waktu siklus eksisting masing-masing lampu lalu lintas.