

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Transportasi

2.1.1 Pengertian Sistem Transportasi

Sistem transportasi dapat diartikan sebagai suatu kesatuan dari komponen yang saling mendukung dan bekerja sama dalam pengadaan pelayanan jasa transportasi yang melayani wilayah mulai dari tingkat lokal (desa dan kota) sampai ke tingkat nasional dan internasional (Miro, 2012).

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2013 tentang Jaringan Lalu Lintas dan Angkutan Jalan bahwa Ruang Lalu Lintas adalah prasarana yang diperuntukkan bagi gerak pindah kendaraan, orang, dan/atau barang yang berupa Jalan dan fasilitas pendukung.

Sistem transportasi adalah suatu bentuk keterkaitan dan keterkaitan antara penumpang atau barang, prasarana dan sarana transportasi yang berinteraksi dalam rangkaian perpindahan penumpang atau barang yang tercakup dalam suatu tatanan baik secara alami maupun rekayasa (buatan). Sistem transportasi bertujuan untuk mengoptimalkan proses transportasi penumpang dan barang dalam ruang dan waktu tertentu dengan mempertimbangkan berbagai faktor seperti keamanan, kenyamanan, keselamatan, kelancaran, serta efisiensi waktu dan biaya (Tamin, 1994)

2.2 Perlintasan Kereta Api

Perlindungan kereta api adalah persilangan antara jalur kereta api dengan jalan, baik jalan raya maupun jalan kecil lainnya. Persilangan bisa terdapat di pedesaan ataupun perkotaan. Perlindungan terdiri dari perlindungan sebidang dan perlindungan tak sebidang. Perlindungan tak sebidang adalah perlindungan antara jalur kereta api dengan jalan raya yang tidak pada satu bidang, misal dengan *flyover* atau *underpass* (Asfiati, Sri Mutiara, 2020)

Perlindungan kereta memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan transportasi dan keselamatan lalu lintas. Perlindungan yang tidak aman dapat mengakibatkan kecelakaan serius. Oleh karena itu, perlindungan kereta api harus dirancang dan diatur dengan cermat, termasuk penggunaan pintu perlindungan, sinyal

perlintasan, dan tanda-tanda peringatan untuk meminimalkan risiko. Persyaratan Pembangunan perlintasan sebidang antara lain :

1. Permukaan jalan tidak boleh lebih tinggi atau lebih rendah dengan kepala rel, toleransi 0,5 cm
2. Terdapat permukaan dapat sepanjang 60 cm diukur dari sisi terluar jalan rel
3. Maksimum gradien untuk dilewati kendaraan dihitung dari titik tertinggi di kepala rel adalah :
 - a. Sebesar 2% diukur dari sisi terluar permukaan datar sebagaimana dimaksud dalam butir 2 untuk jarak 9,4 meter.
 - b. Sebesar 10% untuk 10 meter berikutnya dihitung dari titik terluar sebagaimana dimaksud dalam butir 1 sebagai gradien peralihan.
4. Lebar perlintasan untuk satu jalur maksimum 7 meter
5. Sudut perpotongan antara rel dengan jalan raya sekurang-kurangnya 90 derajat dan panjang jalan yang lurus minimal harus 150 meter dari jalan rel
6. Harus dilengkapi rel lawan atau konstruksi lain untuk tetap menjamin adanya alur untuk roda kereta
7. Ruas jalan yang dapat dibuat perlintasan sebidang antara jalan dengan jalan kereta api mekrunyai persyaratan sebagai berikut:
 - a. Jalan kelas III
 - b. Jalan sebanyak-banyaknya 2 lajur 2 arah
 - c. Tidak pada tikungan jalan dan atau alinement horizontal yang memiliki radius sekurang-kurangnya 500 meter
 - d. Tingkat kelandaian kurang dari 5% dari titik terluar jalan rel
 - e. Memenuhi jarak pandang bebas
 - f. Sesuai dengan Rencana Umum Tata Ruang (RUTR)

2.3 Karakteristik Arus Lalu Lintas

Arus lalu lintas adalah jumlah kendaraan yang melewati suatu titik di jalan dalam jangka waktu tertentu, dengan mekrertimbangkan arah dan jalur yang berbeda. Satuan pengukuran arus lalu lintas adalah kendaraan per waktu atau kendaraan per smp/waktu.

Arus lalu lintas terbentuk dari pergerakan individu pengendara dan kendaraan yang berinteraksi satu sama lain di sepanjang jalan dan lingkungan

sekitarnya. Karena setiap pengemudi memiliki karakteristik yang berbeda, maka perilaku arus lalu lintas tidak dapat seragam. Selanjutnya, berbagai perilaku pengemudi atau kebiasaan mereka akan memengaruhi karakteristik arus lalu lintas. Arus lalu lintas di suatu jalan akan bervariasi dalam hal karakteristiknya, baik berdasarkan lokasi maupun waktu, yang secara langsung memengaruhi perilaku arus lalu lintas.

Dalam menggambarkan arus lalu lintas secara kuantitatif dalam rangka untuk mengerti tentang keragaman karakteristiknya dan rentang kondisi perilakunya, maka perlu suatu parameter. Parameter tersebut harus dapat didefinisikan dan diukur oleh insinyur lalu lintas dalam menganalisis, mengevaluasi, dan melakukan perbaikan fasilitas lalu lintas berdasarkan parameter dan pengetahuan pelakunya (Clarkson H. Oglesby; R. Gary Hicks, 1988).

2.3.1 Parameter yang Berhubungan dengan Karakteristik Lalu Lintas

Menurut Sundana, G (2004) Karakteristik arus lalu lintas dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu faktor manusia (sebagai pengemudi kendaraan dan pejalan kaki), faktor kendaraan, dan faktor jalan. Faktor-faktor tersebut memberikan variasi terhadap arus lalu lintas setiap kondisi dan keadaan, sehingga diperlukan parameter yang dapat menunjukkan kondisi ruas jalan atau yang akan dipakai untuk dasar perencanaan. Parameter tersebut adalah volume, kecepatan, dan kepadatan.

2.3.1.1 Arus dan Volume

Arus lalu lintas (*traffic flow*) adalah jumlah kendaraan yang melintasi suatu titik pada seggal jalan tertentu pada interval waktu tertentu dan diukur dalam satuan kendaraan persatuan waktu tertentu. Sedangkan volume adalah jumlah kendaraan yang melintasi suatu ruas jalan pada periode waktu tertentu diukur dalam satuan kendaraan persatuan waktu yang dapat di ekspresikan dalam tahunan, harian, jam jaman atau sub jam.

Menurut (Ofyar Z. Tamin, 2008) hubungan matematis antara kecepatan, kerapatan, dan volume lalu lintas dinyatakan dengan persamaan

$$V = D \times U_s$$

Dimana,

$$V = \text{Volume (kend/jam)}$$

D = Kerapatan (kend/km)

Us = Kecepatan (km/jam)

Analisis volume lalu lintas dilakukan dalam satuan skr/jam dengan melakukan konversi volume lalu lintas hasil survei lapangan dalam satuan kend/jam menggunakan faktor ekr tiap jenis kendaraan bermotor seperti persamaan berikut :

Dimana:

$$V = [(ekrKR \times KR) + (ekrKB \times KB) + (EksSM \times SM)] \quad (2.1)$$

V = Jumlah arus atau volume kendaraan (skr/jam)

ekr = Ekivalensi Kendaraan Ringan

KR = Kendaraan Ringan

KB = Kendaraan berat

SM = Sepeda motor

2.3.1.2 Kecepatan (Speed)

Kecepatan (*Speed*) lalu lintas, dinyatakan dengan notasi S adalah jarak yang dapat ditempuh oleh sebuah kendaraan dalam satu satuan waktu tertentu, biasa dinyatakan dalam satuan km/jam (Ofyar Z. Tamin, 2008) Kecepatan dirumsukan sebagai berikut:

$$Us = \frac{L}{(t_2 - t_1)} \quad (2.2)$$

Dimana:

Us = Kecepatan (km/jam)

L = Jarak (km)

(t1-t2) = Waktu untuk melintasi (detik)

Panjang Lintasan Pengamatan yang dianjurkan oleh Direktorat Jenderal Perhubungan Darat, 1990.

Tabel 2.1 Panjang lintasan yang dianjurkan untuk pengamatan

Kecepatan rata-rata arus lalu lintas (km/jam)	Panjang Lintasan (m)
< 40	25 - 30
40 – 65	50 – 60
> 65	75 - 90

Sumber: Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia 2014

Dalam pergerakan arus lalu lintas, tiap kendaraan berjalan pada kecepatan yang berbeda. Dengan demikian dalam arus lalu lintas tidak dikenal kecepatan tunggal tetapi lebih dikenal sebagai distribusi dari kecepatan kendaraan tunggal. Dari distribusi tersebut jumlah rata-rata atau nilai tipikal dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dari arus lalu lintas.

2.3.1.3 Kepadatan (*Density*)

Kepadatan didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang menempati suatu panjang jalan atau lajur, secara umum diekspresikan dalam kendaraan per kilometer. Kepadatan sulit diukur secara langsung di lapangan, melainkan dihitung dari nilai kecepatan dan arus sebagai hubungan sebagai berikut

$$V = D \cdot U_s \quad (2.3)$$

$$D = \frac{V}{U_s} \quad (2.4)$$

Dimana :

V = Arus atau Volume (skr/jam)

U_s = Kecepatan rata-rata ruang (km/jam)

d = Kepadatan (skr/km)

2.3.2 Pengelompokan Jenis Kendaraan

Dalam PKJI 2023 yang disebut sebagai unsur lalu lintas adalah benda atau penjalan kaki yang menjadi bagian dari lalu lintas. Sedangkan kendaraan adalah unsur lalu lintas diatas roda. Sebagai unsur lalu lintas yang paling berpengaruh dalam analisis, kendaraan dikategorikan menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Kendaraan Ringan (KR)

Kendaraan bermotor beroda beroda ekrat, dnegan dua gandar berjarak 2-3 m (termasuk kendaraan penumpang, opelet, mikro bis, angkot, pickup, dan truk kecil)

2. Kendaraan Berat (KB)

Kendaraan bermotor dengan jarak as lebih dari 3,5 m biasanya beroda lebih dari ekrat (bis, dan truk besar atau kontainer)

3. Sepeda Motor (SM)

Kendaraan bermotor dengan dua atau tiga roda (termasuk sepeda motor, kendaraan roda tiga).

2.4 Hubungan antara Volume, Kecepatan dan Kepadatan

Volume, kecepatan dan kepadatan merupakan tiga variable/parameter utama (makroskopis) dalam aliran lalu lintas yang digunakan untuk mengetahui arus lalu lintas.

1. Volume (flow), merupakan jumlah kendaraan yang melewati suatu titik tertentu pada suatu ruas jalan per satuan waktu tertentu yang dinyatakan dalam skr/jam.
2. Kecepatan (speed), adalah tingkat gerakan di dalam suatu jarak tertentu dalam satu satuan waktu yang dinyatakan dengan kilometer/jam.
3. Kepadatan (density), merupakan jumlah kendaraan yang menekrati suatu ruas/segmen jalan tertentu yang dinyatakan dalam skr/kilometer.

Hubungan antara ketiga parameter di atas selanjutnya dapat dinyatakan dalam hubungan matematis sebagai berikut:

$$V = D \cdot U_s \quad (2.5)$$

Dimana:

V = Volume (skr/jam)

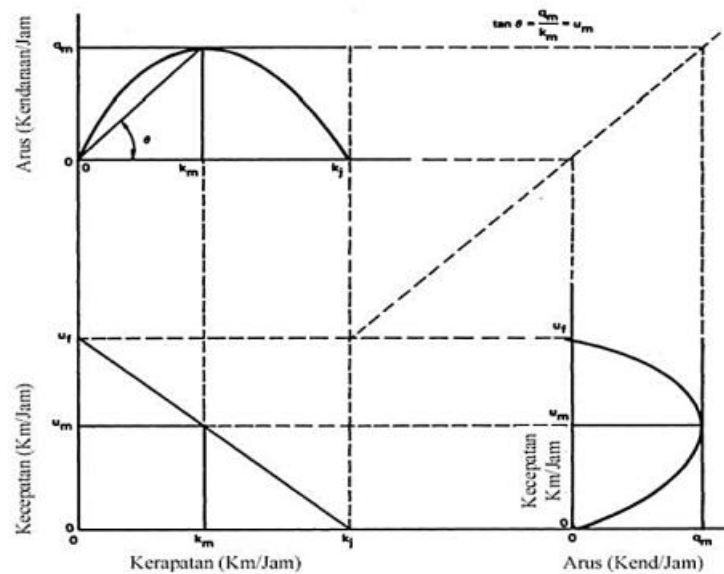
U_s = Kecepatan (km/jam)

D = Kepadatan (skr/km)

Persamaan Persamaan di atas hanya berlaku untuk arus lalu lintas tak terganggu, dimana setiap arus bergerak secara bebas tidak ada pengaruh dari luar. Contoh aliran ini dapat dilihat pada arus lalu lintas jalan utama dari jalan bebas hambatan.

Hubungan antara ketiga parameter tersebut menggambarkan tentang aliran lalu lintas tak terinterupsi (uninterrupted traffic stream), dimana volume merupakan hasil dari kecepatan dan kepadatan. Sementara itu hubungan tersebut untuk lalu lintas yang stabil, kombinasi variabel yang menghasilkan hubungan dua dimensi.

Gambar di bawah mengilustrasikan tentang bentuk umum hubungan volume, kecepatan dan kepadatan.



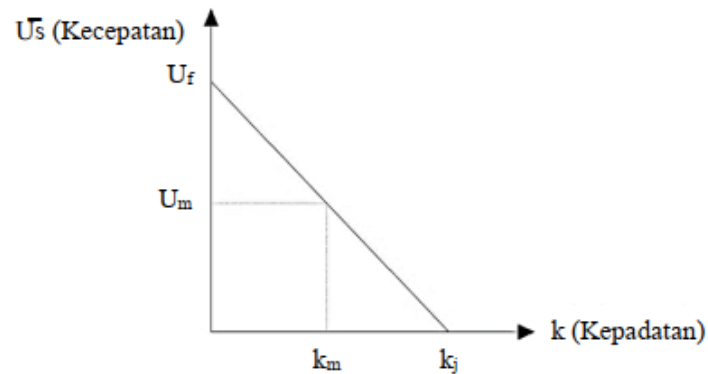
Gambar 2. 1 Grafik Hubungan Volume, Kecepatan dan Kepadatan
Sumber: Tamin, 2008

Keterangan:

- q_m = Kapasitas, arus maksimum (skr/jam)
- U_m = Kecepatan kritis, kecepatan pada kondisi arus maksimum (km/jam)
- K_m = Kepadatan Kritis, kepadatan pada kondisi arus maksimum (skr/jam)
- K_j = Kepadatan pada kondisi arus macet total (skr/km)
- U_f = Kecepatan pada kondisi arus sangat rendah atau pada kondisi kepadatan mendekati nol, kecepatan arus bebas (km/jam)

Perlu diketahui, arus “nol” (tidak ada arus) terjadi dalam dua kondisi. Ketika tidak ada kendaraan di jalan raya berarti kepadatannya nol, kecepatan teoritis didasarkan pada “kecepatan arus bebas” yang merupakan kecepatan tertinggi bagi kendaraan yang sendirian. Namun demikian, arus “nol” juga terjadi ketika kepadatan begitu tinggi sehingga kendaraan yang akan bergerak harus berhenti menyebabkan terjadinya kemacetan lalu lintas yang disebut istilah *traffic jam*. Pada kondisi ini, semua kendaraan berhenti sehingga tidak ada kendaraan yang lewat pada suatu ruas jalan tersebut.

2.4.1 Hubungan antara Kecepatan dan Kepadatan

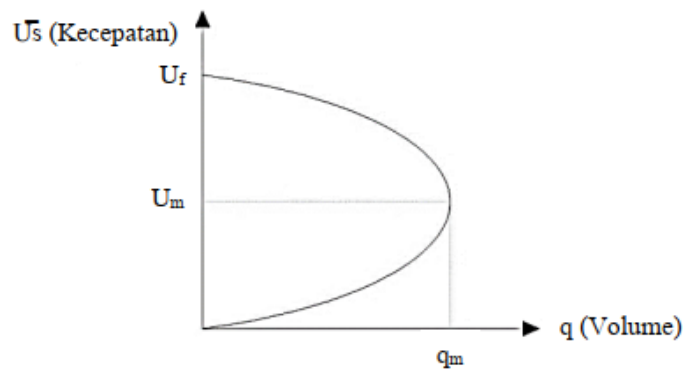


Gambar 2. 2 Grafik Hubungan antara Kecepatan dan Kepadatan

Sumber: Tamin, 2008

Kurva ini merupakan diagram yang menjadi dasar penggambaran aliran lalu lintas. Dari kurva terlihat bahwa kecepatan akan menurun apabila kepadatan bertambah. Kecepatan arus bebas (U_f) akan terjadi apabila kepadatan sama dengan nol, sedangkan pada saat kecepatan sama dengan nol maka terjadi kemacetan (*density*).

2.4.2 Hubungan antara Volume dan Kecepatan



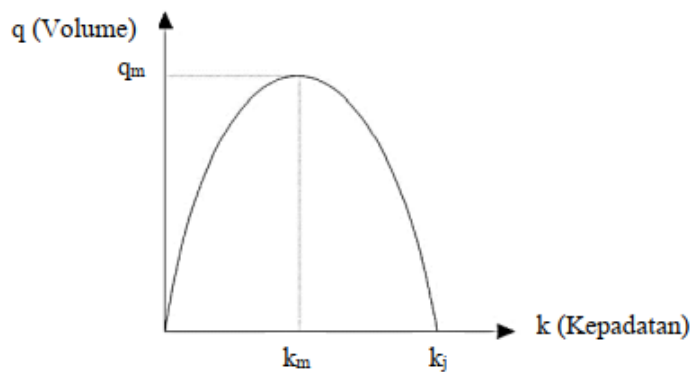
Gambar 2. 3 Grafik Hubungan antara Volume dan Kecepatan

Sumber: Tamin, 2008

Dari kurva terlihat bahwa hubungan mendasar antara volume dan kecepatan adalah dengan bertambahnya volume lalu lintas maka kecepatan rata-rata ruangnya akan berkurang sampai kepadatan kritis (volume maksimum) tercapai. Setelah kepadatan kritis tercapai, maka kecepatan rata-rata ruang dan volume akan

berkurang. Jadi kurva ini menggambarkan dua kondisi yang berbeda dimana lengan atas untuk stabil sedangkan lengan bawah menunjukkan kondisi lalu lintas yang padat.

2.4.3 Hubungan antara Volume dan Kepadatan



Gambar 2. 4 Grafik Hubungan antara Volume dan Kepadatan

Sumber: Tamin, 2008

Dari kurva akan terlihat bahwa kepadatan akan bertambah apabila volumenya juga bertambah. Volume maksimum (q_m) terjadi pada saat kepadatan mencapai titik k_m (kepadatan pada saat arus maksimum). Setelah mencapai titik ini volume akan menurun walaupun kepadatan bertambah sampai terjadi kemacetan di titik k_j .

2.4.4 Perhitungan Volume, Kecepatan dan Kepadatan

1. Perhitungan Volume

Volume kendaraan adalah Volume kendaraan adalah parameter yang menjelaskan keadaan arus lalu lintas di jalan. Kendaraan yang melewati suatu ruas jalan dijumlahkan dengan mengalikan faktor konversi kendaraan yang telah ditetapkan sehingga nantinya diperoleh jumlah kendaraan yang lewat pada ruas jalan tersebut. Nilai tersebut kemudian dikonversikan ke dalam skr/jam untuk mendapatkan nilai volume kendaraan yang lewat setiap jamnya.

2. Perhitungan Kecepatan

Kecepatan merupakan laju pergerakan yang ditandai dengan besaran yang menunjukkan jalan yang ditempuh kendaraan kemudian dibagi dengan waktu tempuh. Kecepatan dapat didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$U_s = \frac{x}{t} \quad (2.6)$$

Dimana:

U_s = Kecepatan (km/jam)

x = Jarak tempuh kendaraan (km)

t = Waktu tempuh kendaraan (jam)

Kecepatan kendaraan pada suatu bagian jalan akan berubah-ubah menurut waktu dan besarnya lalu lintas. Ada dua hal penting yang perlu diperhatikan dalam menilai hasil studi kecepatan, yaitu:

- Space-mean speed* (U_s), menyatakan kecepatan rata-rata kendaraan dalam suatu bagian jalan pada suatu interval waktu tertentu dinyatakan dalam km/jam
- Time-mean speed* (U_t), menyatakan kecepatan rata-rata kendaraan yang melewati suatu titik dalam interval waktu tertentu yang dinyatakan dalam km/jam

Space-mean speed dan *time-mean speed* dapat dihitung dari pengukuran waktu tempuh dan jarak menurut rumus berikut:

$$U_t = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x}{t_i}}{n}$$

$$U_t = \frac{x \cdot n}{n \sum_{i=1}^n t_i} \text{ atau } U_t = \frac{x}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i} \quad (2.7)$$

Dimana:

U_t = *Time-mean speed* (km/jam)

U_s = *Space-mean speed* (km/jam)

x = Jarak tempuh (km)

t_i = Waktu tempuh kendaraan (jam)

n = Jumlah kendaraan yang diamati

Kedua jenis kecepatan di atas sangat berguna dalam studi mengenai hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan. Penggunaan rumus di atas dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 2.2 Contoh perhitungan kecepatan rata-rata

No. Kendaraan	Jarak (meter)	Waktu Tempuh (detik)	Kecepatan (km/jam) x 3.6
1	100	4,0	90
2	100	7,2	50
3	100	6,0	60
4	100	7,2	50
5	100	4,0	90
6	100	4,0	90
Total	600	32,4	860
Rata - rata		2,7	71.67
Ut = 71.67 km/jam Us = 66,67 km/jam			

Sumber: Fitri Lestari (2022). Tugas Akhir

Disebabkan karena sampel data yang diambil adalah terbatas pada periode waktu tertentu pada suatu titik dan harus mengikutsertakan beberapa kendaraan yang berjalan cepat, akan tetapi pada saat pengambilan data dilaksanakan kendaraan yang berjalan lambat juga harus diikutsertakan. Oleh karena itu, pendekatan antara kecepatan setempat dan kecepatan arat-rata ruang digunakan persamaan berikut:

$$Us = Ut - \frac{\sigma t^2}{Ut} \quad (2.8)$$

Dimana:

Σt = Deviasi standar dari kecepatan setempat.

3. Perhitungan Kepadatan

Kepadatan merupakan parameter yang menjelaskan keadaan lalu lintas dimana terdapat banyaknya jumlah kendaraan yang menekrati suatu panjang ruas tertentu. Nilai kepadatan dapat dihitung jika nilai volume dan kecepatan kendaraan telah diperoleh sebelumnya.

2.5 Pemodelan Hubungan antara Volume, Kecepatan, dan Kepadatan

Analisis untuk suatu ruas jalan didasarkan pada hubungan antara ketiga variable parameter, yaitu volume, kecepatan dan kepadatan lalu lintas dalam keadaan jalan lalu lintas yang ideal. Hubungan tersebut mengikuti definisi dari kriteria tingkat pelayanan didasarkan pada faktor penyesuaian untuk kendaraan yang tidak sejenis. Terdapat tiga pemodelan yang sering digunakan untuk menyatakan keterkaitan ketiga parameter tersebut, yaitu model *Greenshield* dan *Greenberg*.

2.5.1 Model Greenshield

Pemodelan ini merupakan model paling awal yang menerangkan hubungan antara volume lalu lintas (V), kecepatan (U_s), dan kepadatan (D). *Greenshield* mengadakan studi pada jalun jalan di kota Ohio, dimana kondisi lalu lintas memenuhi syarat karena tanpa gangguan dan bergerak secara bebas (*steady state condition*). *Greenshield* mendapat hasil bahwa hubungan antara kecepatan dan kepadatan bersifat linear. Berdasarkan penelitian-penelitian selanjutnya, terdapat hubungan yang era tantara model linear dengan keadaan data di lapangan. Hubungan linear antara kecepatan dan kepadatan ini menjadi hubungan yang paling sederhana sehingga mudah diterapkan.

Pada prinsipnya, pemakaian model *Greenshield* ini memerlukan pengetahuan tentang parameter-parameter kecepatan arus bebas (U_f) dan kepadatan macet (D_j) dalam menyelesaikan secara numerik hubungan kecepatan dan kepadatan. Kecepatan arus bebas relative mudah di estimasi di lapangan dan umumnya bernilai antara kecepatan batas dan kecepatan rencana.

Perhitungan kepadatan pergerakan lalu lintas, mengingat fungsi hubungannya adalah yang paling sederhana sehingga mudah diterapkan. Adapun persamaan umum hubungan antara kecepatan dan kepadatan dengan cara regresi linear adalah sebagai berikut

$$Y_i = A + BX_i \quad (2.9)$$

Dengan diperolehnya persamaan $Y_i = A + BX_i$, maka hubungan antara kecepatan dan kepadatan dapat dirumuskan. Garis hasil persamaan ini akan memotong skala kecepatan pada U_f dan memotong skala kepadatan pada k_j . Oleh karena itu, persamaan garis yang didapat tersebut adalah sebagai berikut:

$$U_s = U_f - \frac{U_f}{D_j} \cdot D \quad (2.10)$$

$U_s = A + B \cdot k$ (Hubungan antara kecepatan – kepadatan)

Selanjutnya, hubungan matematis antara volume dengan kepadatan dapat diturunkan dengan menggunakan persamaan dasar $q = k \cdot \bar{U}_s$, dan selanjutnya dengan memasukkan persamaan $\bar{U}_s = V/D$ ke Persamaan (2.10), maka dapat diturunkan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} U_s &= \frac{V}{D} \\ \frac{V}{D} &= U_f - \frac{U_f}{D_j} \cdot D \\ V &= U_f \cdot D - \frac{U_f}{D_j} \cdot D^2 \text{ (Hubungan antara volume-kepadatan)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Kondisi arus maksimum (q_m) bisa didapat pada saat arus $k = k_m$. Nilai $k = k_m$ bisa didapat melalui persamaan dibawah ini :

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial U_s} &= U_f - \frac{2 \cdot k_j}{U_f} D_m = 0 \\ D_m &= \frac{D_j}{2} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dengan memasuki Persamaan (2.12) ke Persamaan, (2.11) maka nilai q_m bisa didapat seperti terlihat dalam persamaan (2.13)

$$V_m = \frac{D_j \cdot U_f}{4} \quad (2.13)$$

Selanjutnya, hubungan matematis antara volume dengan kecepatan dapat diturunkan menggunakan persamaan dasar $q = k \cdot \bar{U}_s$, dan dengan memasukkan persamaan $k = q/\bar{U}_s$ ke Persamaan (2.11) maka bisa didapatkan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} D &= \frac{V}{U_s} \\ U_s &= U_f - \frac{U_f}{D_j} \cdot \frac{V}{U_s} \\ \frac{U_f}{D_j} \cdot \frac{V}{U_s} &= U_f - U_s \\ V &= D_j \cdot U_s - \frac{D_j}{u_f} \cdot U_s^2 \text{ (Hubungan antara volume – Kecepatan)} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Kondisi arus maksimum (q_m) bisa didapat pada saat arus $\bar{U}_s = U_m$. Nilai $\bar{U}_s = U_m$ bisa didapat melalui persamaan di bawah ini:

$$\frac{\partial q}{\partial U_s} = Dj - \frac{2.kj}{U_f} \cdot U_m = 0$$

$$U_m = \frac{U_f}{2} \quad (2.15)$$

Dengan memasukkan Persamaan ke Persamaan maka nilai q_m bisa didapat seperti terlihat dalam persamaan

$$V_m = \frac{Kj \cdot U_f}{4} \quad (2.16)$$

Sehingga, dapat disimpulkan bahwa q_m dapat dicapai pada kondisi $\bar{U}_s = U_m$ dan $D = D_m$.

2.5.2 Model Greenberg

Hubungan ini dibuat dengan mengasumsikan bahwa arus lalu lintas mekrunyai kesamaan dengan arus fluida. Pada tahun 1959 *Greenberg* menyelidiki aliran arus lalu lintas yang dilakukan pada bagian utara terowongan Lincoln di kota New York dan menganalisa hubungan antara kecepatan dan kepadatan dengan mekrergunakan asumsi kontinuitas dari persamaan gerakan benda cair.

Greenberg merumuskan bahwa hubungan matematis antara kecepatan dan kepadatan bukan merupakan fungsi linear, melainkan fungsi eksponensial. Persamaan dasar model *Greenberg* adalah sebagai berikut:

$$K = C \cdot e^{b \cdot U_s} \quad (2.17)$$

Dimana: C dan b merupakan konstanta

Jika Persamaan dinyatakan dalam bentuk logaritma natural, maka persamaan tersebut dapat dinyatakan kembali sebagai Persamaan (2.18). Sehingga, hubungan matematis antara kecepatan dengan kepadatan selanjutnya dapat dinyatakan dalam Persamaan

$$\ln D = \ln C + b \cdot U_s \quad (2.18)$$

$$b \cdot U_s = \ln D - \ln C$$

$$U_s = \frac{\ln D}{b} - \frac{\ln C}{b} \text{ (Hubungan antara kecepatan-kepadatan)} \quad (2.19)$$

Selanjutnya, hubungan matematis antara volume dengan kepadatan dapat diturunkan dengan menggunakan persamaan dasar $V = D \cdot \bar{U}_s$, dan dengan memasukkan persamaan $\bar{U}_s = V/D$ ke Persamaan (2.19), maka bisa diturunkan persamaan berikut:

$$\frac{V}{D} = \frac{\ln D}{b} - \frac{\ln C}{b}$$

$$\frac{V}{D} = \frac{D \cdot \ln D}{b} - \frac{\ln C}{b} \quad (\text{Hubungan antara Volume -kepadatan}) \quad (2.20)$$

Kondisi arus maksimum (q_m) bisa didapat pada saat arus $k = k_m$. Nilai $k = k_m$ bisa didapat melalui persamaan di bawah ini:

$$\frac{\partial q}{\partial k} = \frac{(\ln km+1)}{b} - \frac{\ln C}{b} = 0$$

$$(\ln D_m + 1) = \ln C$$

$$D_m = e^{\ln C - 1}$$

$$(2.21)$$

Selanjutnya, hubungan matematis antara volume dengan kecepatan dapat diturunkan menggunakan persamaan dasar $V = D \cdot \bar{U}_s$. Dengan memasukkan persamaan $k = q / \bar{U}_s$ ke Persamaan, maka bisa diturunkan persamaan berikut:

$$\frac{V}{U_s} = C \cdot e^{b \cdot U_s}$$

$$V = U_s \cdot C \cdot e^{b \cdot U_s} \quad (\text{Hubungan antara volume-kecepatan}) \quad (2.22)$$

Kondisi arus maksimum (V_m) bisa didapat pada saat arus $\bar{U}_s = U_m$. Nilai $\bar{U}_s = V_m$ bisa didapat melalui persamaan di bawah ini:

$$\frac{\partial q}{\partial k} = C \cdot e^{b \cdot U_s} + U_s \cdot C \cdot b \cdot e^{b \cdot U_s} = 0$$

$$e^{b \cdot U_s} (1 + U_s \cdot b) = 0$$

$$V_m = - \frac{1}{b}$$

2.6 Pengujian Statistik

2.6.1 Analisis Regresi Linear

Pemodelan volume lalu lintas yang umum digunakan untuk menentukan karakteristik kecepatan dan kepadatan adalah regresi linear. Analisa ini dilakukan dengan meminimalkan total nilai perbedaan kuadratis antara observasi dan nilai perkiraan dari variabel yang tidak bebas (*dependent*). Bila variabel tidak bebas linear terhadap variabel bebas, maka hubungan dari kedua variabel itu dikenal dengan analisa regresi linear.

Bila variabel tidak bebas Y dan variabel bebas X mempunyai hubungan linear, maka fungsi regresinya:

$$Y_i = A + BX_i \quad (2.24)$$

Besarnya konstanta A dan B dapat dicari dengan persamaan-persamaan di bawah ini:

$$B = \frac{N \sum_{i=1}^N (X_i Y_i) - \sum_{i=1}^N X_i \cdot \sum_{i=1}^N Y_i}{N \sum_{i=1}^N (X_i)^2 - \sum_{i=1}^N (X_i)^2} \quad (2.25)$$

$$A = Y - BX \quad (2.26)$$

Dimana:

- A = Konstanta regresi
- B = Konstanta regresi
- X_i = Variabel bebas
- Y_i = Variabel tidak bebas
- N = Jumlah sampel

2.6.2 Analisis Korelasi

Analisis korelasi digunakan untuk menentukan kuatnya hubungan antara peubah bebas dan tidak bebas yang dinyatakan dengan nilai koefisien korelasi r . Nilai koefisien korelasi bervariasi antara -1 sampai +1 ($-1 < r < +1$). Apabila nilai koefisien sama dengan 0 (nol), maka dikatakan tidak terdapat korelasi antara peubah bebas dan peubah tidak bebas, sedangkan apabila nilai koefisien korelasi sama dengan 1 (satu) dikatakan mempunyai hubungan yang sempurna. Nilai koefisien korelasi dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (2.27)$$

Sebagai koefisien penentu digunakan koefisien determinasi (r^2) yang dihitung dengan mengkuadratkan nilai koefisien korelasi. Koefisien korelasi r ini perlu memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

- a. Koefisien korelasi harus besar apabila kadar hubungan tinggi atau kuat dan harus kecil apabila kadar hubungan itu kecil atau lemah.
- b. Koefisien korelasi harus bebas dari satuan yang digunakan untuk mengukur variabel-variabel, baik prediktor maupun respon.

2.7 Ekivalen Kendaraan Ringan

Ekivalensi Kendaraan Ringan (EKR) adalah konsep yang digunakan dalam perencanaan transportasi untuk mengukur sejauh mana penggunaan berbagai mode transportasi, seperti sepeda, kendaraan umum, atau pejalan kaki, setara dengan penggunaan mobil penumpang dalam hal penggunaan jalan raya, penggunaan ruang, dan dampak lingkungan. Konsep ini membantu untuk membandingkan dampak dari berbagai mode transportasi berdasarkan sejumlah faktor, seperti kapasitas, efisiensi energi, polusi, dan kepadatan penggunaan jalan,

Dalam PKJI 2023 definisi satuan mobil penumpang dan ekivalensi mobil penumpang adalah sebagai berikut:

- a. Satuan Mobil Penumpang, yaitu satuan arus lalu lintas, dimana arus dari berbagai tipe kendaraan telah diubah menjadi Kendaraan Ringan (termasuk mobil penumpang) dengan menggunakan ekr.
- b. Ekivalensi kendaraan ringan, yaitu faktor konversi berbagai jenis kendaraan dibandingkan dengan mobil penumpang atau Kendaraan Ringan lainnya sehubungan dengan dampaknya pada perilaku lalu lintas (untuk mobil penumpang dan Kendaraan Ringan lainnya, $ekr = 1$).

Untuk memudahkan perhitungan, jenis kendaraan yang sangat beragam pada kehidupan nyata dapat disederhanakan dengan mengklasifikannya kepada kelompok utama kendaraan menurut PKJI 2023 meliputi:

1. Kendaraan Ringan (KR) atau Kendaraan Ringan (KR)
Kendaraan bermotor ber as dua dengan ekrat roda dan dengan jarak as 2,0 – 3,0 m. Kendaraan ini meliputi mobil penumpang, oplet, mikrobis, *pick-up*, dan truk kecil sesuai sistim klasifikasi Bina Marga.
2. Kendaraan Berat (KB) atau Kendaraan Berat(KB)
Kendaraan bermotor dengan lebih dari 4 roda. Kendaraan ini meliputi bis, truk 2 as, truk 3 as dan truk kombinasi sesuai sistim klasifikasi Bina Marga
3. Sepeda Motor (SM) atau Sepeda Motor (SM)
Kendaraan bermotor dengan 2 atau 3 roda. Kendaraan ini meliputi sepeda motor dan kendaraan roda 3 sesuai sistim klasifikasi Bina Marga
4. Kendaraan tak bermotor atau Unmotorized Vehicle (UM)

Kendaraan dengan roda yang digerakan oleh orang atau hewan. Kendaraan ini meliputi sepeda, becak, kereta kuda, dan kereta dorong sesuai sistim klasifikasi Bina Marga.

Catatan: Dalam manual ini kendaraan tak bermotor tidak dianggap sebagai bagian arus lalu lintas tetapi sebagai unsur hambatan samping.

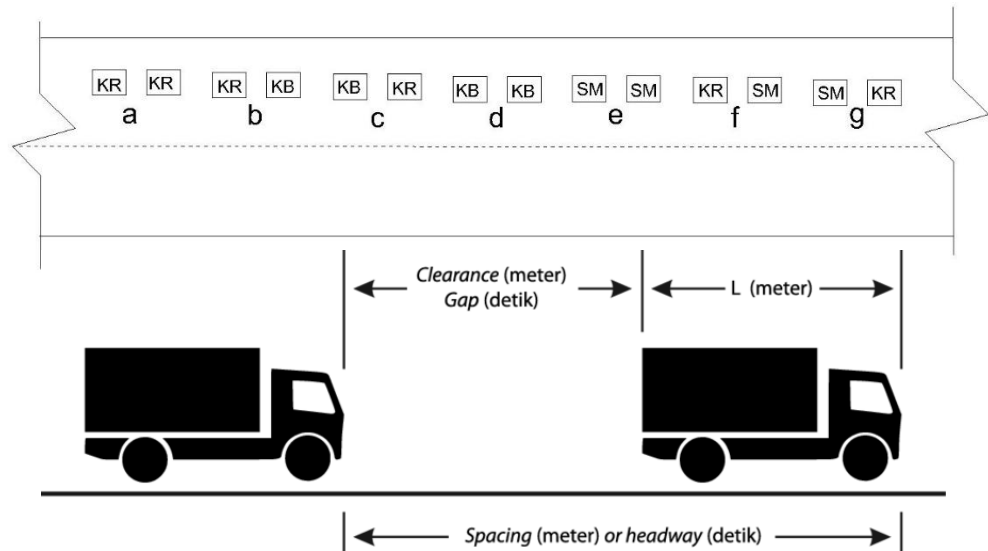
2.7.1 Metode Rasio *Headway*

Metode rasio headway adalah salah satu teknik yang digunakan dalam analisis lalu lintas untuk menentukan nilai ekr kendaraan, serta mengukur tingkat ketidak beraturan atau ketidak pastian dalam aliran lalu lintas. Metode ini berguna untuk mengidentifikasi variabilitas dalam jarak antara kendaraan yang melintas pada jalan raya (Shalter, 1983) menerangkan dalam bukunya *Highway Traffic Analysis and Design* cara menentukan nilai ekr adalah dengan mencatat waktu antara kendaraan yang beraturan saat kendaraan tersebut melewati suatu titik pengamatan yang telah ditentukan

Catatan waktu antara kendaraan yang diperlukan mencakup 7 macam kombinasi, yaitu:

1. Kendaraan Ringan (KR) diikuti Kendaraan Ringan (KR)
2. Kendaraan Ringan (KR) diikuti Kendaraan Berat (KB)
3. Kendaraan Berat (KB) diikuti Kendaraan Ringan (KR)
4. Kendaraan Berat (KB) diikuti Kendaraan Berat (KB)
5. Sepeda Motor (SM) diikuti Sepeda Motor (SM)
6. Kendaraan Ringan (KR) diikuti Sepeda Motor (SM)
7. Motor Cychle (SM) diikuti Kendaraan Ringan (KR)

Berikut ini merupakan ilustrasi perhitungan *time headway*



Gambar 2. 5 Ilustrasi Perhitungan Rasio *Headway*

Keterangan:

KR = Kendaraan Ringan

KB = Kendaraan Berat

SM = Sepeda Motor

a = pencatatan rasio *headway* antara KR dengan KR yang berurutan

b = pencatatan rasio *headway* antara KR dengan KB yang berurutan

c = pencatatan rasio *headway* antara KB dengan KR yang berurutan

d = pencatatan rasio *headway* antara KB dengan KB yang berurutan

e = pencatatan rasio *headway* antara SM dengan SM yang berurutan

f = pencatatan rasio *headway* antara KR dengan SM yang berurutan

g = pencatatan rasio *headway* antara SM dengan KR yang berurutan

Nilai EKR KB dapat dihitung dengan cara membagi nilai rata-rata *time headway* kombinasi KB – KB dengan nilai rata-rata rasio *headway* kombinasi KR – KR. Hasil akan benar apabila rasio *headway* KB tidak tergantung pada kendaraan yang mendahului maupun mengikutinya. Kondisi ini didapat jika jumlah rata-rata *time headway* KR – KR ditambah rata-rata *time headway* KB – KB sama dengan jumlah rata-rata *time headway* KR – KB ditambah rata-rata *time headway* KB – KR.

Hal diatas dapat ditulis sebagai berikut:

$$ta + td = tb + tc \quad (2.28)$$

dengan:

ta = nilai rata-rata rasio *headway* KR – KR

tb = nilai rata-rata rasio *headway* KR – KB

tc = nilai rata-rata rasio *headway* KB – KR

td = nilai rata-rata rasio *headway* KB – KB

Mencapai kondisi yang sesuai dengan persamaan di atas akan menjadi sulit karena setiap kendaraan memiliki ciri-ciri yang berbeda. Begitu pula, kemampuan pengemudi dalam mengemudi sangat bervariasi. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian atau koreksi terhadap nilai rata-rata rasio *headway* sebagai berikut:

$$\left[ta - \frac{k}{na} \right] + \left[td - \frac{k}{nd} \right] = \left[tb - \frac{k}{nb} \right] + \left[tc - \frac{k}{nc} \right]$$

$$k = \frac{na.nb.nc.nd.[ta+td-tb-tc]}{na.nb.nc+na.nb.nd+na.nc.nd+nb.nc.nd} \quad (2.29)$$

Dengan :

na = jumlah data *time headway* KR – KR

nb = jumlah data *time headway* KR – KB

nc = jumlah data *time headway* KB – KR

nd = jumlah data *time headway* KB – KB

Dengan menggunakan nilai rata-rata *time headway* yang sudah dikoreksi maka :

$$ta_k + td_k = tb_k + tc_k \quad (2.30)$$

Dengan:

ta_k = nilai rata-rata *time headway* KR – KR terkoreksi

tb_k = nilai rata-rata *time headway* KR – KB terkoreksi

tc_k = nilai rata-rata *time headway* KB – KR terkoreksi

td_k = nilai rata-rata *time headway* KB – KB terkoreksi

Jika persamaan tersebut memenuhi syarat, maka nilai ekr KB dapat dihitung dengan persamaan :

$$emp\ KB = \frac{td_k}{ta_k} \quad (2.31)$$

Untuk mencari nilai ekr SM dapat digunakan persamaan-persamaan seperti mencari ekr KB, namun variable KB diganti dengan variabel SM

2.7.2 Tinjauan Statistik Rasio *Headway*

Dalam memperoleh nilai arus lalu lintas yang menunjukkan penyebaran yang cenderung merata, diperlukan analisis statistik. Analisis statistik ini penting untuk menggambarkan berbagai kemungkinan nilai yang dapat muncul secara acak dalam jumlah yang signifikan. Dalam penelitian ini, digunakan distribusi normal. Distribusi normal, juga dikenal sebagai distribusi Gaussian, merupakan salah satu distribusi teoritis yang diterapkan pada variabel acak yang bersifat kontinu. Ketika data sampel dianggap cukup besar, nilai rata-rata digambarkan sebagai $\bar{x}$ dan varians disimbolkan dengan δ^2 . Penggunaan distribusi normal menjadi relevan ketika jumlah sampel yang tersedia lebih besar atau setidaknya sama dengan 30 ($n > 30$)

Karena sampel dipilih acak dimungkinkan adanya suatu kesalan standar deviasi dari distribusi yang dinyatakan sebagai *standard error* (E) sebagai berikut:

$$E = \frac{s}{n^{0.5}} \quad (2.32)$$

Dengan:

E = *standar error*

s = Standar deviasi

n = jumlah sampel

dan standar deviasi sebagai berikut :

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.33)$$

Dengan:

n = jumlah sampel

x_i = nilai *time headway* ke-i

$\bar{x}$ = nilai rata-rata sampel *time headway*

untuk perkiraan nilai rata-rata *time headway* seluruh pasangan kendaraan dapat disesuaikan dengan tingkat konfidensi atau keyakinan yang diinginkan (*desired level of confidence*). Perkiraan ini terletak dalam suatu interval yang disebut interval keyakinan (*confidence interval*) yang mekrunyai batas toleransi kesalahan sebesar e :

$$e = K \cdot E \quad (2.34)$$

Nilai batas atas dan bawah *time headway* untuk distribusi normal ($n > 30$) :

$$\mu_{1,2} = \bar{x} \pm e \quad (2.35)$$

dengan :

K = tingkat konfidensi distribusi normal

$\mu_{1,2}$ = batas keyakinan atas dan bawah nilai rata-rata

$\bar{x}$ = nilai rata-rata *time headway*

e = batas toleransi kesalahan

Apabila sampel kurang dari 30 atau tidak sama dengan 30, maka perkiraan rata-rata *time headway* pasangan kendaraan secara keseluruhan sebaiknya dilakukan dengan distribusi t atau disebut juga distribusi student.

Dengan s standar deviasi :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.36)$$

2.7.3 Uji Kolmogorov-Smirnov

Uji *Kolmogorov-Smirnov* merupakan uji statistik nonparametrik yang digunakan untuk menguji kesesuaian antara distribusi data empiris dan distribusi teoritis tertentu. Uji ini dilakukan dengan membandingkan fungsi distribusi kumulatif empiris dengan fungsi distribusi kumulatif teoritis, yang dinyatakan dalam statistik uji D.

Menurut Smirnov (1948), uji *Kolmogorov-Smirnov* mengukur selisih maksimum antara fungsi distribusi kumulatif empiris dan fungsi distribusi kumulatif teoritis. Nilai selisih maksimum tersebut digunakan sebagai dasar dalam menilai kesesuaian suatu distribusi teoritis terhadap data empiris.

Pengambilan keputusan dalam uji Kolmogorov-Smirnov dapat dilakukan dengan membandingkan nilai statistik uji D dengan nilai kritis (D_{cr}) yang diperoleh dari tabel nilai kritis *Kolmogorov-Smirnov* pada tingkat signifikansi tertentu. Namun, Smirnov (1948) juga menyatakan bahwa dalam praktik pengujian, apabila nilai kritis tidak tersedia dalam tabel, maka keputusan pengujian dapat didasarkan pada pendekatan nilai probabilitas atau melalui perhitungan nilai kritis secara matematis.

Tabel 2.3 Nilai Kritis Kolmogorv-Smirnov pada Berbagai Tingkat Signifikansi

N	Level of Significance (α)				
	20%	15%	10%	5%	1%
1	0,900	0,925	0,95	0,975	0,995
2	0,684	0,726	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,642	0,708	0,829
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,734
5	0,446	0,474	0,51	0,563	0,669
6	0,41	0,436	0,47	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,4457	0,543
9	0,339	0,36	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,409	0,486
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,45
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,258	0,274	0,295	0,328	0,391
17	0,25	0,266	0,286	0,318	0,38
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,37
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,361
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,352
25	0,210	0,239	0,240	0,270	0,320

Apabila nilai kritis (D_{cr}) tidak tersedia dalam tabel Kolmogorov–Smirnov, maka pengambilan keputusan dapat dilakukan dengan menggunakan nilai signifikansi (*asymptotic significance*) atau dengan menghitung nilai D kritis menggunakan rumus pendekatan $D_{cr} = 1,36/\sqrt{n}$, dengan n merupakan jumlah sampel. Data dinyatakan sesuai dengan distribusi teoritis apabila nilai statistik uji D lebih kecil dari nilai D kritis atau nilai signifikansi lebih besar dari tingkat signifikansi yang ditetapkan.

2.8 Gelombang Kejut (*Shock Wave*)

Gelombang kejut didefinisikan sebagai batas kondisi berbasis ruang dan waktu ditandai dengan diskontinuitas antara arus padat dan tak padat (May, 1990). Sedangkan lighthill dan Whitham seperti dikutip dari (Wohl, 1967) menjelaskan bahwa gelombang kejut terbentuk ketika pada sebuah ruas jalan terdapat arus

dengan kerapatan rendah yang diikuti oleh arus dengan kerapatan tinggi, dimana kondisi ini mungkin diakibatkan oleh kecelakaan, pengurangan jumlah alur, atau jalur masuk *ramp*.

Gelombang kejut pada persimpangan jalan dan jalan rel terjadi pada kondisi perlintasan dibuka dan ditutup. Pertama akibat tertutupnya badan jalan dan yang kedua karena perlambatan sebagai akibat dari pengurangan kecepatan kendaraan di depan kelompok kendaraan (*platoon*) untuk mengurangi ketidaknyamanan saat melintasi jalur rel yang tidak rata.

Pada kondisi pertama yaitu saat penutupan pintu perlintasaan ketika ada kereta yang melintas, kendaraan mulai berhenti dan kerapatan bertambah, diskontinuitas terjadi ketika kendaraan bergabung dengan antrian dan pada saat kendaraan mulai bergerak dari bagian depan antrian pada saat pintu perlintasaan terbuka. Pada kondisi kedua yaitu pada saat kelompok kendaraan melintasi jalur rel, kendaraan di bagian depan mekrerlambat kecepatan sehingga terjadi peningkatan kerapatan dan setelah melewati jalur rel, kendaraan akan menambah kecepatan sehingga kerapatan berkurang.

2.8.1 Klasifikasi Gelombang Kejut

Menurut tamin (2008) gelombang kejut dapat diklasifikasikan menjadi 6 (enam) kelas yaitu:

1. Gelombang kejut diam depan (*frontal stationary shock wave*)
Terbentuk pada saat pintu perlintasaan kereta ditutup. Istilah depan berarti bagian terdepan dari daerah kemacetan mekrunyai kerapatan lebih rendah ke arah hilir dan lebih tinggi ke arah hulu. Istilah diam berarti gelombang kejut terjadi pada lokasi tersebut dan tidak akan berpindah dengan berubahnya waktu.
2. Gelombang kejut mundur bentukan (*backward forming shock wave*)
Terbentuk apabila terjadi kemacetan. Istilah ‘mundur’ berarti dengan berjalannya waktu, gelombang kejut akan bergerak ke belakang (ke arah hulu atau ke arah yang berlawanan dengan arah pergerakan lalu lintas. Istilah ‘bentukan’ berarti dengan berjalannya waktu, kemacetan akan semakin meningkat ke arah hulu.
3. Gelombang kejut maju pemulihan (*frontal recorvery shock wave*)

Istilah ‘maju’ berarti selama berjalannya waktu, gelombang kejut bergerak ke depan (ke arah hilir atau ke arah yang sama dengan arah pergerakan lalu lintas). Istilah ‘pemulihan’ berarti selama berjalannya waktu terdapat kondisi arus lalu lintas bebas (free-flow) pada daerah yang semakin jauh ke arah hilir.

4. Gelombang kejut diam belakang (*rear stationary shock wave*)

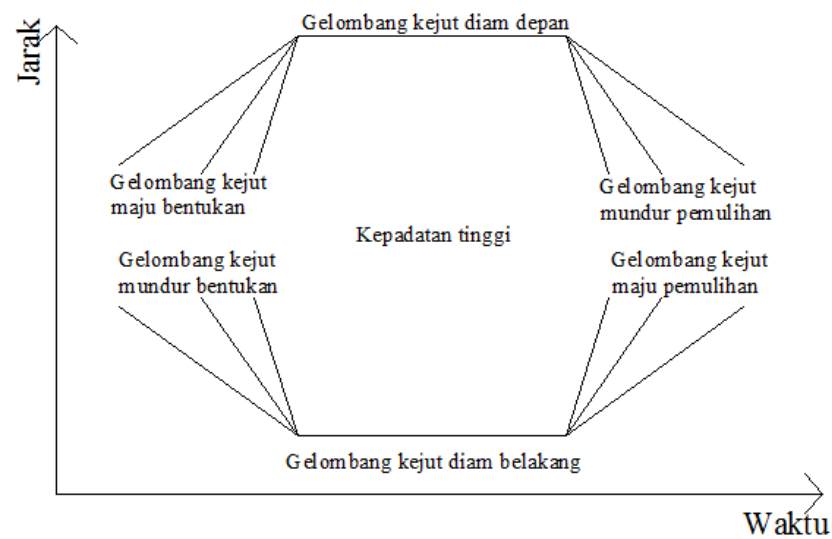
Terbentuk apabila arus kedatangan lalu lintas sama dengan kapasitas pada daerah kemacetan untuk rentang waktu tertentu. Istilah ‘diam’ berarti gelombang tidak berpindah lokasinya selama rentang waktu tertentu. Istilah ‘belakang’ berarti bagian paling belakang dari daerah kemacetan.

5. Gelombang kejut mundur pemulihan (*backward recovery shock wave*)

Terbentuk pada saat kemacetan terjadi dan kemudian terjadi peningkatan kapasitas jalan. Istilah ‘mundur’ berarti selama berjalannya waktu, gelombang kejut bergerak ke belakang (ke arah hulu atau ke arah yang berlawanan dengan arah pergerakan lalu lintas). Istilah ‘pemulihan’ berarti selama berjalannya waktu, kondisi arus-bebas (free-flow) meningkat semakin menjauh dari daerah kemacetan. Daerah kemacetan berada di sebelah kiri gelombang kejut dan kondisi arus bebas berada di sebelah kanannya.

6. Gelombang kejut maju bentukan (*forward forming shock wave*)

Istilah ‘maju’ berarti gelombang kejut bergerak ke arah yang sama dengan arah pergerakan lalu lintas, sedangkan istilah ‘bentukan’ berarti selama berlangsungnya waktu kemacetan terjadi peningkatan arus lalu lintas pada tekrat yang semakin jauh ke arah hilir

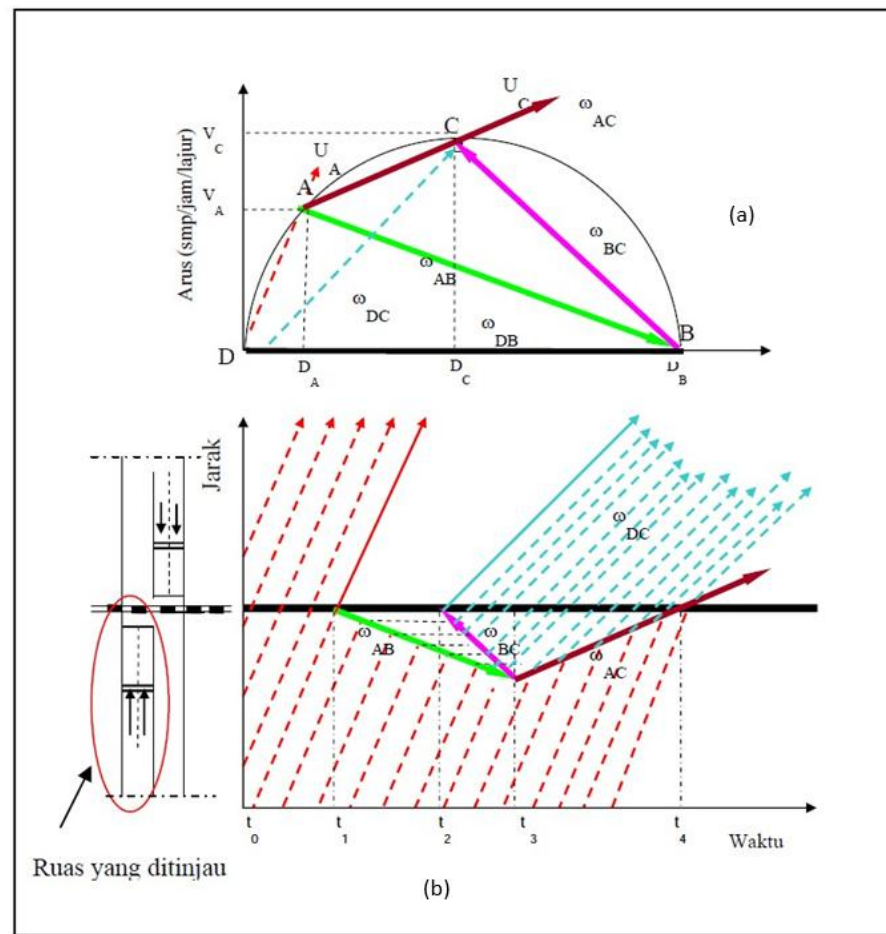


Gambar 2. 6 Klasifikasi Gelombang Kejut

2.8.2 Nilai Gelombang Kejut

Kondisi pada saat pintu perlintasan ditutup dapat digambarkan sebagai berikut:

1. Kondisi jalan tertutup total, kondisi ini terjadi saat kereta melintas dan pintu perlintasan ditutup. Akibatnya nilai kerapatan pada kondisi arus yang masuk ($\text{volume kebutuhan} = \text{demand}$) berangsur-angsur menjadi kerapatan macet. Kendaraan yang berada di depan kelompoknya mengurangi kecepatannya saat mendekati perlintasan, dan akhirnya berhenti sehingga terbentuk antrian di belakangnya.
2. Pintu perlintasan dibuka, kerapatan pada kondisi macet berangsur-angsur kembali sampai pada keadaan dimana kerapatan menuju ke kondisi
3. Tahap ini, kecepatan gelombang kejut 2 (ω_{BC}) akan menyusul kecepatan gelombang kejut 1 (ω_{AB}) dimana kerapatan saat kondisi macet akan hilang dan arus akan kembali pada kondisi normal sebelumanya penutupan.



Gambar 2. 7 Gelombang kejut pada saat perlintasan kereta ditutup

Sumber: Tamin, 2008.

Tiga gelombang kejut mulai pada saat t_1 di garis henti: ω_{AD} (gelombang kejut bentukan maju), ω_{DB} (gelombang kejut diam depan), dan ω_{AB} (gelombang kejut bentukan mundur). Kecepatan dari ketiga gelombang kejut ini dinyatakan pada diagram Gambar 2.3(a) dan dapat dihitung dengan menggunakan rumus-rumus berikut:

$$\omega_{DA} = \frac{V_A - V_D}{D_A - D_D} = S_A \quad (2.37)$$

$$\omega_{DB} = \frac{V_B - V_D}{D_B - D_D} = 0 \quad (2.38)$$

$$\omega_{DA} = \frac{V_B - V_A}{D_B - D_A} = - \frac{V_A}{D_B - D_A} \quad (2.39)$$

Dimana:

ω_{DA} = gelombang kejut dari kondisi titik awal D ($V_D = 0$ dan $D_D = 0$)

ketitik A (V_A, D_A).

ω_{DB} = gelombang kejut pada saat pintu perlintasan ditutup selama kendaraan berhenti sehingga $V_B = 0$ dan D_B = kerapatan saat macet.

ω_{AB} = gelombang kejut saat nilai kerapatan arus pada kondisi volume kendaraan sama dengan volume kebutuhan ($V = V_A$) berangsur-angsur menjadi kerapatan macet (D_B)

Kondisi arus A, B, dan D ini tetap sampai waktu t_2 pada saat pintu perlintasan dibuka. Kondisi arus baru C pada waktu di garis henti meningkat dari nol sampai arus jenuh. Ini menyebabkan dua gelombang kejut baru, ω_{DC} (gelombang kejut pemulihan maju) dan ω_{BC} (gelombang kejut pemulihan mundur), sedangkan gelombang kejut akhir adalah ω_{DB} (gelombang kejut diam depan). Kecepatan dua gelombang kejut baru ini dapat secara grafis dilihat pada Gambar dan dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$\omega_{DC} = \frac{V_C - V_D}{D_C - D_D} \quad (2.40)$$

$$\omega_{DA} = \frac{V_B - V_A}{D_B - D_C} = - \frac{V_C}{D_B - D_C} \quad (2.41)$$

Dimana

ω_{DC} = gelombang kejut pada saat pintu perlintasan dibuka, kondisi ruas di depan pintu perlintasan dari kondisi arus dan kerapatan nol perlahan bergerak searah dengan lalu lintas ke arah hilir sampai pada kondisi titik C (V_C = volume maksimum = kapasitas, D_C = kerapatan maksimum).

ω_{BC} = gelombang kejut dari kendaraan yang mengalami kondisi berhenti saat pintu ditutup mulai bergerak disusul oleh kendaraan dibelakangnya sampai kendaraan terakhir yang tidak mengalami antrian tetapi kecepatannya terpengaruh oleh kecepatan arus di depannya.

Kondisi arus D, C, B dan A tetap sampai ω_{AB} dan ω_{BC} mencapai t_3 . Interval waktu antara t_2 dan t_3 dapat dihitung sebagai berikut:

$$t_3 - t_2 = r \left| \frac{\omega_{AB}}{\omega_{CB} - \omega_{AB}} \right| \quad (2.42)$$

Panjang atrian maksimum pada waktu t_3 dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$Q_M = \frac{1}{3600} \cdot \left| \frac{\omega_{AB}}{\omega_{CB} - \omega_{AB}} \right| \quad (2.43)$$

Dimana

r = lamanya waktu penutupan pintu perlintasan = $t_2 - t_1$

Respon lalu lintas yang tidak bisa bergerak dengan segera begitu pintu perlintasan dibuka mengakibatkan beberapa kendaraan mungkin masih mengalami tundaan walaupun tidak mengalami antrian.

Pada saat gelombang kejut gerak maju baru ω_{AC} terbentuk, dan dua gelombang kejut gerak mundur ω_{AB} dan ω_{BC} berakhir. Gelombang kejut ω_{AC} dapat dihitung dengan rumus:

$$\omega_{AC} = \frac{V_C - V_A}{D_C - D_A} \quad (2.44)$$

Kondisi arus D, C, dan A tetap sampai waktu tertentu sampai pintu perlintasan ditutup kembali, tetapi sebelumnya pada saat waktu t_4 , gelombang kejut bentukan maju ω_{AC} memotong garis henti dan arus di garis henti menurut dari arus maksimum V_C menjadi V_A . Periode waktu dari mulai pintu perlintasan dibuka sampai tingkat pelepasan garis henti turun dibawah nilai maksimum (t_2 sampai t_4) dapat dihitung sebagai berikut:

$$t_4 - t_2 = \frac{r \cdot \omega_{AB}}{(\omega_{CB} - \omega_{AB})} \cdot \left| \frac{\omega_{AB}}{\omega_{AC}} + 1 \right| \quad (2.45)$$

$(t_4 - t_2) = T$ merupakan waktu penormalan, yaitu total waktu antara sejak diberlakukannya penormalan lajur hingga antrian berakhir.

2.9 Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian sebelumnya yang membahas mengenai analisis gelombang kejut dalam berbagai kondisi dan kriteria penelitian. Penelitian terdahulu bertujuan untuk mendapatkan referensi dan sebagai bahan perbandingan dalam melakukan penelitian.

1. (Sumarsono et al., 2017), Studi Gelombang Kejut pada Persimpangan Jalan dan Jalan rel dengan Menggunakan Emp atas Dasar Analisa Headway (Studi Kasus Perlintasan Kereta Purwosari Jl.Slamet Riyadi Surakarta). Penelitian ini bertujuan untuk mencari nilai emp dengan metode rasio headway dan menganalisis gelombang kejut berdasarkan

nilai emp kendaraan yang didapatkan dari metode rasio headway dan MKJI 1997.

Berdasarkan analisis dengan menggunakan metode rasio headway diperoleh nilai emp untuk sepeda motor adalah 0,42 sementara untuk kendaraan besar didapatkan nilai emp 1,34 sementara nilai emp dari MKJI 1997 untuk sepeda motor sebesar 0,4 dan untuk kendaraan besar sebesar 1,30. Dari analisis dapat disimpulkan bahwa hasil gelombang kejut dengan menggunakan emp headway lebih besar dari pada menggunakan emp MKJI 1997. Pada perhitungan dengan emp headway dihasilkan nilai terbesar gelombang kejut mundur bentukan sebesar 4,745 km/jam, gelombang kejut mundur pemulihan sebesar 10,641 km/jam, dan gelombang kejut maju pemulihan sebesar 6,977 km/jam dengan tundaan sebesar 0,264 km dan waktu penormalan sebesar 3,76 menit untuk lajur luar. Sedangkan perhitungan untuk lajur dalam diperoleh gelombang kejut mundur bentukan sebesar - 2,732km/jam, gelombang kejut mundur pemulihan sebesar 12,201km/jam, dan gelombang kejut maju pemulihan sebesar 11,771 km/jam dengan tundaan sebesar 0,274 km dan waktu penormalan sebesar 274 menit untuk lajur dalam. Untuk perhitungan dengan menggunakan emp MKJI 1997 diperoleh hasil terbesar gelombang kejut mundur bentukan sebesar 4,759 km/jam, gelombang kejut mundur pemulihan sebesar 10,637 km/jam, dan gelombang kejut maju pemulihan sebesar 6,952 km/jam dengan tundaan sebesar 0,266 km dan waktu penormalan sebesar 3,79 menit untuk lajur luar. Sedangkan perhitungan untuk lajur dalam diperoleh gelombang kejut mundur bentukan sebesar 2,719km/jam, gelombang kejut mundur pemulihan sebesar 12,185km/jam, dan gelombang kejut maju pemulihan sebesar 11,75 km/jam dengan tundaan sebesar 0,272 km dan waktu penormalan sebesar 273 menit untuk lajur dalam.

2. Samuel Y R Rompis (2018) *Traffic Flow Model and Shockwave Analysis*. Penelitian ini membangun tiga model hubungan arus–kecepatan–kepadatan menggunakan model Greenshields, Greenberg,

dan Underwood berdasarkan data lapangan selama 24 jam. Ketiga model tersebut dikalibrasi untuk menentukan model yang paling sesuai dengan karakteristik arus lalu lintas pada ruas I-64 Westbound. Meskipun model Underwood memiliki nilai koefisien determinasi tertinggi, model ini tidak mampu mengestimasi jam density, sehingga model Greenshields ditetapkan sebagai model yang paling sesuai untuk digunakan dalam analisis gelombang kejut.

Model Greenshields kemudian digunakan untuk menganalisis gelombang kejut akibat skenario insiden berupa penutupan satu lajur. Analisis dilakukan dengan mengidentifikasi perubahan parameter arus dan kepadatan pada saat insiden (t_1), kondisi setelah penyempitan kapasitas (t_2), serta kondisi pemulihan (t_3 dan t_4). Dari perubahan kondisi tersebut dihitung tiga jenis gelombang kejut, yaitu ω_{AB} , ω_{CB} , dan ω_{AC} , yang masing-masing menggambarkan pergerakan gangguan lalu lintas sebagai akibat penyempitan kapasitas dari dua lajur menjadi satu lajur.

Hasil analisis menunjukkan bahwa setiap tambahan lima menit durasi insiden menyebabkan waktu dari pembukaan lajur hingga kendaraan terakhir memasuki antrian meningkat sekitar 3,65 menit, diikuti oleh pertambahan panjang antrian sebesar 1,23 mil, serta kenaikan waktu pemulihan sebesar 3,74 menit. Selain itu, total keterlambatan yang terjadi selama insiden mengalami peningkatan secara eksponensial seiring bertambahnya durasi penutupan lajur. Validasi hasil dilakukan melalui perbandingan antara analisis makroskopis dan simulasi mikroskopis menggunakan VISSIM, dan diperoleh selisih yang relatif kecil, yaitu sekitar 8–12 persen, sehingga metode makroskopis dinilai cukup representatif dalam menggambarkan perilaku gelombang kejut pada kondisi insiden lalu lintas.

3. (Burhan Ghifari, 2019) Studi Gelombang Kejut pada Simpang Bersinyal dengan Menggunakan Emp atas Dasar Analisis Headway (Studi Kasus pada Simpang Bersinyal Jalan Raya Wongiri – Sukoharjo – Jalan Ciu Karangwuni – Jalan Gedongan). Penelitian dilakukan pada hari

Kamis, 18 Oktober 2018 pada jam puncak pagi jam 05.30-08.00 WIB. Analisis Headway menghasilkan nilai EMP SM= 0,45 dan KB= 1,29 yang selanjutnya nilai tersebut digunakan untuk merubah jumlah kendaraan menjadi satuan mobil penumpang (smp).

Langkah selanjutnya adalah mencari hubungan matematis antara arus, kecepatan dan kepadatan menggunakan model *greenshield*, yang menghasilkan kecepatan arus bebas (S_{ff}), kepadatan saat macet (D_j), dan Jumlah kendaraan maksimal (V_m). Hasil- hasil tersebut digunakan untuk menghitung nilai gelombang kejut..

Analisis waktu headway menghasilkan nilai EMP SM = 0.45 dan KB = 1,29 yang selanjutnya nilai tersebut digunakan untuk merubah jumlah kendaraan menjadi satuan mobil penumpang (smp). Setelah itu dilakukan perhitungan Gelombang Kejut dengan nilai tertinggi yang terjadi pada pendekat simpang Jl. Raya Wonogiri-Sukoharjo Selatan Lajur Luar dengan nilai $\omega_{ab} = -1,42$ km/jam, $\omega_{cb} = -13,75$ km/jam, $\omega_{ac} = 12,15$ km/jam. Selanjutnya dilakukan perbandingan rata-rata nilai uji validasi MAPE panjang antrian dan waktu penormalan dengan EMP atas dasar analisis headway dengan EMP atas dasar MKJI pada setiap pendekat simpang. Nilai MAPE untuk panjang antrian dengan EMP headway lebih besar sedikit dibandingkan nilai MAPE dengan MKJI yakni 0,72% berbanding dengan 0,49%. Sedangkan nilai MAPE untuk waktu penormalan dengan EMP headway lebih kecil dibanding nilai MAPE MKJI yakni 1,59% berbanding 1,94%.

4. Luthfi Ramadhan (2019) Studi Gelombang Kejut pada Penyempitan Jalan dengan Menggunakan EMP atas Dasar Analisis Rasio Headway (Studi Kasus: Penyempitan Jalan Jend. Ahmad Yani Melewati Viaduct Gilingan, Surakarta). Penelitian ini menganalisis fenomena gelombang kejut (shockwave) yang terjadi pada lokasi penyempitan jalan dengan menggunakan nilai *ekivalensi mobil penumpang* (EMP) yang dihitung berdasarkan analisis rasio headway. Nilai EMP hasil headway kemudian dibandingkan dengan nilai EMP standar MKJI 1997. Studi ini juga

membentuk hubungan matematis parameter lalu lintas kecepatan, volume, dan kepadatan menggunakan *Model Greenshield* untuk memperoleh parameter arus (Sff , Dj , V_{max}) yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan gelombang kejut.

Berdasarkan analisis rasio headway diperoleh EMP sepeda motor sebesar 0,43, kendaraan ringan 1,00, dan kendaraan berat 1,88, sedangkan nilai EMP MKJI masing-masing adalah 0,30, 1,00, dan 1,20. Dari hasil perhitungan gelombang kejut menggunakan EMP headway diperoleh nilai rata-rata $\omega_{ab} = -3,74$ km/jam, $\omega_{cb} = -14,19$ km/jam, dan $\omega_{ac} = 8,29$ km/jam, dengan panjang antrian maksimum (Q_m) sebesar 0,10 km serta waktu penormalan (T) 73,18 detik.

Sebaliknya, perhitungan menggunakan EMP MKJI menghasilkan $\omega_{ab} = -5,05$ km/jam, $\omega_{cb} = -17,78$ km/jam, dan $\omega_{ac} = 8,65$ km/jam, dengan $Q_m = 0,13$ km dan $T = 95,27$ detik. Hasil uji validitas MAPE menunjukkan model EMP headway memberikan ketelitian lebih baik dibandingkan EMP MKJI untuk panjang antrian (1,08%) dan waktu penormalan (3,35%).

5. Muhammad Iqbal Fadila (2023) Pengaruh Perlintasan Sebidang dengan Rel Kereta Api terhadap Karakteristik Lalu Lintas. Penelitian menganalisis dampak penutupan pintu perlintasan kereta api terhadap kondisi lalu lintas pada ruas Jalan Ciptomangunkusumo, Ciamis. Penelitian berfokus pada perubahan karakteristik lalu lintas yang terjadi ketika pintu perlintasan ditutup, seperti meningkatnya volume kendaraan yang tertahan, menurunnya kecepatan arus lalu lintas, serta bertambahnya panjang antrian dan tundaan. Data yang dikumpulkan mencakup volume kendaraan, kecepatan, kepadatan lalu lintas, jadwal kedatangan kereta api, lama penutupan pintu perlintasan, jumlah kendaraan dalam antrian, panjang antrian, dan waktu pemulihan kendaraan setelah pintu dibuka kembali.

Metode analisis yang digunakan adalah *Shock Wave Analysis*, yang digunakan untuk menggambarkan bagaimana gelombang kejut lalu lintas terbentuk akibat hambatan mendadak berupa penutupan pintu

perlindungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi antrian dan tundaan maksimum terjadi pada periode 16:00:14–16:04:10, dengan waktu pelepasan sebesar 205,71 detik, waktu pemulihan 163,70 detik, panjang antrian sepanjang 143 meter, serta jumlah kendaraan antri sebanyak 46,08 smp. Penelitian ini menyimpulkan bahwa semakin besar volume kendaraan yang mendekati perlindungan dan semakin lama durasi penutupan, maka semakin besar pula panjang antrian, tundaan, dan waktu pemulihan yang terjadi. Penelitian ini memberikan gambaran yang kuat mengenai pengaruh signifikan perlindungan sebidang terhadap kinerja lalu lintas dan pentingnya pengelolaan lalu lintas yang efektif untuk meminimalkan dampak gelombang kejut yang ditimbulkan.