

PENGARUH PENGURANGAN 4 LAJUR MENJADI 3 LAJUR DI JALAN TOL TERHADAP TUNDAAN DAN ANTRIAN (REDUCTION EFFECT OF 4 LANES TO 3 LANES ON TOLL ROADS TO DELAYS AND QUEUES)

Ade Syura Saputra¹⁾, Nahdalina²⁾

^{1),2)}Universitas Gunadarma

^{1),2)}Kampus D Universitas Gunadarma, Jl. Margonda Raya 100 Depok

e-mail: ¹⁾adesyura9@gmail.com, ²⁾nahdalina70@gmail.com

Diterima: 15 September; direvisi: 4 Desember 2020; disetujui: 17 Desember 2020

ABSTRAK

*Bottleneck dapat disebabkan penyempitan jalan, pengurangan lajur, atau terdapat gangguan samping. Pada arus lalu lintas yang tinggi, hal ini dapat menyebabkan kemacetan yang berujung pada pemborosan waktu dan bensin. Perkiraan tundaan dan antrian dapat membantu memperhitungkan besaran pemborosan yang terjadi. Perkiraan tersebut dapat didekatkan dengan analisis gelombang kejut. Sebagai contoh, pilar jalan layang yang dibangun di jalan tol menyebabkan adanya pengurangan 4 lajur lalu lintas menjadi 3 lajur di jalan tol. Paper ini dimaksudkan untuk mengetahui nilai tundaan dan antrian di jalan tol, serta nilai derajat kejenuhan (DS) dan Level of Service (LOS). Lokasi penelitian dilakukan di Jalan Tol Jakarta – Cikampek Kilometer 26. Penelitian dilakukan dalam waktu 120 menit dari pukul 09.00 sampai 11.00. Ekuivalensi Mobil Penumpang (EMP) dan perhitungan kapasitas jalan 4 lajur berdasarkan Manual Kapasitas Jalan Indonesia 1997 (MKJI 1997). Perhitungan kapasitas area bottleneck menggunakan model terbaik yaitu Model Greenshields dengan nilai $F = 3,06$, $t = 29,93$, dan $r^2 = 0,88$. Hasil Penelitian dari interval 120 interval terdapat 78 interval tidak mengalami tundaan dan antrian. Sedangkan 42 interval mengalami tundaan dan antrian. Besarnya nilai tundaan dan antrian pada setiap interval bervariasi. Akumulasi total tundaan mencapai 40836 smp*menit dan akumulasi antrian (N) mencapai 81672 smp. Nilai derajat kejenuhan segmen pengurangan 4 lajur adalah 0,91 sampai 0,97, termasuk kategori Level of Service E (sangat buruk). Untuk itu perlu dipilih cara untuk membatasi arus lalu lintas yang masuk ke ruas jalan tersebut. Perhitungan tundaan dan antrian menggunakan analisis gelombang kejut dapat membantu mendesain jalan yang terpaksa harus mengalami pengurangan jumlah lajur.*

Kata kunci: gelombang kejut, Greenshields, Greenberg, Underwood, antrian, tundaan.

ABSTRACT

*Bottlenecks can be caused by road narrowing, lane reduction, or side interference. In high traffic flows, this can cause congestion which results in a waste of time and gasoline. Estimated delays and queues can help to calculate the amount of waste that occurs. This estimate can be approximated by shock wave analysis. For example, an elevated road pillar built on a toll road causes a reduction of 4 lanes of traffic to 3 lanes on the toll road. This paper is intended to determine the value of delays and queues on toll roads, as well as the degree of saturation (DS) and Level of Service (LOS) values. The research location was conducted on the Jakarta - Cikampek Kilometer 26 Toll Road. The study was conducted within 120 minutes from 09.00 to 11.00 hours. Passenger Car Equivalence (EMP) and calculation of 4-lane road capacity based on the Indonesian Road Capacity Manual 1997 (MKJI 1997). The calculation of the bottleneck area capacity uses the best model, namely the Greenshields Model with a value of $F = 3.06$, $t = 29.93$, and $r^2 = 0.88$. The results of the study of the interval 120 intervals, there were 78 intervals that did not experience delays and queues. Meanwhile, the 42 intervals experienced delays and queues. The amount of delay and queue value at each interval varies. The total accumulated delays reached 40836 pcu * minutes and the accumulated queues (N) reached 81672 pcu. The value of the degree of saturation of the 4-lane reduction segment was 0.91 to 0.97, including the Level of Service E category (very poor). For this reason, it is necessary to choose a method to limit the flow of traffic entering these roads. The calculation of delays and queues using shock wave analysis can help design roads that are forced to experience a reduction in the number of lanes.*

Keywords: shock wave, Greenshields, Greenberg, Underwood, queue, delay.

PENDAHULUAN

Penyelenggaraan jalan tol dilakukan dengan partisipasi pengguna jalan dalam membayar tol. Dengan harapan pengguna dapat lebih cepat sampai di tujuan.

Terjadinya suatu tundaan dan antrian pada jalan tol dapat mengganggu pengguna jalan dan pengusaha jalan tol. Selain karena terbuangnya waktu dan bahan bakar, pelayanan jalan tol pun menjadi kurang baik, padahal menurut UU No. 38 tentang Jalan, jalan tol memiliki spesifikasi dan pelayanan yang lebih tinggi daripada jalan umum yang ada.

Tundaan dan antrian pada jalan tol akibat penutupan lajur, pekerjaan jalan, dll, dapat diperkirakan. Dengan demikian, antisipasi dapat dirancang untuk meminimumkan dampak yang terjadi.

Sebagai contoh Jalan Tol Jakarta-Cikampek yang merupakan jalan tol dengan volume lalu lintas tertinggi pada tahun 2017 (BPJT, 2017). Gangguan terhadap lalu lintas yang tinggi di ruas jalan ini dapat menyebabkan terjadinya tundaan dan antrian yang berujung pada terjadinya pemborosan waktu, bahan bakar, dan polusi.

Jalan Tol Jakarta-Cikampek mayoritas memiliki 4 lajur, namun pada kilometer 26, terdapat kolom *fly over* dan *abutment*. Hal ini menyebabkan pengurangan 4 lajur menjadi 3 lajur.

Pengurangan 4 lajur menjadi 3 lajur memungkinkan terjadi perlambatan kecepatan. Perlambatan tersebut akan mempengaruhi kendaraan-kendaraan di belakangnya seperti efek domino, atau dalam penelitian ini istilah tersebut disebut gelombang kejut bentukan mundur (ωAB).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui tundaan dan antrian karena ada pengurangan 4 lajur menjadi 3 lajur (lebar satu lajur 3,5 m) di jalan tol menggunakan analisis gelombang kejut (*Shock Wave Analysis*). Selain itu, bertujuan untuk mengetahui derajat kejenuhan (DS) dan *Level of Service* (LOS) di segmen pengurangan lajur tersebut.

KAJIAN PUSTAKA

Penyempitan Jalan (*bottleneck*)

Penyempitan jalan adalah suatu bagian jalan dengan kapasitas arus lalu lintas yang lebih kecil dari pada kondisi bagian jalan sebelumnya

(*downstream* lebih kecil dari *upstream*). Kondisi seperti ini dapat terjadi karena perbaikan jalan, terdapat mobil mogok, dan terjadinya suatu kecelakaan sehingga sebagian jalan ditutup. Hal ini mengakibatkan terjadinya perubahan perjalanan kendaraan dari arus bebas (*uninterrupted flow*) menjadi terganggu (*interrupted flow*), sehingga terjadi penurunan kecepatan, bertambahnya kerapatan, berkurangnya arus, terjadi tundaan, dan antrian.

Tundaan (T) dan Antrian (N)

Tundaan adalah waktu yang hilang akibat adanya gangguan lalu-lintas yang berada diluar kemampuan pengemudi untuk mengontrolnya. Tundaan pada penelitian ini berupa perlambatan kecepatan yang terjadi akibat adanya gangguan yang mengakibatkan pengurangan dari empat lajur ke tiga lajur.

Antrian dalam Manual Kapasitas Jalan Indonesia, 1997, didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang antri dalam suatu pendekatan simpang dan dinyatakan dalam kendaraan atau satuan mobil penumpang. Sedangkan panjang antrian didefinisikan sebagai panjang antrian kendaraan dalam suatu pendekatan dan dinyatakan dalam satuan meter.

Vikram dan Mittal (2013) menyimpulkan kecepatan gelombang kejut tergantung kesetimbangan hubungan kecepatan dengan kerapatan. Namun, terkadang kerapatan dan kecepatan gelombang kejut pada realita berbeda jika dihitung dengan Model Lighthill, Whitham, dan Richards (LWR) yang menyatakan tetap setimbang.

Keunggulan Model LWR menggunakan variabel kecepatan dan kerapatan yang tipikal dengan perhitungan yang relevan. Menurut Wen-Long Jin (2017), model LWR *Continuous*, model LWR *Discontinuous*, dan model *Kinematic Wave* yang menyatakan tidak terdapat penurunan kapasitas pada penyempitan jalan. Hal ini disebabkan karena laju arus lalu lintas dari kemacetan pada penyempitan jalan dapat mencapai kapasitas hilir meskipun tautan hulu tersumbat atau tidak.

Ou dan Tang (2018) menyatakan bahwa dampak *bottleneck traffic* dengan menggunakan metode numerik memiliki pengaruh besar pada evolusi arus lalu lintas yang bergantung pada kepadatan hulu. Jin (2010) menjelaskan tentang penurunan kapasitas jalan karena pengurangan jumlah jalur, serta perubahan jalur sistematis.

Model Hubungan Karakteristik Lalu Lintas

Variabel utama dalam karakteristik lalu lintas adalah arus (V), kecepatan (\bar{U}_s), dan kerapatan (D). Kerapatan didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang menempati suatu panjang jalan atau lajur. Hubungan matematis antara arus, kecepatan, kerapatan dapat direpresentasikan sebagai persamaan (3):

$$D = \frac{V}{\bar{U}_s} \dots\dots\dots (3)$$

Model Linier Greenshields

Persamaan dasar Model Linier Greenshields yang menjelaskan hubungan antara kecepatan dan kerapatan dapat dipresentasikan sebagai persamaan (4).

$$\bar{U}_s = \bar{U}_f - \left(\frac{\bar{U}_f}{D_j}\right) D \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan: \bar{U}_s = kecepatan rata-rata ruang; \bar{U}_f = kecepatan rata-rata ruang keadaan; arus bebas (*free flow speed*); D_j = kerapatan pada saat macet (*jam density*); D = kerapatan; V = arus lalu lintas

Hubungan antara arus dengan kerapatan diformulasikan pada persamaan (5) dengan mensubstitusikan persamaan (3) ke persamaan (4).

$$\frac{V}{D} = \bar{U}_f - \left(\frac{\bar{U}_f}{D_j}\right) D$$

$$V = D \cdot \bar{U}_f - \left(\frac{\bar{U}_f}{D_j}\right) D^2 \dots\dots\dots (5)$$

Hubungan antara arus dengan kecepatan diformulasikan pada persamaan (6) dengan mensubstitusikan persamaan (3) ke persamaan (4).

$$\bar{U}_s = \bar{U}_f - \left(\frac{\bar{U}_f}{D_j}\right) \frac{V}{\bar{U}_s}$$

$$V = \bar{U}_s \cdot D_j - \left(\frac{D_j}{\bar{U}_f}\right) \bar{U}_s^2 \dots\dots\dots (6)$$

Nilai arus maksimum dapat dicari dengan menurunkan persamaan (5) terhadap kerapatan (D).

$$V = D \cdot \bar{U}_f - \left(\frac{\bar{U}_f}{D_j}\right) D^2$$

$$\frac{\partial V}{\partial D} = \bar{U}_f - 2D_m \left(\frac{\bar{U}_f}{D_j}\right)$$

$$D_m = \frac{D_j}{2} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan: D_m = kerapatan pada saat arus maksimum

Nilai D_m dalam persamaan (7) disubstitusikan ke dalam persamaan (5) dengan kondisi arus (V) berubah menjadi arus maksimum (V_m) dan kerapatan (D) menjadi kerapatan saat arus maksimum (D_m).

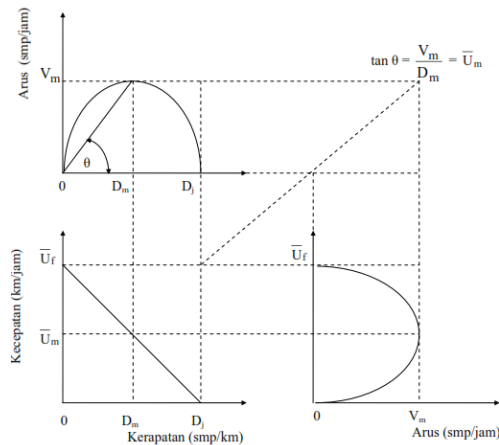
$$V_m = D_m \cdot \bar{U}_f - \left(\frac{\bar{U}_f}{D_j}\right) D_m^2$$

$$V_m = \frac{D_j}{2} \cdot \bar{U}_f - \left(\frac{\bar{U}_f}{D_j}\right) \frac{D_j^2}{2^2}$$

$$V_m = \frac{D_j \cdot \bar{U}_f}{4} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan: V_m = arus maksimum

Bentuk umum hubungan antara arus-kecepatan, arus-kerapatan dan kecepatan-kerapatan dapat dipresentasikan pada Gambar 1.



Sumber: Gerlough dan Huber (1975)

Gambar 1. Hubungan antara kecepatan, arus dan kerapatan model greenshields

Gambar 1 menjelaskan bahwa hubungan antara kecepatan (\bar{U}_s) dengan kerapatan (D) berbanding terbalik, artinya semakin tinggi kecepatan (\bar{U}_s) maka semakin rendah kerapatan (D) dan sebaliknya. Sedangkan hubungan arus-kecepatan dan arus-kerapatan adalah berbentuk kurva, yang artinya terdapat titik maksimum yaitu kerapatan maksimum (D_m) dan kecepatan maksimum (\bar{U}_m) yang terjadi ketika arus maksimum (V_m). Ketika nilai kerapatan (D) semakin kecil atau besar dari D_m , maka nilai arus (V) turun. Ketika nilai kecepatan semakin kecil atau besar dari \bar{U}_m maka nilai arus (V) turun.

Model Greenshields memiliki kemiripan dengan MKJI 1997 dalam menggambarkan hubungan kecepatan-kerapatan dan arus-kecepatan. Dengan demikian terlihat bahwa model linier Greenshields juga dapat diaplikasikan di Indonesia.

Model Logaritma Greenberg

Greenberg mendapatkan hubungan antara kecepatan dan kerapatan berbentuk logaritma.

$$\bar{U}_s = \bar{U}_m \ln \left(\frac{D_j}{D} \right) \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan: \bar{U}_m = kecepatan saat arus maksimum.

Nilai konstanta dan koefisien \bar{U}_f dan D_j diperoleh dengan transformasi persamaan (9) menjadi persamaan linier $y = a + bx$.

$$\bar{U}_s = \bar{U}_m \ln D_j - \bar{U}_m \ln D \dots\dots\dots (10)$$

Hubungan antara arus dan kerapatan diformulasikan pada persamaan (11) dengan mensubstitusikan persamaan (3) ke persamaan (9).

$$\bar{U}_s = \bar{U}_m \ln \left(\frac{D_j}{D} \right); \frac{V}{D} = \bar{U}_m \ln \left(\frac{D_j}{D} \right) \\ V = \bar{U}_m \cdot D \cdot \ln \left(\frac{D_j}{D} \right) \dots\dots\dots (11)$$

Hubungan antara arus dan kecepatan diformulasikan pada persamaan (12) dengan mensubstitusikan persamaan (3) ke persamaan (9).

$$\bar{U}_s = \bar{U}_m \ln \left(\frac{D_j}{\frac{V}{\bar{U}_s}} \right); \ln \left(\frac{D_j \cdot \bar{U}_s}{V} \right) = \frac{\bar{U}_s}{\bar{U}_m} \\ V = D_j \cdot \bar{U}_s \cdot e^{-\frac{\bar{U}_s}{\bar{U}_m}} \dots\dots\dots (12)$$

Nilai kerapatan pada saat arus maksimum untuk model *Greenberg* dicari dengan menurunkan persamaan (11) terhadap kerapatan (D).

$$\frac{\partial V}{\partial D} = \bar{U}_m \cdot \ln \left(\frac{D_j}{D} \right) \\ \frac{\partial V}{\partial D} = \bar{U}_m \cdot \ln \left(\frac{D_j}{D} \right) + \bar{U}_m \cdot D \left(\frac{-\frac{D_j}{D^2}}{\frac{D_j}{D}} \right) \\ \frac{\partial V}{\partial D} = \bar{U}_m \cdot \ln \left(\frac{D_j}{D} \right) - \bar{U}_m; 0 = \ln \left(\frac{D_j}{D} \right) - 1 \\ D_m = \frac{D_j}{e} \dots\dots\dots (13)$$

Persamaan matematis arus maksimum pada metode *Greenberg*.

$$V_m = D_m \cdot \bar{U}_m; V_m = \frac{D_j}{e} \cdot \bar{U}_m \\ V_m = \frac{D_j \cdot \bar{U}_m}{e} \dots\dots\dots (14)$$

Model Eksponensial Underwood

Underwood mengemukakan suatu hipotesis bahwa hubungan antara kecepatan dan kerapatan merupakan hubungan eksponensial dengan bentuk persamaan (15).

$$\bar{U}_s = \bar{U}_f \cdot e^{-\left(\frac{D}{D_m}\right)} \dots\dots\dots (15)$$

Nilai konstanta dan koefisien \bar{U}_f dan D_j diperoleh dengan transformasi persamaan (15) menjadi persamaan linier $y = a + bx$.

$$\ln \bar{U}_s = \ln \left(\bar{U}_f \cdot e^{-\left(\frac{D}{D_m}\right)} \right) \\ \ln \bar{U}_s = \ln \bar{U}_f - \frac{D}{D_m} \dots\dots\dots (16)$$

Hubungan antara arus dan kerapatan diformulasikan pada persamaan (17) dengan mensubstitusikan persamaan (3) ke persamaan (15).

$$\frac{V}{D} = \bar{U}_f \cdot e^{-\left(\frac{D}{D_m}\right)} \\ V = D \cdot \bar{U}_f \cdot e^{-\left(\frac{D}{D_m}\right)} \dots\dots\dots (17)$$

Hubungan antara arus dan kecepatan diformulasikan pada persamaan (18) dengan mensubstitusikan persamaan (3) ke persamaan (15).

$$\bar{U}_s = \bar{U}_f \cdot e^{-\left(\frac{D}{D_m}\right)} \\ \bar{U}_s = \bar{U}_f \cdot e^{-\left(\frac{V}{\bar{U}_s \cdot D_m}\right)} \dots\dots\dots (18)$$

Fungsi logaritma naturalis persamaan (18) ditulis pada persamaan (19).

$$\ln \bar{U}_s = \ln (\bar{U}_f) - \left(\frac{V}{\bar{U}_s \cdot D_m} \right) \\ V = \bar{U}_s \cdot D_m \cdot \ln (\bar{U}_f) - \bar{U}_s \cdot D_m \cdot \ln (\bar{U}_s) \\ V = \bar{U}_s \cdot D_m \cdot \ln \left(\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_s} \right) \dots\dots\dots (19)$$

Nilai kecepatan pada saat arus maksimum diperoleh dengan menurunkan persamaan (19) terhadap kecepatan (\bar{U}_s).

$$\frac{\partial V}{\partial \bar{U}_s} = D_m \cdot \ln \left(\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_s} \right) + D_m \cdot \bar{U}_s \cdot \left(\frac{-\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_s^2}}{\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_s}} \right) \\ \frac{\partial V}{\partial \bar{U}_s} = D_m \cdot \ln \left(\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_s} \right) - D_m \\ 0 = D_m \left[\ln \left(\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_s} \right) - 1 \right] \\ 0 = \left[\ln \left(\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_s} \right) - 1 \right] \\ \frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_s} = e \dots\dots\dots (20)$$

Persamaan matematis arus maksimum pada metode *Underwood*.

$$V_m = D_m \cdot \bar{U}_m; V_m = \frac{D_m \cdot \bar{U}_f}{e} \dots\dots\dots (21)$$

Analisis Regresi Linier

Penyelesaian statistik didekati dengan mencari hubungan antara kecepatan (\bar{U}_s) sebagai y) dan kerapatan (D sebagai x) dengan analisis regresi. Dengan menggunakan persamaan (4), (10), dan (16) maka nilai konstanta dan koefisien

masing-masing model akan diperoleh dengan persamaan (23) dan (24).

$$y = a + bx \dots\dots\dots (22)$$

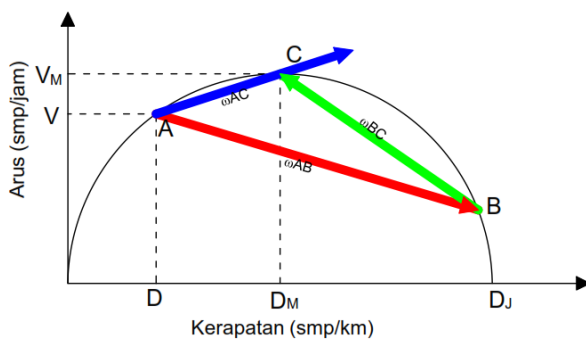
$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \dots\dots\dots (23)$$

$$a = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \dots\dots\dots (24)$$

Analisis Gelombang Kejut

Perhitungan gelombang kejut ω_{AB} , ω_{BC} , dan ω_{AC} pada penyempitan jalan membutuhkan input data arus *demand* (V), kerapatan (D), arus maksimum (V_m), *jam density* (D_j), kerapatan pada saat arus maksimum (D_m), dan arus saat macet (V_j).

Hubungan dasar antara gelombang kejut dengan arus dan kerapatan yang masuk pada segmen penyempitan jalan ditampilkan pada Gambar 2.



Sumber: Adolf D. May (1990)
Gambar 2. Diagram gelombang kejut ω_{AB} , ω_{BC} , dan ω_{AC}

Gambar 2 menjelaskan bahwa perlambatan pada jalan *bottleneck* dimulai dengan pengereman kendaraan yang menghasilkan (ω_{AB}). Setelah itu, laju kendaraan berangsur-angsur membentuk gelombang kejut pemulihan mundur (ω_{BC}). Setelah kendaraan tidak terpengaruh dengan *bottleneck*, laju kendaraan akan membentuk gelombang kejut bentukan maju (ω_{AC}). Persamaan matematis gelombang kejut ω_{AB} , ω_{BC} , dan ω_{AC} menurut Lighthill-Whitham-Richards (LWR 1955;1956) yang dikutip oleh Adolf D. May (1990), diformulasikan pada persamaan (25), (26), dan (27).

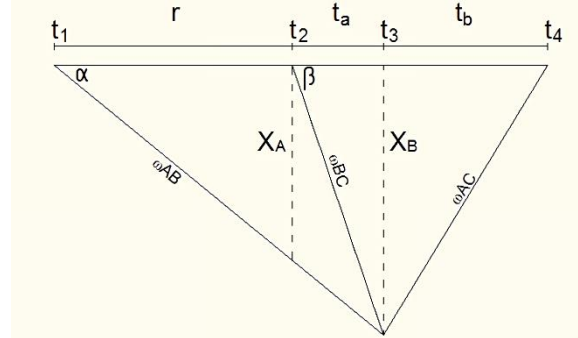
$$\omega_{AB} = \frac{V_j - V}{D_j - D} = \dots\dots\dots (25)$$

$$\omega_{BC} = \frac{V_j - V_m}{D_j - D_m} = \dots\dots\dots (26)$$

$$\omega_{AC} = \frac{V - V_m}{D - D_m} = \dots\dots\dots (27)$$

Keterangan: ω_{AB} = gelombang kejut bentukan mundur; ω_{BC} = gelombang kejut pemulihan mundur; ω_{AC} = gelombang kejut bentukan maju

Hubungan antara gelombang kejut ω_{AB} , ω_{BC} , dan ω_{AC} dengan jarak dan waktu yang dibutuhkan selama terjadinya gelombang kejut ditampilkan pada Gambar 3.



Sumber: Adolf D. May (1990)
Gambar 3. Diagram hubungan gelombang kejut dengan jarak dan waktu selama terbentuknya gelombang kejut.

Gambar 3 menjelaskan bahwa gelombang kejut terbentuk ketika kendaraan mendekati *bottleneck* sehingga mengalami perlambatan. Setelah kendaraan melewati *bottleneck*, kendaraan akan mengalami percepatan. Jarak dan waktu selama proses terbentuknya gelombang kejut tersebut dapat diformulasikan dengan Persamaan (27), (28), (29), (30), (31), (32), dan (33).

Lokasi antrian dari penyempitan jalan ke belakang sampai kendaraan terakhir yang mengalami antrian pada waktu t_2 dapat dihitung sebagai berikut:

$$X_A = r \cdot \tan \alpha \dots\dots\dots (28)$$

$$\tan \alpha = \left[\frac{V}{D_j - D} \right] \dots\dots\dots (29)$$

Keterangan: X_A = Jarak ω_{AB} pada waktu t_2 ; r = durasi pengamatan atau interval

Lokasi hilangnya antrian dari penyempitan jalan pada waktu t_3 dapat dihitung sebagai berikut :

$$X_B = \frac{r \cdot \left[\frac{\omega_{BC} \cdot \omega_{AB}}{\omega_{BC} - \omega_{AB}} \right]}{3600} = \dots\dots\dots (30)$$

Keterangan: X_B = jarak ω_{AB} bertemu dengan ω_{BC} pada waktu t_3

Periode waktu gelombang kejut ω_{AC} dari *bottleneck* sampai hilangnya antrian (t_2 sampai t_4) dapat dihitung sebagai berikut:

$$t_b = \frac{r \cdot \omega_{AB}}{\omega_{BC} - \omega_{AB}} \left[\frac{\omega_{BC}}{\omega_{AC}} + 1 \right] = \dots\dots\dots (31)$$

Keterangan: t_b = periode waktu ω_{AC} sampai kembali kecepatan kembali normal

Waktu yang diperlukan untuk ω_{AB} bertemu ω_{BC} memotong waktu t_3 . Interval waktu antara t_2 dan t_3 dapat dihitung sebagai berikut:

$$t_a = r \left[\frac{\omega_{AB}}{\omega_{BC} - \omega_{AB}} \right] = \dots\dots\dots (32)$$

Keterangan: t_a = periode waktu ω_{AB} bertemu ω_{BC}

Jumlah kendaraan yang mengalami antrian :

$$N = (t_a + t_b) V_A \dots\dots\dots (33)$$

Keterangan: N = jumlah kendaraan yang mengalami antrian

Tundaan yang terjadi adalah :

$$T = \frac{1}{2} * r * N = \dots\dots\dots (34)$$

Keterangan: T = Tundaan kendaraan

Kapasitas (C) dan Derajat Kejenuhan (DS)

Kapasitas jalan adalah kemampuan ruas jalan untuk menampung arus lalu lintas. Perhitungan kapasitas menggunakan satuan satuan mobil penumpang per jam atau smp/jam pada Persamaan (1).

$$C = C_o * FC_w \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan: C = kapasitas jalan; C_o = kapasitas dasar; FC_w = faktor penyesuaian lebar lajur

Derajat kejenuhan (DS) merupakan rasio antara volume lalu lintas (V) dengan kapasitas jalan (C), jika nilai derajat kejenuhan mendekati 1 maka kondisi jalan tersebut sudah mendekati jenuh. Perhitungan derajat kejenuhan pada persamaan (2).

$$DS = \frac{V}{C} \dots\dots\dots (2)$$

Level of Service (LOS)

Klasifikasi LOS berdasarkan derajat kejenuhan dilakukan setiap 30 menit. Klasifikasi tersebut ditampilkan pada Tabel 1 (Navandar, Dhamaniya, dan Patel, 2019).

Tabel 1. Klasifikasi *Level of Service* (LOS)

LOS	DS atau V/C ratio
A	< 0,50
B	0,50 - 0,59
C	0,60 - 0,70
D	0,71 - 0,86
E	0,87 - 1,00

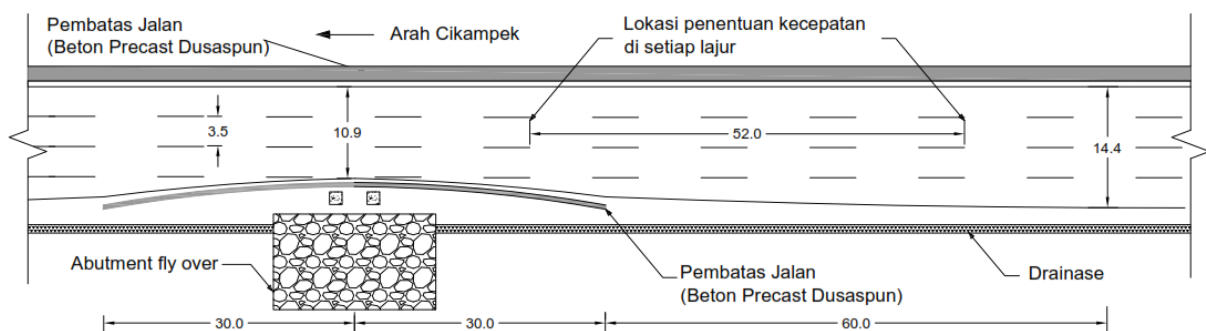
Sumber: Navandar, Dhamaniya, dan Patel (2019)

HIPOTESIS

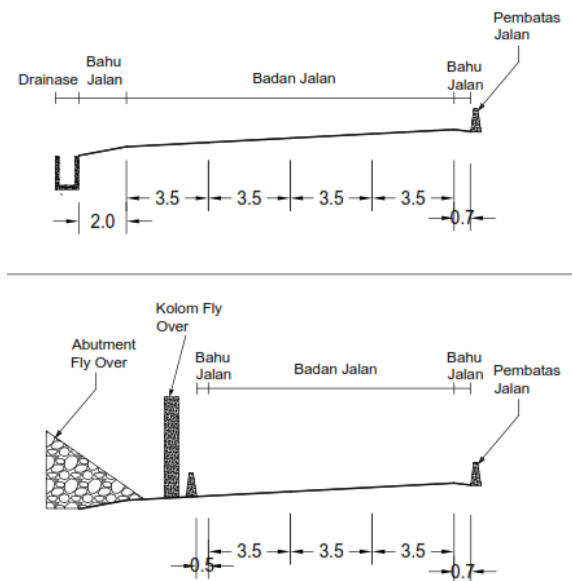
Jika nilai arus lalu lintas (V) tinggi dengan nilai derajat kejenuhan (DS) lebih besar 0,75 maka tundaan (T) dan antrian (N) akan terjadi. Semakin besar arus lalu lintas, semakin besar juga dampak dari penyempitan jalan tersebut.

METODOLOGI

Kondisi geometrik Jalan Tol Jakarta – Cikampek arah Cikampek adalah 4 lajur dengan lebar 3,5m. Pada KM 26 terdapat kolom *fly over* sehingga sepanjang 60m, hanya terdapat 3 lajur lalu lintas. Bahu yang tersedia umumnya tidak digunakan pengguna jalan. (Gambar 4 dan Gambar 5).



Gambar 4. Kondisi geometrik jalan tol Jakarta-Cikampek km.26



Gambar 5. Penampang melintang jalan sebelum penyempitan dan di penyempitan jalan.

Pengambilan data di lapangan dilakukan pada hari Selasa, 13 Agustus 2019 selama dua jam mulai pukul 09.00 sampai 11.00. Interval waktu dibagi menjadi 120. Pengambilan data arus dan kecepatan dilakukan per satu menit.

Pengambilan data arus lalu lintas menggunakan metode volume jam-an, yakni suatu pengamatan terhadap arus lalu lintas untuk menentukan jam puncak selama periode pagi dan sore yang biasanya terjadi kesibukan akibat orang pergi dan pulang kerja. Dari pengamatan tersebut dapat diketahui arus yang paling besar yang disebut sebagai jam puncak. Arus pada jam puncak ini dipakai sebagai dasar untuk desain jalan raya dan analisis operasi lainnya. Namun, pada jalan tol ini, diasumsikan arus dan kerapatan yang optimal adalah pada pukul 09.00 sampai 11.00.

Uji normalitas kecepatan kendaraan dengan menggunakan metode Kolmogorov-smirnov. Data kecepatan dibagi setiap menit, sehingga terdapat 120 interval waktu. Rata-rata kecepatan 76,21 dengan simpangan baku (σ) 18.59, sehingga diperoleh nilai selisih D maksimum $|F_0(X) - S_N(X)| = 0.089$. Sedangkan, nilai tabel Kolmogorov-Smirnov pada tingkat kepercayaan 95% adalah 0,124. Hal ini disebabkan, karena nilai D maximum lebih kecil dari nilai tabel Kolmogorov-Smirnov, sehingga data termasuk berdistribusi normal.

Data arus selanjutnya dikonversi dari kendaraan per jam menjadi smp per jam berdasarkan MKJI 1997 tentang jalan bebas hambatan. Pada arus lebih besar dari 4150 smp/jam, maka nilai konversi untuk kendaraan menengah (MHV) adalah 1,3 kali kendaraan ringan (LV), untuk bus besar (LB) adalah 1,5 kali kendaraan ringan (LV), dan kendaraan berat (LT) adalah 2 kali kendaraan ringan (LV).

Data kecepatan kendaraan didapat dengan membagi jarak yang telah ditentukan, yaitu segmen sejauh 52 meter dibagi waktu tempuh.

Selanjutnya penentuan hubungan karakteristik lalu lintas seperti arus-kecepatan, arus-kerapatan, dan kecepatan-kerapatan menggunakan tiga model. Tiga model tersebut adalah Model Linier *Greenshields*, Model Logaritmik *Greenberg*, dan Model Eksponensial *Underwood*. Dari ketiga model selanjutnya dipilih berdasarkan hasil analisis korelasi yang kuat dengan koefisien determinasi yang tertinggi dan memiliki nilai tertinggi pada uji signifikansi, yaitu uji-F dan uji-t.

Model terpilih menunjukkan nilai arus maksimum (V_m), arus saat macet (V_j), kerapatan saat arus maksimum (D_m) dan kerapatan saat macet (D_j). Model terpilih menjadi data input untuk analisis gelombang kejut, kapasitas arus, dan kerapatan.

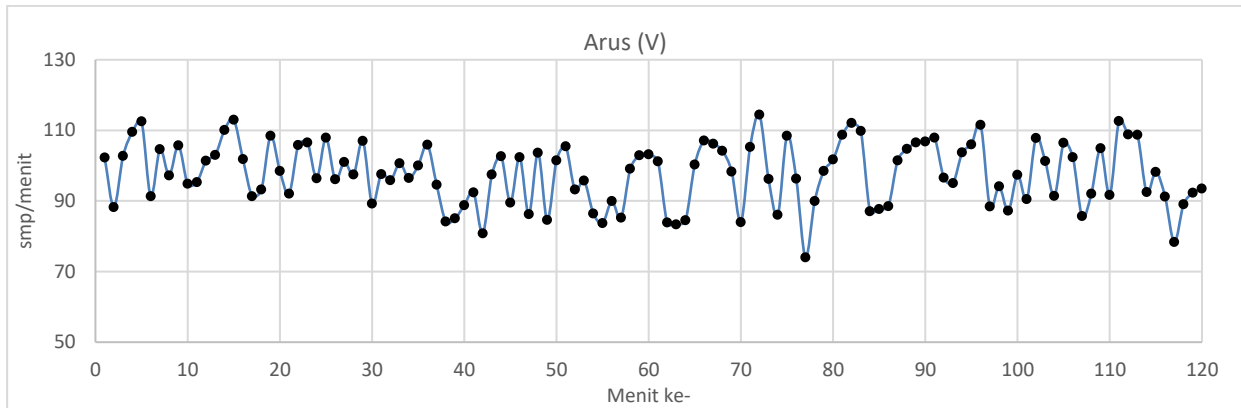
Analisis gelombang kejut didefinisikan sebagai arus pergerakan yang timbul karena adanya perbedaan kerapatan dan kecepatan lalu lintas pada suatu ruas jalan. Perhitungan pada makalah ini, menggunakan formula yang dikemukakan oleh Lighthill, Whitham, dan Richards (LWR) (1955; 1956) yang dikutip oleh Adolf D. May dalam buku "*traffic flow fundamentals*".

Perhitungan tundaan dan antrian pada penelitian ini dilakukan per satu menit atau 1 interval selama 120 menit, sehingga total 120 interval. Perhitungan tundaan dan antrian dilakukan setelah perhitungan kecepatan gelombang kejut diperoleh.

HASIL DAN ANALISIS

Data Arus Lalu Lintas (V)

Hasil pengamatan arus lalu lintas pada segmen Jalan Tol Jakarta - Cikampek KM. 26 ditampilkan pada Gambar 5 dalam bentuk grafik.



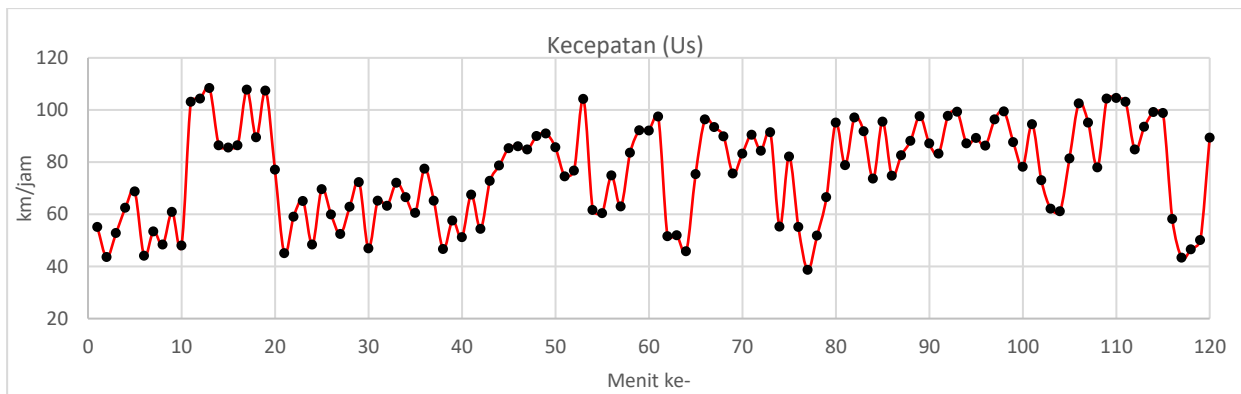
Gambar 6. Hasil pengamatan arus lalu lintas

Gambar 6 menampilkan data hasil pengamatan langsung di lapangan dengan satuan smp/menit. Data tersebut selanjutnya dikonversi menjadi smp/jam. Data tersebut adalah kondisi kendaraan masuk ke segmen *bottleneck*.

Kondisi arus lalu lintas tersebut menunjukkan ada fluktuatif per menitnya. Arus lalu lintas tertinggi terjadi pada menit ke-72 dengan nilai 114,4 smp/menit. Sedangkan arus lalu lintas terendah terjadi pada menit ke-77 dengan nilai 74,0 smp/menit.

Data Kecepatan Kendaraan (\bar{U}_s)

Gambar 7 menunjukkan bahwa fluktuasi kecepatan kendaraan yang terjadi pada lokasi penelitian. Namun, pada beberapa interval ada pula yang memiliki selisih nilai kecepatan yang relatif tidak jauh. Namun, terdapat beberapa interval yang memiliki selisih nilai kecepatan kendaraan yang relatif jauh. Kecepatan tertinggi terjadi pada menit ke-13 dengan nilai 108,3 km/jam. Sedangkan kecepatan terendah terjadi pada menit ke-77 dengan nilai 38,6 km/jam.

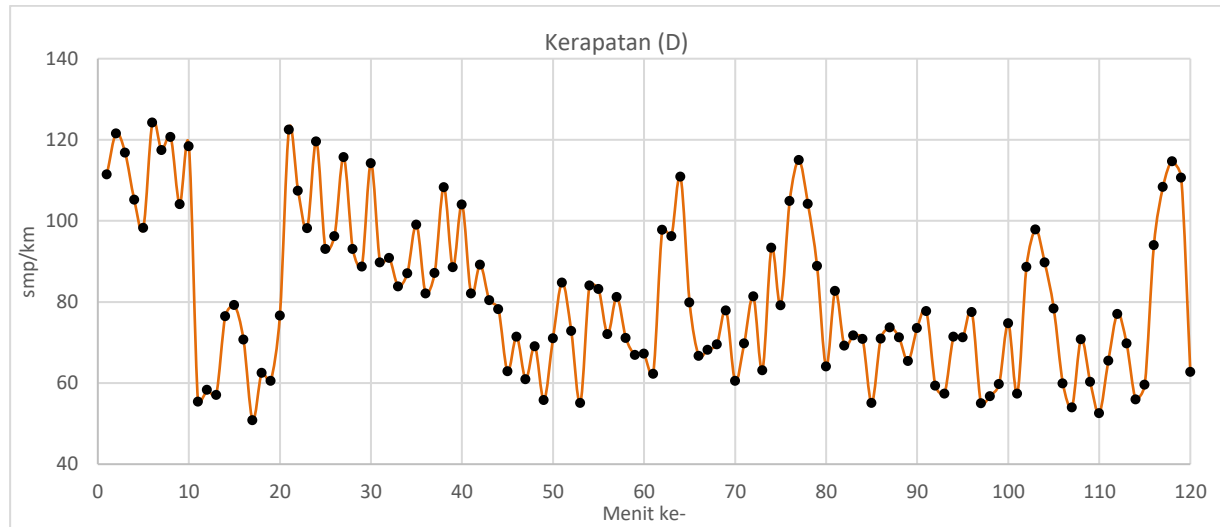


Gambar 7. Hasil Perhitungan Kecepatan Kendaraan

Data Kerapatan (D)

Kerapatan diperoleh dari hasil bagi antara arus (V) dengan kecepatan (\bar{U}_s). Hasil

perhitungan kerapatan ditampilkan pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Hasil Perhitungan Kerapatan

Gambar 8 menunjukkan fluktuasi kerapatan kendaraan per menit yang ditandai dengan titik hitam. Kerapatan adalah jumlah kendaraan yang menempati segmen jalan dengan satuan smp/km. Nilai kerapatan akan menjadi variabel X dalam analisis regresi linier sederhana. Sedangkan variabel Y adalah nilai kecepatan kendaraan. Kerapatan tertinggi terjadi pada menit ke-6 dengan nilai 124,3 smp/km. Sedangkan kerapatan terendah terjadi pada menit ke-17 dengan nilai 50,9 smp/km.

Analisis Regresi Linier Sederhana

Hubungan antara Arus (V), kecepatan (\bar{U}_s), Kerapatan (D) dianalisis dengan menggunakan metode *Greenshields*, *Greenberg*, dan *Underwood*. Penyelesaian statistik didekati dengan mencari hubungan antara kecepatan (\bar{U}_s sebagai Y) dan kerapatan (D sebagai X) dengan analisis regresi. Berdasarkan data eksiting dan perhitungan kerapatan (D) diperoleh data sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Sigma X &= \Sigma D &&= 9764,73 \\ \Sigma Y &= \Sigma \bar{U}_s &&= 9144,73 \\ \Sigma X^2 &= \Sigma D^2 &&= 840358,76 \\ \Sigma XY &= \Sigma D \cdot \bar{U}_s &&= 696883,82 \\ n &= 120 \end{aligned}$$

Data tersebut diselesaikan dengan Persamaan (22), (23), dan (24). Dengan demikian, $b = -0,89$ dan $a = 148,66$

Persamaan *Greenberg* dan *Underwood* harus ditransformasi linier agar nilai konstanta a dan koefisien b bisa diselesaikan dengan analisis regresi linier. Transformasi persamaan untuk model *Greenberg* pada persamaan (10), dan model *Underwood* pada persamaan (16). Setelah dilakukan transformasi linier, berdasarkan persamaan matematis masing-masing model akan menampilkan nilai variabel terikat y, variabel bebas x, konstanta a, dan koefisien b pada Tabel 2.

Tabel 2. Variabel, Konstanta, dan Koefisien Regresi Linier untuk Tiap Model

Model	y	x	a	b
<i>Greenshields</i>	\bar{U}_s	D	\bar{U}_f	$-\bar{U}_f / D_j$
<i>Greenberg</i>	\bar{U}_s	$\ln D$	$\bar{U}_m \cdot \ln D_j$	$-\bar{U}_m$
<i>Underwood</i>	$\ln \bar{U}_s$	D	$\ln \bar{U}_f$	$-1 / D_m$

Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai a dan b pada model *Greenshields* menghasilkan nilai kecepatan arus bebas (\bar{U}_f) dan kerapatan macet (D_j), pada model *Greenberg* menghasilkan nilai kecepatan saat arus maksimum (\bar{U}_m) dan kerapatan macet D_j dan pada model *Underwood* menghasilkan nilai kecepatan arus bebas (\bar{U}_f) dan kerapatan saat arus maksimum (D_m).

Model Greenshields

- Mencari \bar{U}_f ; $a = \bar{U}_f = 160,20$
- Mencari D_j

$$b = -\frac{\bar{U}_f}{D_j}, D_j = -\frac{\bar{U}_f}{b} = \frac{-160,20}{-1,03} = 155,20$$

Model Greenberg

- Mencari \bar{U}_m
 $b = -\bar{U}_m = 0,89, \bar{U}_m = -b = 0,89$
- Mencari D_j ;
 $a = U_m \cdot \ln D_j, \ln D_j = \frac{a}{U_m}$
 $\ln D_j = \frac{148,66}{0,89} = 166,96$
 $D_j = e^{166,96} = 3,1E - 73$

Model Underwood

- Mencari \bar{U}_f ; $a = \ln \bar{U}_f$
 $\bar{U}_f = e^a = 2,7183^{148,66} = 3,7E + 64$
- Mencari D_m
 $b = -\frac{1}{D_m}, D_m = -\frac{1}{b} = \frac{-1}{-1,89} = 1,12$

Untuk mendapatkan formulasi hubungan kecepatan-keapatan, arus-kecepatan, dan arus-keapatan, nilai-nilai tersebut disubstitusi ke Persamaan (4), (5), (6) untuk model *Greenshields*, (9), (11), (12) untuk model *Greenberg*, dan (15), (17), dan (18) untuk model *Underwood*. Hasil analisis regresi linier sederhana ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Formulasi Hubungan antara Arus, Kecepatan, dan Kerapatan

Model	Kecepatan-Kerapatan	Arus-Kecepatan	Arus-Kerapatan
<i>Greenshields</i>	$\bar{U}_s = 148,66 - 0,89 D$	$V = 166,96 \bar{U}_s - 1,12 \bar{U}_s^2$	$V = 148,66D - 0,89 D^2$
<i>Greenberg</i>	$\bar{U}_s = 0,89 * \ln \left[\frac{3,1E - 73}{D} \right]$	$V = 3,1E - 73 \bar{U}_s \cdot e^{(-\frac{\bar{U}_s}{0,89})}$	$V = 0,89 D \cdot \ln \left[\frac{3,1E - 73}{D} \right]$
<i>Underwood</i>	$\bar{U}_s = 3,7E + 64 \cdot e^{(-\frac{D}{1,12})}$	$V = 1,12 \cdot \bar{U}_s \cdot \ln \left[\frac{3,7E + 64}{\bar{U}_s} \right]$	$V = 3,7E + 64 D \cdot e^{(-\frac{D}{1,12})}$

Analisis Korelasi dan Uji Signifikansi

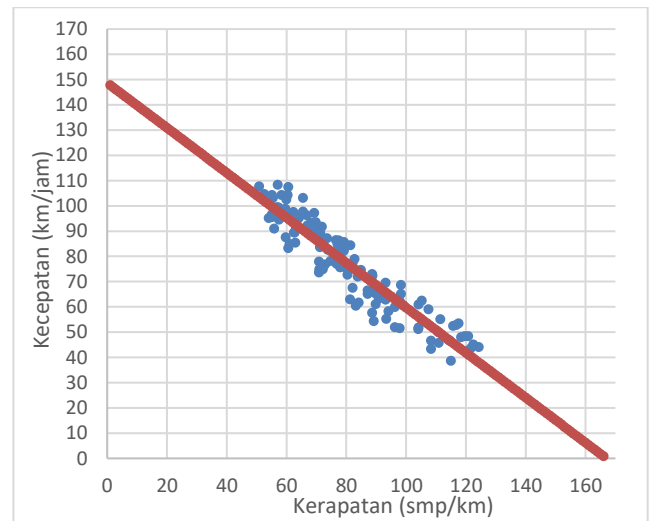
Hasil analisis korelasi dan uji signifikansi ditampilkan pada Tabel 4. Tabel tersebut menunjukkan bahwa model *Greenshields* memiliki nilai koefisien korelasi yang lebih tinggi. Pada kasus ini model *Greenshields* adalah model yang paling tepat, karena selain memenuhi syarat pada uji F dan t, model *Greenshields* juga memiliki nilai yang paling tinggi pada nilai koefisien korelasi (r) dan nilai determinasi (r²).

Tabel 4. Analisis Korelasi dan Uji Signifikansi

Model	Uji	Nilai	F tabel	t tabel
			$\alpha=0.1(90\%)$	$\alpha=0.1(90\%)$
<i>Greenshields</i>	F	3,06	2,75	
	t	-29,93		-1,29 => >1,29
	r	-0,94		
	r ²	0,88		
<i>Greenberg</i>	F	0,06	2,75	
	t	-21,73		-1,29 => >1,29
	r	-0,89		
	r ²	0,80		
<i>Underwood</i>	F	5,7E-61	2,75	
	t	-2,56		-1,29 => >1,29
	r	-0,24		
	r ²	0,06		

Hubungan Karakteristik Lalu Lintas

Model hubungan kecepatan (\bar{U}_s) dengan kerapatan (D) yang dihasilkan model linier *Greenshields* adalah $\bar{U}_s = 148,66 - 0,89 D$ (Gambar 9).

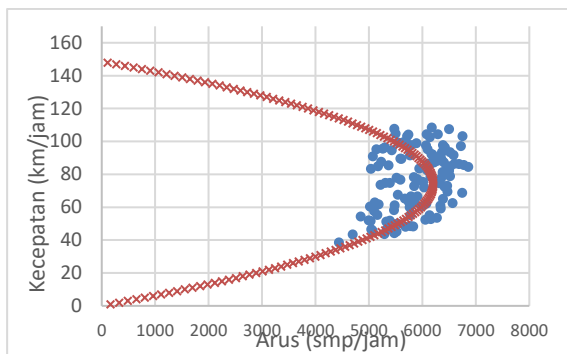


Gambar 9. Grafik hubungan kecepatan (\bar{U}_s) dengan kerapatan (D) (*Greenshields*)

Gambar 9 menunjukkan bahwa kecepatan dengan kerapatan mempunyai hubungan yang berbanding terbalik. Semakin tinggi kecepatan (\bar{U}_s) maka kerapatan (D) semakin rendah dan sebaliknya. Nilai kecepatan tertinggi adalah kecepatan saat arus bebas atau *free flow speed* (\bar{U}_f) yaitu 148,60 km/jam, Sedangkan nilai kerapatan tertinggi atau *jam density* (D_j) yaitu 166,96 smp/km.

Hubungan Arus (V) dengan kecepatan (\bar{U}_s) yang dihasilkan model linier *Greenshields*

adalah $V = 166,96 \bar{U}_s - 1,12 \bar{U}_s^2$ menghasilkan grafik yang ditampilkan pada Gambar 10.

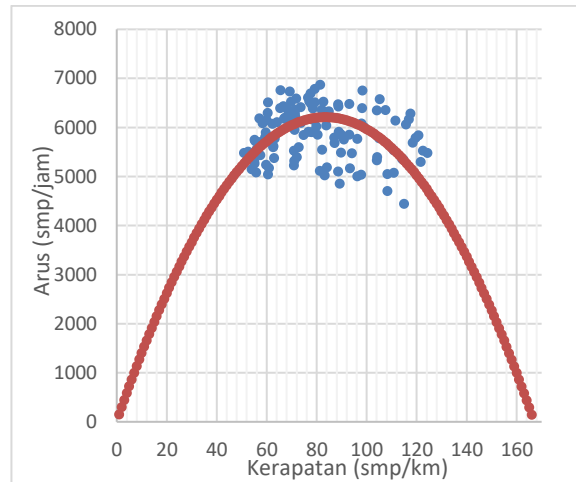


Gambar 10. Grafik Hubungan Arus (V) dengan Kecepatan (\bar{U}_s) (*Greenshields*)

Gambar 10 menunjukkan bahwa nilai arus maksimum (V_m) yaitu 6205,05 smp/jam terjadi pada kecepatan 74,33 km/jam. Sedangkan apabila kecepatan lebih besar atau lebih kecil dari 74,33 km/jam maka nilai arus akan turun dan lebih kecil dari 6205,05 smp/jam.

Model hubungan Arus (V) dengan kerapatan (D) yang dihasilkan model *Greenshields* adalah $V = 148,66 D - 0,89 D^2$, menghasilkan grafik yang ditampilkan pada Gambar 11.

Gambar 11 menunjukkan bahwa arus maksimum (V_m) adalah 6205,05 smp/jam terjadi pada saat nilai kerapatan 83,48 smp/km. Sedangkan apabila nilai kerapatan lebih atau kurang dari 83,48 smp/km, maka nilai arus akan turun dan lebih kecil dari 6205,05 smp/jam.



Gambar 11. Grafik Hubungan Arus (V) dengan Kerapatan (D) (*Greenshields*)

Analisis Gelombang Kejut

Karakteristik lalu lintas pada *bottleneck* berdasarkan model *Greenshields* menghasilkan arus maksimum (V_m) 6205,05 smp/jam/3-lajur, kerapatan macet atau *jam density* (D_j) 166,96 smp/km/3-lajur, kerapatan saat arus maksimum (D_m) 83,48 smp/jam/3-lajur, dan arus saat kerapatan macet (V_j) 0 smp/km/3-lajur.

Gelombang kejut ω_{AB} , ω_{BC} , dan ω_{AC} dihitung berdasarkan data permintaan arus (V) dan kerapatan (D) yang masuk segmen *bottleneck* dengan menggunakan persamaan (25), (26), dan (27) terhadap 120 interval. Beberapa hasil perhitungan kecepatan gelombang kejut yang ditunjukkan pada Tabel 5 adalah 12 interval dari total 120 interval.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Kecepatan Gelombang Kejut

In-terval ke-	V smp/jam	V_j smp/jam	V_m smp/jam	D smp/km	D_j smp/km	D_m smp/km	Kecepatan <i>Shock Wave</i>		
							ω_{AB}	ω_{BC}	ω_{AC}
							km/jam	km/jam	km/jam
	a	b	c	d	e	f	$g=(b-a)/(e-d)$	$h=(b-c)/(e-f)$	$i=(a-c)/(d-f)$
1	6138	0	6205	111.48	166.96	83.48	-110.64	-74.33	-2.39
2	5292	0	6205	121.56	166.96	83.48	-116.56	-74.33	-23.98
3	6162	0	6205	116.83	166.96	83.48	-122.92	-74.33	-1.29
4	6570	0	6205	105.27	166.96	83.48	-106.50	-74.33	16.75
5	6750	0	6205	98.29	166.96	83.48	-98.30	-74.33	36.80
6	5478	0	6205	124.28	166.96	83.48	-128.35	-74.33	-17.82
7	6276	0	6205	117.50	166.96	83.48	-126.90	-74.33	2.09
8	5832	0	6205	120.71	166.96	83.48	-126.09	-74.33	-10.02
9	6342	0	6205	104.10	166.96	83.48	-100.89	-74.33	6.64
10	5688	0	6205	118.42	166.96	83.48	-117.19	-74.33	-14.80
11	5718	0	6205	55.47	166.96	83.48	-51.29	-74.33	17.39
12	5856	0	6205	89.78	166.96	83.48	-75.88	-74.33	-55.37
Dst 120									

Tabel 5 menunjukkan bahwa hasil perhitungan analisis gelombang kejut pada masing-masing interval memiliki nilai gelombang kejut yang berbeda-beda tergantung dari besarnya arus (V) dan kerapatan (D) yang masuk ke segmen jalan *bottleneck*.

Nilai kecepatan gelombang kejut ω_{AB} , ω_{BC} , dan ω_{AC} setiap interval selanjutnya menjadi data input untuk mendapatkan nilai tundaan dan antrian pada setiap interval.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Tundaan dan Antrian

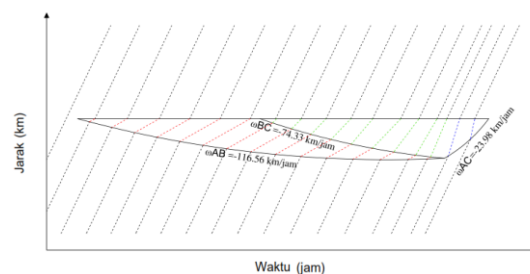
In-terval ke-	r	t_a	X_A	X_B	t_b	N	T
	menit	menit	km	km	menit	smp	smp*menit
	j	$k=jg/(h-g)$	$l=(ja/(e-d))/60$	$m=(j*(hg/(h-g)))/60$	$n=(jg/(h-g))*((h/i)+1)$	$o=((j+k)*a)/60$	$p=(j*o)/2$
1	1	-3,05	1,84	3,78	-97,63	-209	-104,72
2	1	-2,76	1,94	3,42	-11,32	-155	-77,62
3	1	-2,53	2,05	3,13	-148,19	-157	-78,55
4	1	-3,31	1,77	4,10	11,38	-253	-126,51
5	1	-4,10	1,64	5,08	4,18	-349	-174,46
6	1	-2,38	2,14	2,94	-12,29	-126	-62,81
7	1	-2,41	2,12	2,99	83,63	-148	-73,95
8	1	-2,44	2,10	3,02	-20,51	-140	-69,80
9	1	-3,80	1,68	4,71	38,71	-296	-147,89
10	1	-2,73	1,95	3,39	-16,47	-164	-82,21
11	1	2,23	0,85	-2,76	-7,29	307	153,69
12	1	-48,98	1,26	60,68	-114,74	-4683	-2341,40
Dst 120							

Tabel 6 menunjukkan perhitungan tundaan dan antrian pada beberapa interval (12) dari total 120 interval. Hasil perhitungan menunjukkan 78 interval tidak mengalami tundaan dan antrian. Sedangkan 42 interval lainnya mengalami tundaan dan antrian. Besarnya nilai tundaan dan antrian pada setiap interval bervariasi. Contohnya pada interval ke-1 nilai tundaan 104,72 smp*menit dan antrian 209 smp atau 940,5 meter (dengan asumsi panjang 1 smp = 4.5 meter). Interval ke-2 nilai tundaan 77,62 smp*menit dan antrian 155 smp atau 697,5 meter. Sedangkan pada interval ke-11 tidak terjadi tundaan dan antrian. Akumulasi total tundaan mencapai 40836 smp*menit. Sementara itu, akumulasi antrian (N) mencapai 81672 smp atau 367,5 km.

Terdapat atau tidaknya tundaan dan antrian tergantung arus dan kerapatan kendaraan yang melewati jalan tersebut. Jika arus dan kerapatan kendaraan tinggi, maka adanya penyempitan jalan memiliki pengaruh besar dan mengakibatkan tundaan dan antrian. Sebaliknya,

jika arus dan kerapatan kendaraan rendah, maka adanya penyempitan jalan tidak memiliki pengaruh.

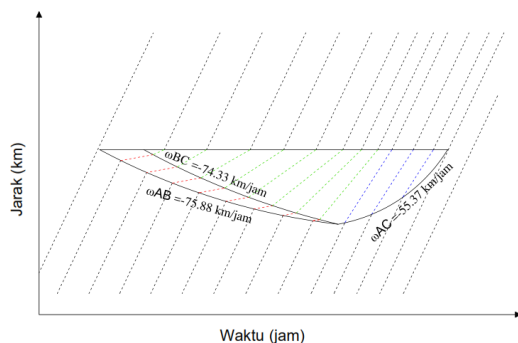
Berdasarkan hasil analisis gelombang kejut, perubahan kecepatan kendaraan pada segmen jalan *bottleneck* dapat dipresentasikan dalam grafik *vehicles trajectory* ditampilkan pada Gambar 12 dan Gambar 13. Hasil grafik *vehicles trajectory* pada interval No 2 dipresentasikan pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik *Trajectory Vehicles* pada Interval No 2

Gambar 12 menjelaskan bahwa Garis Hitam adalah bentuk kecepatan kendaraan yang

masih normal dan belum terpengaruh oleh *bottleneck*. Garis Merah adalah hasil pengaruh dari ω_{AB} , yang menunjukkan perlambatan laju kendaraan. Garis Hijau adalah akibat pengaruh dari ω_{BC} yang artinya laju kendaraan sedang mengalami pemulihan kecepatan. Garis Biru adalah pengaruh dari ω_{AC} yang menunjukkan bahwa laju kendaraan akan mendekati kecepatan normal atau sudah tidak dipengaruhi *bottleneck*. Hasil Grafik *Vehicles Trajectory* pada interval No 12 dipresentasikan pada Gambar 13.



Gambar 13. Grafik *Trajectory Vehicles* pada Interval No 12

Gambar 13 menjelaskan bahwa pergerakan lalu lintas akibat pengaruh dari *bottleneck*, memiliki kondisi yang mirip seperti Gambar 12. Kedua kondisi mengalami perlambatan, walaupun terdapat perbedaan besarnya nilai perlambatan tersebut.

Gambar 12 menunjukkan bahwa bentuk kurva lebih tipis dari pada Gambar 13. Interval no. 2 menghasilkan nilai $\omega_{AB} = -116,56$ km/jam, $\omega_{BC} = -74,33$ km/jam, $\omega_{AC} = -23,98$ km/jam, nilai antrian (N) = 155 smp/3-lajur dan nilai tundaan (T) = 77,62 smp.menit/3-lajur. Sedangkan, interval no. 12 menghasilkan nilai $\omega_{AB} = -75,88$ km/jam, $\omega_{BC} = -74,33$ km/jam, $\omega_{AC} = -55,37$ km/jam, nilai antrian (N) = 46,83 smp/3-lajur dan nilai tundaan (T) = 2341,40 smp.menit/3-lajur.

Kapasitas (C), Derajat Kejenuhan (DS), dan Level of Service (LOS)

Berdasarkan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) tahun 1997 nilai kapasitas dasar (C_0) adalah 2300 smp/jam/lajur. Sebelum penyempitan jalan terdapat 4 jalur sehingga nilai $C_0 = 9200$ smp/jam atau 4600 smp/30.menit/4.lajur. Nilai faktor penyesuaian kapasitas (FC_w) dengan lebar lajur 3,5 meter adalah 1.

Sedangkan kapasitas pada penyempitan jalan (3 lajur) atau arus maksimum (V_m)

berdasarkan *model linier greenshields* pada Tabel 5 adalah 6205,05 smp/jam/3-lajur atau 3102,525 smp/30.menit/3-lajur.

Hasil perhitungan derajat kejenuhan (DS) atau rasio V/C per 30 menit ditampilkan pada Tabel 7 untuk 3-lajur dan Tabel 8 untuk 4-lajur. Terlihat bahwa DS pada 3 lajur adalah E dan pada 4 lajur adalah C.

Tabel 7. Derajat Kejenuhan (DS) pada 3 lajur

Interval Waktu (per 30 menit)	Arus (V) (smp/30 menit)	Kapasitas (C) Penyempitan (smp/30.menit/3- lajur)	DS	LOS
1-30 menit	3024,20	3102,53	0,97	E
31-60 menit	2834,70	3102,53	0,91	E
61-90 menit	2937,00	3102,53	0,95	E
91-120 menit	2927,00	3102,53	0,94	E

Tabel 8. Derajat Kejenuhan (DS) 4 lajur

Interval Waktu (per 30 menit)	Arus (V) (smp/30 menit)	Kapasitas (C) Normal (smp/30.menit/4- lajur)	DS	LOS
1-30 menit	3024,20	4600	0,66	C
31-60 menit	2834,70	4600	0,62	C
61-90 menit	2937,00	4600	0,64	C
91-120 menit	2927,00	4600	0,64	C

PEMBAHASAN

Tundaan dan Antrian

Hasil Penelitian pada segmen pengurangan 4 lajur menjadi 3 lajur (lebar satu lajur 3,5 m) dari 120 interval terdapat 78 interval tidak mengalami tundaan dan antrian. Sedangkan 42 interval lainnya mengalami tundaan dan antrian.

Besarnya nilai tundaan dan antrian pada setiap interval bervariasi. Contohnya pada menit ke-1 nilai tundaan 104,72 smp*menit dan antrian 209 smp atau 940,5 meter (dengan asumsi panjang 1 smp = 4,5 meter). Menit ke-2 nilai tundaan 77,62 smp*menit dan antrian 155 smp atau 697,5 meter.

Terdapat atau tidaknya tundaan dan antrian tergantung besarnya arus dan kepadatan kendaraan yang melewati segmen jalan tersebut. Semakin besar nilai derajat kejenuhan (DS), semakin besar pula pengaruhnya terhadap tundaan dan antrian.

Pada penelitian ini arus dengan $DS > 0,91$ sampai 0,97 menghasilkan akumulasi tundaan mencapai 40836 smp*menit dan akumulasi antrian (N) mencapai 81672 smp pada 42 interval dalam 120 menit.

Derajat kejenuhan (DS) dan LOS

Nilai derajat kejenuhan saat jam sibuk di segmen pengurangan 4 lajur menjadi 3 lajur adalah 0,91 sampai 0,97, termasuk kategori *Level of Service E* (sangat buruk). Jika penyempitan jalan dihilangkan, maka nilai derajat kejenuhan menjadi 0,62 sampai 0,66 dengan kategori *Level of Service C* (cukup atau sedang).

Tindakan yang perlu dilakukan pada segmen penyempitan jalan, yaitu menghitung derajat kejenuhan (DS) untuk menentukan *Level of Service (LOS)*. Jika nilai $DS < 0.70$ (dengan nilai LOS A, B, atau C), maka penyempitan jalan tidak perlu dihilangkan. Sebaliknya, jika nilai $DS > 0.70$ (dengan nilai LOS D atau E) maka penyempitan jalan perlu dihilangkan. Agar nilai DS turun sehingga meningkatkan nilai LOS. Untuk itu perlu dipilih cara untuk membatasi arus lalu lintas yang masuk ke ruas jalan tersebut. Sebagai contoh mendorong pengguna jalan tidak menggunakan ruas jalan tersebut namun menggunakan alternative ruas jalan lainnya.

Tahapan perhitungan tundaan dan antrian menggunakan analisis gelombang kejut dapat membantu memperhitungkan desain jalan yang harus menggunakan lajur jalan. Sebagai contoh, pembangunan *fly over* di atas jalan tol, mempertimbangkan tundaan dan antrian yang terjadi akibat adanya penyempitan jalan. Dengan perhitungan tersebut dapat diambil antisipasi penanganan agar LOS jalan tol tersebut sesuai dengan standar yang disyaratkan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Tundaan dan antrian karena ada pengurangan 4 lajur menjadi 3 lajur (lebar satu lajur 3,5 m) di jalan tol menggunakan analisis gelombang kejut (*shock wave analysis*) menunjukkan bahwa dari 120 menit (2 jam) pengamatan terdapat 42 interval yang mengalami tundaan dan antrian.

Hasil perhitungan menunjukkan dalam 2 jam tersebut, pada arus dengan $DS > 0,91$ sampai 0,97 menghasilkan akumulasi tundaan

mencapai 40836 smp*menit dan secara total, antrian yang terjadi adalah 81.672 smp atau 367,5 km. Namun demikian, tundaan dan antrian yang terjadi tergantung pada jumlah arus yang masuk.

Nilai derajat kejenuhan pada 2 jam pengamatan, di segmen pengurangan 4 lajur menjadi 3 lajur adalah 0,91 sampai 0,97, termasuk kategori *Level of Service E* (sangat buruk). Untuk itu perlu dipilih cara untuk membatasi arus lalu lintas yang masuk ke ruas jalan tersebut.

Saran

Perhitungan tundaan dan antrian menggunakan analisis gelombang kejut dapat membantu memperhitungkan desain jalan yang harus mengalami pengurangan jumlah lajur. Dengan demikian dapat diambil antisipasi penanganan agar LOS jalan tol tersebut sesuai dengan standar yang disyaratkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih pada semua pihak yang telah membantu mewujudkan karya tulis ilmiah ini, khususnya kepada dosen pembimbing dan dosen penguji yang telah memberikan banyak masukan dan saran.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahn, S. dan Chen, D. 2017. *Capacity-drop at extended bottlenecks: Merge, diverge, and weave*. Science Direct Transportation Research Part B Elsevier. 108: 1-20.
- Anuar, K. dan Cetin, M. 2017. Estimating Freeway Traffic Volume Using Shockwaves and Probe Vehicle Trajectory Data. *Science Direct Transportation Research Procedia*. 22: 183–192.
- Gerlough, D.L., Huber, M.J. 1975. *Traffic Flow Theory*. Washington DC. Transportation Research Board.
- Immers, dan Logghe. 2002. *Traffic Flow Theory*. Leuven. Katholieke Universiteit Leuven.
- Indonesia, Departemen Pekerjaan Umum (DPU) Direktorat Bina Marga. 1997. *Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI)*. Jakarta: DPU Direktorat Bina Marga.
- Indrajaya, yupiter. 2002. *Pengaruh Penyempitan Jalan terhadap karakteristik lalu lintas*. Semarang. UNDIP.
- Long, Jin W. 2017. *Kinematic wave models of lane-drop bottlenecks*. Science Direct

- Transportation Research Part B Elsevier. 105: 507-522.
- May, Adolf D. 1990. *Traffic Flow Fundamental*. New Jersey. Prentice-Hall Inc.
- Motamedidehkordi, N., Margretier, M., dan Benz, T. 2016. *Shockwave Suppression by Vehicle-to-Vehicle Communication*. ScienceDirect Transportation Research Procedia. 15: 471–482.
- Navandar, Yogeshwar V., Dr. Ashish Dhamaniya, dan Dr. D. A. Patel. 2019. A Quick Method for Estimation of Level of Service at Manually Operated Tollbooths under Mixed Traffic Conditions. *ScienceDirect Transportation Research Procedia* 48: 3107–3120.
- Ramadan, O. E. dan Sisiopiku, V. P. 2016. Impact of Bottleneck Merge Control Strategies on Freeway Level of Service. *ScienceDirect Transportation Research Procedia* 15: 583–593.
- Rompis, Samuel Y. R. 2018. *Traffic Flow Model and Shockwave Analysis*. Manado. Universitas Sam Ratulangi.
- Said. 2004. *Kajian Satu Persimpangan Sebidang Jalan dan Jalan Rel*. Bandung. ITB.
- Setiyaningsih, Ika. 2007. *Karakteristik Lalu lintas Pada Persilangan sebidang jalan dan Jalan Rel*. Bandung. ITB.
- Sudjana. 2005. *Metode Statistika*. Bandung. Tarsito.
- Sugiyono. 2007. *Statistika untuk Penelitian*. Bandung. CV. Alfabeta.
- Vikram, D., Chakroborty, P. dan Mittal, S. 2013. Exploring the behavior of LWR continuum models of traffic flow in presence of Shockwaves. *ScienceDirect Procedia-Social and Behavioral Sciences* 104: 412–421.