

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)

Luthfi Ramadhan¹⁾, Agus Sumarsono²⁾, Amirotul M.H.M.³⁾

¹⁾ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret

²⁾³⁾ Pengajar Program Studi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret

Jalan Ir. Sutami No. 36A Surakarta 57126 Telp: 0271647069. E-mail: luthfi.ramadhan.lr@student.uns.ac.id

Abstract

Bottleneck at Jend. Ahmad Yani Street below Gilingan Viaduct often creates traffic delay especially at peak hour. This delay is caused by bottleneck which results shockwave (ω) to be formed. This study used passenger car equivalence (PCE) based on headway ratio analysis compared to Indonesian Highway Capacity Manual (MKJI) 1997. Mathematical correlations between speed (S), volume (V), and density (D) were made by using Greenshields Model. The model was then used to calculate values of the shockwaves formed. From the values obtained could be calculated maximum queue length (Q_m) and needed normalization time (T). In this study, it was obtained the following results. Based on headway ratio analysis, PCM of motorcycle (MC) = 0,43; PCM of light vehicle (LV) = 1,00; and PCM of heavy vehicle (HV) = 1,88. While according to MKJI 1997, PCM of MC = 0,30; PCM of LV = 1,00; and PCM of HV = 1,20. And also based on headway ratio analysis in average, $\omega_{AB} = -3,74$; $\omega_{CB} = -14,19$; $\omega_{AC} = 8,29$; $Q_m = 0,10$ km; and T = 73,18 s. While according to MKJI 1997 in average, $\omega_{AB} = -5,05$; $\omega_{CB} = -17,78$; $\omega_{AC} = 8,65$; $Q_m = 0,13$ km; and T = 95,27 s.

Keywords: bottleneck, shockwave, headway, Greenshields model

Abstrak

Penyempitan jalan di Jalan Jend. Ahmad Yani dibawah *Viaduct* Gilingan seringkali menimbulkan tundaan lalu lintas terutama pada jam puncak. Tundaan ini diakibatkan oleh *bottleneck* yang menyebabkan terbentuknya gelombang kejut (ω). Studi ini menggunakan ekuivalensi mobil penumpang (EMP) atas dasar analisis rasio *headway* dibandingkan dengan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997. Hubungan matematis antara kecepatan (S), arus (V), dan kepadatan (D) dibuat menggunakan Model *Greenshield*. Model tersebut kemudian digunakan untuk menghitung nilai gelombang kejut yang terbentuk. Dari nilai yang didapat dapat dihitung panjang antrian maksimum (Q_m) dan waktu penormalan (T) yang dibutuhkan. Dalam studi ini didapatkan hasil sebagai berikut. Berdasarkan analisis rasio *headway*, EMP sepeda motor (MC) = 0,43; EMP kendaraan ringan (LV) = 1,00; dan EMP kendaraan berat (HV) = 1,88. Sedangkan menurut MKJI 1997, EMP MC = 0,30; EMP CM of LV = 1,00; dan EMP HV = 1,20. Begitu pula secara rata-rata berdasarkan analisis rasio *headway*, $\omega_{AB} = -3,74$; $\omega_{CB} = -14,19$; $\omega_{AC} = 8,29$; $Q_m = 0,10$ km; dan T = 73,18 s. Sedangkan secara rata-rata menurut MKJI 1997, $\omega_{AB} = -5,05$; $\omega_{CB} = -17,78$; $\omega_{AC} = 8,65$; $Q_m = 0,13$ km; dan T = 95,27 s.

Kata Kunci: penyempitan, gelombang kejut, *headway*, model *Greenshield*

PENDAHULUAN

Sebagai salah satu kota besar di Indonesia dan pusat kegiatan (*Central Business District/CBD*) di wilayah regionalnya, Kota Surakarta memiliki tingkat pergerakan yang tinggi. Hal ini tentunya meningkatkan potensi terjadinya masalah-masalah transportasi. Surakarta juga memiliki banyak simpang, palang perlintasan kereta api dan penyempitan ruas yang merupakan lokasi terjadinya konflik lalu lintas. Konflik lalu lintas menimbulkan antrian yang berakibat kemacetan. Penyempitan (*bottleneck*) merupakan lokasi dimana terjadi perbedaan kapasitas jalan sebelum, pada saat dan sesudah penyempitan sehingga terjadi antrian serta perubahan kecepatan, kepadatan dan arus. Sebagai contoh terjadi saat perbaikan jalan, kecelakaan lalu lintas, di jembatan dan di *underpass*. Dalam penelitian ini diambil *underpass* di bawah *Viaduct* Gilingan sebagai studi kasus. Pemilihan lokasi tersebut dikarenakan saat *peak hour* terjadi kemacetan yang cukup parah disana.

Kondisi pada *bottleneck* dapat digambarkan dengan studi gelombang kejut (*shockwave*). Gelombang kejut dapat didefinisikan dengan diskontinuitas arus dan kepadatan lalu lintas. Ketika mendekati awal *bottleneck* di bawah *viaduct* kendaraan akan menurunkan kecepatan, Kepadatan bertambah, dan antrian terbentuk. Fase ini disebut gelombang kejut bentukan. Pada suatu saat tertentu di bawah *viaduct* kendaraan akan melaju dengan kecepatan konstan, sebelum akhirnya saat mendekati akhir *bottleneck* kendaraan akan menaikkan kecepatan, kepadatan berkurang, dan antrian terurai. Fase ini disebut gelombang kejut penguraian. Dengan menggunakan Model *Greenshields* pada grafik hubungan arus (V) dengan kepadatan (D) dapat diketahui gelombang kejut yang terjadi.

Ekuivalensi Mobil Penumpang (EMP) pada penelitian ini menggunakan analisis rasio *headway* dibandingkan dengan EMP dari MKJI (Manual Kapasitas Jalan Indonesia) tahun 1997. Pemilihan analisis rasio *headway* dikarenakan arus lalu tumbuh setiap tahunnya, sehingga EMP dari MKJI 1997 kurang mewakili kondisi lalulintas saat ini. Pada penelitian ini dihitung pula panjang antrian maksimum (Q_m) dan waktu penormalan (T) yang akan diuji validitas dengan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*).

EKUIVALENSI MOBIL PENUMPANG (EMP)

Nilai EMP didapat dengan mencatat waktu antara kendaraan (*time headway*) yang berurutan pada saat kendaraan-kendaraan tersebut melewati suatu titik yang telah ditentukan. Kombinasi kendaraan yang diperlukan antara lain LV-LV, LV-HV, HV-LV, HV-HV, MC-MC, LV-MC, dan MC-LV. Nilai EMP dihitung dengan cara membagi nilai rata-rata *time headway* pasangan kendaraan, dan hasil tersebut benar apabila memenuhi persamaan :

$$t_a + t_b = t_c + t_d \quad (1)$$

dengan nilai koreksi k ,

$$k = \frac{na.nb.nc.nd.[ta+tb+tc+td]}{nb.nc.nd+na.nc.nd+na.nb.nd+na.nb.nc} \quad (2)$$

Apabila persaratan tersebut memenuhi syarat, maka nilai EMP HV dapat dihitung dengan persamaan :

$$emp = \frac{td_k}{ta_k} \quad (3)$$

Karena sampel dipilih secara acak, maka dimungkinkan adanya suatu kesalahan standar deviasi dari distribusi ini dapat dinyatakan sebagai *standard error* (E), selanjutnya dapat dihitung :

Standar deviasi

$$s = \sqrt{\left(\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)} \quad (4)$$

Standard error

$$E = \frac{s}{n^{0,5}} \quad (5)$$

PARAMETER ARUS LALULINTAS

1. Arus (*volume*)

Menurut Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997, arus lalulintas (V) diartikan sebagai jumlah kendaraan bermotor yang melewati satu titik pada jalan per satuan waktu, dinyatakan dalam kendaraan per jam.

2. Kecepatan (*speed*)

Kecepatan didefinisikan sebagai laju dari suatu pergerakan kendaraan dihitung dalam jarak persatuan waktu. Sehingga kecepatan dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \frac{L}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

Dalam pengukuran kecepatan pada penelitian ini dengan vara manual, panjang penggal jalan yang dipakai untuk mengukur waktu tempuhnya adalah berdasarkan perkiraan kecepatan rata-rata pada tabel berikut :

Tabel 1. Rekomendasi Panjang Jalan untuk Studi Kecepatan

No.	Kecepatan rata-rata (km/jam)	Panjang penggal jalan (m)
1.	≤ 40	25
2.	40 - 65	50
3.	≥ 65	75

Sumber : BINKOT No.001/T/BNKT/1990

3. Kepadatan (*density*)

Kepadatan didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang menempati suatu panjang jalan atau lajur, secara umum dinyatakan dalam kendaraan per kilometer (kend/km) atau satuan mobil penumpang per kilo meter (smp/km). Jika panjang ruas jalan yang diamati adalah L , dan terdapat N kendaraan, maka kepadatan D dapat dihitung sebagai berikut :

$$D = \frac{N}{L} \quad (7)$$

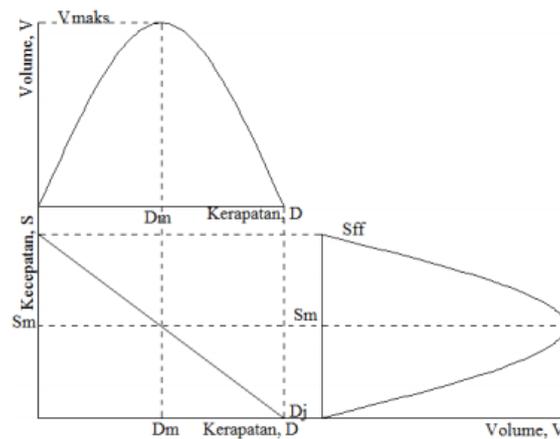
METODE GREENSHIELD

Greenshields merumuskan bahwa hubungan matematis antara Kecepatan- Kepadatan (S - D) diasumsikan linier, sehingga persamaan yang dihasilkan dari model *Greenshields* diperlihatkan pada tabel berikut :

Tabel 2. Rangkuman Persamaan Model *Greenshields*

Hubungan	Persamaan yang dihasilkan	Hubungan	Persamaan yang dihasilkan
S-D	$S = S_{ff} - \frac{S_{ff}}{D_j} \cdot D$	V_M	$V_M = \frac{D_j \cdot S_{ff}}{4}$
V-D	$S = D \cdot S_{ff} - \frac{S_{ff}}{D_j} \cdot D$	S_M	$S_M = \frac{S_{ff}}{2}$
V-S	$V = D_j \cdot S_{ff} - \frac{D_j}{S_{ff}} \cdot S^2$	D_M	$D_M = \frac{D_j}{2}$

Sumber: Tamin (2008)



Gambar 1. Hubungan Volume, Kecepatan, dan Kepadatan

Sumber : Khisty (1990)

GELOMBANG KEJUT (*SHOCKWAVE*)

Gelombang kejut dapat digambarkan sebagai gerakan pada arus lalulintas akibat adanya perubahan nilai kepadatan dan arus lalulintas. Apabila arus dan kepadatan relatif tinggi, titik pada saat kendaraan harus mengurangi kecepatannya ditandai dengan nyala lampu rem, dan titik tersebut akan bergerak ke arah datangnya lalulintas. Gerakan lampu rem menyala relatif terhadap jalan sebenarnya merupakan gerakan gelombang kejut. Gelombang kejut pada penyempitan jalan dimulai ketika arus lalulintas mengalami hambatan yang menyebabkan penyempitan atau efek leher botol (*bottleneck*) sehingga mengakibatkan terjadi antrian dan proses pemulihannya setelah arus lalulintas tidak mengalami hambatan.

(Tamin, 2008)

Berdasarkan gambar 2, nilai gelombang kejut saat arus lalulintas mengalami adalah sebagai berikut :

1. Ada tiga gelombang kejut yang terjadi pada saat arus lalulintas mengalami hambatan (t_1), yaitu :

$$\omega_{DA} = \frac{V_A - V_D}{D_A - D_D} = S_A \quad (8)$$

$$\omega_{DB} = \frac{V_B - V_D}{D_B - D_D} = S_B \quad (9)$$

$$\omega_{AB} = \frac{V_B - V_A}{D_B - D_A} \quad (10)$$

2. Arus lalulintas dengan kondisi A, B dan D akan terus terjadi sampai arus lalulintas tidak mengalami hambatan (t_2). Sehingga terjadi arus lalulintas dengan kondisi C dimana pada waktu t_2 garis henti arus lalulintas akan meningkat dari V_B menjadi jenuh (saturated). Ada dua gelombang kejut yang terbentuk, yaitu :

$$\omega_{DC} = \frac{V_C - V_D}{D_C - D_D} \quad (11)$$

$$\omega_{CB} = \frac{V_B - V_C}{D_B - D_C} \quad (12)$$

3. Arus lalulintas dengan kondisi D, C, B dan A terus terjadi sampai sampai ω_{AB} dan ω_{BC} mencapai t_3 . Selang waktu antara t_2 sampai dengan t_3 dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$t_3 - t_2 = r \cdot \left| \frac{\omega_{AB}}{\omega_{CB} - \omega_{AB}} \right| \quad (13)$$

Dengan r adalah durasi efektif terjadinya hambatan (detik) panjang antrian maksimum dapat terjadi pada waktu t_3 dapat dihitung dengan persamaan :

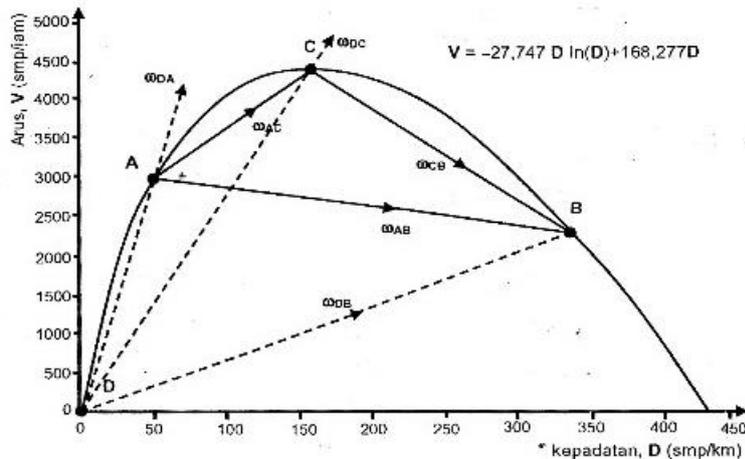
$$Q_M = \frac{r}{3600} \cdot \left| \frac{\omega_{CB} - \omega_{AB}}{\omega_{CB} - \omega_{AB}} \right| \quad (14)$$

4. Pada kondisi t_3 , akan terbentuk satu gelombang kejut baru, yaitu :

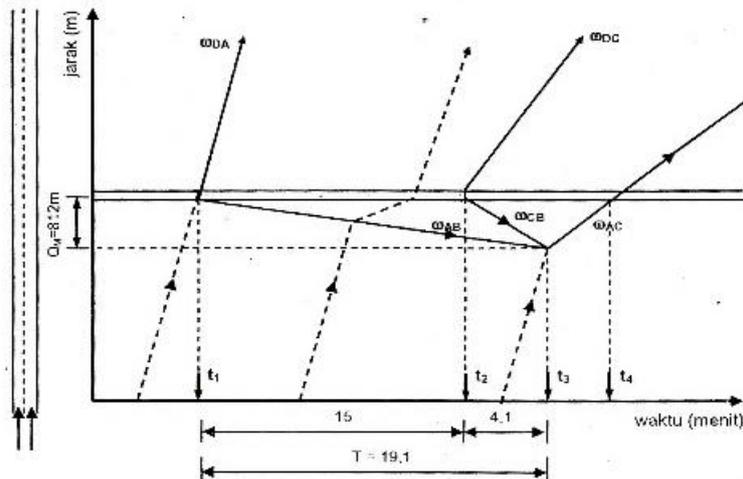
$$\omega_{Ac} = \frac{V_c - V_A}{D_c - D_A} \quad (15)$$

5. Selanjutnya untuk waktu penormalan yaitu selang waktu $t_2 - t_4$ dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$T = t_4 - t_2 = \frac{r \cdot \omega_{AB}}{\omega_{CB} - \omega_{AB}} \cdot \left| \frac{\omega_{CB}}{\omega_{AC}} + 1 \right| \quad (16)$$



Gambar 2. Gelombang Kejut Pada Penyempitan Jalan (Arus-Kepadatan)
Sumber: Tamin (2008)



Gambar 3. Gelombang Kejut Pada Penyempitan Jalan (Jarak-Waktu)
Sumber: Tamin (2008)

UJI STATISTIK

Nilai panjang antrian (Q_m) dan waktu neormalan (T) hasil hitungan diuji validitas terhadap nilai riil di lapangan dengan uji statistik MAPE

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{|b_i - a_i|}{a_i} \times 100 \% \quad (17)$$

METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi kasus yaitu dengan melakukan survei di lapangan dan mengumpulkan keterangan dari buku atau jurnal. Tahapan metode penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Melakukan studi pustaka mengenai teori yang berkaitan dengan penelitian ini, kemudian dilakukan penyusunan metodologi penelitian.
2. Melakukan survei pendahuluan untuk mengetahui situasi sesungguhnya di lapangan dan menetapkan waktu survei yang sesuai.
3. Melakukan survei dengan merekam lalu lintas menggunakan kamera untuk mendapatkan data primer, antara lain jumlah kendaraan untuk menghitung volume, kecepatan, durasi lampu merah, waktu *headway* panjang antrian, dan waktu penormalan.
4. Menganalisis dan mengolah data hasil survey menggunakan aplikasi *Microsoft Excel*.
5. Melakukan perbandingan dari hasil analisis dengan data yang terjadi di lapangan (*real*), serta mencari korelasinya.
6. Memberikan kesimpulan dan saran dari hasil penelitian.

Dilakukan 4 survei pada penelitian ini, sebagai berikut:

1. Survei Pendahuluan
Survei pendahuluan bertujuan untuk menentukan lokasi penelitian, peralatan yang dibutuhkan dalam survei, dan data apa saja yang diperlukan dalam analisa, serta metode pengumpulan data. Data arus lalulintas yang dicari saat dilakukan saat survei adalah arus lalulintas (kend/jam), kecepatan kendaraan (km/jam), *time headway* (detik), panjang antrian (meter) dan waktu penormalan (detik)
2. Survei Desain
Survei desain dilakukan untuk mengetahui keadaan lokasi penelitian dan merencanakan penempatan *surveyor*.
3. Survei Pilot
Survei pilot dilakukan untuk persiapan dan simulasi sebelum survei primer/utama dilakukan. Sehingga apa yang diperlukan saat survei utama dapat dipersiapkan saat dilakukan survei pilot.
4. Survei Primer/Utama
Survei primer dilakukan untuk mendapatkan data arus lalulintas (volume), data kecepatan (kecepatan rerata ruang), *time headway*, panjang antrian dan waktu penormalan pada ruas jalan yang diamati.

Data arus didapat dengan menghitung jumlah kendaraan yang melewati ruas yang ditinjau. kendaraan dibagi menjadi sepeda motor (MC), kendaraan ringan (LV) dan kendaraan berat (HV). Data kecepatan didapat dengan menghitung waktu tempuh yang dibutuhkan kendaraan/*platoon* kendaraan untuk melintasi panjang penggal pengamatan (25 meter). Data *time headway* didapatkan dengan menghitung waktu antara bumper depan 2 kendaraan yang berurutan. Terdapat 7 kombinasi kendaraan, yakni MC-MC, MC-LV, LV-MC, LV-LV, HV-HV, HV-LV dan LV-HV. Panjang antrian diukur dari awal penyempitan sampai dengan akhir terjadinya antrian. Sedangkan untuk waktu penormalan dihitung dari lamanya antrian kendaraan yang terjadi saat terjadi sampai jalan kembali pada posisi normal. Penghitungan waktu penormalan dimulai saat antrian mulai mengurai meninggalkan penyempitan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan nilai EMP di penyempitan Jalan Jend. Ahmad Yani melewati *Viaduct* Gilingan dengan analisis rasio *headway* didapatkan nilai EMP MC sebesar 0,43 dan EMP HV sebesar 1,88. Sedangkan EMP berdasarkan MKJI (Manual Kapasitas Jalan Indonesia) 1997 yang merupakan standar baku pedoman perhitungan jalan dan lalulintas di Indonesia, diperoleh nilai EMP kendaraan MC sebesar 0,30 dan HV sebesar 1,20.

Dengan menggunakan model Greenshield didapatkan hubungan matematis antar parameter lalulintas sebagai berikut:
EMP analisis rasio headway:

Hubungan Kecepatan-Kepadatan : $S = 60,18 - 0,38 D$

Hubungan Volume-Kecepatan : $V = 60,18 D - 0,38 D^2$

Hubungan Volume-Kepadatan : $V = 157,16 S - 2,61 S^2$

EMP MKJI 1997:

Hubungan Kecepatan-Kepadatan : $S = 60,25 - 0,47 D$

Hubungan Volume-Kecepatan : $V = 60,25 D - 0,47 D^2$

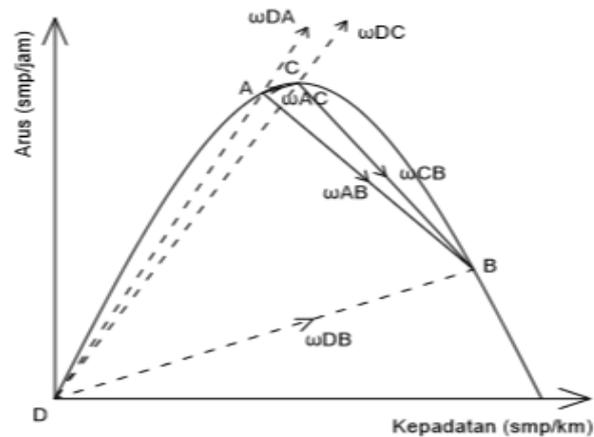
Hubungan Volume-Kepadatan : $V = 127,32 S - 2,11 S^2$

Gelombang kejut yang terjadi pada penyempitan jalan dapat dianalisis apabila hubungan matematis antara volume-kepadatan telah diketahui dan kondisi volume lalu lintas telah ditentukan. Gelombang kejut mengakibatkan kemacetan sehingga terdapat panjang antrian maksimum yang terjadi selama arus lalu lintas mengalami hambatan dan waktu penormalan yang dibutuhkan sampai keadaan volume lalu lintas dari jenuh menjadi normal kembali.

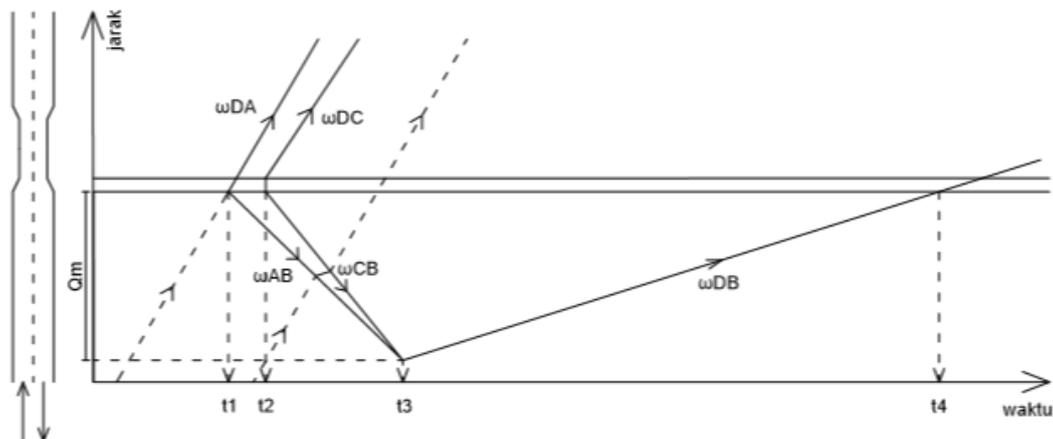
Tabel 3. Nilai Gelombang Kejut (ω), Panjang Antrian (Q_m), dan Waktu Penormalan (T)

EMP	Nilai	Kecepatan Gelombang Kejut			Durasi Efektif (detik)	Q_m (km)	T (detik)
		ω_{ab} (km/jam)	ω_{cb} (km/jam)	ω_{ac} (km/jam)			
Headway	Σ	-97.21	-387.37	215.41	2199.30	2.50	1902.66
	Rata-rata	-3.74	-14.90	8.29	61.09	0.10	73.18
MKJI 1997	Σ	-136.20	-480.06	233.68	2199.30	3.57	2572.35
	Rata-rata	-5.04	-17.78	8.65	61.09	0.13	95.27

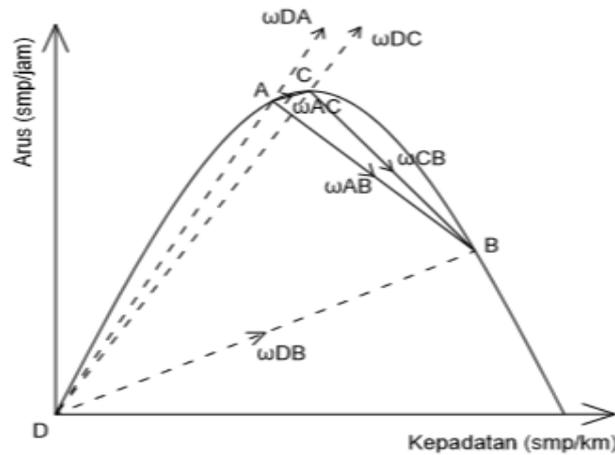
Gelombang kejut yang terjadi pada penyempitan Jalan Jend. Ahmad Yani melewati *Viaduct* Gilingan diperlihatkan pada gambar 3 dan 5 kurva volume - kepadatan. Pada gambar 3 diperlihatkan terdapat beberapa gelombang kejut yang terjadi yaitu ω_{da} (gelombang kejut maju bentukan), ω_{db} (gelombang kejut diam depan), ω_{ab} (gelombang kejut mundur bentukan), ω_{dc} (gelombang kejut maju pemulihan), ω_{cb} (gelombang kejut mundur pemulihan), dan ω_{ac} (gelombang kejut maju pemulihan) diambil contoh gambar kurva arus-kepadatan gelombang kejut dengan waktu penormalan terbesar. Sedangkan gambar 4 dan 6 memperlihatkan diagram hubungan panjang antrian, gelombang kejut, dan waktu saat mulainya arus lalu lintas mengalami hambatan hingga waktu penormalan yang terjadi, diambil contoh gambar diagram jarak-waktu pada jam 6.25 – 6.30 WIB.



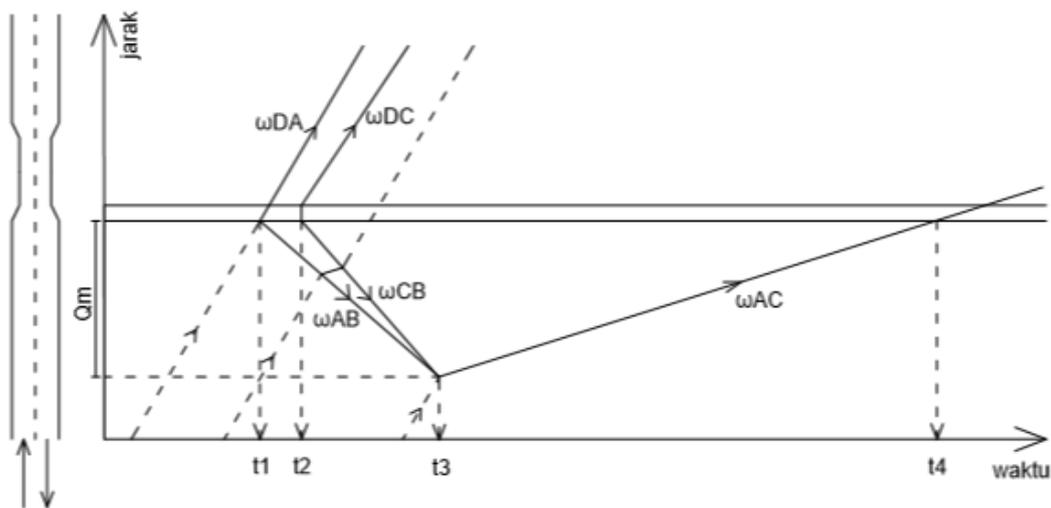
Gambar 4. Kurva Volume – Kepadatan (EMP Headway)



Gambar 5. Diagram Jarak – Waktu (EMP Headway)



Gambar 6. Kurva Volume – Kepadatan (EMP MKJI 1997)



Gambar 7. Diagram Jarak – Waktu (EMP MKJI 1997)

Nilai panjang antrian (Q_m) dan waktu neormalan (T) hasil hitungan diuji validitas terhadap nilai riil di lapangan dengan uji statistik MAPE. Hasil perhitungan ditampilkan berikut ini:

Tabel 4. Hasil Uji Validitas Model

Uji Validitas	Panjang Antrian Maksimum (Q_m) (km)		Waktu Penormalan (T) (detik)	
	EMP Headway	EMP MKJI 1997	EMP Headway	EMP MKJI 1997
r	0,8912	0,8858	0,1906	0,2033
SD	0,0056	0,0099	23,24	28,84
MAPE (%)	1,08 %	2,03 %	3,35 %	3,99 %

SIMPULAN

- Berdasarkan analisis rasio *headway*, EMP sepeda motor (MC) = 0,43; EMP kendaraan ringan (LV) = 1,00; dan EMP kendaraan berat (HV) = 1,88. Sedangkan menurut MKJI 1997, EMP MC = 0,30; EMP CM of LV = 1,00; dan EMP HV = 1,20.
- Secara rata-rata berdasarkan analisis rasio *headway*, $\omega_{ab} = -3,74$; $\omega_{cb} = -14,19$; $\omega_{ac} = 8,29$; $Q_m = 0,10$ km; dan $T = 73,18$ s. Sedangkan secara rata-rata menurut MKJI 1997, $\omega_{ab} = -5,05$; $\omega_{cb} = -17,78$; $\omega_{ac} = 8,65$; $Q_m = 0,13$ km; dan $T = 95,27$ s.
- Didapatkan nilai uji validitas antara panjang antrian maksimum hasil perhitungan dan kondisi riil di lapangan dengan MAPE sebesar 1,08% ($EMP_{Headway}$) dan 2,03% (EMP_{MKJI}). Sedangkan untuk waktu penormalan sebesar 3,35% ($EMP_{Headway}$) dan 3,99% (EMP_{MKJI}).

REFERENSI

- Andiani, Christy A. 2013. *Studi Penetapan Nilai Ekuivalensi Mobil Penumpang (EMP) Kendaraan Bermotor Menggunakan Metode Time Headway dan Aplikasinya untuk Menghitung Kinerja Ruas Jalan (Kasus pada Ruas . Jalan Raya SoloSragen Km.12)*. Surakarta: Jurnal Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta.
- Anonim. 2005. *Buku Pedoman Penulisan Tugas Akhir, Surakarta: Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret, Surakarta.*
- Direktorat Jendral Bina Marga, 1997. *Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997*, Jakarta.
- Kasenda, Natalia Diane. 2013. *Analisa Gelombang Kejut dan Pengaruhnya terhadap Arus Lalulintas di Jalan Sarapung Manado*. Surakarta: Jurnal Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Morlok, Edward K. 1978. *Introducing to Transportation Engineering and Planning*. Mc Graw-Hill, Inc.
- Pratiwi, Lintang Ayu. 2015. *Gelombang Kejut pada Silang Kereta Api Menggunakan EMP Atas Dasar Headway*. Surakarta: Jurnal Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Salter, R.J. 1980. *Highway Traffic Analysis and Design*. The Macmillan Press Ltd.
- Tamin, Ofyar Z. 2003. *Perencanaan dan Pemodelan Transportasi: Contoh Soal dan Aplikasi*. ITB. Bandung