

**TUNDAAN PERJALANAN AKIBAT PENYEMPITAN BADAN JALAN
OLEH ANTRIAN *FOLLOW-UP* YANG TERJADI PADA AREA *U-TURN***

(Skripsi)

Oleh

**JEANE AYU CLAUDIA
NPM 1615011042**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

TUNDAAN PERJALANAN AKIBAT PENYEMPITAN BADAN JALAN OLEH ANTRIAN *FOLLOW-UP* YANG TERJADI PADA AREA *U-TURN*

Oleh

JEANE AYU CLAUDIA

Bandar Lampung sebagai salah satu kota dengan tingkat mobilitas kendaraan yang cukup tinggi, tentu tidak dapat terhindar dari adanya kemacetan lalu lintas. Inilah yang terjadi di area *u-turn* Kedaton Medical Center Jalan ZA Pagar Alam, Bandar Lampung. Kemacetan ini disebabkan karena ada antrian kendaraan yang akan melakukan gerak *u-turn*. Antrian kendaraan ini kemudian menimbulkan antrian *follow-up* yang perlahan memanjang dan menyebabkan terjadinya penyempitan jalan. Penyempitan jalan ini kemudian menjadi penyebab timbulnya tundaan perjalanan. Penelitian ini akan meninjau karakteristik arus lalu lintas, seperti volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas yang kemudian akan dilakukan analisis gelombang kejut akibat adanya antrian kendaraan pada area *u-turn* di ruas jalan tersebut. Selanjutnya, dengan adanya waktu tempuh kendaraan pada arus terganggu dan tidak terganggu dapat diketahui selisih waktu tempuh yang akan dijadikan sebagai besarnya tundaan perjalanan. Pada ruas jalan arah Rajabasa-Kedaton pukul 07.00-09.00 WIB, gelombang kejut yang terjadi adalah ω_{DA} sebesar 12,95 km/jam, ω_{DB} sebesar 1,50 km/jam, ω_{AB} sebesar -0,92 km/jam, ω_{DC} sebesar 4,93 km/jam, ω_{CB} sebesar -11,08 km/jam, dan ω_{AC} sebesar 2,63 km/jam. Pada ruas jalan arah Rajabasa-Kedaton pukul 16.00-18.00 WIB, gelombang kejut yang terjadi adalah ω_{DA} sebesar 14,76 km/jam, ω_{DB} sebesar 1,68 km/jam, ω_{AB} sebesar -1,20 km/jam, ω_{DC} sebesar 5,59 km/jam, ω_{CB} sebesar -8,96 km/jam, dan ω_{AC} sebesar 2,58 km/jam. Pada ruas jalan arah Rajabasa-Kedaton pukul 07.00-09.00 WIB, terjadi tundaan perjalanan selama 11,68 detik dan penurunan kecepatan sebesar 6,87 km/jam. Pada ruas jalan arah Rajabasa-Kedaton pukul 16.00-18.00 WIB, terjadi tundaan perjalanan selama 21,41 detik dan penurunan kecepatan sebesar 17,67 km/jam.

Kata kunci: gelombang kejut, penyempitan jalan, tundaan perjalanan

ABSTRACT

TRAVEL DELAY DUE TO BOTTLENECK EFFECT OF THE ROADWAY BY THE FOLLOW-UP QUEUE THAT OCCURS AT THE U-TURN AREA

By

JEANE AYU CLAUDIA

Bandar Lampung, as one of the cities with a high level of vehicle mobility, certainly cannot avoid traffic congestion. This is what happened at the Kedaton Medical Center u-turn area on Jalan ZA Pagar Alam, Bandar Lampung. This congestion is caused by a queue of vehicles that will make a u-turn. This queue of vehicles then creates a follow-up queue that slowly extends and causes road narrowing. This research will review the characteristics of traffic flow, such as volume, speed, and traffic density which will then be analyzed for shock waves due to the queue of vehicles in the u-turn area on the road. Furthermore, with the vehicle travel time in the disturbed and undisturbed flow, the difference in travel time can be known which will be used as the amount of travel delay. On the Rajabasa-Kedaton road section at 07.00-09.00 WIB, the shock waves that occur are ω_{DA} of 12,95 km/h, ω_{DB} of 1,50 km/h, ω_{AB} of -0,92 km/h, ω_{DC} of 4,93 km/h, ω_{CB} of -11,08 km/h, and ω_{AC} of 2,63 km/h. On the Rajabasa-Kedaton road section at 16.00-18.00 WIB, the shock waves that occur are ω_{DA} of 14,76 km/h, ω_{DB} of 1,68 km/h, ω_{AB} of -1,20 km/h, ω_{DC} of 5,59 km/h, ω_{CB} of -8,96 km/h, and ω_{AC} of 2,58 km/h. On the Rajabasa-Kedaton road section at 07.00-09.00 WIB, there was a travel delay of 11,68 seconds and a decrease in speed of 6,87 km/h. On the Rajabasa-Kedaton road section at 16.00-18.00 WIB, there was a travel delay of 21,41 seconds and a decrease in speed of 17,67 km/h.

Key words: shock wave, bottleneck, travel delay

**TUNDAAN PERJALANAN AKIBAT PENYEMPITAN BADAN JALAN
OLEH ANTRIAN *FOLLOW-UP* YANG TERJADI PADA AREA *U-TURN***

Oleh

JEANE AYU CLAUDIA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : **TUNDAAN PERJALANAN AKIBAT
PENYEMPITAN BADAN JALAN OLEH
ANTRIAN *FOLLOW-UP* YANG TERJADI
PADA AREA *U-TURN***

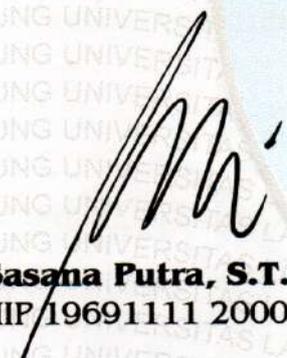
Nama Mahasiswa : **Jeane Ayu Claudia**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1615011042

Program Studi : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

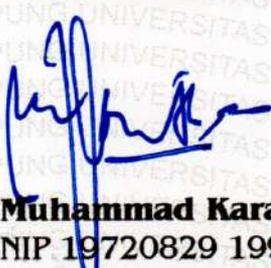


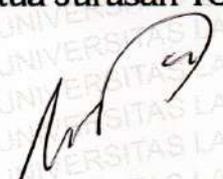

Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP/19691111 200003 1 002


Siti Anugrah Mulya P.O., S.T., M.T.
NIP 19910113 201903 2 020

2. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

3. Ketua Jurusan Teknik Sipil


Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 19720829 199802 1 001

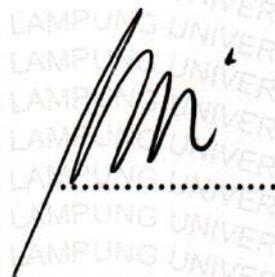

Ir. Laksmi Irianti, M.T.
NIP 19620408 198903 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: **Sasana Putra, S.T., M.T.**



Sekretaris

: **Siti Anugrah Mulya P.O., S.T., M.T.**



Penguji

Bukan Pembimbing : **Dr. Ir. Rahayu Sulistyorini, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.}
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 31 Mei 2023

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini adalah:

Nama : Jeane Ayu Claudia
NPM : 1615011042
Prodi/Jurusan : S1/Teknik Sipil
Fakultas : Teknik Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebut dalam daftar pustaka.

Atas pernyataan ini, apabila di kemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 31 Mei 2023



Jeane Ayu Claudia

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Jeane Ayu Claudia, dilahirkan di Jakarta pada 27 Juni 1998. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara, putri dari Bapak Hendra Buyung dan Ibu Titin Karyani.

Jenjang Pendidikan Penulis dimulai dari Sekolah Dasar di SD Pusaka Bangsa Karawang dimulai dari tahun 2004-2010. Setelah lulus SD penulis menempuh pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Yos Sudarso Karawang pada tahun 2010-2013 dan melanjutkan ke jenjang Sekolah Menengah Atas di SMAN 10 Bandar Lampung pada tahun 2013-2016. Penulis terdaftar sebagai mahasiswi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung pada tahun 2016 melalui jalur SBMPTN.

Pada tahun 2017 sampai 2018 penulis tercatat sebagai anggota aktif Departemen Usaha dan Karya Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung. Kemudian pada periode 2018/2019 penulis tercatat sebagai anggota aktif Departemen Kesekretariatan Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung. Penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata di Pekon Sindang Marga, Kecamatan Pulau Pangung, Kabupaten Tanggamus selama 40 hari pada tahun 2020. Dalam pengaplikasian ilmu di bidang Teknik Sipil, penulis juga telah melaksanakan Kerja Praktik di UIN Raden Intan, Lampung pada Proyek

Pembangunan Kampus UIN Raden Intan Lampung Gedung *Faculty of Science and Technology Tower 1* di Jalan Letnan H. Endro Suratmin, Kecamatan Sukarame, Kota Bandar Lampung.

PERSEMBAHAN

Segala puji, syukur dan kemuliaan kepada Tuhan Yesus Kristus, karena atas berkat, kasih dan anugerah-Nya skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Karya ini saya persembahkan untuk:

Bapak Hendra Buyung dan Ibu Titin Karyani, kedua orang tua yang telah mendidik dan membesarkanku dengan ketulusan dan kerja keras, selalu mengasihi, menyayangi, dan memberikan teladan yang baik. Terima kasih untuk semua doa, kesabaran, pengertian dan kepercayaan dalam mendukung semua pencapaianku.

Gabriel Armando Buyung, adikku yang selalu menyayangi, mendoakan, dan membantuku dalam setiap hal.

Dosen Pembimbing Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., Bapak Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D., dan Ibu Siti Anugrah Mulya Putri Ofrial, S.T., M.T., yang telah membimbing dan mengajarkan banyak hal dalam proses pengerjaan skripsi ini agar dapat terselesaikan dengan baik.

Dosen Penguji Ibu Dr. Rahayu Sulistyorini, S.T., M.T., yang telah membantu dan membimbing proses penyelesaian skripsi ini.

Keluarga, saudara-saudara, dan sahabat-sahabat yang selalu mengingatkan dan memotivasi untuk dapat menyelesaikan skripsi ini.

MOTTO

Bersukacitalah dalam pengharapan, sabarlah dalam kesesakan, dan bertekunlah dalam doa.

(Roma 12:12)

See, in your life, everybody has a turn back moment. You have a moment where you could go forward or you can give up. But the thing you have to keep in mind, before you give up is that, if you give up, the guarantee is it will never happen. That's the guarantee of quitting. That it will never happen, no way under the sun. The only way the possibility remains that it can happen is if you never give up no matter what. Because God is always coming, He's never too late. Faith was everything, that you have to remain faithful.

(Steve Harvey)

Janganlah hendaknya kamu kuatir tentang apa pun juga, tetapi nyatakanlah dalam segala hal keinginanmu kepada Allah dalam doa dan permohonan dengan ucapan syukur. Damai sejahtera Allah, yang melampaui segala akal, akan memelihara hati dan pikiranmu dalam Kristus Yesus.

(Filipi 4:6-7)

One day, you will see God has purpose for all the waiting, and not only for the future, but also for the present, where you would gather all the strength and courage you needed to prepare for days to come.

(Morgan Harper Nichols)

SANWACANA

Segala puji, syukur dan kemuliaan hanya bagi Tuhan Yesus Kristus. Terima kasih karena atas berkat kasih dan anugerah Tuhan, skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi dengan judul “*Tundaan Perjalanan Akibat Penyempitan Badan Jalan oleh Antrian Follw-Up yang Terjadi pada Area U-Turn*” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
2. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
4. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Pembimbing Utama yang telah memberikan ilmu pengetahuan, saran, kritik, semangat dan bimbingan dalam penelitian ini.
5. Ibu Siti Anugrah Mulya Putri O., S.T., M.T., selaku Pembimbing Kedua yang sudah memberikan banyak ilmu pengetahuan, bimbingan, saran serta kritik dalam penelitian ini.
6. Ibu Dr. Rahayu Sulistyorini, S.T., M.T., selaku Penguji yang telah memberikan saran, kritik, dan bimbingan dalam penelitian ini.
7. Bapak Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku Pembimbing Akademik yang telah memberikan saran, kritik, dan bimbingan dalam akademik saya.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung atas ilmu yang telah diberikan selama perkuliahan.

9. Keluarga tercinta Bapak, Ibu, serta Adik yang selalu mendukung dan memberikan doa terbaik.
10. Terima kasih kepada keluarga dan saudara-saudara yang selalu mendukung dan mendoakanku.
11. Terima kasih juga kepada rekan-rekan seperjuangan Angkatan 2016 Teknik Sipil Universitas Lampung yang telah memberikan dukungan dan doanya selama ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan, baik dari isi maupun cara penyampaiannya. Oleh karena itu, Penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun dari pembaca.

Akhir kata, Penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan ilmu baru dan membawa manfaat bagi pembaca.

Bandar Lampung, 2023

Penulis,

Jeane Ayu Claudia

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	v
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	2
C. Tujuan Penelitian	2
D. Batasan Masalah	3
E. Manfaat Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
A. Tundaan.....	4
B. Karakteristik Lalu Lintas	5
1. Volume Lalu Lintas	5
2. Kecepatan Lalu Lintas	6
3. Kepadatan Lalu Lintas	7
C. Hubungan Antara Volume, Kecepatan dan Kepadatan Lalu Lintas	7
1. Model Greenshields	9
2. Model Greenberg	11
3. Model Underwood	12
D. Penyempitan Jalan	14
E. Nilai Ekvivalen Kendaraan Ringan	15
1. Perhitungan Nilai Ekvivalen Kendaraan Ringan dengan Analisis Rasio <i>Headway</i>	16
2. Tinjauan Statistik Rasio <i>Time Headway</i>	19
F. Antrean.....	20
G. Gelombang Kejut	21
1. Klasifikasi Gelombang Kejut.....	22
2. Gelombang Kejut Pada Jalan Menyempit	24
3. Nilai Gelombang Kejut	25
4. Nilai Gelombang Kejut pada Jalan Menyempit.....	27
F. Penelitian Terdahulu	30
III. METODOLOGI PENELITIAN	33
A. Persiapan Penelitian	33
B. Pelaksanaan Survei dan Pengumpulan Data	34
C. Pengolahan Data	36
D. Diagram Alir Penelitian	38

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	40
A. Karakteristik Lalu Lintas	40
1. Nilai Ekvivalen Kendaraan Ringan (EKR).....	40
2. Volume Lalu Lintas	52
3. Kecepatan Lalu Lintas	53
4. Kepadatan Lalu Lintas	54
B. Hubungan Antara Volume, Kecepatan, dan Kepadatan Lalu Lintas	56
C. Nilai Gelombang Kejut	64
D. Tundaan Perjalanan.....	71
V. KESIMPULAN DAN SARAN	77
A. Kesimpulan	77
B. Saran	78
DAFTAR PUSTAKA	79
LAMPIRAN.....	81

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian Terdahulu	30
2. Data <i>Time Headway</i> Kendaraan Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 07.00-07.05 WIB	41
3. Data <i>Time Headway</i> Kendaraan Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 16.00-16.05 WIB	41
4. Perhitungan Senjang Rata-Rata Kendaraan Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 07.00-07.05 WIB	44
5. Perhitungan Senjang Rata-Rata Kendaraan Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 16.00-16.05 WIB	45
6. Data <i>Time Headway</i> Kendaraan Terkoreksi Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 07.00-07.05 WIB	46
7. Data <i>Time Headway</i> Kendaraan Terkoreksi Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 16.00-16.05 WIB	46
8. Perhitungan Nilai ekr SM Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 07.00-07.05 WIB	48
9. Perhitungan Nilai ekr SM Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 16.00-16.05 WIB	50
10. Rekapitulasi Nilai ekr dengan Analisis Rasio <i>Headway</i> Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 07.00-09.00 WIB	51
11. Rekapitulasi Nilai ekr dengan Analisis Rasio <i>Headway</i> Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 16.00-18.00 WIB	51
12. Data Volume Lalu Lintas dan Kecepatan Kendaraan Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 07.00-09.00 WIB	56
13. Nilai Koefisien Determinasi (R^2) Hubungan Matematis antara Kecepatan-Kepadatan Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 07.00-09.00 WIB....	57
14. Perhitungan Analisis Regresi-Linear Hubungan Matematis Kecepatan-Kepadatan (Model Underwood) Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 07.00-09.00 WIB	58
15. Data Volume Lalu Lintas dan Kecepatan Kendaraan Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 16.00-18.00 WIB	60

16. Nilai Koefisien Determinasi (R^2) Hubungan Matematis antara Kecepatan-Kepadatan Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 16.00-18.00 WIB....	62
17. Perhitungan Analisis Regresi-Linear Hubungan Matematis Kecepatan-Kepadatan (Model Underwood) Arah Rajabasa-Kedaton Pukul 16.00-18.00 WIB.....	62
18. Rekapitulasi Nilai Gelombang Kejut Arah Rajabasa-Kedaton.....	71
19. Waktu Tempuh dan Kecepatan Kendaraan pada Kondisi Arus Tidak Terganggu Arah Rajabasa-Kedaton pukul 07.00-09.00 WIB.....	72
20. Waktu Tempuh dan Kecepatan Kendaraan pada Kondisi Arus Terganggu Arah Rajabasa-Kedaton pukul 07.00-09.00 WIB.....	72
21. Waktu Tempuh dan Kecepatan Kendaraan pada Kondisi Arus Tidak Terganggu Arah Rajabasa-Kedaton pukul 16.00-18.00 WIB.....	74
22. Waktu Tempuh dan Kecepatan Kendaraan pada Kondisi Arus Terganggu Arah Rajabasa-Kedaton pukul 16.00-18.00 WIB.....	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Hubungan matematis antara kecepatan, arus dan kepadatan	8
2. <i>Systematic bottleneck</i>	15
3. <i>Unsystematic bottleneck</i>	15
4. Kombinasi kendaraan rasio <i>headway</i>	17
5. Cara pencatatan <i>time headway</i>	17
6. Klasifikasi gelombang kejut	23
7. Perwujudan gelombang kejut pada jalur menyempit.....	24
8. Dasar analisis geombang kejut.....	25
9. Gelombang kejut pada kondisi jalan ditutup 1 lajur selama 15 menit, untuk nilai $V = 3000$ smp/jam	28
10. Lokasi penelitian	34
11. Segmen pengamatan	34
12. Diagram alir penelitian.....	39
13. Grafik volume lalu lintas rata-rata pukul 07.00-09.00 WIB	52
14. Grafik volume lalu lintas rata-rata pukul 16.00-18.00 WIB	53
15. Grafik kecepatan lalu lintas rata-rata pukul 07.00-09.00 WIB	54
16. Grafik kecepatan lalu lintas rata-rata pukul 16.00-18.00 WIB	54
17. Grafik kepadatan lalu lintas rata-rata pukul 07.00-09.00 WIB.....	55
18. Grafik kepadatan lalu lintas rata-rata pukul 16.00-18.00 WIB.....	55
19. Grafik hubungan matematis antarparameter lalu lintas arah Rajabasa- Kedaton pukul 07.00-09.00 WIB	57
20. Grafik hubungan matematis antarparameter lalu lintas arah Rajabasa- Kedaton pukul 16.00-18.00 WIB	61
21. Diagram arus-kepadatan gelombang kejut arah Rajabasa-Kedaton pukul 07.00-09.00 WIB	67
22. Diagram jarak-waktu gelombang kejut arah Rajabasa-Kedaton pukul 07.00-09.00 WIB	67

23. Diagram arus-kepadatan gelombang kejut arah Rajabasa-Kedaton pukul 16.00-18.00 WIB	70
24. Diagram jarak-waktu gelombang kejut arah Rajabasa-Kedaton pukul 16.00-18.00 WIB	70

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Bandar Lampung sebagai salah satu kota dengan tingkat mobilitas kendaraan yang cukup tinggi, tentu tidak dapat terhindar dari adanya kemacetan lalu lintas. Menurut Kumar, et al (2021), kemacetan lalu lintas merupakan masalah utama yang paling banyak dihadapi oleh kota metropolitan yang dapat membuang-buang waktu dan energi, meningkatkan polusi dan stres, mengurangi produksi, serta meningkatkan biaya pada masyarakat dan juga negara. Alamsyah (2008) menuliskan bahwa pertumbuhan jumlah kendaraan yang tidak sebanding dengan kapasitas jalan akan menyebabkan kemacetan dan sebagai akibatnya dapat meningkatkan kerusakan jalan, pemborosan serta mengurangi tingkat kenyamanan dan kecepatan kendaraan. Kemacetan dapat terjadi karena beberapa pemicu atau penyebab, diantaranya ada proyek konstruksi jalan, kecelakaan lalu lintas, antrean kendaraan, dan sebagainya.

Ada berbagai fasilitas jalan yang dirancang bagi para pengguna jalan, baik pejalan kaki maupun pengguna kendaraan. Satu diantaranya adalah median, yaitu bangunan fisik pemisah jalur lalu lintas sehingga konflik yang ditimbulkan dari arah yang berlawanan dapat dihilangkan. Dalam perencanaan median jalan, ada yang disebut dengan bukaan median, yaitu area putar balik (*u-turn*) yang memungkinkan kendaraan untuk mengubah arah perjalanan. Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya bahwa salah satu penyebab kemacetan lalu lintas adalah adanya antrean kendaraan. Hal inilah yang terjadi pada area *u-turn* Kedaton Medical Center di Jalan ZA Pagar Alam, Bandar Lampung. Antrean kendaraan pada daerah pengamatan ini timbul karena kendaraan-kendaraan tersebut akan melakukan gerak *u-turn*. Seiring dengan

berjalannya waktu, akan tercipta antrean *follow-up*, yaitu kendaraan yang ikut mengantre dan menunggu waktu untuk dapat bergerak. Antrean *follow-up* kendaraan ini perlahan memanjang sehingga menyebabkan konflik berupa efek penyempitan badan jalan (*bottleneck*). Keadaan ini selanjutnya akan menimbulkan tundaan perjalanan, yaitu waktu yang hilang karena adanya gangguan lalu lintas.

Tidak dapat disangkal bahwa lalu lintas kendaraan yang terganggu memiliki waktu tempuh yang lebih lama dibandingkan dengan lalu lintas kendaraan yang tidak terganggu. Dengan demikian, penelitian ini akan meninjau karakteristik arus lalu lintas, seperti volume lalu lintas, kecepatan lalu lintas, dan kepadatan lalu lintas yang kemudian akan dilakukan analisis gelombang kejut akibat adanya antrean kendaraan pada area *u-turn* di ruas jalan tersebut. Selanjutnya, dengan adanya waktu tempuh kendaraan pada kondisi arus bebas dan pada kondisi arus ketika ada antrian *follow-up* dapat diketahui selisih waktu tempuh yang akan dijadikan sebagai besarnya tundaan perjalanan.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang telah diutarakan dalam latar belakang, dapat dirumuskan masalah, yaitu terjadinya tundaan perjalanan akibat penyempitan badan jalan karena adanya antrean *follow-up* kendaraan pada area *u-turn* Kedaton Medical Center di Jalan ZA Pagar Alam, Bandar Lampung.

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya tundaan perjalanan yang terjadi pada area *u-turn* Kedaton Medical Center arah Rajabasa-Kedaton karena mengalami penyempitan jalan akibat adanya antrean *follow-up* kendaraan yang melakukan gerak *u-turn*.

D. Batasan Masalah

Untuk membatasi lingkup dalam penelitian, maka batasan masalah untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan di ruas Jalan ZA Pagar Alam, Gedong Meneng, Kecamatan Rajabasa, Kota Bandar Lampung tepat di area *u-turn* Kedaton Medical Center arah Rajabasa-Kedaton.
2. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode gelombang kejut (*shock wave analysis*).
3. Pengambilan data dilakukan satu hari pada saat hari kerja (*weekday*) yang mewakili jam sibuk (*peak hour*) pada pagi hari dan sore hari.
4. Pengambilan data volume lalu lintas dan kecepatan kendaraan dilakukan dengan interval waktu 5 menit.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya tundaan perjalanan yang terjadi pada area *u-turn* karena mengalami penyempitan jalan akibat adanya antrean *follow-up* kendaraan yang melakukan gerak *u-turn*. Oleh sebab itu, melalui penelitian ini, pengguna jalan dapat mengerti bahwa akan lebih baik apabila para pengendara dapat menggunakan lajur sebagaimana mestinya dengan menggunakan lajur kanan dan mengantri dengan tertib apabila akan melakukan *u-turn* serta menggunakan lajur kiri atau lajur tengah apabila tetap lurus. Diharapkan bahwa penelitian ini dapat menjadi referensi untuk studi dan penelitian yang akan datang. Selain itu, diharapkan juga dengan adanya penelitian ini akan menambah dan meningkatkan pengetahuan, terutama tentang pemahaman analisis gelombang kejut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tundaan

Tundaan adalah jumlah waktu yang diperlukan oleh kendaraan untuk melewati simpang dibandingkan dengan kondisi tanpa simpang (PKJI, 2014). Menurut Alamsyah (2008), tundaan adalah perbedaan waktu perjalanan dari suatu perjalanan dari satu titik ke titik tujuan antara kondisi arus bebas dengan arus terhambat.

Tundaan dalam suatu arus lalu lintas terbagi menjadi dua jenis, yaitu:

1. Tundaan tetap

Tundaan ini merupakan tundaan yang disebabkan oleh aturan pengendali lalu lintas dan biasanya sering terjadi di persimpangan jalan. Tundaan seperti ini disebabkan oleh banyak hal, antara lain:

- a. Faktor fisik, meliputi lebar jalan, jumlah jalur, pengendali akses menuju jalan tersebut, juga tempat-tempat transit.
- b. Pengendali lalu lintas, meliputi tanda berhenti, jenis dan pengaturan waktu dari lampu lalu lintas, juga pengendali belokan ataupun parkir.

2. Tundaan operasional

Tundaan ini terjadi karena gangguan antara komponen arus lalu lintas atau tundaan yang disebabkan oleh pengaruh dari lalu lintas lain, seperti kendaraan yang keluar masuk tempat parkir, pejalan kaki atau kendaraan yang berhenti, dan lain-lain. Selain itu, kemacetan yang terjadi karena volume kendaraan yang lebih besar daripada kapasitas jalan juga dapat menjadi penyebab tundaan ini.

Menurut PKJI (2014), ada dua jenis tundaan, yaitu tundaan lalu lintas (T_{LL}) dan tundaan geometrik (T_G). Tundaan lalu lintas (T_{LL}) terjadi karena adanya interaksi antara kendaraan dalam arus lalu lintas. Sedangkan, tundaan geometrik (T_G) terjadi karena adanya perlambatan atau percepatan yang terganggu ketika kendaraan membelok pada suatu simpang dan/atau berhenti.

Permasalahan lalu lintas seperti tundaan ini dapat terjadi karena banyak penyebab. Terjadinya waktu tundaan mengakibatkan terjadinya penurunan kapasitas jalan sehingga dapat menimbulkan kemacetan yang merugikan para pengemudi dan juga menurunkan kecepatan perjalanan yang berakibat pada bertambahnya waktu perjalanan.

B. Karakteristik Lalu Lintas

Arus lalu lintas terbentuk dari adanya pergerakan oleh pengendara yang berinteraksi satu dengan yang lain pada suatu ruas jalan. Ada tiga karakteristik yang mempengaruhi arus lalu lintas diantaranya volume, kecepatan, dan kepadatan.

1. Volume Lalu Lintas

Dalam Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 96 Tahun 2015 tentang Pedoman Pelaksanaan Kegiatan Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas, volume lalu lintas didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang melewati suatu titik tertentu pada ruas jalan persatuan waktu, dinyatakan dalam satuan kendaraan per jam atau satuan mobil penumpang per jam. Volume lalu lintas pada suatu ruas jalan dapat diperoleh dari hasil penghitungan data jumlah arus lalu lintas berdasarkan jenis kendaraan yang melalui ruas jalan tersebut.

Apabila terdapat sebanyak N kendaraan yang melintas pada suatu ruas jalan selama waktu T, maka menurut Risdiyanto (2014), volume lalu lintas dapat dihitung dengan formulasi berikut:

$$Q = \frac{N}{T} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

Q = volume lalu lintas (kend/jam)

N = jumlah kendaraan yang melintas (kend)

T = waktu (jam)

2. Kecepatan Lalu Lintas

Kecepatan lalu lintas (*speed*) adalah jarak yang dapat ditempuh dalam satuan waktu tertentu. Kecepatan didefinisikan dalam Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 96 Tahun 2015 tentang Pedoman Pelaksanaan Kegiatan Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas sebagai kemampuan untuk menempuh jarak tertentu dalam satuan waktu, yang dinyatakan dalam kilometer per jam.

Kecepatan terdiri dari beberapa jenis, seperti:

a. Kecepatan setempat (*spot speed*)

Kecepatan kendaraan ketika melintasi titik atau segmen tertentu suatu ruas jalan disebut kecepatan setempat. Kecepatan jenis ini dihitung dengan pengamatan pada jarak ± 100 meter menggunakan *speed gun*. Dalam kecepatan setempat dikenal dua macam istilah kecepatan, yaitu:

1) *Time Mean Speed* (TMS)

Kecepatan jenis ini dihitung sebagai kecepatan rata-rata berdasarkan kecepatan masing-masing kendaraan di jalan.

2) *Space Mean Speed* (SMS)

Kecepatan jenis ini dianggap sebagai kecepatan rata-rata berdasarkan waktu perjalanan kendaraan yang melintasi suatu ruas jalan.

b. Kecepatan berjalan (*running speed*)

Kecepatan berjalan merupakan kecepatan kendaraan saat melewati ruas jalan tertentu, terlepas dari adanya perhitungan tundaan di ruas jalan yang menyebabkan kendaraan berhenti. Kecepatan jenis ini dapat dihitung dengan membagi panjang ruas jalan dibagi waktu perjalanan.

3. Kepadatan Lalu Lintas

Menurut Risdiyanto (2014), kepadatan dapat didefinisikan sebagai jumlah kendaraan di setiap panjang jalan tertentu atau konsentrasi kendaraan di jalan. Kepadatan juga dapat dinyatakan sebagai kendaraan tiap mil atau kendaraan per kilometer. Nilai kepadatan lalu lintas tergantung pada jumlah jalur yang ada di jalan dan seberapa penting ruas jalan tersebut untuk mengalirkan arus lalu lintas. Menurut Tamin (2008), tingkat kepentingan jalan dalam suatu jaringan jalan berkorelasi positif dengan kepadatan lalu lintas.

C. Hubungan antara Volume, Kecepatan dan Kepadatan Lalu Lintas

Dalam bukunya yang berjudul “*Perencanaan dan Pemodelan Transportasi: Contoh Soal dan Aplikasi*”, Tamin (2003) menjelaskan bahwa hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan seperti berikut ini.

$$V = D \times S \dots\dots\dots (2)$$

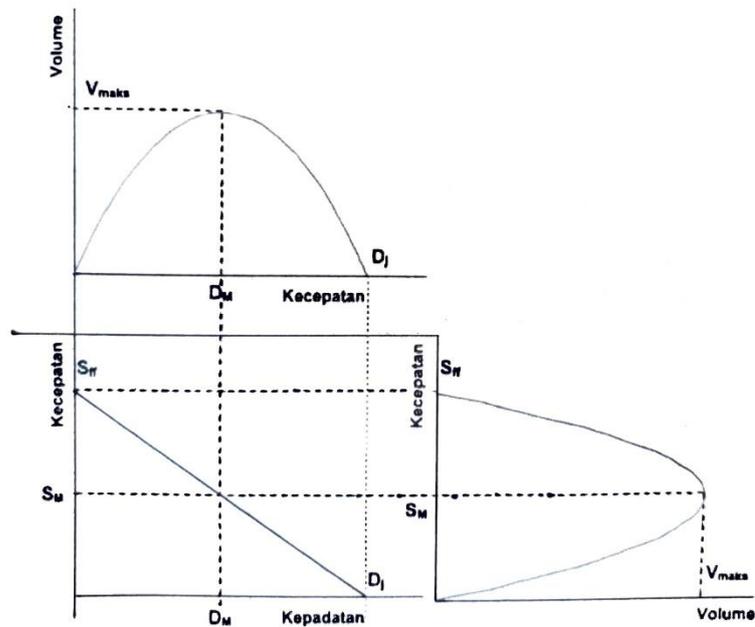
dimana:

V = volume lalu lintas (smp/jam)

D = kepadatan lalu lintas (kend/km)

S = kecepatan lalu lintas (km/jam)

Hubungan antarparameter di atas dapat dijelaskan dengan Gambar 1 yang menunjukkan hubungan antara kecepatan-kepadatan, volume-kepadatan, dan volume-kecepatan secara umum.



Gambar 1. Hubungan matematis antara kecepatan, arus, dan kepadatan. (Sumber : Wohl and Martin (1967), Pignatoro (1973), Salter (1978), dan Hobbs (1979), dikutip dalam Ofyar Z. Tamin, 2003)

dimana:

- V_M = kapasitas atau arus maksimum (kend/jam)
- S_M = kecepatan pada kondisi arus lalu lintas maksimum (km/jam)
- D_M = kepadatan pada kondisi arus lalu lintas maksimum (kend/km)
- D_j = kepadatan pada kondisi arus lalu lintas macet total (kend/km)
- S_{ff} = kecepatan pada kondisi arus lalu lintas sangat rendah atau pada kondisi kepadatan mendekati 0 (nol) atau kecepatan arus bebas (km/jam)

Menurut hubungan antara kecepatan-kepadatan, kecepatan akan menurun apabila kepadatan lalu lintas meningkat. Ketika kepadatan lalu lintas sangat tinggi, volume lalu lintas akan menjadi nol. Inilah kondisi yang dikenal sebagai

kondisi macet total ($D=D_j$), yaitu kondisi yang tidak memungkinkan kendaraan untuk bergerak. Jika kepadatan meningkat dari titik nol, kecepatan akan menurun, namun volume lalu lintas akan meningkat. Apabila kepadatan terus menerus mengalami peningkatan, maka akan tercapai suatu keadaan dimana meningkatnya kepadatan tidak akan berdampak pada meningkatnya volume lalu lintas, namun berdampak pada menurunnya volume lalu lintas.

Hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan dapat direpresentasikan dengan tiga jenis model perumusan, yaitu:

1. Model Greenshields

Tamin (2003) menuliskan bahwa Greenshields menjelaskan hubungan antara kecepatan-kepadatan secara linier dengan perumusan sebagai berikut:

$$S = S_{ff} - \frac{S_{ff}}{D_j} \cdot D \dots\dots\dots (3)$$

Hubungan matematis antara arus-kepadatan dapat diturunkan menggunakan dasar persamaan (2) yang kemudian dilanjutkan dengan memasukkan persamaan (4) ke dalam persamaan (3).

$$S = \frac{V}{D} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{V}{D} = S_{ff} - \frac{S_{ff}}{D_j} \cdot D \dots\dots\dots (5)$$

$$V = S_{ff} \cdot D - \frac{S_{ff}}{D_j} \cdot D^2 \dots\dots\dots (6)$$

Persamaan (6) merupakan hasil akhir yang menyatakan hubungan matematis antara arus-kepadatan.

Nilai suatu kondisi arus maksimum (V_M) dapat diperoleh ketika arus $D=D_M$ dimana nilai $D=D_M$ bisa didapat melalui persamaan (7)-(9).

$$\frac{\partial V}{\partial D} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

$$S_{ff} - \frac{2 \cdot S_{ff}}{D_j} \cdot D_M = 0 \dots\dots\dots (8)$$

$$D_M = \frac{D_j}{2} \dots\dots\dots (9)$$

Dengan memasukkan persamaan (9) ke persamaan (6), maka nilai V_M dapat diperoleh seperti dalam persamaan (10).

$$V_M = \frac{D_j \cdot S_{ff}}{4} \dots\dots\dots (10)$$

Hubungan matematis antara arus-kecepatan dapat diturunkan menggunakan dasar persamaan (2) yang kemudian dilanjutkan dengan memasukkan persamaan (11) ke persamaan (3).

$$D = \frac{V}{S} \dots\dots\dots (11)$$

$$S = S_{ff} - \frac{S_{ff}}{D_j} \cdot \frac{V}{S} \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{S_{ff}}{D_j} \cdot \frac{V}{S} = S_{ff} - S \dots\dots\dots (13)$$

$$V = D_j \cdot S - \frac{D_j}{S_{ff}} \cdot S^2 \dots\dots\dots (14)$$

Persamaan (14) merupakan hasil akhir yang menyatakan hubungan matematis antara arus-kecepatan.

Kondisi arus maksimum (V_M) dapat diperoleh ketika arus $S=S_M$. Nilai $S=S_M$ dapat diperoleh melalui persamaan (15)-(17).

$$\frac{\partial V}{\partial S} = 0 \dots\dots\dots (15)$$

$$D_j - \frac{2 \cdot D_j}{S_{ff}} \cdot S_M = 0 \dots\dots\dots (16)$$

$$S_M = \frac{S_{ff}}{2} \dots\dots\dots (17)$$

Dengan memasukkan persamaan (17) ke persamaan (14), maka nilai V_M dapat diperoleh dengan persamaan yang sama seperti pada persamaan (10). Oleh sebab itu, bisa disimpulkan bahwa V_M tercapai pada saat kondisi $S=S_M$ dan $D=D_M$.

2. Model Greenberg

Tamin (2003) menuliskan bahwa Greenberg mengasumsikan hubungan matematis antara kecepatan-kepadatan bukanlah merupakan fungsi linear melainkan fungsi eksponensial dengan persamaan dasar sebagai berikut:

$$D = C \cdot e^{b \cdot S} \dots\dots\dots (18)$$

dimana C dan b bukan merupakan konstanta.

Apabila persamaan (18) dinyatakan dalam bentuk logaritma natural, persamaan (18) dapat dinyatakan kembali sebagai persamaan (19) sehingga hubungan matematis antara kecepatan-kepadatan selanjutnya dinyatakan dalam persamaan (21).

$$\ln D = \ln C + b S \dots\dots\dots (19)$$

$$b S = \ln D - \ln C \dots\dots\dots (20)$$

$$S = \frac{\ln D}{b} - \frac{\ln C}{b} \dots\dots\dots (21)$$

Hubungan matematis antara arus-kepadatan dapat diturunkan dengan menggunakan persamaan dasar (2) yang dilanjutkan dengan memasukkan persamaan (4) ke persamaan (21).

$$\frac{V}{D} = \frac{\ln D}{b} - \frac{\ln C}{b} \dots\dots\dots (22)$$

$$V = \frac{D \ln D}{b} - \frac{D \ln C}{b} \dots\dots\dots (23)$$

Persamaan (23) merupakan hasil akhir yang menyatakan hubungan matematis antara arus-kepadatan.

Kondisi arus maksimum (V_M) dapat diperoleh ketika arus $D=D_M$. Nilai $D=D_M$ diperoleh melalui persamaan (24)-(27).

$$\frac{\partial V}{\partial D} = 0 \dots\dots\dots (24)$$

$$\left(\frac{\ln D_M + 1}{b} - \frac{\ln C}{b}\right) = 0 \dots\dots\dots (25)$$

$$(\ln D_M + 1) = \ln C \dots\dots\dots (26)$$

$$D_M = e^{\ln C - 1} \dots\dots\dots (27)$$

Hubungan matematis antara arus-kecepatan dapat diturunkan menggunakan persamaan dasar (2) yang dilanjutkan dengan memasukkan persamaan (11) ke persamaan (21).

$$\frac{V}{S} = C \cdot e^{b \cdot S} \dots\dots\dots (28)$$

$$V = S \cdot C \cdot e^{b \cdot S} \dots\dots\dots (29)$$

Persamaan (29) merupakan hasil akhir yang menyatakan hubungan matematis antara arus-kecepatan.

Kondisi arus maksimum (V_M) dapat diperoleh ketika arus $S=S_M$. Nilai $S=S_M$ diperoleh menggunakan persamaan (30)-(33).

$$\frac{\partial V}{\partial S} = 0 \dots\dots\dots (30)$$

$$C \cdot e^{b \cdot S} - S \cdot C \cdot e^{b \cdot S} = 0 \dots\dots\dots (31)$$

$$e^{b \cdot S} (1 + S b) = 0 \dots\dots\dots (32)$$

$$S_M = -\frac{1}{b} \dots\dots\dots (33)$$

3. Model Underwood

Tamin (2003) menuliskan bahwa Underwood mengasumsikan hubungan matematis antara kecepatan-kepadatan merupakan fungsi logaritma.

$$S = S_{ff} \cdot e^{-\frac{D}{DM}} \dots\dots\dots (34)$$

dimana:

Sff = kecepatan arus bebas

D_M = kepadatan pada kondisi arus maksimum (kapasitas)

Apabila persamaan (34) dinyatakan dalam bentuk logaritma natural, persamaan (34) dapat dinyatakan kembali sebagai persamaan (35) sehingga hubungan matematis antara kecepatan-kepadatan selanjutnya dinyatakan dalam persamaan (35).

$$\ln S = \ln Sff - \frac{D}{D_M} \dots\dots\dots (35)$$

Hubungan matematis antara arus-kepadatan dapat diturunkan dengan menggunakan persamaan dasar (2) yang dilanjutkan dengan memasukkan persamaan (4) ke persamaan (34).

$$\frac{V}{D} = Sff \cdot e^{-\frac{D}{D_M}} \dots\dots\dots (36)$$

$$V = D \cdot Sff \cdot e^{-\frac{D}{D_M}} \dots\dots\dots (37)$$

Persamaan (37) merupakan persamaan yang menyatakan hubungan matematis antara arus-kepadatan.

Hubungan matematis antara arus-kecepatan dapat diturunkan dengan menggunakan persamaan dasar (2) yang dilanjutkan dengan memasukkan persamaan (11) ke persamaan (34).

$$S = Sff \cdot e^{-\frac{V}{S \cdot D_M}} \dots\dots\dots (38)$$

$$\ln S = \ln Sff - \frac{V}{S \cdot D_M} \dots\dots\dots (39)$$

$$\frac{V}{S \cdot D_M} = \ln Sff - \ln S \dots\dots\dots (40)$$

$$V = S \cdot D_M \cdot (\ln Sff - \ln S) \dots\dots\dots (41)$$

Persamaan (41) merupakan persamaan akhir yang menyatakan hubungan matematis antara arus-kecepatan.

Kondisi arus maksimum (V_M) dapat diperoleh pada saat arus S=S_M. Nilai S=S_M diperoleh melalui persamaan (42)-(46).

$$\frac{\partial V}{\partial S} = 0 \dots\dots\dots (42)$$

$$D_M (\ln S_{ff} - \ln S_M) + D_M \cdot S_M \cdot \left(-\frac{1}{S_M} \right) = 0 \dots\dots\dots (43)$$

$$D_M (\ln S_{ff} - \ln S_M) - D_M = 0 \dots\dots\dots (44)$$

$$(\ln S_{ff} - \ln S_M) = 1 \dots\dots\dots (45)$$

$$S_M = e^{\ln S_{ff} - 1} \dots\dots\dots (46)$$

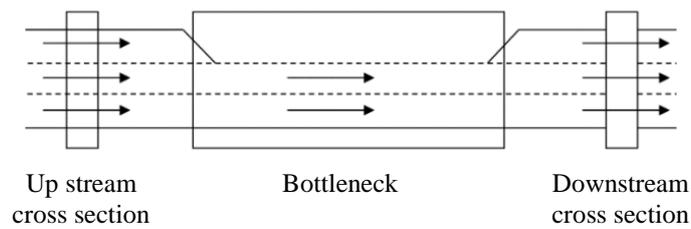
D. Penyempitan Jalan

Penyempitan jalan atau *bottleneck* adalah suatu bagian jalan dimana kondisi kapasitas lalu lintas bagian masuk (*up stream*) lebih besar dari pada bagian sesudahnya (*down stream*). Situasi seperti ini dapat terjadi dalam berbagai situasi, seperti saat memasuki jembatan, kecelakaan yang membuat beberapa lajur ditutup, perbaikan jalan atau kondisi lainnya. Situasi ini dapat memicu perubahan perjalanan kendaraan dari arus bebas (*uninterrupted flow*) menjadi arus terganggu (*interrupted flow*) yang mengakibatkan kecepatan kendaraan berkurang dan kepadatan antarkendaraan bertambah (Yupiter, 2003). Menurut Tamin (2008), penyempitan jalan (*bottleneck*) hanya berpengaruh apabila arus lalu lintas (*demand*) lebih besar daripada kapasitas jalan (*supply*) terhadap kendaraan di daerah penyempitan. Jika hal ini tidak terjadi, arus lalu lintas terlewati tanpa hambatan dan kendaraan tidak akan mengganggu perjalanan.

Sugiarto (2015) menjelaskan bahwa penyempitan jalan (*bottleneck*) terbagi menjadi dua jenis, yaitu:

1. *Systematic bottleneck*

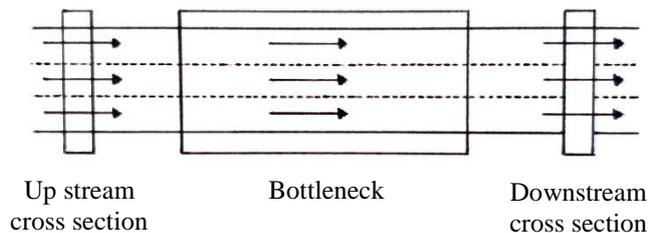
Penyempitan ini merupakan kondisi saat terjadi penyempitan geometrik jalan, yaitu adanya penyempitan ruas jalan pada saat keadaan dalam kondisi normal.



Gambar 2. *Systematic bottleneck*.
(Sumber: Brilon et al. (2005), dikutip dalam Sugiarto, 2015)

2. *Unsystematic bottleneck*

Jenis penyempitan yang disebut juga *virtual bottleneck* ini terjadi saat suatu ruas jalan mengalami pengurangan kapasitas jalan karena adanya hambatan samping, seperti adanya sebagian lebar jalan yang ditutup karena terjadi kecelakaan, parkir kendaraan pada badan jalan, pedagang kaki lima, dan sebagainya.



Gambar 3. *Unsystematic bottleneck*.
(Sumber: Brilon et al. (2005), dikutip dalam Sugiarto, 2015)

E. Nilai Ekuivalen Kendaraan Ringan

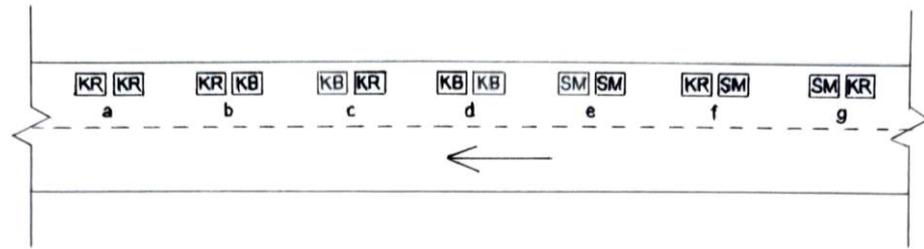
Jalan raya terdiri dari berbagai kendaraan dengan fitur yang berbeda dan membentuk arus lalu lintas. Arus lalu lintas tidak dapat hanya diwakili dalam satuan kendaraan/waktu karena perbedaan spasial dan mobilitas antarkendaraan. Oleh karena itu, arus lalu lintas akan diubah dari jumlah kendaraan perjam menjadi kendaraan ringan perjam menggunakan nilai ekuivalen kendaraan ringan (ekr). Dengan demikian, ekuivalensi kendaraan ringan dapat didefinisikan sebagai faktor penyeragaman satuan dari berbagai jenis kendaraan dibandingkan dengan KR berdasarkan pengaruhnya terhadap

karakteristik arus campuran. Untuk kendaraan penumpang dan/atau kendaraan ringan dengan sasis yang sama memiliki nilai $e_{kr} = 1,0$. Secara empiris, nilai ekivalen kendaraan ringan ini dihitung untuk jenis kendaraan berikut:

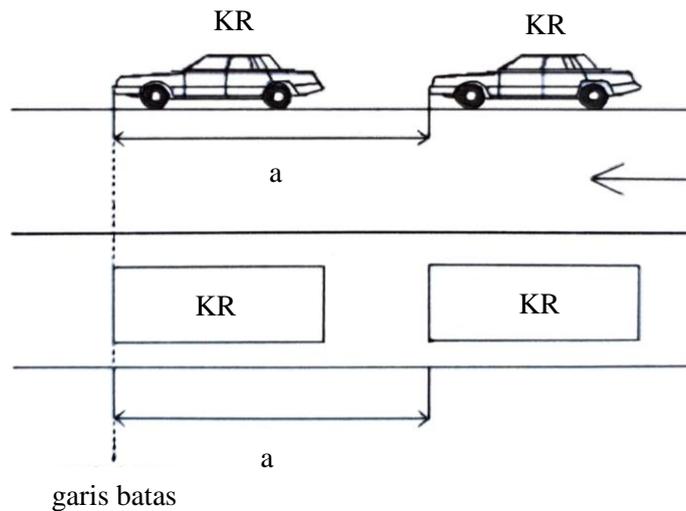
1. Kendaraan ringan (KR)
Kendaraan bermotor beroda empat dengan dua gandar berjarak 2-3 meter (termasuk diantaranya kendaraan penumpang, opelet, mikro bus, angkot, pikap, dan truk kecil).
2. Kendaraan berat (KB)
Kendaraan bermotor dengan jarak as lebih dari 3,5 meter dan biasanya memiliki roda lebih dari empat (bus dan truk besar atau kontainer).
3. Sepeda motor (SM)
Kendaraan bermotor dengan dua atau tiga roda (termasuk diantaranya sepeda motor dan kendaraan roda tiga).
4. Kendaraan tak bermotor (KTB)
Kendaraan bertenaga manusia atau hewan di atas roda (sepeda, becak, kereta kuda, dan kereta dorong).

1. Perhitungan Nilai Ekivalen Kendaraan Ringan dengan Analisis Rasio *Headway*

Nilai e_{kr} dapat dihitung dengan mencatat waktu antara (*time headway*) kendaraan yang berurutan ketika kendaraan tersebut melewati titik pengamatan yang sudah ditentukan. Metode perhitungan nilai e_{kr} ini dikenal sebagai metode *time headway*. Terdapat tujuh jenis kombinasi kendaraan yang diperlukan untuk rasio *headway*, yaitu: Kendaraan Ringan (KR) diikuti oleh Kendaraan Ringan (KR), Kendaraan Ringan (KR) diikuti oleh Kendaraan Berat (KB), Kendaraan Berat (KB) diikuti oleh Kendaraan Ringan (KR), Kendaraan Berat (KB) diikuti oleh Kendaraan Berat (KB), Sepeda Motor (SM) diikuti oleh Sepeda Motor (SM), Kendaraan Ringan (KR) diikuti oleh Sepeda Motor (SM), dan Sepeda Motor (SM) diikuti oleh Kendaraan Ringan (KR).



Gambar 4. Kombinasi kendaraan rasio *headway*.



Gambar 5. Cara pencatatan *time headway*.

Untuk menghitung nilai *ekr*, contohnya, nilai rerata *time headway* SM diikuti SM dibagi dengan nilai rerata *time headway* KR diikuti KR. Hasil tersebut akan benar jika waktu *time headway* SM tidak bergantung pada kendaraan yang mengikuti atau mendahuluinya. Keadaan ini dapat terjadi jika jumlah rata-rata *time headway* KR diikuti KR ditambah dengan jumlah rata-rata *time headway* SM diikuti SM sama dengan jumlah rata-rata *time headway* KR diikuti SM ditambah dengan jumlah rata-rata *time headway* SM diikuti KR. Persamaan yang menggambarkan penjelasan ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$t_a + t_b = t_c + t_d \dots\dots\dots (47)$$

dengan:

t_a = nilai rata-rata *time headway* KR diikuti KR

t_b = nilai rata-rata *time headway* SM diikuti SM

- tc = nilai rata-rata *time headway* KR diikuti SM
- td = nilai rata-rata *time headway* SM diikuti KR

Karena setiap kendaraan memiliki karakteristik yang berbeda, keadaan yang dapat memenuhi persamaan di atas sulit diperoleh. Oleh sebab itu, diperlukan adanya koreksi terhadap nilai rata-rata *time headway* dengan persamaan berikut:

$$\left[ta - \frac{k}{na}\right] + \left[tb - \frac{k}{nd}\right] = \left[tc - \frac{k}{nb}\right] + \left[td - \frac{k}{nc}\right] \dots\dots\dots (48)$$

$$k = \frac{na \cdot nb \cdot nc \cdot nd \cdot (ta + tb + tc + td)}{nb \cdot nc \cdot nd + na \cdot nc \cdot nd + na \cdot nb \cdot nd + na \cdot nb \cdot nc} \dots\dots\dots (49)$$

dimana:

- na = jumlah data *time headway* KR diikuti KR
- nb = jumlah data *time headway* SM diikuti SM
- nc = jumlah data *time headway* KR diikuti SM
- nd = jumlah data *time headway* SM diikuti KR

Kemudian nilai rata-rata *time headway* kombinasi kendaraan tersebut dikoreksi sebagai berikut:

$$ta\ k = ta - \frac{k}{na} \dots\dots\dots (50a)$$

$$tb\ k = tb - \frac{k}{nb} \dots\dots\dots (50b)$$

$$tc\ k = tc - \frac{k}{nc} \dots\dots\dots (50c)$$

$$td\ k = td - \frac{k}{nd} \dots\dots\dots (50d)$$

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

$$ta\ k + tb\ k = tc\ k + td\ k \dots\dots\dots (51)$$

dimana:

- ta k = nilai rata-rata *time headway* KR diikuti KR terkoreksi
- tb k = nilai rata-rata *time headway* SM diikuti SM terkoreksi

- t_k = nilai rata-rata *time headway* KR diikuti SM terkoreksi
 t_d = nilai rata-rata *time headway* SM diikuti KR terkoreksi

Apabila nilai tersebut sudah terpenuhi, maka nilai ekr SM dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$e_{kr\ SM} = \frac{t_b}{t_a} \dots\dots\dots (52)$$

dimana:

- $e_{kr\ SM}$ = ekuivalen kendaraan ringan untuk sepeda motor
 t_b = nilai rata-rata *time headway* SM diikuti SM terkoreksi
 t_a = nilai rata-rata *time headway* KR diikuti KR terkoreksi

2. Tinjauan Statistik Rasio *Time Headway*

Menurut Bolla (2020), dalam buku “*Highway Traffic Analysis and Design*” yang ditulis oleh R. J. Salter (1980), sebaran statistik menggambarkan semua kemungkinan kejadian bernilai acak. Oleh sebab itu, dimungkinkan adanya suatu kesalahan standar deviasi dari distribusi yang dinyatakan sebagai *standard error* (E) seperti dalam persamaan berikut:

$$e = \frac{S}{n^{0,5}} \dots\dots\dots (53)$$

dimana:

- E = *standard error*
 S = standar deviasi
 n = jumlah sampel

Standar deviasi (S) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$S = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots (54)$$

dimana:

- S = standar deviasi
 N = jumlah sampel

- x_i = nilai *time headway* ke- i
 \bar{x} = nilai rata-rata sampel *time headway*

Nilai rata-rata *time headway* seluruh pasangan kendaraan (μ) dapat disesuaikan untuk memperkirakan tingkat kepastian yang diinginkan (*desired level of confidence*). Perkiraan ini terletak dalam suatu interval yang disebut interval keyakinan (*confidence interval*) yang memiliki batas toleransi kesalahan sebesar e .

$$e = K \cdot E \dots\dots\dots (55)$$

dimana:

- e = batas toleransi kesalahan
 K = tingkat kepastian distribusi normal
 E = *standard error*

Nilai rata-rata *time headway* untuk distribusi normal ($n \geq 30$):

$$\mu_{1,2} = \bar{x} \pm e \dots\dots\dots (56)$$

dimana:

- $\mu_{1,2}$ = batas keyakinan atas dan bawah nilai rata-rata
 \bar{x} = nilai rata-rata sampel *time headway*
 e = batas toleransi kesalahan

Apabila sampel kurang dari 30 ($n < 30$), perkiraan rata-rata *time headway* pasangan kendaraan secara keseluruhan sebaiknya dilakukan dengan distribusi t yang disebut juga distribusi *student*.

F. Antrean

Menurut PKJI (2014), antrean adalah jumlah kendaraan yang menunggu dalam suatu pendekat simpang dan dinyatakan dalam satuan kendaraan atau satuan mobil penumpang. Pada dasarnya, antrean terjadi ketika pergerakan lalu lintas (manusia dan/atau kendaraan) terganggu oleh kegiatan pelayanan yang harus dilakukan. Salah satu contohnya adalah antrean kendaraan di area *u-turn* yang terjadi karena pergerakan arus kendaraan terpaksa harus terganggu oleh adanya

pergerakan kendaraan yang melakukan *u-turn*. Karena banyaknya kendaraan yang melakukan gerak *u-turn*, ada antrean tambahan yang dinamakan antrean *follow-up*, yaitu kendaraan yang ikut mengantri dan menunggu waktu untuk dapat bergerak. Kegiatan ini akan mengganggu proses pergerakan arus kendaraan sehingga menimbulkan antrean kendaraan. Dalam situasi tertentu, antrean kendaraan ini dapat mengakibatkan permasalahan baik untuk pengguna dalam bentuk waktu antrean maupun untuk pengelola dalam bentuk panjang antrean. Antrean kendaraan yang terlalu panjang akan menyebabkan bertambahnya permasalahan baru berupa terganggunya sistem pergerakan lalu lintas lainnya karena terhambat oleh antrean kendaraan yang terlalu panjang tersebut.

G. Gelombang Kejut

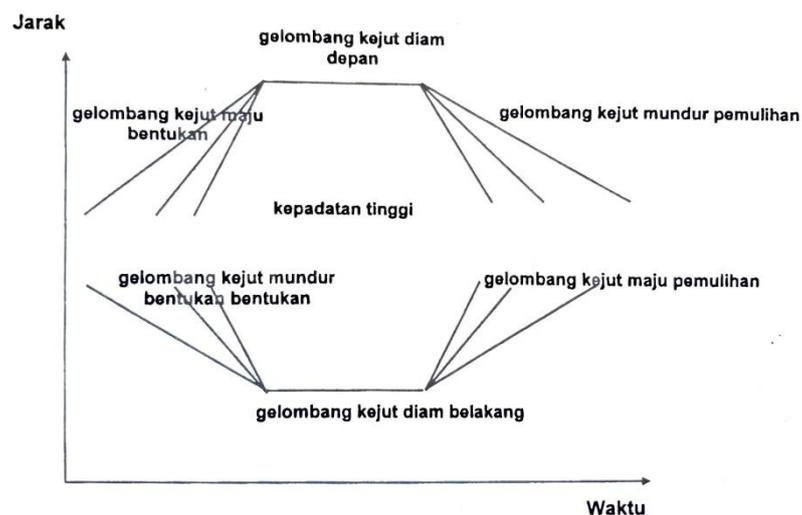
Gelombang kejut adalah pergerakan atau perjalanan perubahan lalu lintas yang disebabkan oleh perubahan nilai arus dan kepadatan lalu lintas. Suatu kendaraan akan bergerak dengan kecepatan tertentu dalam kondisi arus bebas. Apabila ada suatu hambatan (gangguan), maka akan terjadi pengurangan arus yang dapat melewati area hambatan tersebut. Penurunan nilai arus ini akan berakibat pada nilai kepadatan kendaraan di daerah sebelum terjadi hambatan dimana nilai kepadatan ini akan meningkat dan mengakibatkan nilai kecepatan menurun sehingga terjadi antrean. Saat suatu kendaraan mulai mendekati daerah hambatan, akan tercapai titik dimana pada saat kendaraan harus mengurangi kecepatannya, ditandai dengan nyala lampu rem, titik tersebut akan bergerak ke arah datangnya lalu lintas. Menurut Tamin (2003), gerakan lampu rem menyala relatif terhadap jalan inilah yang sebenarnya digambarkan sebagai gerakan gelombang kejut.

1. Klasifikasi Gelombang Kejut

Tamin (2008) menjelaskan dalam bukunya yang berjudul “*Perencanaan, Pemodelan, & Rekayasa Transportasi: Teori, Contoh Soal, dan Aplikasi*”, bahwa gelombang kejut diklasifikasikan ke dalam enam kelas, yaitu:

- a. Gelombang kejut diam depan (*frontal stationary shock wave*)
Istilah ‘depan’ berarti daerah kemacetan paling depan memiliki kepadatan yang lebih tinggi ke arah hulu dan lebih rendah ke arah hilir. Istilah ‘diam’ berarti gelombang kejut terjadi pada lokasi tersebut dan tidak akan berpindah dengan berubahnya waktu. Gelombang kejut ini terjadi pada lokasi penyempitan jalur dan lampu lalu lintas karena pada lokasi tersebut arus lalu lintas lebih besar dari kapasitas jalannya.
- b. Gelombang kejut mundur bentukan (*backward forming shock wave*)
Istilah ‘mundur’ berarti seiring dengan berjalannya waktu, gelombang kejut akan bergerak ke belakang, yaitu ke arah hulu atau ke arah yang berlawanan dengan arah pergerakan lalu lintas. Istilah ‘bentukan’ berarti kemacetan akan semakin meningkat ke arah hulu seiring dengan berjalannya waktu. Oleh karena itu, sesuai dengan pengertiannya, gelombang kejut ini akan terjadi pada saat kemacetan terjadi.
- c. Gelombang kejut maju pemulihan (*forward recovery shock wave*)
Istilah ‘maju’ berarti gelombang kejut akan bergerak ke depan, yaitu ke arah hilir atau ke arah yang sama dengan pergerakan lalu lintas. Istilah ‘pemulihan’ berarti seiring dengan berjalannya waktu, akan terdapat kondisi arus bebas (*free flow*) pada daerah yang semakin jauh ke arah hilir. Gelombang kejut akan terbentuk pada saat terjadi kemacetan dimana arus lalu lintas berada di bawah kapasitas penyempitannya sehingga panjang kemacetan berkurang.
- d. Gelombang kejut diam belakang (*rear stationary shock wave*)
Istilah ‘diam’ berarti gelombang kejut terjadi pada lokasi tersebut dan tidak akan bergerak selama rentang waktu tertentu. Istilah ‘belakang’

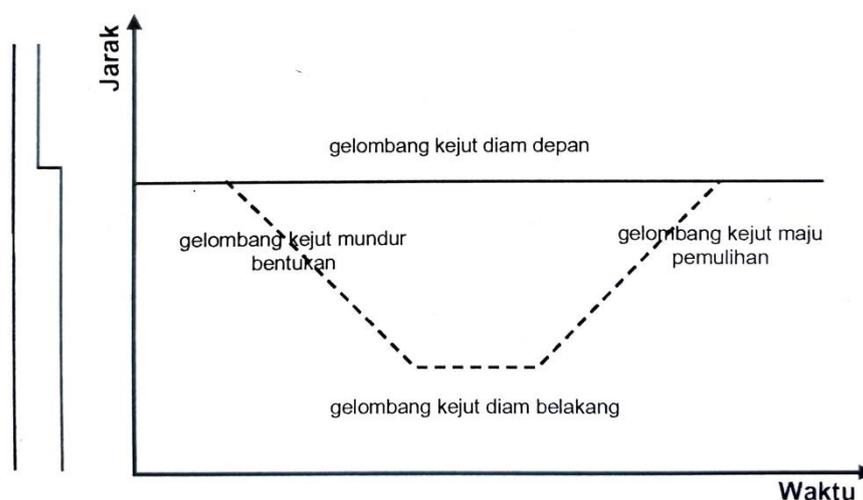
- merujuk pada bagian paling belakang dari daerah kemacetan. Gelombang kejut ini terjadi ketika arus kedatangan lalu lintas sama dengan kapasitas di daerah kemacetan selama rentang waktu tertentu.
- e. Gelombang kejut mundur pemulihan (*backward recovery shock wave*)
Istilah ‘mundur’ berarti seiring dengan berjalannya waktu, gelombang kejut akan bergerak ke belakang, yaitu ke arah hulu atau ke arah yang berlawanan dengan arah pergerakan lalu lintas. Istilah ‘pemulihan’ berarti kondisi arus bebas (*free flow*) akan meningkat semakin jauh dari daerah kemacetan seiring dengan berjalannya waktu. Hal ini terjadi ketika daerah kemacetan berada di sebelah kiri gelombang kejut dan kondisi arus bebas berada di sebelah kanannya. Gelombang kejut ini akan terbentuk saat terjadi kemacetan dan kemudian terjadi peningkatan kapasitas jalan.
- f. Gelombang kejut maju bentukan (*forward forming shock wave*)
Istilah ‘maju’ berarti gelombang kejut akan bergerak ke arah yang sama dengan pergerakan lalu lintas. Istilah ‘bentukan’ berarti akan terjadi peningkatan arus lalu lintas pada daerah yang semakin jauh ke arah hilir selama waktu kemacetan.



Gambar 6. Klasifikasi gelombang kejut.
(Sumber: Wohl and Martin (1967), dikutip dalam Ofyar Z. Tamin, 2003)

2. Gelombang Kejut pada Jalan Menyempit

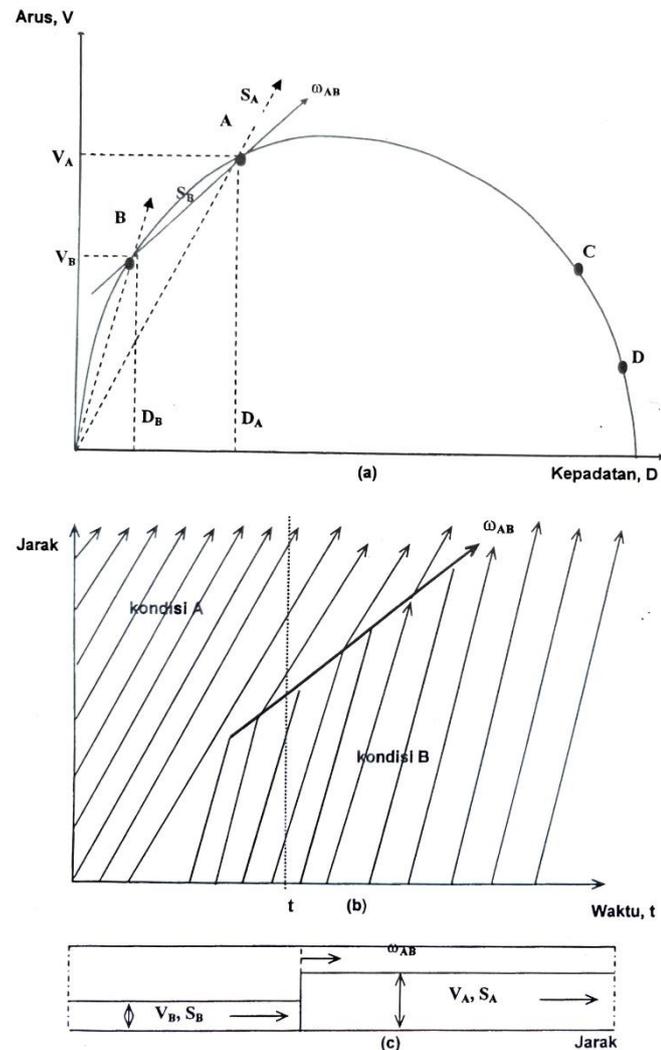
Tamin (2003) mengilustrasikan suatu jalan dengan pola arus lalu lintas 1,5; 2,5; 2,0; dan 2,5 lajur pada waktu tertentu dan kapasitas penyempitan adalah 2,0 lajur. Gelombang kejut tidak terjadi pada rentang waktu pertama ketika arus lalu lintas sebesar 1,5 lajur. Kemudian, gelombang kejut mundur bentukan dengan kecepatan konstan terbentuk segera setelah arus lalu lintas meningkat menjadi sebesar 2,5 lajur. Ketika arus lalu lintas mengalami penurunan menjadi hanya sebesar 2,0 lajur, arus lalu lintas yang masuk akan sama dengan arus lalu lintas yang keluar sehingga akan terbentuk gelombang kejut diam belakang (*rear stationary shock wave*). Apabila arus lalu lintas yang masuk mengalami penurunan menjadi 1,5 lajur, panjang bagian yang mengalami kemacetan sedikit demi sedikit berkurang dan membentuk gelombang kejut maju pemulihan (*forward recovery shock wave*). Selain itu, akan terbentuk gelombang kejut diam depan (*frontal stationary shock wave*) pada daerah penyempitan. Ketika terjadi perpotongan antara gelombang kejut diam depan dan gelombang kejut maju pemulihan, kondisi macet berakhir.



Gambar 7. Perwujudan gelombang kejut pada jalur menyempit.
(Sumber: Wohl and Martin (1967), dikutip dalam Ofyar Z. Tamin, 2008)

3. Nilai Gelombang Kejut

Tamin (2003) menjelaskan nilai gelombang kejut pada suatu ruas jalan dengan dasar analisis sebagai berikut.



Gambar 8. Dasar analisis gelombang kejut.
(Sumber: Wohl and Martin (1967), dikutip dalam Ofyar Z. Tamin, 2003)

Dari gambar di atas, hubungan matematis antara arus-kepadatan pada suatu ruas jalan tanpa gangguan dapat dilihat pada Gambar 8a. Pada rentang waktu tertentu, terdapat suatu kondisi arus lalu lintas bebas yang konstan yang dapat disebut sebagai kondisi A dan memiliki nilai arus, kecepatan serta kepadatan dengan notasi V_A , S_A , dan D_A . Pada rentang

waktu selanjutnya, arus lalu lintas yang masuk berkurang dan terjadi arus lalu lintas bebas yang baru yang disebut sebagai kondisi B dan memiliki nilai arus, kecepatan serta kepadatan dengan notasi V_B , S_B , dan D_B . Kondisi B memiliki nilai kecepatan yang lebih tinggi dari kondisi A dan kendaraan dengan kondisi B akhirnya dapat menyusul kendaraan dengan kondisi A pada ruang dan waktu yang berbeda seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8b.

Gambar 8b menggambarkan diagram jejak arus lalu lintas pada kondisi A dan B. Garis tebal pada gambar tersebut menggambarkan gelombang kejut atau diskontinuitas arus lalu lintas antara kondisi A dan kondisi B, atau dapat pula diartikan sebagai diagram jejak yang menggambarkan kendaraan dengan kecepatan yang lebih tinggi pada kondisi B bergabung dengan kendaraan kondisi A yang kecepatannya lebih rendah. Dengan demikian, untuk mewakili gelombang kejut yang terjadi di atas, diberikan notasi ω_{AB} dengan indeks A dan B untuk menunjukkan bahwa gelombang kejut terletak antara A dan B.

Gambar 8c menunjukkan bagian dari suatu ruas jalan pada waktu t yang menggambarkan adanya dua kondisi arus lalu lintas. Ada tiga kecepatan yang diperlihatkan pada gambar, yaitu kecepatan dengan notasi S_A (kecepatan kendaraan pada kondisi A), S_B (kecepatan kendaraan pada kondisi B), dan ω_{AB} (kecepatan gelombang kejut antara kondisi A dan B).

Pada kondisi ini, kecepatan gelombang kejut memiliki arah yang bebas dan jelas. Namun, terkadang situasi dapat menjadi lebih rumit yang memungkinkan arahnya berubah menjadi tidak jelas. Dalam hal ini, analisis yang harus dilakukan adalah dengan mengasumsikan bahwa yang akan terjadi, yaitu gelombang kejut gerak maju (*forward moving shock wave*) yang arah geraknya sama dengan pergerakan arus lalu lintas (kecepatan gelombang kejut positif) dan gelombang kejut gerak mundur

(backward moving shock wave) yang arah geraknya berlawanan dengan pergerakan arus lalu lintas (kecepatan gelombang kejut negatif).

Pada batas gelombang kejut, jumlah kendaraan meninggalkan kondisi arus B (N_B) harus tepat sama dengan jumlah kendaraan masuk kondisi arus A (N_A) karena tidak ada kendaraan yang dihilangkan maupun yang ditambahkan. Kecepatan kendaraan pada kondisi arus B merupakan batas hulu dari gelombang kejut relatif terhadap kecepatan gelombang kejut ($S_B - \omega_{AB}$). Kecepatan kendaraan pada kondisi arus A merupakan batas hilir dari gelombang kejut relatif terhadap kecepatan gelombang kejut ($S_A - \omega_{AB}$). Besar nilai N_A dan N_B dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$N_B = V_B \cdot t = (S_B - \omega_{AB}) D_B \cdot t \dots\dots\dots (55)$$

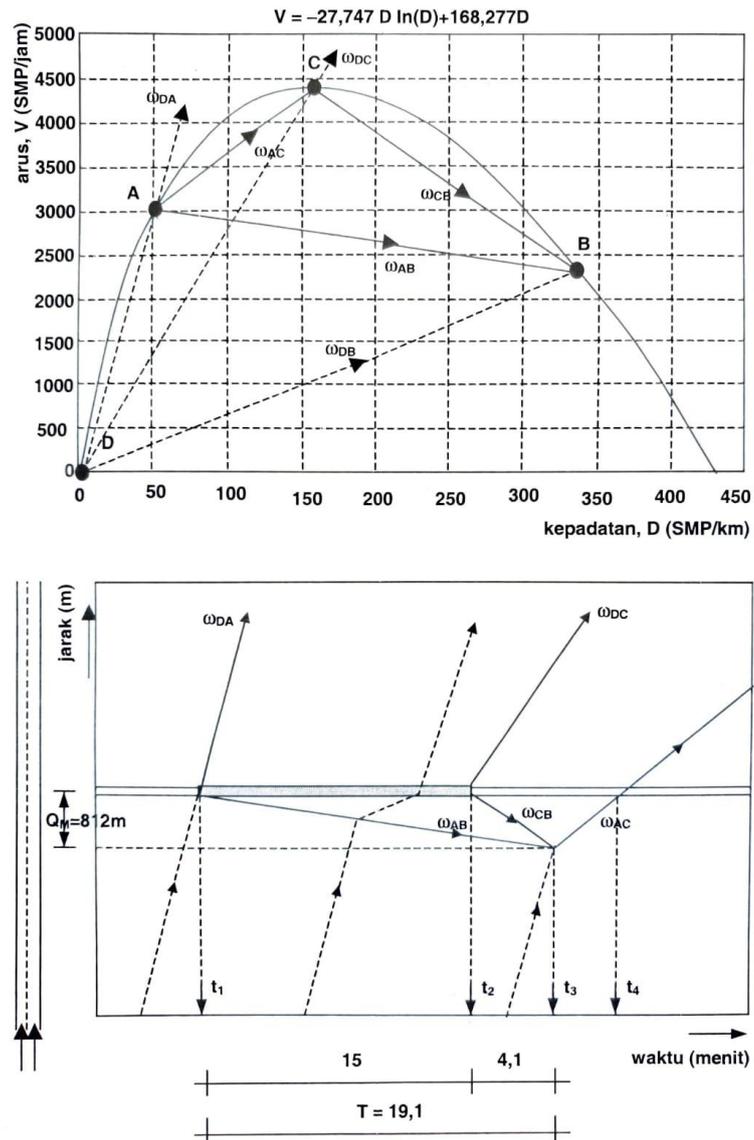
$$N_A = V_A \cdot t = (S_A - \omega_{AB}) D_A \cdot t \dots\dots\dots (56)$$

Karena $N_A = N_B$, maka :

$$\begin{aligned} (S_A - \omega_{AB}) D_A \cdot t &= (S_B - \omega_{AB}) D_B \cdot t \\ D_A \cdot S_A - D_A \cdot \omega_{AB} &= D_B \cdot S_B - D_B \cdot \omega_{AB} \\ D_B \cdot \omega_{AB} - D_A \cdot \omega_{AB} &= D_B \cdot S_B - D_A \cdot S_A \\ (D_B - D_A) \cdot \omega_{AB} &= D_B \cdot S_B - D_A \cdot S_A \\ \omega_{AB} &= \frac{D_B \cdot S_B - D_A \cdot S_A}{D_B - D_A} \\ \omega_{AB} &= \frac{V_B - V_A}{D_B - D_A} \\ \omega_{AB} &= \frac{\Delta V}{\Delta D} \dots\dots\dots (57) \end{aligned}$$

4. Nilai Gelombang Kejut pada Jalan Menyempit

Tamin (2003) menjelaskan perilaku gelombang kejut pada jalan menyempit dengan contoh gelombang kejut pada kondisi jalan ditutup satu lajur selama 15 menit untuk nilai volume lalu lintas sebesar 3000 smp/jam seperti pada penjelasan di bawah ini.



Gambar 9. Gelombang kejut pada kondisi jalan ditutup 1 lajur selama 15 menit, untuk nilai $V = 3000$ smp/jam. (Sumber: Tamin and Soedirjo (1999), dikutip dalam Ofyar Z. Tamin, 2003)

Gambar 9a merupakan kurva arus-kepadatan dengan titik tinjauan A, B, C, dan D. Kondisi arus lalu lintas A merupakan kondisi arus lalu lintas sebelum memasuki kondisi B yang merupakan kondisi arus lalu lintas saat terjadi hambatan (hanya satu lajur terhambat). Kondisi C merupakan kondisi arus lalu lintas maksimum yang melalui ruas tinjauan dan diperoleh sesuai dengan kurva arus-kepadatan. Gambar 9b merupakan

diagram jarak-waktu dengan kemiringan garis yang mewakili kecepatan kendaraan sesuai dengan Gambar 9a.

Selama selang waktu antara t_0 hingga t_1 , tidak terjadi hambatan pada arus lalu lintas sehingga arus lalu lintas bergerak dengan kondisi A (V_A , D_A , dan S_A). Diagram jejak kendaraan dapat dilihat pada Gambar 9b. Pada waktu t_1 , terjadi suatu kondisi dimana arus lalu lintas memasuki area hambatan yang menyebabkan penyempitan sehingga kondisi arus lalu lintas berubah menjadi kondisi B sedangkan kondisi arus lalu lintas setelah terjadi penyempitan berubah menjadi kondisi D. Ada tiga gelombang kejut yang terbentuk mulai t_1 pada garis henti, yaitu sebagai berikut:

$$\omega_{DA} = \frac{V_A - V_D}{D_A - D_D} = S_A \dots\dots\dots (60)$$

$$\omega_{DB} = \frac{V_B - V_D}{D_B - D_D} = S_B \dots\dots\dots (61)$$

$$\omega_{AB} = \frac{V_B - V_A}{D_B - D_A} \dots\dots\dots (62)$$

Arus lalu lintas pada kondisi A, B, dan D terus terjadi sampai dengan waktu t_2 dimana pada saat itu arus lalu lintas tidak mengalami hambatan. Sebuah arus lalu lintas dengan kondisi baru terbentuk, yaitu arus lalu lintas pada kondisi C dimana pada waktu t_2 garis henti arus lalu lintas akan menjadi jenuh. Hal ini menyebabkan terbentuknya dua gelombang kejut baru.

$$\omega_{DC} = \frac{V_C - V_D}{D_C - D_D} \dots\dots\dots (63)$$

$$\omega_{CB} = \frac{V_B - V_C}{D_B - D_C} \dots\dots\dots (64)$$

Arus lalu lintas pada kondisi D, C, dan B dan A terus terjadi hingga ω_{AB} dan ω_{DC} mencapai t_3 . Dengan durasi efektif terjadinya hambatan senilai r detik, selang waktu antara t_2 sampai t_3 dihitung sebagai berikut.

$$t_3 - t_2 = r \cdot \left| \frac{\omega_{AB}}{\omega_{CB} - \omega_{AB}} \right| \dots\dots\dots (65)$$

Panjang antrean maksimum akan terjadi pada waktu t_3 dan dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$Q_M = r \cdot \left| \frac{\omega_{CB} \cdot \omega_{AB}}{\omega_{CB} - \omega_{AB}} \right| \dots\dots\dots (66)$$

Pada waktu t_3 , terbentuk satu gelombang kejut baru, yaitu gelombang kejut gerak maju ω_{AC} , sedangkan dua gelombang kejut gerak mundur ω_{AB} dan ω_{CB} berakhir.

$$\omega_{AC} = \frac{V_C - V_A}{D_C - D_A} \dots\dots\dots (67)$$

Arus lalu lintas D, C, dan A terus terjadi sampai dengan t_4 . Pada waktu t_4 , gelombang kejut gerak maju ω_{AC} memotong garis henti dan arus lalu lintas pada garis henti berubah dari arus maksimum V_C menjadi V_A . Rentang waktu dari mulai fase sebelum terjadi hambatan sampai dengan garis henti merupakan nilai maksimum t_2 ke t_4 yang dapat dihitung sebagai berikut.

$$t_4 - t_2 = \frac{r \cdot \omega_{AB}}{(\omega_{CB} - \omega_{AB})} \cdot \left| \frac{\omega_{CB}}{\omega_{AC}} + 1 \right| \dots\dots\dots (68)$$

dimana $(t_4 - t_2) = T$ adalah waktu penormalan, yaitu total waktu sejak dilakukan penormalan lajur hingga antrean berakhir.

H. Penelitian Terdahulu

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Judul	Penulis	Tahun, Tempat	Kesimpulan
1	Pengaruh <i>U-Turn</i> Terhadap Tundaan Perjalanan Berdasarkan Tinjauan Gelombang Kejut	Dwi Rizki Fatonah	2021, Universitas Lampung	Gelombang kejut yang terjadi adalah gelombang kejut mundur bentukan (ω_{ab}) = -125,70 km/jam; gelombang kejut mundur pemulihan (ω_{cb}) = -16,26 km/jam; gelombang kejut maju pemulihan (ω_{ac}) = 25,85 km/jam. Panjang antrean (Q_m) terjadi sepanjang 12 m dengan waktu penormalan (T) 4,59 detik. Sebagai pengaruh dari gelombang kejut, terjadi peningkatan waktu perjalanan sebesar 7,88 detik dan penurunan kecepatan sebesar 23,35 km/jam.

Tabel 1 (lanjutan)

No	Judul	Penulis	Tahun, Tempat	Kesimpulan
2	Studi Gelombang Kejut Pada Penyempitan Jalan Dengan Menggunakan EMP Atas Dasar Analisis Rasio <i>Headway</i> (Studi Kasus: Penyempitan Jalan Jend. Ahmad Yani Melewati Viaduct Gilingan, Surakarta)	Luthfi Ramadhan	2017, Universitas Sebelas Maret	Berdasarkan analisis rasio <i>headway</i> , 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 LV = 1,00; dan EMP HV = 1,20. Secara rata-rata berdasarkan analisis rasio <i>headway</i> , $\omega_{ab} = -3,74$ km/jam; $\omega_{cb} = -14,19$ km/jam; $\omega_{ac} = 8,29$ km/jam; $Q_m = 0,10$ km; dan $T = 73,18$ detik. Sedangkan secara rata-rata menurut MKJI 1997, $\omega_{ab} = -5,05$ km/jam; $\omega_{cb} = -17,78$ km/jam; $\omega_{ac} = 8,65$ km/jam; $Q_m = 0,13$ km; dan $T = 95,27$ detik. Nilai uji validitas antara panjang antrean maksimum hasil perhitungan dan kondisi riil di lapangan dengan MAPE adalah sebesar 1,08% (EMP <i>Headway</i>) dan 2,03% (EMP MKJI) serta waktu penormalan sebesar 3,35% (EMP <i>Headway</i>) dan 3,99% (EMP MKJI).
3	Pengaruh Penyempitan Jalan Terhadap Karakteristik Lalu Lintas (Studi Kasus: Jalan Wolter Monginsidi, Malalayang II, Kota Manado)	Semuel Y. R. Rompis	2019, Universitas Sam Ratulangi Manado	Volume dan kecepatan kendaraan pada jalan normal memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan jalan menyempit, namun nilai kepadatan justru memiliki nilai yang lebih besar pada jalan menyempit dibandingkan dengan jalan normal. Model terpilih untuk menganalisis gelombang kejut pada kondisi jalan normal dan menyempit yaitu, model Greenshields. Pada jalan normal model Greenshields dipilih sesuai nilai R^2 terbesar yang diperoleh pada hari Minggu, 10 Maret 2019 dengan nilai 72,44% dan untuk jalan menyempit dengan nilai 89,73% pada hari Sabtu, 9 Maret 2019. Potensi panjang antrean maksimum (QM) kendaraan sepanjang 158,99 meter dan setiap bertambah 5 menit kondisi volume jalan normal lebih besar dari volume maksimum jalan menyempit, maka panjang antrean juga bertambah sebesar 159 meter.
4	Analisis Pengaruh Penyempitan Jalur Jalan Terhadap Karakteristik Arus Lalu Lintas (Studi Kasus : Jembatan Ayek Betung Jl. Kapten Sanap Kota Pagar Alam)	M. Geri Perliyansa	2019, Sekolah Tinggi Teknologi Pagar Alam	Nilai Gelombang kejut dari arah Demporeogan ke Alun-Alun Utara pada hari Minggu pukul 07.00-08.00 WIB sebesar -3,65 km/jam dan pada hari Senin pukul 07.00-08.00 WIB sebesar -25,49 km/jam. Nilai Gelombang kejut dari arah Alun-Alun Utara ke Demporeogan pada hari Minggu pukul

Tabel 1 (lanjutan)

No	Judul	Penulis	Tahun, Tempat	Kesimpulan
				07.00-08.00 WIB sebesar -12,52 km/jam dan pada hari Senin pukul 07.00-08.00 WIB sebesar -119,18 km/jam.
5	Pengaruh Gelombang Kejut Terhadap Kemacetan Lalu Lintas (Studi Kasus SPBU 24.351.31 Jl Imam Bonjol, Langkapura, Bandar Lampung)	Dea Muli Leonora	2021, Universitas Lampung	Gelombang kejut yang terjadi pada ruas Jalan Imam Bonjol akibat antrean BBM secara berturut-turut adalah gelombang kejut maju bentukan (ω_{da}) sebesar 43,84 km/jam; gelombang kejut mundur bentukan (ω_{ab}) sebesar -2,31 km/jam; gelombang kejut maju pemulihan (ω_{dc}) sebesar 3,01 km/jam; gelombang kejut mundur pemulihan (ω_{cb}) sebesar -6,21 km/jam; dan gelombang kejut maju pemulihan (ω_{ac}) sebesar 2,93 km/jam. Panjang antrean maksimum (Q_m) yang terjadi adalah sepanjang 44 m. Akibat pengaruh dari gelombang kejut terhadap kemacetan lalu lintas, terjadi peningkatan waktu perjalanan dari 9,59 detik (saat tidak ada antrean BBM) menjadi 24,17 detik (saat terjadi antrean BBM) serta penurunan kecepatan dari 28,15 km/jam menjadi 11,17 km/jam.
6	<i>Evaluation of Road Traffic Congestion by Shock Wave Theory and Reduction Strategies</i>	Dr. Neeta Saxena dan Dr. Neha Jain	2017, <i>International Journal on Recent and Innovations Trends in Computing and Communication</i>	Penelitian ini menyajikan model dinamis kemacetan lalu lintas berdasarkan teori gelombang kejut dan beberapa strategi operasional khusus untuk mengelola lalu lintas jalan di negara berkembang. Secara umum diamati bahwa laju arus pada kemacetan tidak konstan, namun menurun seiring dengan panjangnya antrian. Yang dan Huang (1997) mencoba mengatasi masalah ini dengan mengasumsikan bahwa kapasitas kemacetan adalah fungsi menurun dari panjang antrian. Model car following (misalnya, Verhoef (2002)) dapat menjadi alat yang menjanjikan untuk mengatasi masalah ini. Langkah-langkah teknis saja tidak cukup untuk memastikan pengurangan kemacetan lalu lintas yang diinginkan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian yang berjudul “Tundaan Perjalanan Akibat Penyempitan Badan Jalan oleh Antrian *Follow-Up* yang Terjadi pada Area *U-Turn*” ini, metode penelitian yang digunakan adalah metode survei dan analisis.

A. Persiapan Penelitian

Tahap persiapan penelitian merupakan tahap yang dilakukan sebelum pengumpulan dan pengolahan data dilakukan. Adapun tahap yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan melalui pencarian data atau informasi riset dengan membaca jurnal ilmiah, buku-buku referensi maupun bahan-bahan publikasi yang relevan dengan permasalahan yang diteliti sebagai bahan rujukan dalam pembahasan hasil penelitian.

2. Survei pendahuluan

Survei pendahuluan dilakukan pada awal penelitian di lokasi penelitian untuk memperoleh data awal sebagai bagian penting bahan kajian teknis dan bahan untuk penelitian selanjutnya.

- a. Lokasi penelitian

Penelitian ini dilakukan di area *u-turn* Kedaton Medical Center ruas Jalan ZA Pagar Alam, Kedaton, Bandar Lampung. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada terjadinya tundaan perjalanan akibat penyempitan badan jalan karena adanya antrean *follow-up* kendaraan pada area *u-turn* sehingga dapat dikatakan sesuai untuk dilakukannya penelitian gelombang kejut.

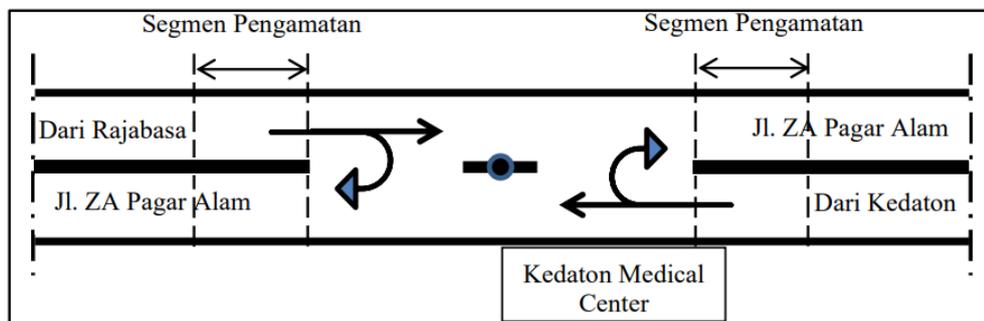


Gambar 10. Lokasi penelitian.

b. Waktu penelitian

Pengamatan dilakukan pada hari yang sama dengan waktu yang berbeda, yaitu satu hari saat hari kerja (*weekday*) yang mewakili jam sibuk pada pagi hari (pukul 07.00-09.00 WIB) dan sore hari (pukul 16.00-18.00 WIB).

B. Pelaksanaan Survei dan Pengumpulan Data



Gambar 11. Segmen pengamatan.

Keterangan:

-  = titik pengamatan
-  = penanda titik pengamatan

Pelaksanaan survei yang dilakukan pada tahap ini bertujuan untuk mendapatkan data arus lalu lintas dan *time headway* pada ruas jalan yang diamati.

1. Peralatan

Peralatan yang dibutuhkan untuk melakukan survei adalah sebagai berikut:

- a. *Drone* untuk merekam pergerakan lalu lintas.
- b. Meteran untuk mengukur geometri jalan di lokasi penelitian.
- c. Penanda titik pengamatan untuk segmen pengamatan 50 m yang ditandai setiap 10 m.

2. Langkah-langkah pengumpulan data survei

a. *Time headway*

Data *time headway* dapat diperoleh dari pengamatan hasil rekaman video survei. Data ini merupakan lama waktu kendaraan yang melintasi titik pengamatan setelah kendaraan sebelumnya melintasi titik tersebut dan dicatat berdasarkan kombinasi kendaraan. Lamanya waktu kendaraan dapat dihitung dengan menggunakan *stopwatch* dan dicatat dalam satuan detik.

b. Arus lalu lintas

Nilai volume kendaraan didapatkan dari survei arus lalu lintas yang melintas di sepanjang segmen pengamatan. Melalui pengamatan hasil rekaman video survei lalu lintas yang sedang terjadi, jumlah kendaraan yang melintas dapat dihitung dan dicatat berdasarkan jenis kendaraan. Kendaraan yang termasuk dalam perhitungan adalah kendaraan yang melewati titik pengamatan yang terbagi menjadi kendaraan ringan (KR), kendaraan berat (KB), sepeda motor (SM) dan kendaraan tidak bermotor (KTB).

c. Kecepatan kendaraan

Kecepatan kendaraan dapat diperoleh apabila ada jarak penggal jalan sehingga lamanya kendaraan melintasi satu titik ke titik selanjutnya dapat diketahui. Dengan mengamati rekaman video survei, lamanya kendaraan melintasi titik pengamatan hingga tiba di titik selanjutnya akan dicatat dalam satuan detik. Selanjutnya, nilai kecepatan kendaraan dapat dihitung dengan cara membagi panjang jarak yang ditempuh dengan waktu tempuh kendaraan yang sudah tercatat. Panjang jarak yang ditempuh dicatat dalam satuan meter dan waktu

tempuh kendaraan dicatat dalam satuan detik sehingga nilai kecepatan tersebut akan dihitung dengan satuan meter/detik yang kemudian perlu dikonversi dalam satuan kilometer/jam.

C. Pengolahan Data

Apabila data survei yang dibutuhkan telah tersedia, selanjutnya akan dilakukan pengolahan data. Data *time headway* yang telah diperoleh dari pengamatan video survei akan digunakan dalam perhitungan senjang rata-rata untuk mendapatkan batas atas dan batas bawah. Setelah itu, data *time headway* yang ada dan masuk dalam interval batas atas dan batas bawah akan menjadi data *time headway* terkoreksi. Data *time headway* terkoreksi inilah yang akan masuk dalam perhitungan untuk memperoleh nilai ekr.

Dari lokasi penelitian yang diamati sepanjang 50 m dari titik *u-turn*, perlu diketahui sebelumnya bahwa area pengamatan terbagi menjadi 3 segmen, yaitu segmen 1 sebagai segmen sebelum terjadi hambatan, segmen 2 sebagai segmen saat terjadi hambatan, dan segmen 3 sebagai segmen setelah terjadi hambatan. Oleh sebab itu, setiap segmen akan memiliki nilai volume, kecepatan, dan kepadatan sendiri yang berbeda-beda.

Volume lalu lintas didapatkan melalui jumlah kendaraan yang telah diamati melalui video survei. Pencatatan pertama volume lalu lintas ini merupakan nilai volume dalam satuan kendaraan. Oleh sebab itu, nilai tersebut akan dikonversikan ke dalam satuan kendaraan ringan (skr) dengan mengalikan nilai volume dalam satuan kendaraan dengan nilai faktor konversi sesuai dengan jenis kendaraan, yaitu nilai ekr. Untuk setiap segmen yang ada, nilai volume akan dikalikan dengan 60 menit sehingga volume lalu lintas yang didapat memiliki satuan skr per jam. Selanjutnya, nilai volume pada tiap segmen akan dirata-rata sehingga diperoleh volume lalu lintas rata-rata tiap sampel. Volume lalu lintas rata-rata tiap sampel ini kemudian akan dirata-ratakan lagi dengan volume lalu lintas rata-rata sampel lain pada periode waktu yang sama. Hingga

pada akhirnya diperoleh nilai volume lalu lintas rata-rata per lima menit dengan satuan skr per jam.

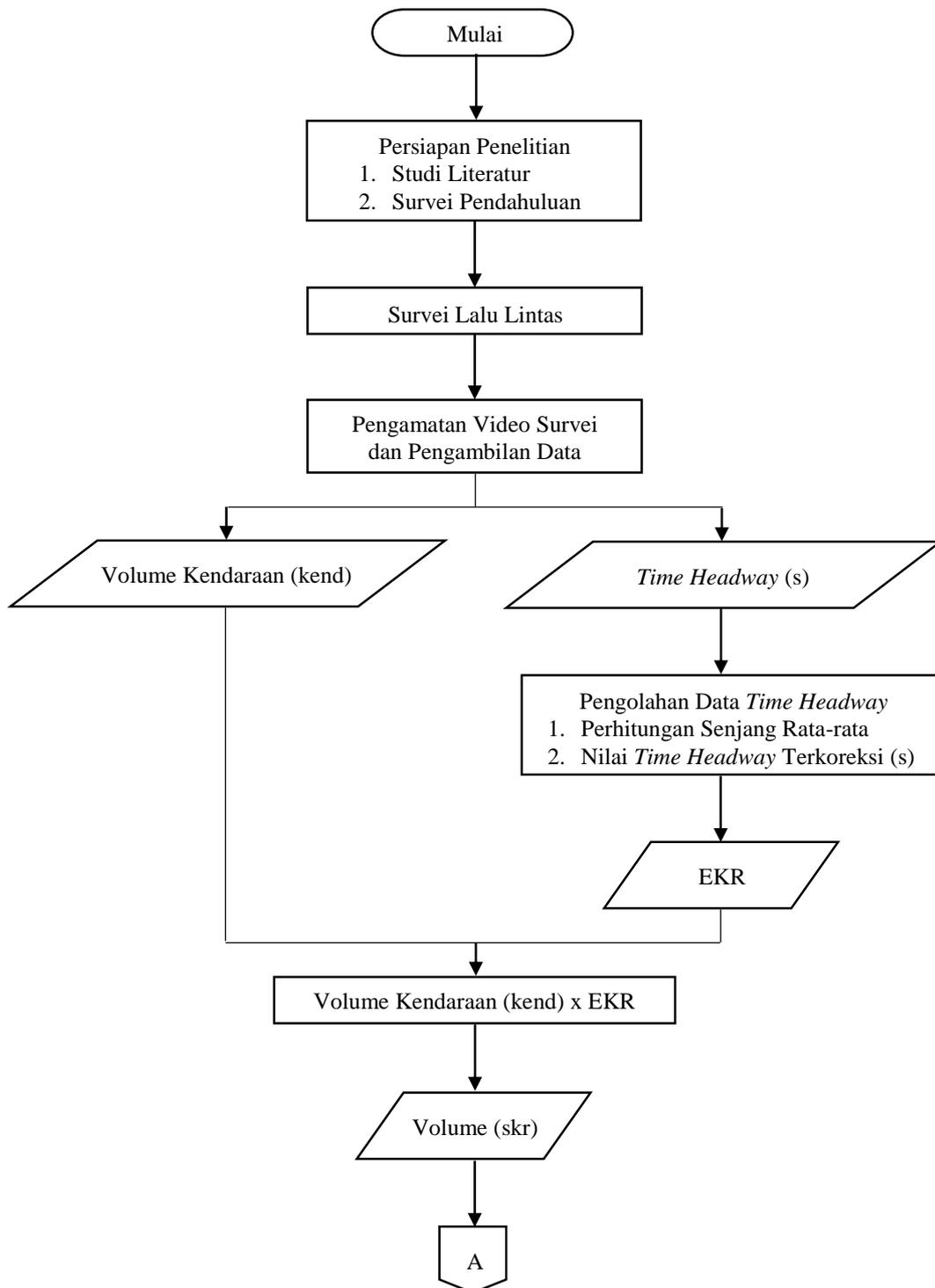
Data untuk menghitung kecepatan kendaraan dapat diperoleh melalui pengamatan video survei. Perhitungannya adalah dengan membagi jarak yang ditempuh kendaraan tiap segmen yang nilainya tentatif dengan waktu tempuh kendaraan tiap segmen yang telah dihitung menggunakan *stopwatch*. Nilai kecepatan kendaraan ini terhitung dengan satuan akhir kilometer per jam. Selanjutnya, nilai kecepatan pada tiap segmen akan dirata-rata sehingga diperoleh kecepatan kendaraan rata-rata setiap sampel. Kecepatan rata-rata tiap sampel ini akan dirata-ratakan lagi dengan kecepatan rata-rata sampel lain pada periode waktu yang sama. Hingga akhirnya diperoleh nilai kecepatan kendaraan rata-rata per lima menit dengan satuan kilometer per jam.

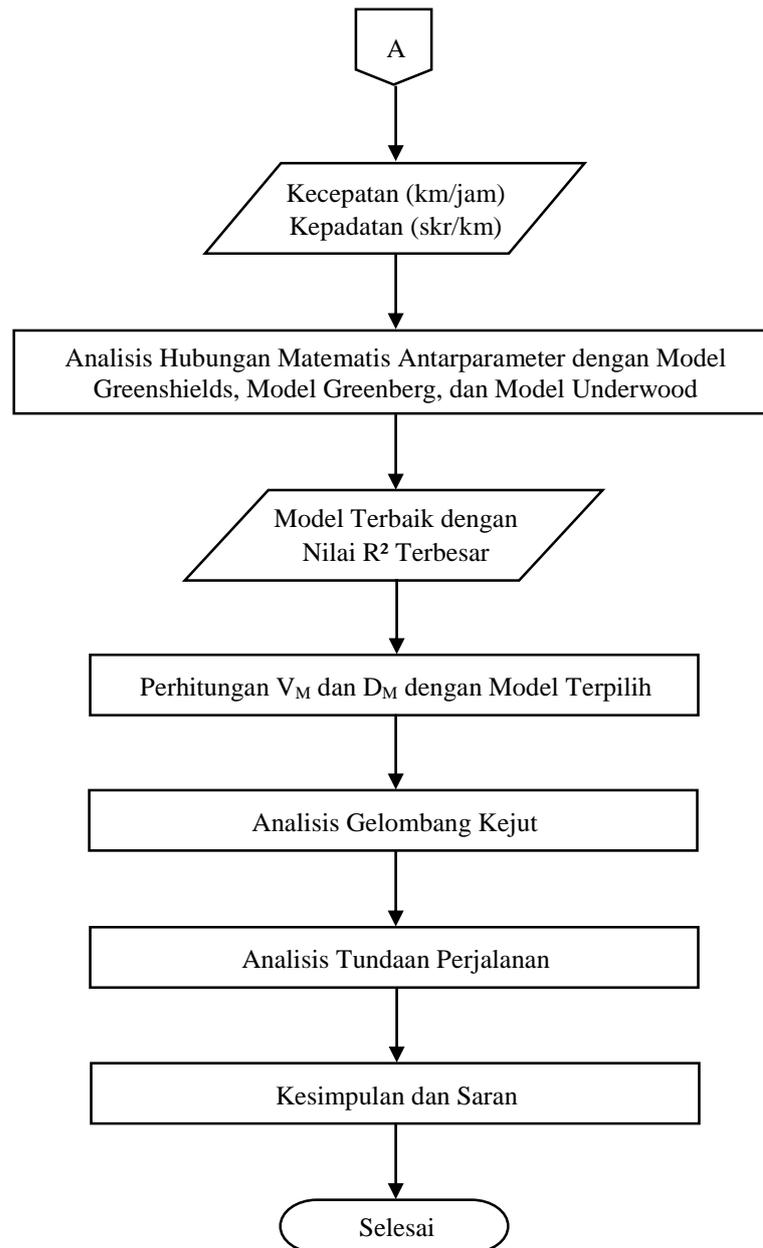
Kepadatan lalu lintas dapat dihitung apabila nilai volume dan kecepatan sudah diperoleh. Nilai kepadatan ini didapatkan dengan membagi nilai volume lalu lintas dengan kecepatan kendaraan. Seperti halnya dengan volume dan kecepatan, nilai kepadatan lalu lintas setiap segmen yang dimiliki suatu sampel akan dirata-rata sehingga diperoleh nilai kepadatan rata-rata tiap sampel. Kepadatan rata-rata tiap sampel ini akan dirata-ratakan lagi dengan kepadatan rata-rata sampel lain pada periode waktu yang sama. Hingga akhirnya diperoleh nilai kepadatan lalu lintas rata-rata per lima menit dengan satuan skr per jam.

Dengan nilai volume, kecepatan, dan kepadatan yang ada, maka akan dicari hubungan matematis antara ketiga parameter lalu lintas tersebut dengan model Greenshields, model Greenberg, dan model Underwood. Dari ketiga model tersebut, akan dipilih model terbaik yang memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) terbesar sehingga dari model terpilih ini akan dapat dicari nilai volume maksimum (V_M) dan kepadatan maksimum (D_M) yang ada pada ruas jalan yang diamati. Setelah semua variabel sudah diketahui, maka nilai gelombang kejut dapat dihitung. Pada akhirnya, sebagai pengaruh dari gelombang kejut, akan

terjadi tundaan perjalanan. Analisis tundaan dapat dihitung dengan membandingkan waktu tempuh perjalanan pada arus yang tidak terganggu dan arus yang terganggu.

D. Diagram Alir Penelitian





Gambar 12. Diagram alir penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh setelah melakukan penelitian di area *u-turn* Kedaton Medical Center Jalan ZA Pagar Alam, Kedaton, Bandar Lampung arah Rajabasa-Kedaton adalah:

1. Gelombang kejut yang terjadi pada pukul 07.00-09.00 WIB adalah ω_{DA} (gelombang kejut maju bentukan) sebesar 12,95 km/jam, ω_{DB} (gelombang kejut maju bentukan) sebesar 1,50 km/jam, ω_{AB} (gelombang kejut mundur bentukan) sebesar -0,92 km/jam, ω_{DC} (gelombang kejut maju pemulihan) sebesar 4,93 km/jam, ω_{CB} (gelombang kejut mundur pemulihan) sebesar -11,08 km/jam, dan ω_{AC} (gelombang kejut maju pemulihan) sebesar 2,63 km/jam.
2. Gelombang kejut yang terjadi pada pukul 16.00-18.00 WIB adalah ω_{DA} (gelombang kejut maju bentukan) sebesar 14,76 km/jam, ω_{DB} (gelombang kejut maju bentukan) sebesar 1,68 km/jam, ω_{AB} (gelombang kejut mundur bentukan) sebesar -1,20 km/jam, ω_{DC} (gelombang kejut maju pemulihan) sebesar 5,59 km/jam, ω_{CB} (gelombang kejut mundur pemulihan) sebesar -8,96 km/jam, dan ω_{AC} (gelombang kejut maju pemulihan) sebesar 2,58 km/jam.
3. Pada kondisi arus bebas pukul 07.00-09.00 WIB, diperoleh nilai rata-rata kecepatan kendaraan ringan untuk bergerak dari titik awal segmen pengamatan sampai ke titik akhir segmen pengamatan adalah sebesar 17,74 km/jam yang ditempuh dalam waktu 16,27 detik. Sedangkan pada kondisi arus ketika ada antrean *follow-up*, diperoleh nilai rata-rata kecepatan kendaraan ringan 10,87 km/jam dan memerlukan waktu selama 27,95 detik untuk sampai ke titik akhir segmen pengamatan. Oleh sebab

itu, besarnya tundaan perjalanan adalah peningkatan waktu tempuh kendaraan selama 11,68 detik yang juga diikuti dengan penurunan kecepatan kendaraan sebesar 6,87 km/jam.

4. Pada kondisi arus bebas pukul 16.00-18.00 WIB, diperoleh nilai rata-rata kecepatan kendaraan ringan untuk bergerak dari titik awal segmen pengamatan sampai ke titik akhir segmen pengamatan adalah sebesar 27,83 km/jam yang ditempuh dalam waktu 16,27 detik. Sedangkan pada kondisi arus ketika ada antrean *follow-up*, diperoleh nilai rata-rata kecepatan kendaraan ringan 10,87 km/jam dan memerlukan waktu selama 27,95 detik untuk sampai ke titik akhir segmen pengamatan. Oleh sebab itu, besarnya tundaan perjalanan adalah peningkatan waktu tempuh kendaraan selama 21,41 detik yang juga diikuti dengan penurunan kecepatan kendaraan sebesar 17,67 km/jam.

B. Saran

Saran yang dapat diberikan penulis, yaitu:

1. Untuk meminimalisir besarnya tundaan perjalanan akibat *u-turn*, adanya faktor hambatan samping lain seperti kendaraan parkir di badan jalan juga sebaiknya tidak diijinkan sehingga tidak menambah kemacetan yang membuat tundaan perjalanan menjadi semakin lama.
2. Untuk meminimalisir besarnya tundaan perjalanan, sebaiknya para pengguna kendaraan bermotor menggunakan lajur sebagaimana mestinya. Apabila akan tetap lurus, maka gunakanlah lajur kiri atau lajur tengah agar tidak terkena antrian. Apabila ingin melakukan gerak *u-turn*, maka gunakanlah lajur kanan dan mengantri dengan tertib sehingga tidak mengganggu kendaraan lain yang ingin tetap lurus. Serta akan lebih baik lagi apabila dalam pengaturan lalu lintas ditambahkan rambu dan marka jalan.
3. Untuk pengambilan video survei lalu lintas, sebagai penanda penggal segmen pengamatan sebaiknya menggunakan pilox berwarna putih agar dapat terlihat jelas.

DAFTAR PUSTAKA

- Alamsyah, A. A. (2008). *Rekayasa Lalu Lintas Edisi Revisi*. Malang: UPT Penerbitan Universitas Muhammadiyah Malang.
- Bolla, M. E., dkk. (2020). *Perbandingan Nilai Ekuivalensi Kendaraan Ringan Time Headway Method dan PKJI 2014 pada Simpang Apill Kupang*. Jurnal Teknik Sipil, IX (1).
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2014). *Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI)*. Jakarta.
- Fatonah, D. R., dkk (2021). *Pengaruh U-Turn Terhadap Tundaan Perjalanan Berdasarkan Tinjauan Gelombang Kejut*. Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain, 9(1).
- Indrajaya, Y., dkk. (2003). *Pengaruh Penyempitan Jalan Terhadap Karakteristik Lalu Lintas (Studi Kasus Pada Ruas Jalan Kota Demak-Kudus Road, Km. 5)*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Kumar, M., et al (2021). *Study on Road Traffic Congestion: A Review*. Recent Trends in Communication and Electronics, 230-240.
- Leonora, D. M. (2021). *Pengaruh Gelombang Kejut Terhadap Kemacetan Lalu Lintas (Studi Kasus SPBU 24.351.31 Jl Imam Bonjol, Langkapura, Bandar Lampung)*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 96 Tahun 2015 tentang Pedoman Pelaksanaan Kegiatan Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas.
- Perliyansa, M. G., dkk. (2019). *Analisis Pengaruh Penyempitan Jalur Jalan Terhadap Karakteristik Arus Lalu Lintas (Studi Kasus: Jembatan Ayek Betung Jl. Kapten Sanap Kota Pagar Alam)*. Jurnal Ilmiah Bering's, 6(2).
- Ramadhan, L. (2017). *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)*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.

- Risdiyanto. (2014). *Rekayasa dan Manajemen Lalu Lintas: Teori dan Aplikasi*. Yogyakarta: Leutikaprio.
- Rompis, S. Y. R. (2019). *Pengaruh Penyempitan Jalan Terhadap Karakteristik Lalu Lintas (Studi Kasus: Jalan Wolter Monginsidi, Malalayang II, Kota Manado)*. Manado: Universitas Sam Ratulangi.
- Sugiarto, dkk. (2015). *An Assessment of The Capacity Drops at The Bottleneck Segments: A Review on The Existing Methodologies*. Banda Aceh: Universitas Syiah Kuala.
- Saxena, Dr. N. & Jain, Dr. N. (2017). *Evaluation of Road Traffic Congestion by Shock Wave Theory and Reduction Strategies*. *Internasional Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 5(5), 125-129.
- Tamin, O. Z. (2003). *Perencanaan dan Pemodelan Transportasi: Contoh Soal dan Aplikasi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Tamin, O. Z. (2008). *Perencanaan, Pemodelan, & Rekayasa Transportasi: Teori, Contoh Soal, dan Aplikasi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.