



Analisa Karakteristik Gelombang Kejut Pada Simpang Bersinyal (Studi Kasus: Jl. Yos Sudarso, Paal Dua, Manado)

Margetty R. C. Siongke^{#a}, Samuel Y. R. Rompis^{#b}, Audie L. E. Rumayar^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^amargettys@gmail.com; ^bsemrompis@unsrat.ac.id; ^caudie_rumayar@unsrat.ac.id

Abstrak

Persimpangan bersinyal Jl. Yos Sudarso, Paal Dua, Manado menimbulkan peristiwa gelombang kejut pada arus lalu lintas dikarenakan adanya perubahan nilai arus dan kepadatan, yang disebabkan oleh keberadaan lampu lalu lintas. Penelitian ini menganalisa karakteristik gelombang kejut untuk mengetahui waktu penormalan yang dibutuhkan, untuk memulihkan panjang antrian yang cukup panjang pada jam sibuk yang disebabkan oleh meningkatnya arus lalu lintas. Berdasarkan hasil pemodelan didapatkan model Greenshields pada hari Sabtu, 5 November 2022 sebagai model terbaik ditunjukkan dengan nilai R^2 sebesar 0,683. Karakteristik gelombang kejut yang terjadi untuk arus $V_A = 1400$ skr/jam adalah gelombang kejut maju bentukan ($\omega_{DA} = 42,760$ km/jam), gelombang kejut diam depan ($\omega_{DB} = 0$ km/jam), gelombang kejut mundur bentukan ($\omega_{AB} = -8,503$ km/jam), gelombang kejut maju pemulihan ($\omega_{DC} = 25,631$ km/jam), gelombang kejut mundur pemulihan ($\omega_{CB} = -25,631$ km/jam), gelombang kejut bergerak maju searah pergerakan lalu lintas ($\omega_{AC} = 17,129$ km/jam), tundaan yang terjadi ($r = 83,32$ detik), panjang antrian maksimum yang terjadi ($Q_M = 294,476$ m), waktu penormalan ($T = 103,250$ detik).

Kata kunci - gelombang kejut, simpang bersinyal, arus lalu lintas

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Kota Manado yang berada di Indonesia merupakan Ibukota dari Provinsi Sulawesi Utara dengan luas wilayah $162,53$ km² dan menurut Badan Pusat Statistik jumlah penduduk Kota Manado sampai tahun 2021 sebanyak 453.182 jiwa. Pertambahan jumlah penduduk dari tahun ke tahun yang cukup signifikan memberikan pengaruh yang cukup besar dalam permasalahan lalu lintas, yaitu bertambahnya jumlah kendaraan atau pengguna jalan tetapi tidak diiringi dengan meningkatnya prasarana yaitu jalan. Permasalahan tersebut menimbulkan konflik pada beberapa titik arus lalu lintas, contohnya pada persimpangan.

Jl. Yos Sudarso, Paal Dua, Manado dengan arah lalu lintas dari kairagi menuju pusat kota merupakan salah satu contoh persimpangan bersinyal yang sibuk terlebih pada jam atau waktu puncak, dikarenakan ruas Jl. Yos Sudarso, Paal Dua, Manado merupakan jalan nasional, juga dikarenakan Kecamatan Paal Dua merupakan kawasan pertokoan, sekolah, perkantoran, restoran, dan rumah sakit menjadikan Simpang bersinyal Jl. Yos Sudarso, Paal Dua, Manado mengalami banyak pergerakan lalu lintas terutama yang datang dari arah Kecamatan Mapanget, Kota Bitung, Airmadidi (Kabupaten Minahasa Utara), dan sebagainya.

Pengoperasian lampu lalu lintas pada persimpangan bersinyal kadangkala belum menyesuaikan dengan tinggi rendahnya arus lalu lintas yang ada, sehingga pembagian durasi lampu lalu lintas belum cukup efisien. Gelombang kejut pada simpang bersinyal Jl. Yos, Sudarso, Paal Dua, Manado terjadi karena adanya pergantian nyala lampu lalu lintas. Ketika lampu lalu lintas berwarna merah maka kendaraan akan berhenti, kepadatan lengan simpang sebelum lampu merah akan meningkat, kecepatan menurun, dan akhirnya terjadi antrian.

1.2. Rumusan Masalah

Perlu dilakukan identifikasi pengaturan sebuah simpang bersinyal dari analisa karakteristik gelombang kejut terhadap arus lalu lintas, dengan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik volume, kecepatan, dan kepadatan di lokasi studi?
2. Bagaimana hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas yang dikarenakan gelombang kejut pada simpang bersinyal?
3. Bagaimana karakteristik gelombang kejut pada simpang bersinyal di lokasi studi?

1.3. Batasan Masalah

Ruang lingkup pembahasan dalam penelitian ini perlu dibatasi dengan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya meninjau karakteristik gelombang kejut pada persimpangan bersinyal Jl. Yos Sudarso, Paal Dua, Manado dengan arah lalu lintas dari kairagi ke pusat kota.
2. Mendapatkan hubungan volume, kecepatan, dan kepadatan menggunakan hubungan matematis model Greenshields, Greenberg, dan Underwood.
3. Didasarkan pada PKJI (2014) dan simulasi menggunakan software PTV VISSIM.

1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan karakteristik parameter dasar lalu lintas yaitu volume, kecepatan, dan kepadatan di lokasi studi.
2. Menganalisis hubungan antara volume (V), kecepatan (S), dan kepadatan (D).
3. Menganalisis karakteristik gelombang kejut pada simpang bersinyal di lokasi studi.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Memberikan informasi penting khususnya kepada pemerintah agar dapat mengatur lampu lalu lintas sehingga lebih efisien.
2. Memaparkan hasil analisa yang dapat dimanfaatkan guna mengoptimalkan lampu lalu lintas sehingga mengurangi antrian yang panjang atau kemacetan.
3. Mengedukasi masyarakat agar lebih disiplin dalam menggunakan transportasi yang ada serta menaati aturan lalu lintas yang telah ditetapkan.
4. Menjadi bahan referensi penelitian selanjutnya di masa yang akan datang.

2. Metode

2.1 Periode dan lokasi Pengumpulan

1. Periode Pengumpulan

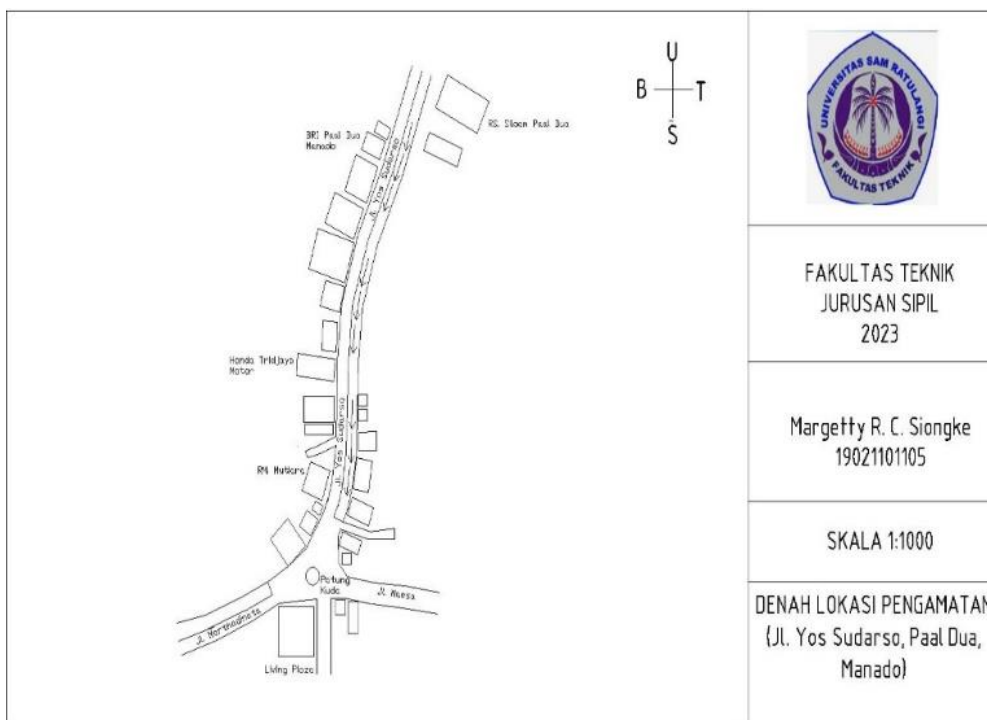
Pengumpulan data lalu lintas ini dilakukan selama 3 (tiga) hari terus – menerus yaitu; Kamis, Jumat, Sabtu. Pengumpulan data dilakukan selama 12 jam mulai pukul 06.00 – 18.00 WITA dengan interval waktu selama 15 menit.

2. Lokasi Pengumpulan

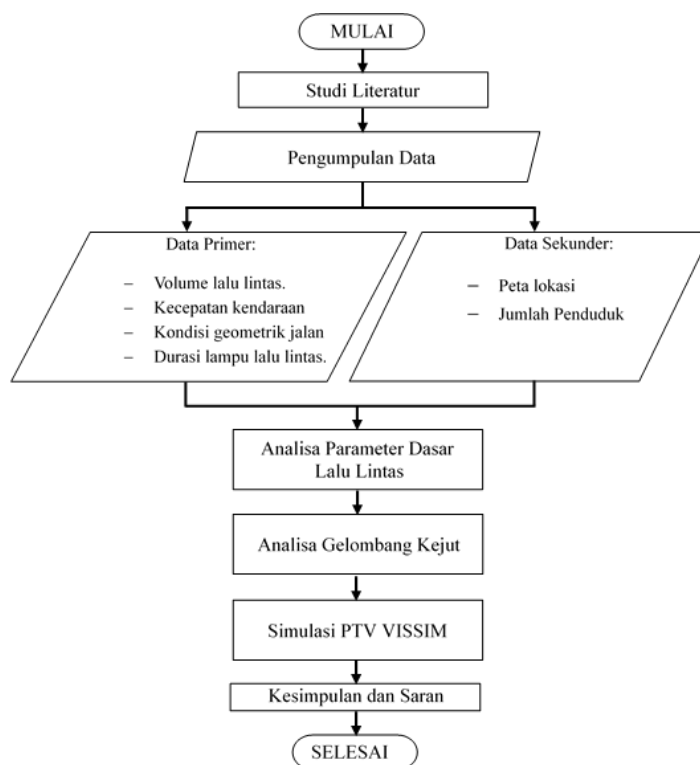
Penelitian dilaksanakan pada simpang bersinyal ruas Jl. Yos Sudarso, Paal Dua, Manado yang berada pada koordinat 1°29'14"N 124°51'42"E

2.2 Bagan Alir Penelitian

Kegiatan penelitian memiliki alur seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Denah Lokasi Penelitian



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

3. Kajian literatur

3.1 Karakteristik Kendaraan

Karakteristik kendaraan berdasarkan fisiknya dibedakan berdasarkan dimensi, berat, dan kinerja. Dimensi kendaraan mempengaruhi lebar lajur lalu lintas, lebar bahu jalan yang diperkeras

panjang dan lebar ruang parkir. Menurut PKJI (2014), kendaraan diartikan sebagai unsur lalu lintas yang bergerak menggunakan roda.

Tabel 1. Nilai Ekuivalen Kendaraan

Jenis Kendaraan	ekr	
	$Q_{total} \geq 1000$ skr/jam	$Q_{total} < 1000$ skr/jam
KR	1	1
KS	1.8	1.3
SM	0.2	0.5
KTB	1	1

3.2 Analisa Regresi dan Koefisien Determinasi

Analisa regresi linier digunakan untuk mendapatkan persamaan dalam memprediksi nilai variable dependent atas nilai variable independent, juga dapat mengukur intensitas hubungan kedua variable tersebut, seperti ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$y = A + Bx$$

Dengan:

y = Variable dependent

x = Variable independent

A = Konstanta regresi

B = Koefisien regresi

Dimana konstanta A dan B dapat dicari dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut:

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

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

Analisa regresi non linier merupakan suatu cara jika regresi liniernya tidak didapat yaitu terlihat dari letak titik-titik liniernya dalam diagram sangat menyimpang dari letak titik-titik yang sebenarnya. Dihitung dengan persamaan berikut:

$$y = AB^x$$

Kuatnya hubungan antara variable dependent dan variable independent dapat diketahui dengan koefisien determinasi (R^2), dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$R^2 = \frac{n\sum xy - \sum x \sum y}{(n\sum x^2 - (\sum x)^2) \cdot (n\sum y^2 - (\sum y)^2)}$$

Dengan:

r = Nilai uji koefisien determinasi

X = Nilai dependen

Y = Nilai independen

n = Jumlah Data

3.3 Hubungan Volume, Kecepatan, dan Kepadatan

Hubungan matematis antara volume, kecepatan, dan kepadatan dapat dinyatakan dalam persamaan:

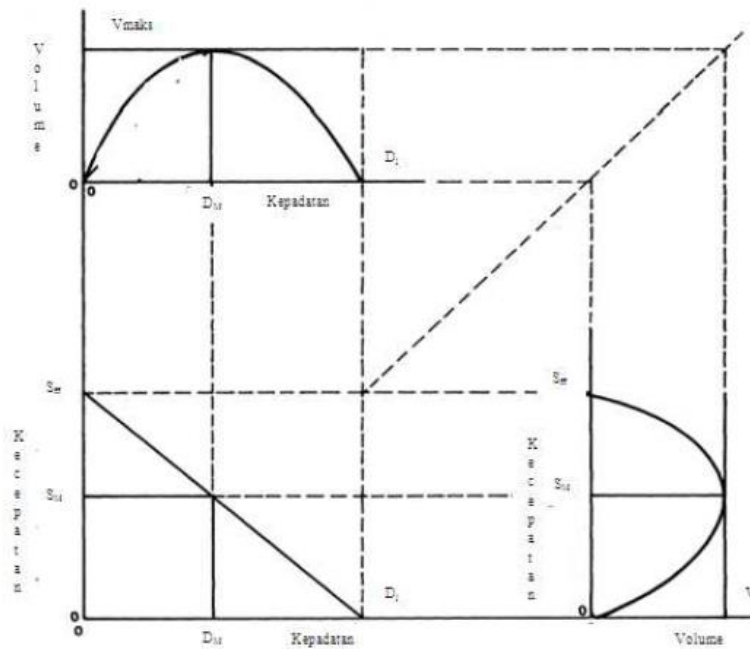
$$V = D \cdot S$$

Dengan:

V = Arus (skr/jam)

D = Kepadatan (skr/km)

S = Kecepatan (km/jam)



Gambar 3. Hubungan Matematis Antara Volume, Kecepatan, dan Kepadatan

Dengan:

V_m = kapasitas atau volume maksimum (kend/jam)

D_m = kepadatan pada kondisi volume lalu lintas maksimum (kend/km)

D_j = kepadatan pada kondisi volume lalu lintas macet total (kend/km)

S_m = kecepatan pada kondisi volume lalu lintas maksimum (km/jam)

S_{ff} = kecepatan pada kondisi volume lalu lintas sangat rendah atau pada kondisi kepadatan mendekati 0 atau kecepatan arus bebas (km/jam)

3.4 Model Greenshields

Greenshields merumuskan bahwa hubungan matematis antara Kecepatan – Kepadatan diasumsikan linier, seperti yang dinyatakan dalam persamaan di bawah ini:

$$S = S_{ff} - \frac{S_{ff}}{D_j} \cdot D$$

Dengan:

S = Kecepatan (km/jam)

S_{ff} = Kecepatan pada saat kondisi arus lalu lintas sangat rendah atau pada kondisi Kepadatan mendekati 0 atau kecepatan arus bebas (km/jam)

D_j = Kepadatan pada kondisi arus lalu lintas macet total (skr/km)

D = Kepadatan (skr/km)

3.5 Model Greenberg

Greenberg mengasumsikan bahwa hubungan matematis antara Kecepatan – Kepadatan bukan merupakan fungsi linear melainkan fungsi logaritmik. Persamaan dasar Greenberg dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$D = C \cdot e^{bS}$$

Dimana: C dan b sebagai konstanta.

3.6 Model Underwood

Underwood mengasumsikan bahwa hubungan matematis antara Kecepatan – Kepadatan bukan merupakan fungsi linear melainkan fungsi exponential. Persamaan dasar model Underwood dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$S = S_{ff} \cdot e^{-\frac{D}{D_M}}$$

Dengan:

S_{ff} = Kecepatan arus bebas (km/jam)

D_M = Kepadatan pada kondisi arus maksimum/kapasitas (skr/km)

3.7 Gelombang Kejut

Gelombang kejut merupakan pergerakan pada arus lalu lintas akibat terjadinya perubahan nilai kepadatan dan arus atau volume lalu lintas. Gelombang kejut terbentuk ketika pada sebuah ruas jalan terdapat arus dengan kepadatan rendah yang diikuti oleh arus dengan kepadatan tinggi.

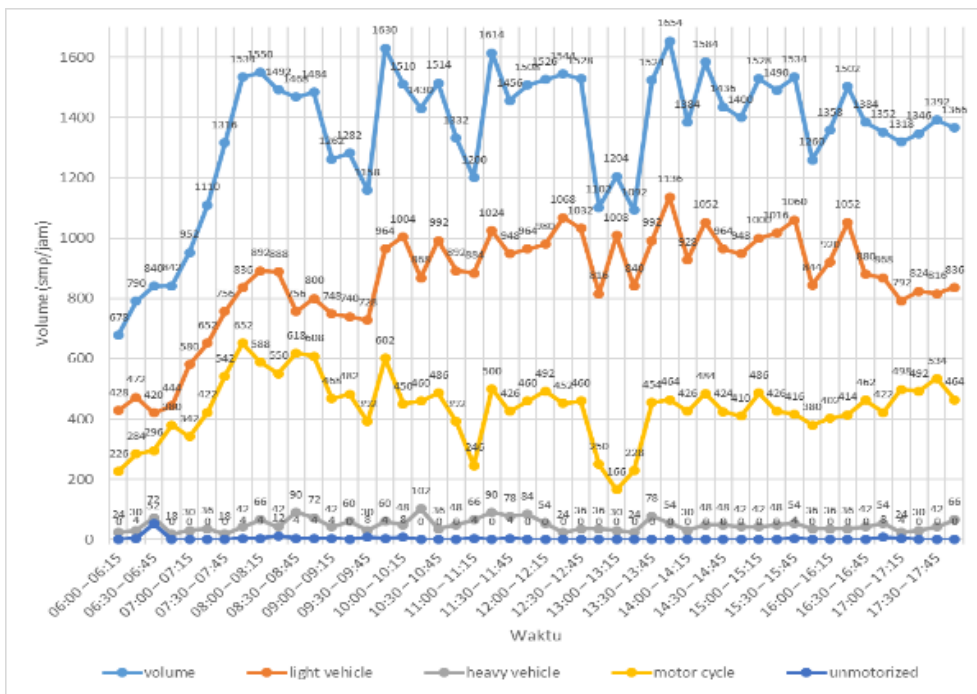
4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Volume Lalu lintas

Untuk mendapatkan volume lalu lintas dalam satuan kendaraan ringan (skr) maka data yang diperoleh dari hasil survey dalam interval lima belas menit dikalikan dengan faktor ekivalensi kendaraan ringan (Tabel 1.) untuk setiap jenis kendaraan yang diambil datanya.

Faktor ekivalensi diambil menurut Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (2014):

- Kendaraan Ringan (LV) = 1.0
- Kendaraan Berat (HV) = 1.5
- Sepeda Motor (MC) = 0.5
- Kendaraan Tak Bermotor (UM) = 1.0



Gambar 4. Grafik Hasil Perhitungan Volume Lalu Lintas Sabtu, 5 November 2022

Gambar 4. memperlihatkan volume lalu lintas dari hasil survey pada hari Sabtu, 5 November 2022. Terlihat jam sibuk paling tinggi terdapat pada pukul 13:45 – 14:00 WITA dengan volume total sebesar 1654 skr/jam atau 413,5 skr/15'. Peningkatan arus lalu lintas terjadi pada siang ke sore hari, diduga karena hari sabtu merupakan *weekends* maka masyarakat

melakukan aktivitas di rumah saja atau keluar rumah hanya untuk keperluan penting atau sekadar merayakan *weekends* dengan orang-orang terdekat.

4.2 Kecepatan Kendaraan

Pada penelitian ini, survey kecepatan hanya dilakukan pada kendaraan ringan saja karena kendaraan ringan dianggap yang paling bisa menggambarkan kondisi aktual yang terjadi di lokasi penelitian.



Gambar 5. Grafik Hasil Perhitungan Kecepatan Kendaraan Sabtu, 5 November 2022

Gambar 5. memperlihatkan kecepatan kendaraan dari hasil survey pada hari Sabtu, 5 November 2022. Terlihat kecepatan paling rendah terjadi pada pukul 14:00 – 14:15 WITA yaitu 6,438 km/jam, sedangkan kecepatan paling tinggi terjadi pada pukul 06:30 – 06:45 WITA yaitu 62,783 km/jam. Perubahan nilai kecepatan terjadi pada siang ke sore hari disebabkan oleh bertambahnya pengguna jalan yang diduga karena hari sabtu merupakan *weekends* maka masyarakat melakukan aktivitas keluar rumah hanya untuk keperluan penting atau sekadar merayakan *weekends* dengan orang-orang terdekat.

4.3 Kepadatan

Nilai kepadatan dapat dihitung dengan membagi volume lalu lintas dengan variabel kecepatan rata-rata kendaraan. Tabel 2. menampilkan nilai kepadatan pada hari Sabtu, 5 November 2022 untuk interval waktu setiap 15 menit.

Tabel 2. Nilai Kepadatan Hari Sabtu, 5 November 2022

PERIODE	V	S	D	PERIODE	V	S	D
	(skr/j)	(km/j)	(skr/km)		(skr/j)	(km/j)	(skr/km)
06:00 – 06:15	678	58.881	11.515	12:00 – 12:15	1526	33.272	45.865
06:15 – 06:30	790	62.133	12.715	12:15 – 12:30	1544	38.726	39.870
06:30 – 06:45	840	62.783	13.379	12:30 – 12:45	1528	39.604	38.582
06:45 – 07:00	842	53.587	15.713	12:45 – 13:00	1102	37.582	29.322
07:00 – 07:15	952	51.136	18.617	13:00 – 13:15	1204	34.890	34.508
07:15 – 07:30	1110	51.122	21.713	13:15 – 13:30	1092	38.290	28.519
07:30 – 07:45	1316	47.936	27.453	13:30 – 13:45	1524	38.552	39.531

PERIODE	V	S	D	PERIODE	V	S	D
	(skr/j)	(km/j)	(skr/km)		(skr/j)	(km/j)	(skr/km)
07:45 – 08:00	1534	39.560	38.776	13:45 – 14:00	1654	11.530	143.448
08:00 – 08:15	1550	36.772	42.151	14:00 – 14:15	1384	6.438	214.989
08:15 – 08:30	1492	46.512	32.078	14:15 – 14:30	1584	32.322	49.007
08:30 – 08:45	1468	39.604	37.067	14:30 – 14:45	1436	39.797	36.083
08:45 – 09:00	1484	47.034	31.551	14:45 – 15:00	1400	38.176	36.672
09:00 – 09:15	1262	50.833	24.826	15:00 – 15:15	1528	40.359	37.860
09:15 – 09:30	1282	44.313	28.930	15:15 – 15:30	1490	38.911	38.293
09:30 – 09:45	1158	47.898	24.176	15:30 – 15:45	1534	42.980	35.691
09:45 – 10:00	1630	47.783	34.112	15:45 – 16:00	1260	31.348	40.194
10:00 – 10:15	1510	34.649	43.580	16:00 – 16:15	1358	40.789	33.294
10:15 – 10:30	1430	42.939	33.303	16:15 – 16:30	1502	44.053	34.095
10:30 – 10:45	1514	48.649	31.121	16:30 – 16:45	1384	38.902	35.576
10:45 – 11:00	1332	47.406	28.098	16:45 – 17:00	1352	42.705	31.659
11:00 – 11:15	1200	37.492	32.007	17:00 – 17:15	1318	38.577	34.165
11:15 – 11:30	1614	34.423	46.887	17:15 – 17:30	1346	36.437	36.940
11:30 – 11:45	1456	40.440	36.004	17:30 – 17:45	1392	34.522	40.322
11:45 – 12:00	1508	45.329	33.268	17:45 – 18:00	1366	36.855	37.064

4.4 Greenshields

Hubungan matematis fungsi linear dapat ditulis menjadi $y = A + Bx$, dengan mengasumsikan $S = y$ (variable dependent) dan $D = x$ (variable independent). Dari hasil survey lapangan diketahui nilai S dan D , sehingga dengan menggunakan persamaan regresi linier parameter A dan B dapat dihitung. Data pada Tabel 2 diolah sehingga mendapatkan nilai A , B dan R^2 berturut – turut adalah sebagai berikut:

$$A = 51,263$$

$$B = -0,2597$$

$$R^2 = 0,683$$

Kemudian didapatilah nilai dari parameter-parameter lainnya, adalah sebagai berikut:

$$S_{ff} = A = 51,263 \text{ km/jam.}$$

$$S_M = 25,631 \text{ km/jam.}$$

$$D_j = -\frac{A}{B} = D_j = -\frac{51,26}{-0,682} = -197,396 \text{ skr/km.}$$

$$D_M = -98,698 \text{ skr/km.}$$

$$V_M = -2529,766 \text{ skr/jam}$$

4.5 Greenberg

Hubungan matematis fungsi linear dapat ditulis menjadi $y = A + Bx$, dengan mengasumsikan $S = y$ (variable dependent) dan $\text{Log} \epsilon . D = x$ (variable independent). Dari hasil survey lapangan diketahui nilai S dan D , sehingga dengan menggunakan persamaan regresi linier parameter A dan B dapat dihitung. Data pada Tabel 2. diolah sehingga mendapatkan nilai A , B dan R^2 berturut – turut adalah sebagai berikut:

$$A = 110,856$$

$$B = -19,810$$

$$R^2 = 0,9032$$

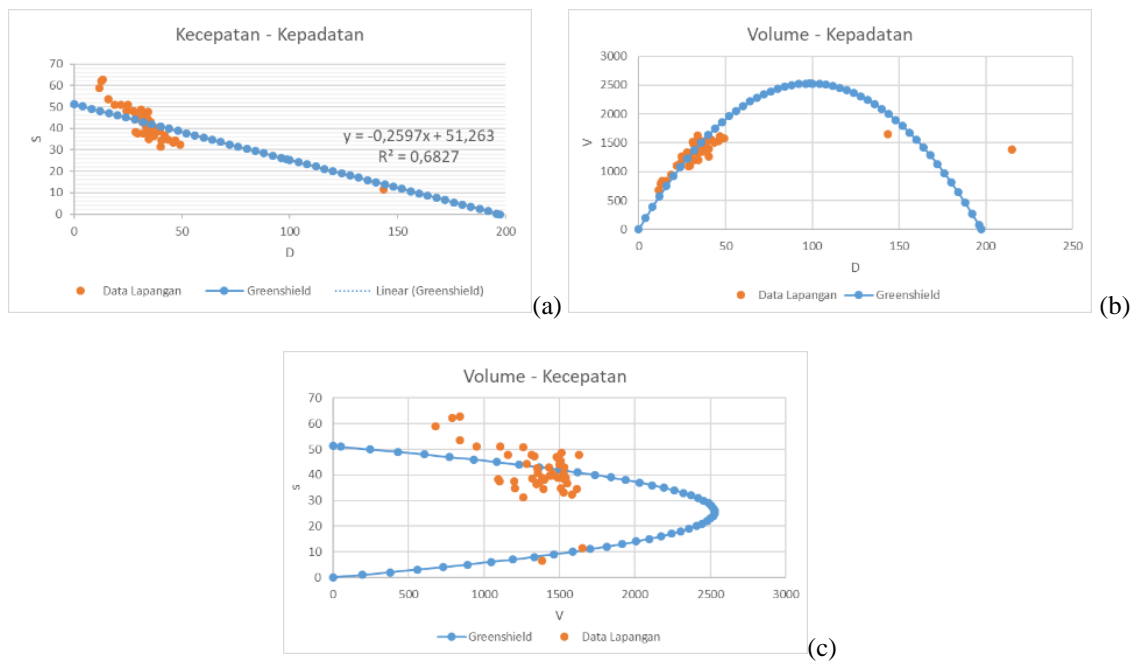
Kemudian didapatilah nilai dari parameter-parameter lainnya, adalah sebagai berikut:

$$C = e^{-A/B} = C = e^{-102,661/-19,810} = 269,311 ; b = \frac{1}{B} = b = \frac{1}{-19,810} = -0,0505$$

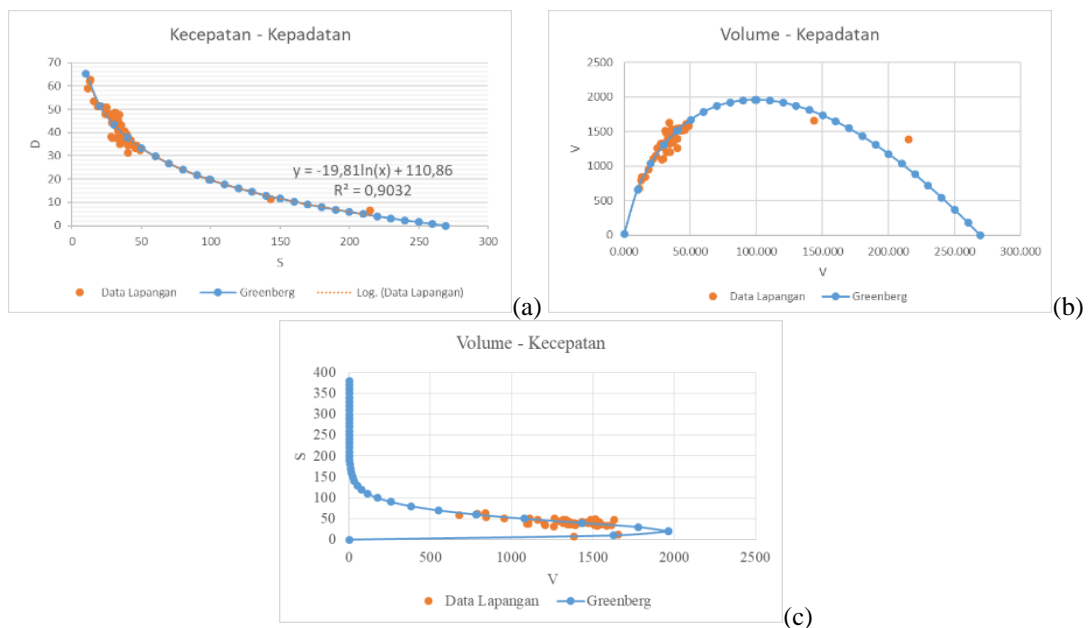
$$D_j = C = 269,311 \text{ skr/km.}$$

$$D_M = 99,074 \text{ skr/km.}$$

$S_M = 19,810 \text{ km/jam.}$



Gambar 6. Grafik Greenshields (a); Hubungan S – D (b); Hubungan V – D; (c) Hubungan V – S Sabtu, 5 November 2022



Gambar 7. Grafik Greenberg (a) Hubungan Hubungan S – D (b) Hubungan V – D (c) Hubungan V – S Sabtu, 5 November 2022

4.6 Underwood

Hubungan matematis fungsi linear dapat ditulis menjadi $y = A + Bx$, dengan mengasumsikan $\ln(S) = y$ (variable dependent) dan $D = x$ (variable independent). Dari hasil survey lapangan diketahui nilai S dan D, sehingga dengan menggunakan persamaan regresi linier parameter A dan B dapat dihitung. Data pada Tabel 2. diolah sehingga mendapatkan nilai A, B dan R^2 berturut – turut adalah sebagai berikut:

A = 4,104
 B = -0,011

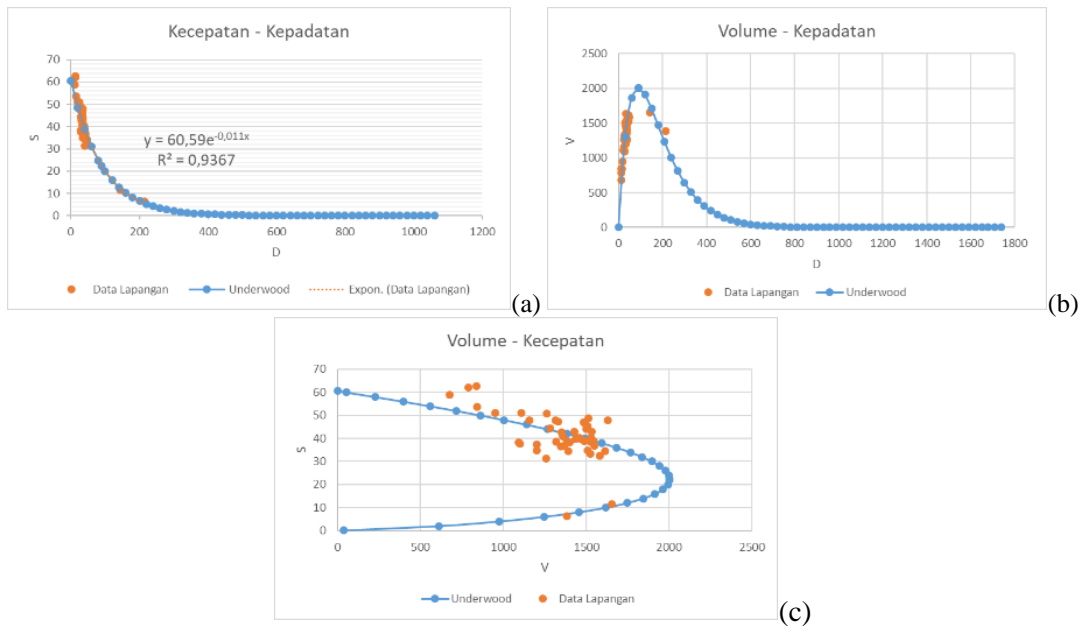
$R^2 = 0,9367$

Kemudian didapatkan nilai dari parameter-parameter lainnya, adalah sebagai berikut:

$S_{ff} = e^A = S_{ff} = e^{4,104} = 60,590 \text{ km/jam.}$

$S_M = 22,290 \text{ km/jam.}$

$D_M = 89,908 \text{ skr/km.}$



Gambar 8. Grafik Underwood (a) Hubungan S – D (b) Hubungan V – D (c) Hubungan V – S Sabtu, 5 November 2022

4.7 Hubungan Matematis

Hasil rekapitulasi perhitungan hubungan matematis antara kecepatan – kepadatan, volume – kepadatan, dan volume – kecepatan untuk model greenshields, greenberg, dan underwood untuk hari Sabtu, 5 November 2022, dapat dilihat pada Tabel 3. Sedangkan Tabel 4. Memperlihatkan hasil analisa regresinya untuk setiap model.

Tabel 3. Hubungan Matematis Antara Volume, Kecepatan, Kepadatan Untuk Model Greenshields, Greenberg, dan Underwood

Model	Greenshields	Greenberg	Underwood
S-D	$S = 51,263 - 0,2579 D$	$S = -19,81 \text{ Ln}(D) - (-110,86)$	$S = 60,59.e^{-0,011D}$
V-D	$V = 51,263 - 0,260 D^2$	$S = -19,810 D.\text{Ln}(D) - (-110,86) D$	$S = 60,590 D.e^{-0,011D}$
V-S	$V = 197,396 S - 3,851 S^2$	$V = 269,311 S.e^{-0,050S}$	$V = 368,996 S - 89,908 S.\text{Ln}(S)$

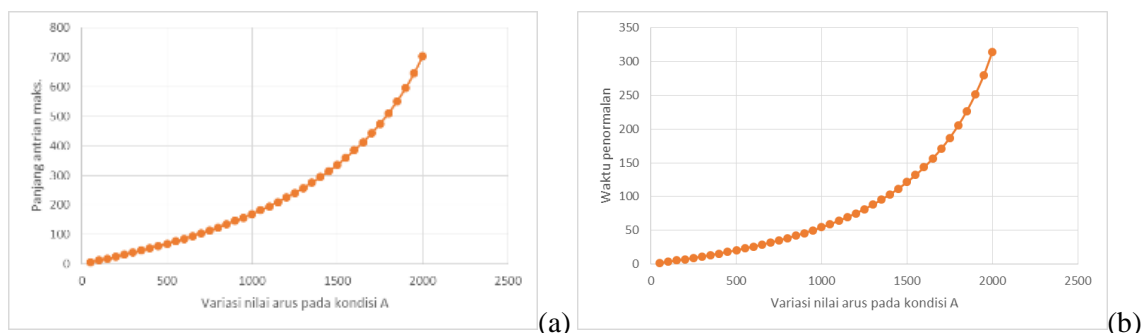
Tabel 4. Hasil Analisa Regresi

	R ²	A	B
Linear	0,683	51,263	-0,260
Logarithmic	0,903	110,856	-19,810
Exponential	0,937	4,104	-0,011

4.8 Shockwave

Variasi nilai arus dilakukan untuk memperlihatkan karakteristik gelombang kejut yang terjadi yang disebabkan oleh nilai arus yang berbeda-beda. Gambar 8a dan 8b menunjukkan

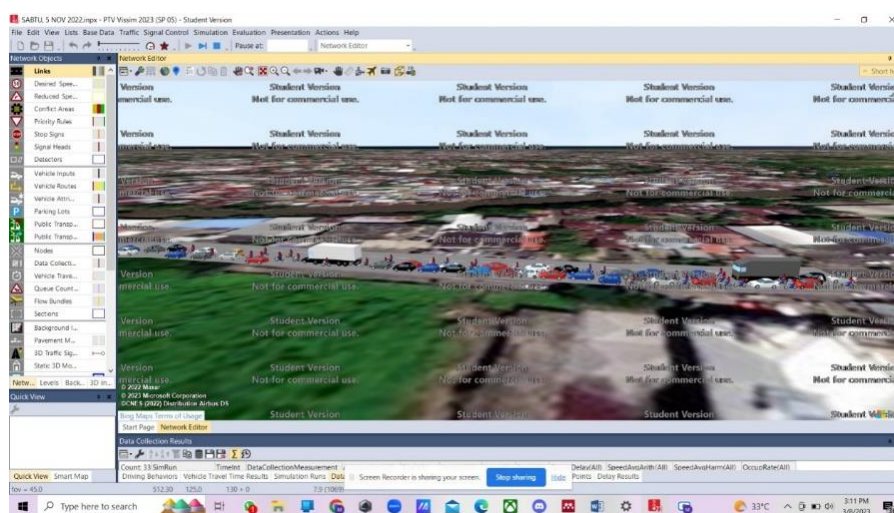
bahwa semakin besarnya nilai volume pada saat kondisi A (V_A), maka akan semakin meningkat pula panjang antrian maksimum (Q_M) yang terjadi, dan semakin lama waktu penormalan (T) atau waktu yang dibutuhkan untuk menormalkan arus kondisi A.



Gambar 9. Kurva Hubungan (a) Antara V_A dan Q_M (b) Antara V_A dan T

4.9 Simulasi Karakteristik Lalu Lintas

Pada penelitian ini digunakan software PTV VISSIM untuk memodelkan atau memberikan gambaran yang semirip mungkin dengan kondisi actual pada lokasi penelitian. Simulasi yang dilakukan telah melewati tahapan kalibrasi dan validasi.



Gambar 10. Simulasi Lalu Lintas Menggunakan Software PTV VISSIM

5. Kesimpulan

Ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini, yaitu:

1. Berdasarkan hasil survey dari tiga hari penelitian didapatkan karakteristik parameter dasar lalu lintas sebagai berikut:
 - a. Hari Senin, 31 Oktober 2022 diperoleh volume tertinggi pada pukul 06:30 – 06:45 WITA yang mencapai 2496 skr/jam, sedangkan kecepatan terendah pada pukul 07:30 – 07:45 WITA yaitu 7,881 km/jam, sehingga didapatkan nilai kepadatan lalu lintas selama 12 jam tiap interval waktu 15 menit pada lokasi penelitian.
 - b. Hari Kamis, 3 November 2022 diperoleh volume tertinggi pada pukul 06:30 – 06:45 WITA yang mencapai 2314 skr/jam, sedangkan kecepatan terendah pada pukul 07:30 – 07:45 WITA yaitu 4,324 km/jam, sehingga didapatkan nilai kepadatan lalu lintas selama 12 jam tiap interval waktu 15 menit pada lokasi penelitian.
 - c. Hari Sabtu, 5 November 2022 diperoleh volume tertinggi pada pukul 13:45 – 14:00 WITA yang mencapai 2314 skr/jam, sedangkan kecepatan terendah pada pukul 14:00 – 14:15

WITA WITA yaitu 6,438 km/jam, sehingga didapatkan nilai kepadatan lalu lintas selama 12 jam tiap interval waktu 15 menit pada lokasi penelitian.

2. Rekapitulasi hasil perhitungan hubungan matematis antara volume – kecepatan – kepadatan untuk model greenshields, greenberg, dan underwood disimpulkan bahwa model underwood pada hari Sabtu, 5 November 2022 merupakan model terbaik yang ditunjukkan dengan nilai koefisien determinasi tertinggi ($R^2 = 0,9367$). Tetapi model underwood dianggap kurang mampu mempresentasikan karakteristik arus lalu lintas karena nilai kepadatan saat macet total tidak dapat diketahui atau pada grafiknya tidak memotong sumbu x. Sehingga, dipilihlah model greenshields dengan angka koefisien determinasi tertinggi sebesar 0,6827 ($R^2 = 0,6827$).
3. Analisis karakteristik gelombang kejut pada simpang bersinyal ruas Jl. Yos Sudarso, Paal Dua, Manado menggunakan hubungan matematis antara volume – kepadatan yang memiliki koefisien determinasi (R^2) tertinggi dari tiga hari survey. Persamaan hubungan matematis volume – kepadatan pada hari Sabtu, 5 November 2022 adalah $V = 51,263 D - 0,260 D^2$. Terlihat bahwa kinerja lampu lalu lintas masih optimal sampai kondisi arus $VA = 1400$ skr/jam dilihat dari panjang antrian dan waktu penormalan. Waktu yang dibutuhkan untuk menormalkan kembali arus $VA = 1400$ skr/jam yang mengalami penundaan selama 83,32 detik adalah 103,250 detik lebih kecil dibandingkan durasi lampu hijaunya 107,35 detik. Itu berarti pada saat lampu berubah dari merah ke hijau semua kendaraan yang mengantri telah melewati garis henti. Sedangkan kondisi arus $VA = 1450$ skr/jam yang mengalami penundaan selama 83,32 detik memerlukan waktu penormalan selama 111,889 detik lebih besar dibandingkan durasi lampu hijaunya 107,35 detik. Itu berarti pada saat lampu berubah dari merah ke hijau tidak semua kendaraan yang mengantri telah melewati garis henti.

Referensi

- Adam, Octaviani Litwina. "Analisa Gelombang Kejut Terhadap Karakteristik Arus Lalu Lintas Di Jalan Walanda Maramis Bitung." *Jurnal Ilmiah Media*, 2013.
- Bella, Marlien Helti Lidya Astri. "Analisa Gelombang Kejut Pada Persimpangan Bersinyal (Studi Kasus Jl. 17 Agustus - Jl. Babe Palar)." *Jurnal Sipil Statik*, 2016.
- Greggy, Michael, James A. Timboeleng, and Samuel Y. R. Rompis. "Analisis Gelombang Kejut Pada Lengan Persimpangan Bersinyal (Studi Kasus: Jl. Sam Ratulangi – Jl. Babe Palar)." *Jurnal Sipil*, 2020.
- Kasenda, Natalia Diane. "Analisa Gelombang Kejut Dan Pengaruhnya Terhadap Arus Lalu Lintas Di Jalan Sarapung Manado." *Jurnal Ilmiah Media* (Universitas Sam Ratulangi), 2013.
- Kementrian Pekerjaan Umum. *Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia*. 2014.
- Kurniawan, Ronny. *Karakteristik Gelombang Kejut (Shock Wave) Pada Persimpangan Bersinyal (Studi Kasus: Simpang Bersinyal Jalan Martadinata)*. Manado: Universitas Sam Ratulangi, 2006.
- Pane, Fanto Pardomuan. "Analisa Perbandingan Panjang Antrian Menggunakan Teori Antrian Dan Analisa Gelombang Kejut Di Locket Keluar Kendaraan Kawasan Megamas Manado." *Jurnal Sipil Statik*, 2018.
- Rachmi, Rachmadiyahani. "Analisis Kinerja Simpang Bersinyal Empat Lengan Menggunakan Metode PKJJ 2014 Dan Aplikasi PTV Vissim 9.0." (Universitas Komputer Indonesia) 2020.
- Rompis, Samuel Y. R. "Traffic Flow Model And Shockwave Analysis." *Jurnal Sipil Statik* Vol. 6, No. 1 (2018): 13-20.
- Sukirman, Silvia. *Dasar-Dasar Perencanaan Geometrik Jalan*. NOVA, 1994.
- Wowor, Stella Kathrine Gracia, Samuel Y. R. Rompis, and Lucia I. R. Lefrandt. "Analisa Gelombang Kejut Akibat Aktivitas Angkutan Kota (Studi Kasus: Jalan Sam Ratulangi – Ranotana, Manado)." *Jurnal Sipil Statik* (Universitas Sam Ratulangi), 2019.
- Zulfhazli. "Analisa Gelombang Kejut Pada Lengan Persimpangan Terhadap Aliran Arus Lalulintas." *Teras Jurnal*, 2017.