

Analisis Hubungan Antara Volume, Kecepatan dan Kepadatan Lalu-Lintas Berdasarkan Model *Greenshield*, *Greenberg* dan *Underwood*

Analysis of the Relationship between Volume, Speed and Density of Traffic based on the Greenshield, Greenberg and Underwood Models

Bagas Saputra^{1,a)} & Dian Savitri^{1,b)}

¹⁾Departemen Matematika, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya.

Koresponden : ^{a)}bagassaputra1208@gmail.com & ^{b)}diansavitri@unesa.ac.id

ABSTRAK

Permasalahan lalu lintas jalan raya merupakan suatu permasalahan yang kompleks dalam dunia transportasi darat terutama untuk transportasi perkotaan. Permasalahan transportasi timbul terutama disebabkan oleh tingginya tingkat urbanisasi, pertumbuhan jumlah kendaraan yang tidak sebanding dengan pertumbuhan prasarana transportasi. Perilaku lalu lintas dapat diselesaikan dengan merepresentasikan dalam bentuk hubungan matematis dan grafis. Secara teoritis terdapat hubungan yang mendasar antara volume (*flow*) dengan kecepatan (*speed*) serta kepadatan (*density*). Oleh karena itu, dalam artikel ini akan dikaji tentang analisis hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas. Untuk merepresentasikan hubungan matematis antara volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas digunakan tiga model sebagai berikut *Greenshield*, *Greenberg*, dan *Underwood*. Tujuan dari penulisan artikel ini adalah untuk mengetahui model manakah yang paling mendekati kondisi eksisting lalu lintas dan mengetahui berapa persen kesesuaian model untuk meyakinkan dalam menggambarkan hubungan antara kecepatan dan kepadatan lalu lintas. Hasil analisis model *Greenberg* menunjukkan hubungan yang paling erat antara kecepatan dan kepadatan dengan model $U_s = 13.29687523 \ln\left(\frac{322.9502746}{D}\right)$. Kesimpulan tersebut diambil dengan membandingkan nilai r^2 terbesar dari ketiga model yang digunakan. Nilai $r^2 = 0,94$ pada model *Greenberg* memiliki arti bahwa kesesuaian model sebesar 94.40% dengan tingkat kepercayaan menggambarkan hubungan antara kecepatan dan kepadatan.

Kata Kunci : operasi infrastruktur jalan, *Greenshield*, *Greenberg*, *Underwood*, volume, kecepatan, kepadatan

PENDAHULUAN

Infrastruktur Jaringan Jalan perlu dioperasikan dengan baik. Infrastruktur Jaringan Jalan pada dasarnya diadakan untuk mengalirkan Lalu-Lintas (Soemitro & Suprayitno, 2020; Suprayitno & Soemitro, 2018). Dengan demikian Pengoperasian Infrastruktur Jaringan Jalan pada dasarnya dilakukan dengan cara-cara dan teknik-teknik Manajemen Lalu Lintas (MLL) (Halim, Mustari & Zakariah, 2019; Wibisono & Cahyono, 2018; Zuhdy, Notodiningrat, Fauzi & Yusuf, 2020). Manajemen Lalu Lintas dibangun berdasarkan pengertian tentang Teknik Lalu Lintas (TLL). Pengetahuan MLL dan TLL memerlukan beberapa Model Lalu Lintas seperti Model Pengaturan Simpang Bersinyal dan juga Model Kapasitas Jalan (Bina Marga, 1997; Kye & Susilawati, 2020). Sedangkan secara keseluruhan TLL harus didasarkan pada Sifat Dasar

Pengaliran Lalu-Lintas (LL). Sifat Dasar Pengaliran ini sudah selesai dimodelkan di negara maju. Indonesia, sebagai negara sedang berkembang, sedang selalu mengalami perubahan dalam Sifat Dasar Pengaliran LL. Hal ini terutama disebabkan oleh Komposisi LL, Karakteristik Pengemudi dan Karakteristik Jalan yang selalu berubah. Komposisi LL berubah dari kandungan kendaraan bermotor yang sedikit menjadi semakin banyak, dan kandungan sepeda motor yang melonjak naik. Pengemudi usia muda yang semakin banyak. Kondisi Jalan yang secara umum semakin bagus. Oleh karena itu, Model Sifat Dasar Pengaliran LL ini selalu harus diperbaharui.

Permasalahan lalu lintas jalan raya merupakan suatu permasalahan yang kompleks dalam dunia transportasi darat terutama untuk transportasi perkotaan. Setiap diselesaikan satu permasalahan akan muncul permasalahan yang lain, dan tidak menutup kemungkinan bahwa masalah yang berhasil diselesaikan dikemudian hari akan muncul karena adanya perubahan. Problem transportasi diperkotaan tersebut timbul terutama disebabkan oleh tingginya tingkat urbanisasi, pertumbuhan jumlah kendaraan yang tidak sebanding dengan pertumbuhan prasarana transportasi (Tamin, 2000).

Informasi mengenai pergerakan arus lalu lintas sangat penting untuk diketahui di daerah perkotaan. Hal ini dikarenakan populasi dan pergerakan arus lalu lintas di daerah perkotaan meningkat pesat setiap harinya. Menurut Utama (2016), teori pergerakan arus lalu lintas memegang peranan sangat penting dalam perencanaan, perancangan, dan penetapan berbagai kebijakan sistem transportasi. Kemampuan untuk menampung arus lalu lintas sangat bergantung pada keadaan fisik dari jalan tersebut, baik kualitas maupun kuantitasnya serta karakteristik operasional lalu lintasnya. Teori pergerakan arus lalu lintas menjelaskan mengenai kualitas dan kuantitas dari arus lalu lintas sehingga dapat diterapkan kebijakan atau pemilihan sistem yang paling tepat untuk menampung lalu lintas yang ada. Penerapan teori pergerakan lalu lintas menggunakan metode pendekatan matematis untuk menganalisa gejala yang terjadi dalam arus lalu lintas (Utama, 2016).

Perilaku lalu lintas dapat diselesaikan dengan merepresentasikan dalam bentuk hubungan matematis dan grafis. Menurut Widodo, dkk. (2012) yang menyatakan bahwa peningkatan volume lalu lintas dapat menyebabkan berubahnya perilaku lalu lintas, sehingga secara teoritis terdapat hubungan yang mendasar antara volume (*flow*) dengan kecepatan (*speed*) serta kepadatan (*density*). Oleh karena itu, dalam artikel ini akan dikaji tentang analisis hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas. Untuk merepresentasikan hubungan matematis antara volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas digunakan tiga model diantaranya model *Greenshield*, *Greenberg*, dan *Underwood*.

Tujuan dari penulisan artikel ini yaitu untuk mengetahui model manakah yang paling mendekati kondisi eksisting lalu lintas dan mengetahui berapa persen kesesuaian model dengan tingkat kepercayaan dalam menggambarkan hubungan antara kecepatan dan kepadatan lalu lintas, serta Model mana yang paling tepat.

KAJIAN PUSTAKA

Lalu lintas yang bergerak di sepanjang jalan raya dapat digambarkan sebagai fungsi ruang, dan sebagai fungsi waktu (Demos, 2002). Fenomena arus lalu lintas dikaitkan dengan perilaku dinamis dari pola lalu lintas mencerminkan bahwa lalu lintas terjadi dalam ruang dan waktu, sehingga yang terkait dengan variabel lalu lintas diukur dalam ruang dan waktu (Boris, 2009).

Komposisi Lalu Lintas

Arus lalu lintas yang ada di lapangan pada kenyataannya adalah heterogen (Jianli & Jianping, 2003). Sejumlah kendaraan dengan berbagai jenis, ukuran dan sifatnya membentuk

sebuah arus lalu lintas. Keragaman ini membentuk karakteristik lalu lintas yang berbeda untuk setiap komposisi dan berpengaruh terhadap arus lalu lintas secara keseluruhan (Julianto, 2010).

Memperhatikan kondisi tersebut, diperlukan suatu besaran untuk menyatakan pengaruh sebuah jenis kendaraan terhadap arus lalu lintas secara keseluruhan. Satuan mobil penumpang (smp) merupakan sebuah besaran yang menyatakan ekivalensi pengaruh setiap jenis kendaraan yang dibandingkan terhadap jenis kendaraan penumpang. Dengan besaran ini, setiap komposisi lalu lintas dapat dinilai (MKJI, 1997).

Arus Lalu Lintas

Karakteristik lalu lintas terjadi karena adanya interaksi antara pengendara dan kendaraan dengan jalan dan lingkungannya. Pembahasan tentang arus lalu lintas harus dikonsentrasikan pada variabel-variabel arus (*flow, volume*), kecepatan (*speed*), dan kerapatan (*density*). Ketiga komponen itu termasuk pembahasan arus lalu lintas dalam skala makroskopik (Aly, 2012).

Pembahasan merupakan pengembangan dan pendalaman dari konsep awalnya yakni bahwa elemen utama dari arus lalu lintas adalah komposisi atau karakteristik volume, asal tujuan, kualitas, dan biaya. Pergeseran tersebut terjadi karena pemahaman tentang fenomena arus lalu lintas pada dasarnya harus didalami dari sudut pandang Teori Arus Lalu Lintas (Julianto, 2010).

Arus dan Volume

Arus (*flow*) adalah rasio per jam jumlah kendaraan yang melintasi suatu titik pada suatu lajur tertentu, pada periode waktu tertentu, diukur dalam satuan kendaraan per satuan waktu tertentu (HCM, 2000). Sedangkan volume adalah jumlah kendaraan yang melintasi suatu arus jalan pada periode waktu tertentu diukur dalam satuan kendaraan per satuan waktu (Morlok, 1991).

Kecepatan

Kecepatan merupakan parameter utama kedua yang menjelaskan keadaan arus lalu lintas di jalan. Menurut McShane, Roess, dan Prassas (2004) kecepatan didefinisikan sebagai rasio pergerakan dari kendaraan dalam jarak per satuan waktu.

Dalam pergerakan arus lalu lintas, tiap kendaraan berjalan pada kecepatan yang berbeda. Dengan demikian pada arus lalu lintas tidak dikenal karakteristik kecepatan tunggal akan tetapi lebih sebagai distribusi dari kecepatan kendaraan tunggal. Dari distribusi tersebut, jumlah rata-rata atau nilai tipikal dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dari arus lalu lintas (Timpal dkk, 2018). Dalam perhitungannya kecepatan rata-rata dibedakan menjadi dua, yaitu:

1. *Time Mean Speed* (TMS), yang didefinisikan sebagai kecepatan rata-rata dari seluruh kendaraan yang melewati suatu titik dari jalan selama periode tertentu.
2. *Space Mean Speed* (SMS), yakni kecepatan rata-rata dari seluruh kendaraan yang menempati penggalan jalan selama periode waktu tertentu.

Kepadatan

Kepadatan dapat didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang menempati suatu panjang jalan atau lajur (Morlok, 1991), secara umum dapat diekspresikan dalam kendaraan per mil (vpm) atau kendaraan per mil per lane (vpmpl). Kepadatan sulit diukur secara langsung di lapangan, melainkan dihitung dari nilai kecepatan dan arus sebagai hubungan:

$$V = U_s \cdot D \quad \dots(1)$$

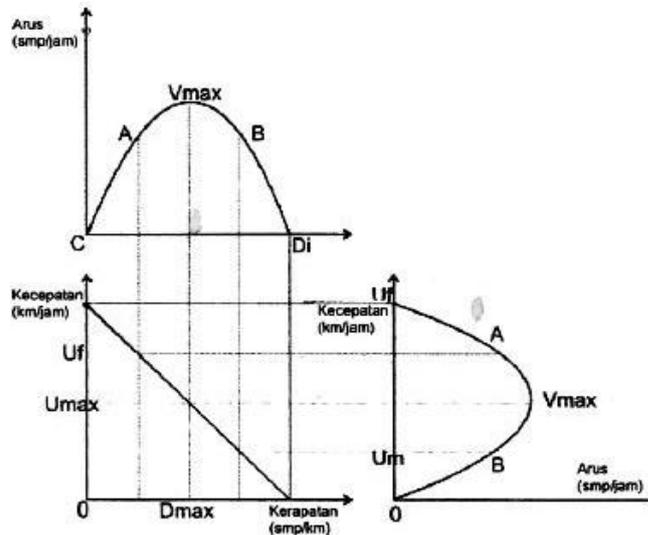
dengan

V : arus lalu lintas

U_s : *Space Mean Speed*

D : kepadatan

Model dari hubungan antara variabel arus, kecepatan, dan kepadatan, dapat terlihat pada Gambar 1 berikut (Indrajaya, 2012):



Gambar 1. Hubungan Antara Arus, Kecepatan, dan Kepadatan

Karakteristik hubungan ketiga parameter utama bagi Lalu-Lintas Kendaraan pada Gambar 1 menurut Indrajaya (2012) dapat diterangkan sebagai berikut.

1. Pada kondisi kepadatan mendekati harga nol, arus lalu lintas juga mendekati harga nol, dengan asumsi seakan-akan tidak terdapat kendaraan bergerak. Sedangkan kecepatannya akan mendekati kecepatan rata-rata pada kondisi arus bebas.
2. Apabila kepadatan naik dari angka nol, maka arus juga naik. Pada suatu kepadatan tertentu akan tercapai suatu titik di mana bertambahnya kepadatan akan membuat arus menjadi turun.
3. Pada kondisi kepadatan mencapai kondisi maksimum atau disebut kepadatan kondisi *jam* (kepadatan jenuh) kecepatan perjalanan akan mendekati nilai nol, demikian pula arus lalu lintas akan mendekati harga nol karena tidak memungkinkan kendaraan untuk dapat bergerak lagi.
4. Kondisi arus di bawah kapasitas dapat terjadi pada dua kondisi, yakni:
 - a. Pada kecepatan tinggi dan kepadatan rendah (kondisi A).
 - b. Pada kecepatan rendah dan kepadatan tinggi (kondisi B).

Hubungan Volume, Kecepatan, dan Kepadatan

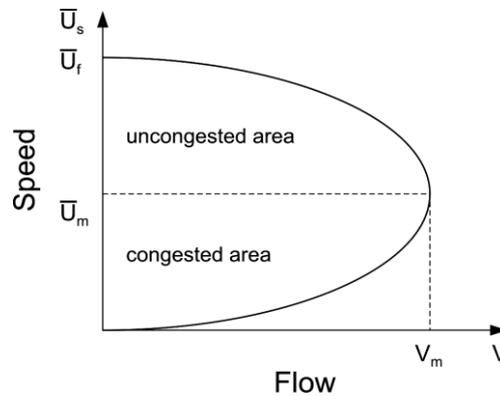
Pada aliran lalu lintas suatu ruas jalan raya terdapat 3 (tiga) variabel utama yang digunakan untuk mengetahui karakteristik arus lalu lintas, yaitu:

1. Volume (*flow*), yaitu jumlah kendaraan yang melewati suatu titik tinjau tertentu pada suatu ruas jalan per satuan waktu tertentu.
2. Kecepatan (*speed*), yaitu jarak yang dapat ditempuh suatu kendaraan pada ruas jalan per satuan waktu.
3. Kepadatan (*density*), yaitu jumlah kendaraan per satuan panjang jalan tertentu.

Variabel-variabel tersebut memiliki hubungan antara satu dengan lainnya. Hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan dapat digambarkan secara grafis dengan menggunakan persamaan matematis (Tamin, 2000).

Hubungan Volume-Kecepatan

Hubungan mendasar antara volume dan kecepatan adalah dengan bertambahnya volume lalu lintas maka kecepatan rata-rata ruangnya akan berkurang sampai kepadatan kritis (volume maksimum) tercapai (MKJI, 1997). Hubungan volume dan kecepatan ditunjukkan pada Gambar 2 berikut ini.

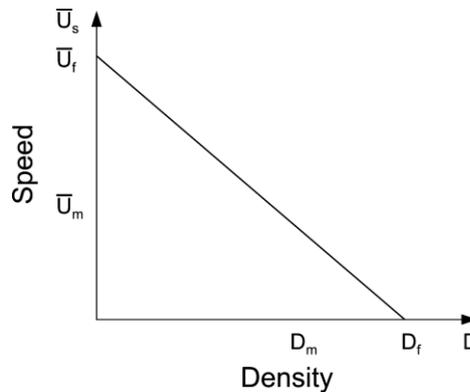


Gambar 2. Hubungan Volume-Kecepatan

Setelah kepadatan kritis tercapai, maka kecepatan rata-rata ruang dan volume akan berkurang. Jadi kurva diatas menggambarkan dua kondisi yang berbeda, lengan atas menunjukkan kondisi stabil dan lengan bawah menunjukkan kondisi arus padat (MKJI, 1997).

Hubungan Kecepatan-Kepadatan

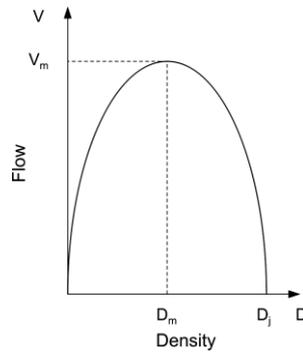
Kecepatan akan menurun apabila kepadatan bertambah. Kecepatan arus bebas akan terjadi apabila kepadatan sama dengan nol, dan pada saat kecepatan sama dengan nol maka akan terjadi kemacetan (MKJI, 1997). Hubungan antara kecepatan dan kepadatan ditunjukkan pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Hubungan Kecepatan-Kepadatan

Hubungan Volume-Kepadatan

Volume maksimum (V_m) terjadi pada saat kepadatan mencapai titik D_m (kapasitas jalur jalan sudah tercapai). Setelah mencapai titik ini volume akan menurun walaupun kepadatan bertambah sampai terjadi kemacetan di titik D_f (MKJI, 1997). Hubungan volume dan kepadatan ditunjukkan pada Gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Hubungan Volume - Kepadatan

Model Hubungan Volume, Kecepatan, dan Kepadatan

Model Greenshield

Model ini adalah model yang paling awal dalam upaya mengamati perilaku lalu lintas. *Greenshield* yang melakukan studi pada jalan-jalan di luar kota Ohio, dimana kondisi lalu lintas memenuhi syarat karena tanpa gangguan dan bergerak secara bebas (*steady state condition*). *Greenshield* mendapatkan hasil bahwa hubungan antara kecepatan dan kepadatan diasumsikan linier (Tamin, 2000). Model ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$U_s = U_f - \left(\frac{U_f}{D_j}\right) D \quad \dots(2)$$

Dari persamaan tersebut perlu diketahui bahwa U_s adalah kecepatan rata-rata ruang (km/jam), D adalah kepadatan (smp/km), dan D_j adalah kepadatan kondisi *jam* (smp/km).

Pada dasarnya persamaan tersebut merupakan suatu persamaan linier $y = a + bx$, dimana U_f dianggap sebagai konstanta a dan $-\frac{U_f}{D_j}$ dianggap sebagai b , sedangkan D dan U_s masing-masing merupakan variabel x dan variabel y . Kedua konstanta tersebut dapat dinyatakan sebagai kecepatan bebas (*free flow speed*) dimana pengendara dapat memacu kecepatan sesuai dengan keinginan dan puncak kepadatan dimana kendaraan tidak dapat bergerak sama sekali (Tamin, 2000).

Hubungan antara volume dan kepadatan didapat dengan mengubah Persamaan 1 menjadi $U_s = \frac{V}{D}$ yang kemudian disubstitusikan pada persamaan (2) sehingga diperoleh:

$$V = U_f \cdot D - \left(\frac{U_f}{D_j}\right) D^2 \quad \dots(3)$$

Persamaan tersebut merupakan persamaan parabolik $V = f(D)$.

Hubungan antara volume dan kecepatan didapat dengan mengubah Persamaan 1 menjadi $D = \frac{V}{U_s}$ yang kemudian disubstitusikan ke persamaan (2) maka diperoleh:

$$V = D_j \cdot U_s - \left(\frac{D_j}{U_f}\right) U_s^2 \quad \dots(4)$$

Persamaan tersebut juga merupakan persamaan parabolik $V = f(U_s)$.

Volume maksimum (V_m) untuk model *Greenshield* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$V_m = D_m \cdot U_m \quad \dots(5)$$

Dari persamaan tersebut perlu diketahui bahwa D_m adalah kepadatan pada saat volume maksimum dan U_m adalah kecepatan pada saat volume maksimum (Tamin, 2000).

Kepadatan saat volume maksimum (D_m) untuk model *Greenshield* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$D = D_m = \frac{D_j}{2} \quad \dots(6)$$

Kecepatan saat volume maksimum (U_m) untuk model *Greenshield* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$U_s = U_m = \frac{U_f}{2} \quad \dots(7)$$

Apabila persamaan (6) dan (7) disubstitusikan ke persamaan (5), maka volume maksimum (V_m) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$V_m = \frac{D_j \cdot U_f}{4} \quad \dots(8)$$

Model Greenberg

Model *Greenberg* adalah model kedua yang mensurvey hubungan kecepatan dan kepadatan pada aliran lalu lintas pada terowongan, dan menyimpulkan bahwa model non linier lebih tepat digunakan yakni fungsi logaritmik (Tamin, 2000). Rumus dasar dari *Greenberg* adalah:

$$D = c \cdot e^{bU_s} \quad \dots(9)$$

dengan c dan b merupakan nilai konstanta.

Dengan menggunakan aliran fluida dengan mengombinasikan persamaan gerak dan kontinuitas untuk satu kesatuan dimensi gerak dan menurunkan persamaan:

$$U_s = U_m \cdot \ln \left(\frac{D_j}{D} \right) \quad \dots(10)$$

Pada model *Greenberg* ini diperlukan pengetahuan tentang parameter-parameter kecepatan optimum dan kepadatan kondisi *jam*. Sama dengan model *Greenshield*, kepadatan kondisi *jam* sangat sulit diamati di lapangan dan estimasi terhadap kecepatan optimum lebih sulit diperkirakan dari pada kecepatan bebas rata-rata (Tamin, 2000).

Estimasi kasar untuk menentukan kecepatan optimum kurang lebih setengah dari kecepatan rencana. Kekurangan lain dari model ini adalah kecepatan bebas rata-rata tidak bisa dihitung (Tamin, 2000). Persamaan (10) diatas dapat ditulis kedalam bentuk persamaan matematika lain yaitu:

$$U_s = U_m \cdot \ln D_j - U_m \cdot \ln D \quad \dots(11)$$

Pada dasarnya persamaan tersebut merupakan suatu persamaan linier $y = a + bx$, dimana $U_m \cdot \ln D_j$ dianggap sebagai konstanta a dan $-U_m$ dianggap sebagai b , sedangkan $\ln D$ dan U_s masing-masing merupakan variabel x dan variabel y .

Hubungan antara volume dan kepadatan didapat dengan mengubah persamaan (1) menjadi $U_s = \frac{V}{D}$ yang kemudian disubstitusikan pada persamaan (10) sehingga diperoleh:

$$V = U_m \cdot D \cdot \ln \left(\frac{D_j}{D} \right) \quad \dots(12)$$

Hubungan antara volume dan kecepatan didapat dengan mengubah persamaan (1) menjadi $D = \frac{V}{U_s}$ yang kemudian disubstitusikan ke persamaan (10) maka diperoleh:

$$V = U_s \cdot D_j \cdot e^{\frac{-U_s}{U_m}} \quad \dots(13)$$

Volume maksimum (V_m) untuk model *Greenberg* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (5). Untuk menentukan konstanta D_m dan U_m , maka persamaan (12) dan (13) harus dideferensir masing-masing terhadap kepadatan dan kecepatan.

Kepadatan saat volume maksimum (D_m) untuk model *Greenberg* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$D = D_m = \frac{D_j}{e} \quad \dots(14)$$

Kecepatan saat volume maksimum (U_m) untuk model *Greenberg* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$U_s = U_m \quad \dots(15)$$

Apabila persamaan (14) dan (15) disubstitusikan ke persamaan (5), maka volume maksimum (V_m) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$V_m = \frac{D_j \cdot U_m}{e} \quad \dots(16)$$

Model Underwood

Underwood mengemukakan suatu hipotesis bahwa hubungan antara kecepatan dan kepadatan merupakan hubungan eksponensial (Tamin, 2000) dengan bentuk persamaan sebagai berikut:

$$U_s = U_f \cdot e^{-\frac{D}{D_m}} \quad \dots(17)$$

Untuk mendapatkan konstanta U_f dan D_m , persamaan (17) diubah menjadi persamaan linier $y = a + bx$ seperti berikut:

$$\ln U_s = \ln U_f - \frac{D}{D_m} \quad \dots(18)$$

dimana $\ln U_f$ dianggap sebagai konstanta a dan $-\frac{1}{D_m}$ dianggap sebagai b , sedangkan D dan $\ln U_s$ masing-masing merupakan variabel x dan variabel y .

Hubungan antara volume dan kepadatan didapat dengan mengubah persamaan (1) menjadi $U_s = \frac{V}{D}$ yang kemudian disubstitusikan pada persamaan (17) sehingga diperoleh:

$$V = D \cdot U_f \cdot e^{-\frac{D}{D_m}} \quad \dots(19)$$

Hubungan antara volume dan kecepatan didapat dengan mengubah persamaan (1) menjadi $D = \frac{V}{U_s}$ yang kemudian disubstitusikan ke persamaan (17) maka diperoleh:

$$V = U_s \cdot D_m \cdot \ln \left(\frac{U_f}{U_s} \right) \quad \dots(20)$$

Apabila persamaan (19) dan (20) disubstitusikan ke persamaan (5), maka volume maksimum (V_m) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$V_m = \frac{D_m \cdot U_f}{e} \quad \dots(21)$$

PENGUMPULAN DATA

Data yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas berdasarkan model *Greenshield*, *Greenberg*, dan *Underwood* merupakan data sekunder (Prabowo, 2011). Data tersebut kemudian diolah sehingga menghasilkan data volume (V), kecepatan (U_s), dan kepadatan (D) seperti pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil Survey Kendaraan

No	Periode	V	U _s
1	06.00-06.15	844	3,195,266,272
2	06.15-06.30	988	2,842,105,263
3	06.30-06.45	1105	2,321,582,115
4	06.45-07.00	1163	197,080,292
5	07.00-07.15	1394	2,007,434,944
6	07.15-07.30	1426	2,340,702,211
7	07.30-07.45	1325	2,551,984,877
8	07.45-08.00	1219	2,583,732,057
9	08.00-08.15	1033	2,848,101,266
10	08.15-08.30	1022	2,843,601,896
11	08.30-08.45	991	349,062,702
12	08.45-09.00	913	3,765,690,377
13	15.00-15.15	716	3,907,380,608
14	15.15-15.30	789	3,176,470,588
15	15.30-15.45	856	3,270,745,003
16	15.45-16.00	977	3,087,478,559
17	16.00-16.15	1160	2,757,916,241
18	16.15-16.30	1219	245,677,889
19	16.30-16.45	1458	2,294,942,626
20	16.45-17.00	1502	2,002,224,694
21	17.00-17.15	1540	1,983,106,869
22	17.15-17.30	1533	178,807,947
23	17.30-17.45	1564	1,840,490,798
24	17.45-18.00	1357	1,978,746,794

Sumber: Hasil perhitungan data lapangan mahasiswa UPN “Veteran” Jatim

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas yaitu model *Greenshield*, *Greenberg*, dan *Underwood*.

1. Model Linier *Greenshield*

Hubungan Kecepatan dan Kepadatan

Greenshield mengemukakan bahwa hubungan antara kecepatan dan kepadatan berbentuk fungsi linier dengan persamaan :

$$U_s = U_f - \left(\frac{U_f}{D_j}\right) D \quad \dots(22)$$

Untuk mendapatkan nilai konstanta U_f dan D_j , maka persamaan tersebut dapat dijadikan persamaan linier $y = a + bx$ dengan $a = U_f$, $b = -\frac{U_f}{D_j}$, $x = D$, dan $y = U_s$. Sehingga dengan menggunakan Metode Regresi Linier diperoleh :

$$a = 40.05813591 \text{ dan } b = -0.280569489$$

Karena $a = U_f$ maka $U_f = 40.05813591$ dan $b = -\frac{U_f}{D_j}$ maka $D_j = 142.7743836$.

Sehingga diperoleh persamaan regresinya adalah

$$U_s = 40.05813591 - 0.280569489 D$$

dengan koefisien korelasi (r)

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

$$r = -0.941885072$$

$$r^2 = 0.887147489$$

Hubungan Volume dan Kecepatan

Hubungan volume dan kecepatan merupakan fungsi parabolik dengan bentuk persamaan sebagai berikut :

$$V = D_j \cdot U_s - \left(\frac{D_j}{U_f}\right) U_s^2 \quad \dots(24)$$

$$V = 142.7743836 U_s - 3.564179421 U_s^2$$

Hubungan Volume dan Kepadatan

Hubungan volume dan kepadatan juga merupakan fungsi parabolik dengan bentuk persamaan sebagai berikut :

$$V = U_f \cdot D - \left(\frac{U_f}{D_j}\right) D^2 \quad \dots(25)$$

$$V = 40.05813591 D - 0.280569489 D^2$$

Perhitungan Volume Maksimum

Volume maksimum (kapasitas) didapat dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$V_m = \frac{D_j \cdot U_f}{4} \quad \dots(26)$$

$$V_m = 1429.818916$$

Volume maksimum menurut model *Greenshield* sebesar 1429.818916 smp/jam.

2. Model Logaritmik Greenberg

Hubungan Kecepatan dan Kepadatan

Greenberg mengemukakan suatu hipotesa bahwa hubungan antara kecepatan dan kepadatan berbentuk logaritmik dengan persamaan :

$$U_s = U_m \cdot \ln\left(\frac{D_j}{D}\right) \quad \dots(27)$$

Untuk mendapatkan nilai konstanta U_m dan D_j , maka persamaan tersebut dapat diubah menjadi persamaan linier $U_s = U_m \cdot \ln D_j - U_m \cdot \ln D$ dengan asumsi $y = a + bx$ dimana $a = U_m \cdot \ln D_j$, $b = -U_m$, $x = \ln D$, dan $y = U_s$. Sehingga dengan menggunakan Metode Regresi Linier diperoleh :

$$a = 76.82267485 \text{ dan } b = -13.29687523$$

Karena $D_j = e^{\frac{a}{U_m}}$ maka $D_j = 322.9502746$ dan $b = -U_m$ maka $U_m = 13.29687523$. Sehingga diperoleh persamaan regresinya adalah

$$U_s = 13.29687523 \ln\left(\frac{322.9502746}{D}\right) \quad \dots(28)$$

dengan koefisien korelasi (r)

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{(n \sum x^2 - (\sum x)^2)(n \sum y^2 - (\sum y)^2)}} \quad \dots(29)$$

$$r = -0.971621206$$

$$r^2 = 0.944047768$$

Hubungan Volume dan Kecepatan

Hubungan volume dan kecepatan berlaku persamaan berikut:

$$V = U_s \cdot D_j \cdot e^{\frac{-U_s}{U_m}} \quad \dots(30)$$

$$V = 322.9502746 U_s e^{\frac{-U_s}{13.29687523}}$$

Hubungan Volume dan Kepadatan

Hubungan volume dan kepadatan berlaku persamaan berikut:

$$V = U_m \cdot D \cdot \ln\left(\frac{D_j}{D}\right) \quad \dots(31)$$

$$V = 13.29687523 D \ln\left(\frac{322.9502746}{D}\right)$$

Perhitungan Volume Maksimum

Untuk model *Greenberg*, volume maksimum (kapasitas) didapat dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$V_m = \frac{D_j \cdot U_m}{e} \quad \dots(32)$$

$$V_m = \frac{(322.9502746)(13.29687523)}{e}$$

$$V_m = 1579.758751$$

Volume maksimum menurut model *Greenberg* sebesar 1579.758751 smp/jam.

3. Model Eksponensial Underwood

Hubungan Kecepatan dan Kepadatan

Underwood mengemukakan bahwa hubungan antara kecepatan dan kepadatan berbentuk eksponensial dengan persamaan:

$$U_s = U_f \cdot e^{-\frac{D}{D_m}} \quad \dots(33)$$

Untuk mendapatkan nilai konstanta U_f dan D_m , maka persamaan tersebut dapat diubah menjadi persamaan linier $\ln U_s = \ln U_f - \frac{D}{D_m}$ dengan asumsi $y = a + bx$ dimana $a = \ln U_f$, $b = -\frac{1}{D_m}$, $x = D$, dan $y = \ln U_s$. Sehingga dengan menggunakan Metode Regresi Linier diperoleh:

$$a = 3.772551401 \text{ dan } b = -0.010787071$$

Karena $a = \ln U_f$ maka $U_f = 43.49088609$ dan $b = -\frac{1}{D_m}$ maka $D_m = 92.70356809$. Sehingga diperoleh persamaan regresinya adalah

$$U_s = 43.49088609 e^{-\frac{D}{92.70356809}}$$

dengan koefisien korelasi (r)

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{(n \sum x^2 - (\sum x)^2)(n \sum y^2 - (\sum y)^2)}} \dots(34)$$

$$r = -0.962605952$$

$$r^2 = 0.926610219$$

Hubungan Volume dan Kecepatan

Hubungan volume dan kecepatan berlaku persamaan berikut:

$$V = U_s \cdot D_m \cdot \ln \left(\frac{U_f}{U_s} \right) \dots(35)$$

$$V = 92.70356809 U_s \ln \left(\frac{43.49088609}{U_s} \right)$$

Hubungan Volume dan Kepadatan

Hubungan volume dan kepadatan berlaku persamaan berikut :

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

$$V = 43.49088609 D e^{-\frac{D}{92.70356809}}$$

Perhitungan Volume Maksimum

Untuk model *Underwood*, volume maksimum (kapasitas) didapat dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$V_m = \frac{D_m \cdot U_f}{e} \dots(37)$$

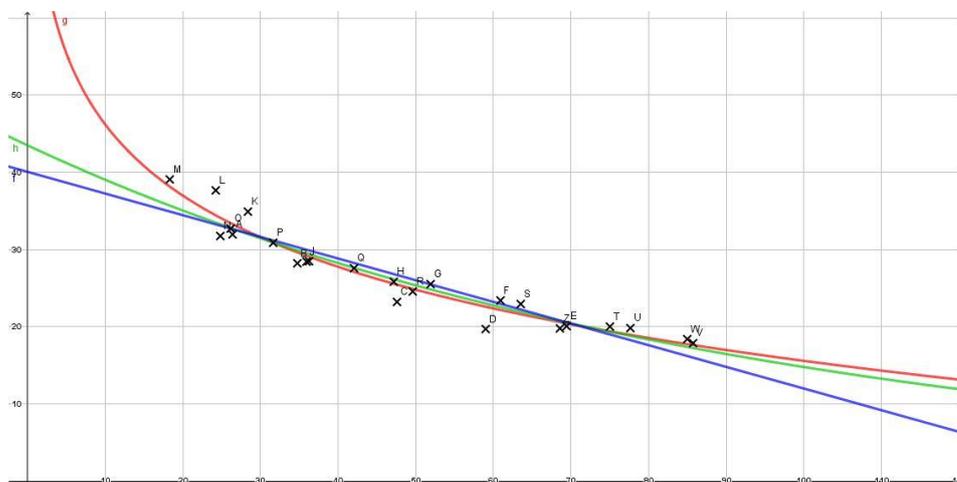
$$V_m = \frac{(92.70356809)(43.49088609)}{e}$$

$$V_m = 1483.201733$$

Volume maksimum menurut model *Underwood* sebesar 1483.202 smp/jam.

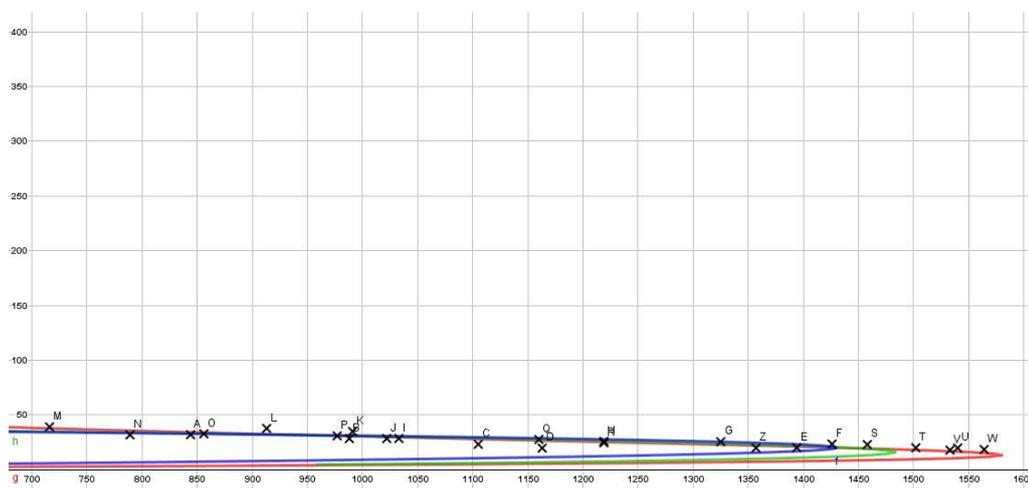
4. Gambaran Ketiga Model Secara Grafis

Hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan dengan menggunakan ketiga model dapat dilihat pada ketiga gambar berikut:



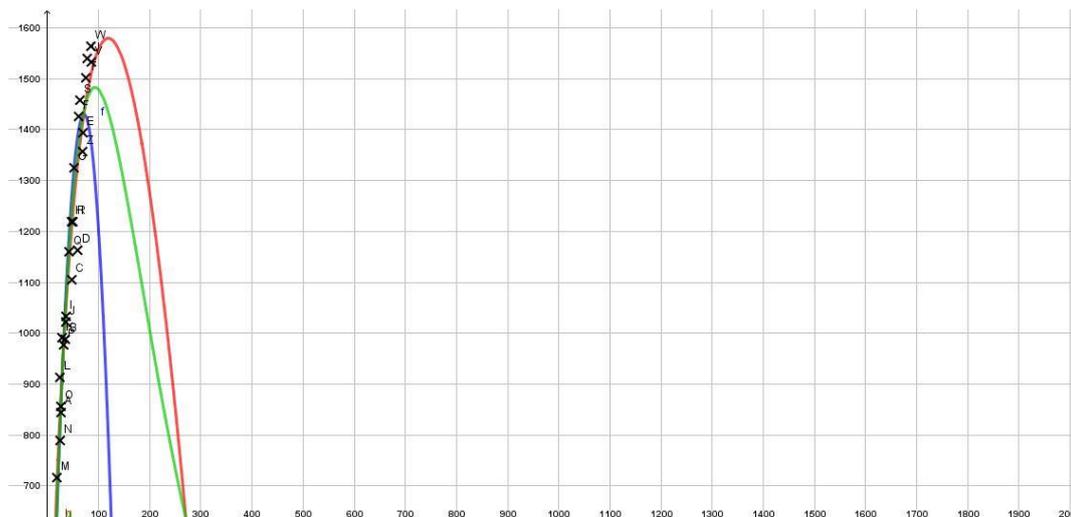
Gambar 5. Kurva Hubungan Kecepatan (U_s) dan Kepadatan (D) Berdasarkan Model *Greenshield*, *Greenberg*, dan *Underwood*

Gambar 5 merupakan kurva hubungan antara kecepatan (U_s) dan kepadatan (D) berdasarkan model *Greenshield* (kurva berwarna biru), *Greenberg* (kurva berwarna merah), dan *Underwood* (kurva berwarna hijau). Sumbu x merepresentasikan kepadatan (D) dan sumbu y merepresentasikan kecepatan (U_s). Kecepatan akan menurun apabila kepadatan bertambah. Kecepatan arus bebas akan terjadi apabila kepadatan sama dengan nol, dan pada saat kecepatan sama dengan nol maka akan terjadi kemacetan (*jam density*).



Gambar 6. Kurva Hubungan Volume (V) dan Kecepatan (U_s) Berdasarkan Model Greenshield, Greenberg, dan Underwood

Gambar 6 merupakan kurva hubungan antara volume (V) dan kecepatan (U_s) berdasarkan model *Greenshield* (kurva berwarna biru), *Greenberg* (kurva berwarna merah), dan *Underwood* (kurva berwarna hijau). Sumbu x merepresentasikan volume (V) dan sumbu y merepresentasikan kecepatan (U_s). Bertambahnya volume lalu lintas menyebabkan kecepatan rata-rata ruangnya akan berkurang sampai kepadatan kritis (volume maksimum) tercapai. Setelah kepadatan kritis tercapai, maka kecepatan rata-rata ruang dan volume akan berkurang.



Gambar 7. Kurva Hubungan Volume (V) dan Kepadatan (D) Berdasarkan Model Greenshield, Greenberg, dan Underwood

Gambar 7 merupakan kurva hubungan antara volume (V) dan kepadatan (D) berdasarkan model *Greenshield* (kurva warna biru), *Greenberg* (kurva warna merah), dan *Underwood*

(kurva warna hijau). Sumbu x merepresentasikan kepadatan (D) dan sumbu y merepresentasikan volume (V). Volume maksimum terjadi pada saat kapasitas jalur jalan sudah terpenuhi. Setelah mencapai titik maksimum volume akan menurun walaupun kepadatan bertambah sampai terjadi kemacetan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal utama, sebagai berikut.

1. Arus lalu lintas Jalan Mastrip berdasarkan ketiga model diperoleh hubungan yang paling erat antara kecepatan dan kepadatan menggunakan model *Greenberg* dengan model
$$U_s = 13.297 \ln \left(\frac{322.9502746}{D} \right).$$
2. Volume tertinggi diperoleh dengan menggunakan model *Greenberg* sebesar 1579.76 smp/jam.
3. Nilai $r^2 = 0.944$ memiliki arti bahwa kesesuaian model sebesar 94.40% dengan tingkat kepercayaan atau meyakinkan dalam menggambarkan hubungan antara kecepatan dan kepadatan.
4. Hubungan antara volume dan kecepatan merupakan fungsi logaritmik.
5. Hubungan antara volume dan kepadatan juga merupakan fungsi logaritmik.

Analisis arus lalu lintas juga dapat didekati dengan berbagai karakteristik, oleh karena itu disarankan beberapa hal sebagai berikut.

1. Mencari faktor lain yang mempengaruhi volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas Jalan Mastrip.
2. Menggunakan metode lain sebagai pengayaan pengetahuan dalam menganalisis hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas

DAFTAR PUSTAKA

- Aly, S.H. (2012). Model Hubungan Karakteristik Makro Lalu Lintas yang Bersifat Heterogen di Kota Makassar. *Prosiding Teknik Sipil*. Universitas Hassanudin.
- Boris, S. Kerner (2009). *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control, The Long Road to Three-Phase Traffic Theory*, Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Denos C. Gazis (2002). *Traffic Theory*. Kluwer Academic Publishers. The United States of America.
- Halim, H., Mustari, I. & Zakariah, A. (2019). “Analisis Kinerja Jalan Satu Arah Dengan Menggunakan Mikrosimulasi Vissim (Studi Kasus: Jalan Masjid Raya di Kota Makassar)”. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, 3(2), September 2019.
- HCM 2000. *Highway Capacity Manual (HCM) 2000*. Transportation Research Board. National Research Council. Washington D.C.
- Indrajaya, Y. (2012). Pengaruh Penyempitan Jalan Terhadap Karakteristik Lalu Lintas. *Tesis Program Pasca Sarjana*. Universitas Diponegoro, Semarang.
- Jianli Zhao and Jianping Wu. (2003). Analysis of Pedestrian Behavior with Mixed Traffic Flow at Intersection. *Intelligent Transportation System*. IEEE, Vol.1.
- Julianto, E.N. (2010). Hubungan Antara Kecepatan, Volume dan Kepadatan lalu Lintas Ruas Jalan Siliwangi Semarang. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 12(2).
- Key, L.Y. & Susilawati (2020). “Development of Cell Transmission Model for Traffic Signal Coordination”. *Journal of Infrastructure & Facility Asset Management*, 2(1), March 2020.
- McShane, W.R., Roess, R.P., and Prassas, E.S. (2004). *Traffic Engineering 3rd ed*. Prentice Hall, Inc. New Jersey.

- MKJI 1997. *Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997*. Bina Karya. Direktorat Jendral Bina Marga. Jakarta.
- Morlok, E.K. (1991). *Pengantar Teknik dan Perencanaan Transportasi*. Erlangga. Jakarta.
- Prabowo, Makruf. (2011). Analisis Kepadatan Arus Lalu Lintas Pada Ruas Jalan Raya Mastrip STA 2+600-3+800 Kota Surabaya Dengan Pendekatan Linier. *Tugas Akhir Program Sarjana*. Universitas Pembangunan Nasional Veteran, Jawa Timur.
- Soemitro, R.A.A. & Suprayitno, H. (2020). “Preliminary Reflection on Basic Principle of Operation Management Public Work Infrastructure Asset Management”. *Journal of Infrastructure & Facility Asset Management*, 2(2), September 2020.
- Suprayitno, H. & Soemitro, R.A.A. (2018). “Preliminary Reflexion on Basic Principle of Infrastructure Asset Management”. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, 2(1), Maret 2018.
- Tamin, O.Z. (2000). *Perencanaan dan Pemodelan Transportasi*. Penerbit ITB. Bandung.
- Timpal, G.S., Sendow, T. K., dan Rumayar, A. L. (2018). Analisa Kapasitas Berdasarkan Pemodelan Greenshield, Greenberg dan Underwood dan Analisa Kinerja Jalan pada Ruas Jalan Sam Ratulangi Manado. *Jurnal Sipil Statik*, 6(8).
- Utama, G. P. (2016). Analisa Perhitungan Hubungan Kecepatan, Volume, dan Kepadatan Arus Kendaraan pada Ruas Jalan Muhamad Yamin Kota Samarinda. *Kurva S Jurnal Mahasiswa*, 2(1), 1567.
- Wibisono, R.E. & Cahyono, M.S.D. (2018). “Kinerja Lalu-Lintas Simpang di Kalen Majenang Akibat Pembangunan Saluran Irigasi Waduk Kalen di Kecamatan Kedungpring Kabupaten Lamongan”. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, 2(2), September 2018.
- Widodo, W., Wicaksono, N., dan Harwin, H. (2012). Analisis Volume, Kecepatan, dan Kepadatan Lalu Lintas dengan Metode Greenshield dan Greenberg. *Semesta Teknika*, 15(2), 178-184.
- Zuhdy, A.Y., Notodiningrat, T.M., Fauzi, A. & Yusuf, L. (2020). “Analisis Kinerja Simpang Monumen Trunojoyo di Kecamatan Sampang, Kabupaten Sampang”. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, 4(4), Oktober 2020.

