

Analisis Pola Arus Lalu Lintas Diperempatan Jalan Menggunakan Konsep Divergensi Medan Vektor

Georgy Stevan Tarigan¹, Mutiara Anatasya², Ranti Turnip³, Yasmin⁴, Zaskia Khanaya⁵, Hamidah Nasution⁶, Alvi Sahrin Nasution⁷

¹Program Studi Matematika, Universitas Negeri Medan, Indonesia; *georgytarigan289@gmail.com

²Program Studi Matematika, Universitas Negeri Medan, Indonesia; anatsyamyutiara7@gmail.com

³Program Studi Matematika, Universitas Negeri Medan, Indonesia; rantiurnip106@gmail.com

⁴Program Studi Matematika, Universitas Negeri Medan, Indonesia; yasminhasibuan277@gmail.com

⁵Program Studi Matematika, Universitas Negeri Medan, Indonesia; zaskiakhanaya10@gmail.com

⁶Program Studi Matematika, Universitas Negeri Medan, Indonesia; hamidah_mat67@yahoo.com

⁷Program Studi Matematika, Universitas Negeri Medan, Indonesia; alvinasution90@gmail.com

Abstrak. Persimpangan jalan merupakan lokasi krusial yang sering menjadi titik kemacetan karena mempertemukan berbagai arus kendaraan. Penelitian ini bertujuan mengkaji pola pergerakan lalu lintas di perempatan dengan pendekatan matematis menggunakan konsep divergensi pada medan vektor, yang memperlakukan arus kendaraan sebagai aliran fluida kontinu. Data berupa simulasi volume kendaraan dikelompokkan ke dalam tiga skenario kepadatan: normal, padat, dan macet. Pergerakan kendaraan direpresentasikan sebagai medan vektor kecepatan dua dimensi, lalu nilai divergensi dihitung dengan metode turunan parsial untuk mendeteksi area potensial akumulasi kendaraan. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan divergensi seiring bertambahnya kepadatan. Pada skenario normal dengan 250 kendaraan, nilai divergensi tercatat 1,872 yang menandakan arus lancar dan menyebar. Pada skenario padat dengan 430 kendaraan, nilai divergensi naik menjadi 3,222, mengindikasikan mulai terjadi konsentrasi kendaraan. Pada skenario macet dengan 710 kendaraan, divergensi mencapai 5,328, mengonfirmasi penumpukan parah. Visualisasi medan vektor juga menunjukkan perubahan pola aliran, dengan distribusi tidak merata dan laju pergerakan menurun saat kepadatan tinggi. Pendekatan divergensi medan vektor terbukti handal dalam mengkuantifikasi tingkat kepadatan lalu lintas secara matematis dan spasial, menyediakan kerangka analitis untuk pemetaan titik rawan kemacetan di persimpangan.

Kata Kunci: Arus lalu lintas, divergensi, medan vektor, diperempatan jalan, kemacetan.

Abstract. Road intersections are crucial locations that often cause traffic jams due to the convergence of various vehicle flows. This study aims to examine traffic

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

movement patterns at intersections using a mathematical approach based on the divergence concept in vector fields, treating vehicle flow as a continuous fluid. Simulation data on vehicle volume were grouped into three density scenarios: normal, dense, and congested. Vehicle movement was represented as a two-dimensional velocity vector field, and divergence values were calculated using partial derivatives to detect potential accumulation areas. The results show increasing divergence with higher density. In the normal scenario with 250 vehicles, the divergence value was 1.872, indicating smooth and spreading flow. In the dense scenario with 430 vehicles, the divergence rose to 3.222, signaling the onset of vehicle concentration. In the congested scenario with 710 vehicles, the divergence reached 5.328, confirming severe accumulation. Vector field visualizations also revealed changes in flow patterns, with uneven distribution and reduced movement speed under high density. The vector field divergence approach proves reliable in quantifying traffic density mathematically and spatially, providing an analytical framework for mapping congestion-prone points at intersections.

Keywords: Traffic flow, divergence, vector field, intersection, congestion

Pendahuluan

Permasalahan transportasi merupakan tantangan yang terus dihadapi oleh negara-negara berkembang, termasuk Indonesia, baik pada transportasi di kawasan perkotaan maupun antarkota. Oleh karena itu, pembangunan sistem transportasi diarahkan untuk mewujudkan pergerakan manusia, kendaraan, dan barang yang berlangsung secara lancar, aman, cepat, efisien, nyaman, serta selaras dengan kondisi lingkungan (Widodo et al., 2016).

Terwujudnya kota yang bebas dari kemacetan menjadi salah satu bentuk dukungan terhadap pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs), khususnya tujuan ke-11 tentang kota dan permukiman yang berkelanjutan (*Sustainable Cities and Communities*) serta tujuan ke-13 mengenai penanganan perubahan iklim (*Climate Action*) (Ginting & Ratnasari, 2022).

Di sisi lain, transportasi juga menjadi tulang punggung perekonomian. Menurut (Permatasari, 2020) Sistem transportasi yang efisien sangat diperlukan untuk mendukung pertumbuhan ekonomi pada era modern karena mampu menghubungkan berbagai wilayah, baik di dalam negeri maupun dengan negara lain.

Karakteristik arus lalu lintas adalah berbagai parameter yang digunakan untuk menggambarkan kondisi dan menganalisis pergerakan kendaraan pada suatu ruas jalan. Arus lalu lintas didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang melintas pada suatu titik pengamatan selama periode waktu tertentu (Endang & Aziz, 2023).

Pemahaman terhadap karakteristik arus lalu lintas menjadi penting karena permasalahan lalu lintas di jalan raya merupakan isu yang kompleks dalam bidang transportasi darat, khususnya pada sistem transportasi di kawasan perkotaan. (Saputra & Savitri, 2021)

Salah satu bentuk kompleksitas tersebut adalah tingginya angka kecelakaan lalu lintas Supriatna et al. (2017) mengatakan Kecelakaan lalu lintas di berbagai kota besar di Indonesia merupakan permasalahan yang sulit untuk dihindari. Kejadian tersebut dapat disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain kelalaian pengemudi, pelanggaran terhadap rambu-rambu lalu lintas, serta faktor-faktor lain yang memengaruhi keselamatan berkendara.

Menurut Wibisana & Utomo (2017) Kecepatan kendaraan merupakan salah satu parameter yang umum digunakan untuk menganalisis karakteristik suatu ruas jalan, terutama pada jalan dengan volume lalu lintas yang tinggi. Tingginya volume lalu lintas tersebut berpotensi meningkatkan risiko terjadinya kemacetan. Menurut Dewi et al. (2023) Pada kondisi arus lalu lintas yang rendah, kendaraan dapat bergerak dengan kecepatan bebas karena tidak mengalami gangguan dari kendaraan lain. Namun, seiring dengan meningkatnya jumlah kendaraan yang melintasi suatu ruas jalan, kecepatan kendaraan akan menurun secara bertahap. Penurunan kecepatan tersebut terus berlangsung hingga tercapai kondisi ketika penambahan volume lalu lintas tidak lagi memungkinkan, yang menandai tercapainya kapasitas maksimum ruas jalan. (Yaqin et al. (2023) Persimpangan jalan merupakan titik pertemuan berbagai arus kendaraan yang menghubungkan kawasan pendidikan, perkantoran, pusat perdagangan, dan permukiman sehingga memiliki intensitas lalu lintas yang tinggi.

Kondisi ini menjadikan persimpangan sering terjadi tundaan dan hambatan samping yang disebabkan oleh berbagai aktivitas di sekitar area simpang. Oleh karena itu, kinerja simpang menjadi faktor utama dalam menentukan upaya penanganan yang paling tepat guna mengoptimalkan fungsi simpang (Mandasari Jurusan et al., 2019).

Untuk menganalisis kinerja simpang dan mengidentifikasi potensi kemacetan secara lebih terukur, diperlukan pendekatan matematis yang mampu menggambarkan dinamika arus lalu lintas

Lighthill & Whitham (1955) mengatakan banyak pendekatan lain yang dapat digunakan adalah pemodelan hubungan antara volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas melalui model makroskopik seperti Greenshields, Greenberg, dan Underwood.

Pendekatan makroskopis ini menggunakan parameter-parameter arus lalu lintas untuk menggambarkan kondisi secara keseluruhan.

Parameter arus lalu lintas secara makroskopis digunakan untuk menggambarkan kondisi lalu lintas secara menyeluruh. Sementara itu, parameter secara mikroskopis berfokus pada analisis perilaku setiap pengguna jalan serta interaksinya dengan pengguna jalan lainnya selama proses pergerakan lalu lintas (Nurmayadi & Sholaudin, 2021).

Menurut Shofiana et al. (2024) Volume (flow) merupakan jumlah kendaraan yang melintasi suatu titik pengamatan pada ruas jalan dalam periode waktu tertentu. Kecepatan (*speed*) adalah jarak yang mampu ditempuh oleh kendaraan dalam satu satuan waktu pada suatu ruas jalan. Sementara itu, kepadatan (*density*) menunjukkan banyaknya kendaraan yang berada pada suatu ruas jalan untuk setiap satuan panjang jalan tertentu.

Pemahaman terhadap ketiga parameter ini menjadi penting karena kemacetan lalu lintas umumnya terjadi pada periode jam sibuk (*peak hour*) maupun pada waktu-waktu tertentu, seperti hari libur, ketika aktivitas perjalanan meningkat. (Abdi Grisela Nurinda et al., 2019)

Menurut Kloeden & Lorenz (2016) Model-model ini pada dasarnya memperlakukan arus kendaraan sebagai aliran kontinu yang dapat dianalisis secara matematis, sejalan dengan prinsip pemodelan fluida yang lazim digunakan dalam berbagai bidang. Prinsip dasar yang sama, yakni memperlakukan suatu aliran sebagai medium kontinu yang dapat dianalisis menggunakan turunan parsial, menjadi dasar bagi pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi matematis untuk menganalisis pola arus lalu lintas pada persimpangan empat

Copyright © 2026

Buana Matematika:

Jurnal Ilmiah Matematika dan Pendidikan Matematika

p-ISSN: 2088-3021

e-ISSN: 2598-8077

arah. Pendekatan ini digunakan untuk memodelkan distribusi arus kendaraan secara matematis menggunakan konsep medan vektor dan divergensi. Metode simulasi dipilih karena penelitian ini tidak menggunakan data lapangan secara langsung, tetapi menggunakan data yang disimulasikan untuk menggambarkan kondisi arus kendaraan pada persimpangan jalan. Pemilihan persimpangan empat arah sebagai objek kajian didasarkan pada pertimbangan bahwa tipe persimpangan ini merupakan konfigurasi yang paling umum dijumpai di kawasan perkotaan dan memiliki kompleksitas arus yang representatif untuk dimodelkan secara matematis. Meskipun kondisi persimpangan nyata melibatkan berbagai faktor tambahan seperti sinyal lalu lintas, jenis kendaraan, dan perilaku pengemudi, penelitian ini membatasi kajian pada model dua dimensi sebagai pendekatan awal yang terstruktur dan dapat dikembangkan lebih lanjut.

Objek penelitian dalam studi ini adalah arus kendaraan yang melewati persimpangan empat arah yang terdiri dari arah utara, selatan, timur, dan barat. Arus kendaraan dari setiap arah direpresentasikan sebagai vektor yang memiliki arah dan besar tertentu. Pergerakan kendaraan dinyatakan dalam sistem koordinat dua dimensi dengan sumbu x dan y . Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data simulasi jumlah kendaraan yang melewati persimpangan dalam interval waktu tertentu.

Data simulasi tersebut dibagi ke dalam tiga kondisi lalu lintas, yaitu kondisi lalu lintas normal, kondisi lalu lintas padat, dan kondisi kemacetan. Data simulasi jumlah kendaraan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Simulasi Volume Kendaraan

Kondisi Lalu Lintas	Arah Utara	Arah Selatan	Arah Timur	Arah Barat
Normal	65 kendaraan	55 kendaraan	70 kendaraan	60 kendaraan
Padat	110 kendaraan	95 kendaraan	120 kendaraan	105 kendaraan
Macet	180 kendaraan	165 kendaraan	190 kendaraan	175 kendaraan

Tabel 1 menyajikan data simulasi volume kendaraan pada setiap lengan persimpangan yang dikelompokkan ke dalam tiga tingkat kepadatan lalu lintas. Pada skenario normal, tercatat sebanyak 250 kendaraan melintasi

persimpangan dengan sebaran yang cukup merata di keempat arah. Skenario padat menunjukkan peningkatan volume lalu lintas menjadi 430 kendaraan, yang berarti terjadi kenaikan sebesar 72% dibandingkan kondisi normal. Adapun pada skenario macet, volume kendaraan mencapai 710 unit, mengalami peningkatan sekitar 65% dari kondisi padat atau setara dengan lonjakan 184% dari kondisi normal. Variasi volume kendaraan ini selanjutnya akan digunakan untuk mengkaji hubungan antara tingkat kepadatan lalu lintas dengan nilai divergensi medan vektor kecepatan kendaraan.

Medan vektor arus kendaraan dinyatakan dalam bentuk fungsi:

$$F(x, y) = (P(x, y), Q(x, y)) \quad (1)$$

di mana $P(x, y)$ merupakan komponen arus kendaraan pada arah sumbu x , sedangkan $Q(x, y)$ merupakan komponen arus kendaraan pada arah sumbu y .

Untuk menganalisis pola distribusi arus kendaraan digunakan konsep divergensi medan vektor yang dirumuskan sebagai:

$$\nabla \cdot F = \partial P / \partial x + \partial Q / \partial y \quad (2)$$

Keterangan:

$\nabla \cdot F$: divergensi dari medan vektor F

$P(x, y)$: komponen arus kendaraan arah sumbu x

$Q(x, y)$: komponen arus kendaraan arah sumbu y

$\partial / \partial x$: turunan parsial terhadap x

$\partial / \partial y$: turunan parsial terhadap y

Misalkan ρ adalah kepadatan kendaraan (kendaraan/m²) dan $v(x, y) = (u(x, y), v(x, y))$ adalah kecepatan kendaraan pada titik (x, y) . Arus kendaraan didefinisikan sebagai:

$$F(x, y) = \rho \cdot v(x, y) \quad (3)$$

Dengan demikian, divergensi arus kendaraan adalah:

$$\nabla \cdot F = \partial(\rho u) / \partial x + \partial(\rho v) / \partial y \quad (4)$$

Nilai divergensi digunakan untuk menentukan apakah suatu titik pada area persimpangan mengalami penyebaran arus kendaraan atau justru mengalami penumpukan kendaraan. Nilai divergensi yang kecil menunjukkan bahwa arus kendaraan relatif stabil, sedangkan nilai divergensi yang besar menunjukkan adanya akumulasi kendaraan yang berpotensi menimbulkan kepadatan lalu lintas.

Tahapan penelitian dalam studi ini dilakukan melalui beberapa langkah, yaitu:

Copyright © 2026

Buana Matematika:

Jurnal Ilmiah Matematika dan Pendidikan Matematika

p-ISSN: 2088-3021

e-ISSN: 2598-8077

1. Menentukan model persimpangan jalan sebagai sistem koordinat dua dimensi.
2. Menyusun data simulasi jumlah kendaraan dari setiap arah pada tiga kondisi lalu lintas.
3. Membentuk model medan vektor arus kendaraan berdasarkan data simulasi.
4. Menghitung nilai divergensi dari medan vektor arus kendaraan.
5. Menganalisis hubungan antara nilai divergensi dan tingkat kepadatan lalu lintas pada area persimpangan.

Hasil perhitungan divergensi kemudian digunakan untuk mengidentifikasi pola distribusi arus kendaraan serta potensi terjadinya kepadatan lalu lintas pada persimpangan jalan.

Hasil dan Pembahasan

Model Matematis Arus Lalu Lintas

Analisis pola arus lalu lintas pada penelitian ini dimodelkan menggunakan konsep divergensi medan vektor. Arus kendaraan pada persimpangan dianggap sebagai suatu aliran kontinu yang dapat dimodelkan menggunakan persamaan kontinuitas, yaitu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (5)$$

Persamaan tersebut menyatakan bahwa perubahan kepadatan kendaraan terhadap waktu dipengaruhi oleh divergensi dari aliran kendaraan. Dalam penelitian ini diasumsikan kondisi lalu lintas stasioner, sehingga:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Dengan demikian persamaan menjadi:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (7)$$

Data Simulasi Arus Kendaraan

Data kendaraan disimulasikan pada sebuah persimpangan empat arah.

Kondisi 1 – Lalu Lintas Normal

Tabel 2. Simulasi Arus Kendaraan Lalu Lintas Normal

Arah	Kendaraan
Utara → Selatan	65
Selatan → Utara	55
Timur → Barat	70
Barat → Timur	60

Total kendaraan:

$$N = 65 + 55 + 70 + 60 = 250$$

Copyright © 2026

Buana Matematika:

Jurnal Ilmiah Matematika dan Pendidikan Matematika

p-ISSN: 2088-3021

e-ISSN: 2598-8077

Misalkan area pengamatan sekitar persimpangan $A = 120 \text{ m}^2$.

Maka kepadatan kendaraan:

$$\rho = \frac{N}{A} = \frac{250}{120} = 2,08 \text{ kendaraan/m}^2$$

Kondisi 2 – Lalu Lintas Padat

Tabel 3. Simulasi Arus Kendaraan Lalu Lintas Padat

Arah	Kendaraan
Utara → Selatan	110
Selatan → Utara	95
Timur → Barat	120
Barat → Timur	105

Total kendaraan:

$$N = 110 + 95 + 120 + 105 = 430$$

Misalkan area pengamatan sekitar persimpangan $A = 120 \text{ m}^2$.

Maka kepadatan kendaraan:

$$\rho = \frac{430}{120} = 3,58 \text{ kendaraan/m}^2$$

Kondisi 3 – Kemacetan

Tabel 4. Simulasi Arus Kendaraan Lalu Lintas Macet

Arah	Kendaraan
Utara → Selatan	180
Selatan → Utara	165
Timur → Barat	190
Barat → Timur	175

Total kendaraan:

$$N = 180 + 165 + 190 + 175 = 710$$

Misalkan area pengamatan sekitar persimpangan $A = 120 \text{ m}^2$.

Maka kepadatan kendaraan:

$$\rho = \frac{710}{120} = 5,92 \text{ kendaraan/m}^2$$

Model Medan Vektor Kecepatan Kendaraan

Kecepatan kendaraan dimodelkan sebagai medan vektor dua dimensi dengan model simulasi:

$$v(x,y) = (u(x,y), v(x,y)) \quad (8)$$

Koefisien pada fungsi kecepatan kendaraan ditentukan berdasarkan asumsi model simulasi yang merepresentasikan karakteristik pergerakan kendaraan

Copyright © 2026

pada persimpangan empat arah. Nilai koefisien dipilih sedemikian rupa sehingga menghasilkan medan vektor yang secara kualitatif konsisten dengan pola distribusi arus kendaraan di persimpangan, di mana komponen kecepatan pada arah sumbu x dan sumbu y dipengaruhi oleh posisi kendaraan dalam area pengamatan.

Kondisi 1 – Lalu Lintas Normal:

$$u(x,y) = 0,4x - 0,2y + 6$$

$$v(x,y) = 0,3x + 0,5y + 4$$

Sehingga:

$$\rho v = \rho \cdot v(x,y)$$

$$\rho v = 2,08(0,4x - 0,2y + 6, 0,3x + 0,5y + 4)$$

Komponen pertama:

$$F_1 = 2,08(0,4x - 0,2y + 6)$$

$$F_1 = 0,832x - 0,416y + 12,48$$

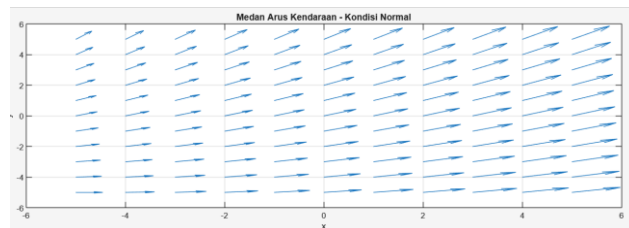
Komponen kedua:

$$F_2 = 2,08(0,3x + 0,5y + 4)$$

$$F_2 = 0,624x + 1,04y + 8,32$$

Maka:

$$F(x,y) = (0,832x - 0,416y + 12,48, 0,624x + 1,04y + 8,32)$$



Gambar 1. Medan vektor arus kendaraan pada kondisi normal dengan kepadatan $\rho = 2,08$ kendaraan/m²

Berdasarkan diagram medan arus kendaraan, sebagian besar vektor menunjukkan arah ke timur laut. Hal ini menandakan bahwa aliran kendaraan pada persimpangan cenderung bergerak menuju arah timur dengan komponen gerak ke arah utara. Perubahan panjang vektor dipengaruhi oleh nilai koordinat x dan y , yang merepresentasikan variasi kecepatan kendaraan pada berbagai titik dalam area pengamatan.

Kondisi 2 – Lalu Lintas Padat

$$u(x,y) = 0,4x - 0,2y + 6$$

$$v(x,y) = 0,3x + 0,5y + 4$$

Sehingga:

$$\rho v = \rho \cdot v(x,y)$$

$$\rho v = 3,58(0,4x - 0,2y + 6, 0,3x + 0,5y + 4)$$

Copyright © 2026

Buana Matematika:

Jurnal Ilmiah Matematika dan Pendidikan Matematika

p-ISSN: 2088-3021

e-ISSN: 2598-8077

Komponen pertama:

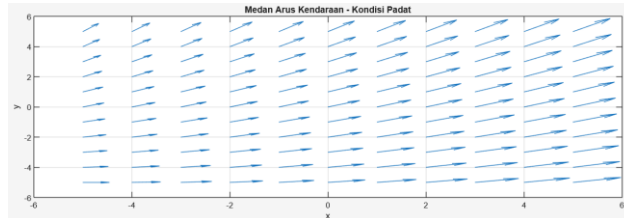
$$F_1 = 1,432x - 0,716y + 21,48$$

Komponen kedua:

$$F_2 = 1,074x + 1,79y + 14,32$$

Maka:

$$F(x,y) = (1,432x - 0,716y + 21,48, 1,074x + 1,79y + 14,32)$$



Gambar 2. Medan vektor arus kendaraan pada kondisi padat dengan kepadatan $\rho = 3,58$ kendaraan/m²

Visualisasi medan arus kendaraan pada kondisi lalu lintas padat memperlihatkan bahwa mayoritas vektor masih memiliki arah dominan menuju timur laut. Hal ini menunjukkan bahwa pergerakan kendaraan di area persimpangan cenderung mengalir ke arah timur dengan tambahan komponen gerak menuju utara. Dibandingkan dengan kondisi lalu lintas normal, panjang vektor pada kondisi padat tampak lebih besar yang menandakan meningkatnya intensitas arus kendaraan seiring bertambahnya kepadatan kendaraan. Selain itu, variasi panjang vektor dipengaruhi oleh perubahan nilai koordinat x dan y , yang menggambarkan perbedaan kecepatan kendaraan pada berbagai titik dalam wilayah pengamatan.

Kondisi 3 – Kemacetan

$$u(x,y) = 0,4x - 0,2y + 6$$

$$v(x,y) = 0,3x + 0,5y + 4$$

Sehingga:

$$\rho v = \rho \cdot v(x,y)$$

$$\rho v = 5,92(0,4x - 0,2y + 6, 0,3x + 0,5y + 4)$$

Komponen pertama:

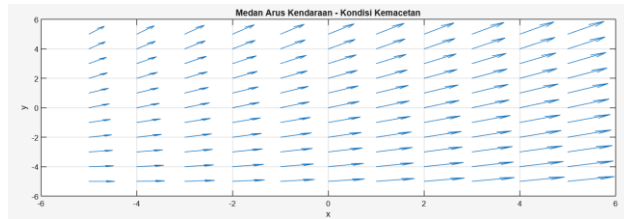
$$F_1 = 2,368x - 1,184y + 35,52$$

Komponen kedua:

$$F_2 = 1,776x + 2,96y + 23,68$$

Maka:

$$F(x,y) = (2,368x - 1,184y + 35,52, 1,776x + 2,96y + 23,68)$$



Gambar 3. Medan vektor arus kendaraan pada kondisi macet dengan kepadatan $\rho = 5,92$ kendaraan/m²

Visualisasi medan arus kendaraan pada kondisi kemacetan memperlihatkan bahwa sebagian besar vektor tetap mengarah ke timur laut, tetapi distribusi arus kendaraan tampak kurang merata. Kondisi ini menunjukkan bahwa kendaraan masih bergerak dominan ke arah timur dengan komponen ke utara, namun laju pergerakannya menurun karena tingginya tingkat kepadatan lalu lintas. Perbedaan panjang vektor pada beberapa titik mencerminkan variasi kecepatan kendaraan di sekitar area persimpangan.

Perhitungan Divergensi

Untuk menentukan nilai divergensi, digunakan formula turunan parsial terhadap masing-masing komponen medan vektor, yaitu:

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial F_2}{\partial y} \quad (9)$$

Proses perhitungan dimulai dengan menurunkan komponen F_1 terhadap x , kemudian komponen F_2 terhadap y , lalu kedua hasil turunan tersebut dijumlahkan. Nilai akhir yang diperoleh mencerminkan tingkat penyebaran atau akumulasi arus kendaraan pada titik pengamatan di persimpangan.

Kondisi 1 – Lalu Lintas Normal

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial F_2}{\partial y}$$

Turunan pertama:

$$f(x,y) = 0,832x - 0,416y + 12,48$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 0,832$$

Turunan kedua:

$$g(x,y) = 0,624x + 1,04y + 8,32$$

$$\frac{\partial g}{\partial y} = 1,04$$

Sehingga:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0,832 + 1,04 = 1,872$$

Nilai divergensi sebesar 1,872 pada kondisi normal mengindikasikan bahwa medan vektor arus kendaraan bersifat ekspansif, artinya kendaraan bergerak

Copyright © 2026

Buana Matematika:

Jurnal Ilmiah Matematika dan Pendidikan Matematika

p-ISSN: 2088-3021

e-ISSN: 2598-8077

menyebar secara merata dari pusat persimpangan ke segala arah. Kondisi ini mencerminkan keseimbangan antara arus masuk dan arus keluar persimpangan, sehingga tidak terjadi akumulasi kendaraan yang berarti. Dari sudut pandang matematis, nilai divergensi positif yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa sistem lalu lintas berada dalam kondisi stabil dan terdistribusi dengan baik.

Kondisi 2 – Lalu Lintas Padat

$$\nabla \cdot F = \frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial F_2}{\partial y}$$

Turunan pertama:

$$\frac{\partial}{\partial x}(1,432x - 0,716y + 21,48) = 1,432$$

Turunan kedua:

$$\frac{\partial}{\partial y}(1,074x + 1,79y + 14,32) = 1,79$$

Sehingga:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 1,432 + 1,79 = 3,222$$

Peningkatan nilai divergensi ini menunjukkan perubahan signifikan dalam pola distribusi arus kendaraan, di mana intensitas akumulasi kendaraan di sekitar persimpangan mulai meningkat dan berpotensi menjadi sumber kemacetan apabila tidak ditangani.

Kondisi 3 – Kemacetan

$$\nabla \cdot F = \frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial F_2}{\partial y}$$

Turunan pertama: $\frac{\partial}{\partial x}(2,368x - 1,184y + 35,52) = 2,368$

Turunan kedua: $\frac{\partial}{\partial y}(1,776x + 2,96y + 23,68) = 2,96$

Sehingga:

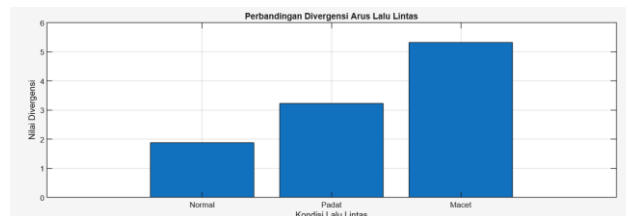
$$\nabla \cdot (\rho v) = 2,368 + 2,96 = 5,328$$

Nilai divergensi yang jauh lebih besar ini mengonfirmasi bahwa kapasitas persimpangan telah terlampaui, ditandai dengan distribusi arus yang tidak merata dan penurunan kecepatan pergerakan kendaraan secara signifikan akibat tingginya tingkat kepadatan.

Secara konseptual, divergensi medan vektor dalam konteks arus lalu lintas menggambarkan kecenderungan pergerakan kendaraan di suatu titik pengamatan. Nilai divergensi positif mengindikasikan bahwa arus kendaraan

cenderung menyebar keluar dari titik tersebut, yang berarti distribusi kendaraan masih berlangsung secara merata. Sebaliknya, peningkatan nilai divergensi yang signifikan menunjukkan terjadinya perubahan intensitas arus yang semakin besar, mencerminkan akumulasi kendaraan yang berpotensi memicu kemacetan. Berdasarkan hasil perhitungan, terdapat kenaikan nilai divergensi yang konsisten seiring bertambahnya volume kendaraan, yakni dari 1,872 pada kondisi normal, meningkat menjadi 3,222 pada kondisi padat, hingga mencapai 5,328 pada kondisi macet. Pola kenaikan ini menunjukkan bahwa konsep divergensi mampu merepresentasikan perubahan dinamika arus kendaraan secara kuantitatif pada setiap tingkat kepadatan lalu lintas.

Pola kenaikan nilai divergensi ini juga dapat diamati secara visual pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik divergensi setiap kondisi

Berdasarkan grafik perbandingan divergensi, terlihat bahwa nilai divergensi arus kendaraan mengalami peningkatan dari kondisi lalu lintas normal hingga kondisi kemacetan. Pada kondisi normal nilai divergensi sebesar 1,872 yang menggambarkan aliran kendaraan masih cukup stabil. Saat lalu lintas menjadi padat, nilai divergensi meningkat menjadi 3,222 yang menunjukkan adanya peningkatan kepadatan arus kendaraan di persimpangan. Pada kondisi macet, nilai divergensi mencapai 5,328 yang mengindikasikan tingginya akumulasi kendaraan sehingga pergerakan lalu lintas menjadi semakin terhambat.

Perbandingan dengan Pendekatan Lain serta Kelebihan dan Keterbatasan Metode

Perbandingan dengan Model Berbasis Regresi (Greenshields, Greenberg, Underwood)

Pendekatan lain yang umum digunakan untuk menganalisis arus lalu lintas adalah model hubungan volume-kecepatan-kepadatan berbasis regresi, seperti model Greenshields, Greenberg, dan Underwood. Model-model tersebut umumnya efektif untuk menggambarkan hubungan antar parameter

pada satu ruas jalan, namun pendekatannya bersifat satu dimensi dan membutuhkan data lapangan dalam jumlah besar melalui survei langsung. Berbeda dengan pendekatan tersebut, divergensi medan vektor dalam penelitian ini memberikan analisis spasial dua dimensi yang dapat mengidentifikasi titik-titik tertentu pada area persimpangan yang berpotensi mengalami akumulasi kendaraan, tanpa memerlukan data survei lapangan yang ekstensif karena bersifat simulatif.

Perbandingan dengan Pendekatan Berbasis Graf

Pendekatan lain yang banyak digunakan khusus untuk permasalahan persimpangan adalah teori graf, baik untuk pewarnaan graf dalam pengaturan lampu lalu lintas maupun pemodelan skema arus menggunakan graf kompatibel. Pendekatan berbasis graf tersebut sangat baik digunakan untuk menentukan urutan dan durasi fase lampu lalu lintas pada suatu persimpangan, tetapi kurang dapat menggambarkan bagaimana arus kendaraan terdistribusi secara spasial di dalam area persimpangan itu sendiri. Pendekatan divergensi medan vektor pada penelitian ini melengkapi kekurangan tersebut dengan memberikan gambaran distribusi arus secara kontinu pada bidang dua dimensi, sehingga dapat menjadi pelengkap analisis sebelum penentuan skema pengaturan lampu lalu lintas dilakukan.

Kelebihan Metode Divergensi

1. Sederhana dan mudah dihitung (hanya memerlukan turunan parsial)
2. Memberikan informasi spasial mengenai titik-titik yang rawan mengalami akumulasi kendaraan
3. Komputasi ringan sehingga berpotensi diterapkan untuk analisis secara cepat
4. Dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mengintegrasikan data dari CCTV atau sensor loop pada persimpangan

Keterbatasan Metode Divergensi

1. Mengasumsikan arus lalu lintas sebagai fluida kontinu, sehingga kurang sesuai untuk kondisi lalu lintas dengan kepadatan sangat rendah
2. Tidak membedakan jenis kendaraan (mobil, motor, truk) dalam perhitungannya
3. Model medan vektor kecepatan yang digunakan dalam penelitian ini masih bersifat linier dan berbasis simulasi, sehingga perlu divalidasi lebih lanjut dengan data lapangan

4. Belum mempertimbangkan faktor-faktor diskrit seperti durasi lampu lalu lintas atau perilaku individual pengemudi

Simpulan

Penelitian ini berhasil menerapkan konsep divergensi medan vektor untuk mengkaji pola arus lalu lintas di persimpangan jalan melalui simulasi matematis. Dengan memperlakukan pergerakan kendaraan sebagai fluida kontinu yang direpresentasikan dalam medan vektor dua dimensi, nilai divergensi ($\nabla \cdot \mathbf{v}$) terbukti mampu mengukur tingkat kepadatan lalu lintas secara kuantitatif dan terstruktur. Hasil analisis memperlihatkan korelasi positif antara peningkatan jumlah kendaraan dengan kenaikan nilai divergensi. Pada kondisi normal dengan 250 kendaraan, nilai divergensi tercatat 1,872 yang mengindikasikan aliran lalu lintas masih lancar dan terdistribusi dengan baik, diperkuat oleh visualisasi medan vektor yang menunjukkan pola pergerakan teratur menuju timur laut. Saat volume meningkat menjadi 430 kendaraan pada kondisi padat, nilai divergensi naik menjadi 3,222 yang menandakan akumulasi kendaraan mulai terjadi di area persimpangan, terlihat dari panjang vektor yang lebih besar mencerminkan intensitas arus yang meningkat. Pada kondisi macet dengan 710 kendaraan, nilai divergensi mencapai 5,328 yang mengonfirmasi penumpukan kendaraan signifikan, dengan distribusi arus yang tidak merata dan penurunan kecepatan pergerakan akibat kepadatan tinggi. Hal ini membuktikan bahwa metode divergensi medan vektor merupakan alat analisis yang efektif untuk mengidentifikasi lokasi rawan kemacetan dengan ketelitian spasial yang lebih unggul dibandingkan metode konvensional. Konsistensi peningkatan nilai divergensi pada setiap tahap kepadatan menunjukkan sensitivitas metode ini dalam menangkap perubahan dinamika arus kendaraan. Untuk pengembangan selanjutnya, model ini dapat diintegrasikan dengan variabel lapangan seperti durasi lampu lalu lintas, jenis kendaraan, dan data aktual guna meningkatkan akurasi serta relevansinya dalam praktik manajemen lalu lintas perkotaan.

Daftar Pustaka

- Abdi Grisela Nurinda, Priyanto Sigit, & Malkamah Siti. (2019). Hubungan Volume Kecepatan dan Kepadatan Lalu Lintas Pada Ruas Jalan Padjajaran (Ring Road Utara), Sleman. *Teknisia*, XXIV, 55–64.
- Dewi, K., Krisdiyanto, A., Yasak, I., & Rafferti, K. A. (2023). Analisis Pengaruh Penyempitan Jalan Dan Parkir Badan Jalan Terhadap Karakteristik Arus Lalu Lintas. *Jurnal Cahaya Mandalika ISSN 2721-4796 (Online)*, 4(1), 71–89.
- Endang, W., & Aziz, M. (2023). ANALISIS KAPASITAS DAN KINERJA JALAN DENGAN MODEL GREENSHIELD DAN MODEL UNDERWOOD (STUDI KASUS : JALAN TOL JAGORAWI KM 19 + 600). XIII(1), 19–32.
- Ginting, N. M., & Ratnasari, N. E. (2022). *Aliansi : Jurnal Politik, Keamanan dan Hubungan Internasional Nomor eISSN 2829-1794* "Analisis Kemacetan Dan Perkiraan Tingkat Pelayanan Jalan Pada Masa Mendatang (Studi Kasus Jalan Raya Sawangan Depok". 2021(December 2021), 175–181.
- Kloeden, P. E., & Lorenz, T. (2016). Nonlocal multi-scale traffic flow models: analysis beyond vector spaces. In *Bulletin of Mathematical Sciences* (Vol. 6, Issue 3). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s13373-016-0090-5>
- Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955). On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178), 317–345. <https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0089>
- Mandasari Jurusan, T., Studi Teknik Sipil, P., Teknik, F., Palangka Raya Jln Hendrik Timang, U., Raya, P., Riani, D., & Raya Jln Hendrik Timang, P. (2019). Analisis Persimpangan Pada Simpang Tiga Tak Bersinyal Studi Kasus (Jalan Tambun Bungai-Jalan R.a Kartini). *Jurnal Teknika*, 2(2), 177–185.
- Nurmayadi, D., & Sholahudin, F. (2021). Analisis Karakteristik Arus Lalu Lintas Dengan Model Greenshield, Greenberg, dan Underwood Di Ruas Jalan KHZ Musthofa Kota Tasikmalaya Farhan Sholahudin. *Jurnal Perencanaan Dan Rekayasa Sipil*, 04(September), 77–83.
- Permatasari, O. (2020). Dampak Kemacetan Lalu Lintas Terhadap Produktivitas Kerja Di Surabaya. *Media Mahardhika*, 18(2), 322–331. <https://doi.org/10.29062/mahardhika.v18i2.208>
- Saputra, B., & Savitri, D. (2021). Analisis Hubungan antara Volume, Kecepatan dan Kepadatan Lalu-Lintas Berdasarkan Model Greenshield, Greenberg dan Underwood. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, 5(1). <https://doi.org/10.12962/j26151847.v5i1.8742>

Copyright © 2026

Buana Matematika:

Jurnal Ilmiah Matematika dan Pendidikan Matematika

p-ISSN: 2088-3021

e-ISSN: 2598-8077

- Shofiana, H., Sumina, S., & Handoyo, S. (2024). Analisis Hubungan Volume, Kecepatan Dan Kepadatan Lalu Lintas Di Ruas Jalan Slamet Riyadi Kartasura. *Sultra Civil Engineering Journal*, 5(2), 308–321. <https://doi.org/10.54297/sciej.v5i2.648>
- Supriatna, N., Basjaruddin, N. C., & Rakhman, E. (2017). Cooperative Driving Pada Perempatan Jalan Berbasis Fuzzy Logic Menggunakan Komunikasi Antar Kendaraan. *Industrial Research Workshop and National Seminar Politeknik Negeri Bandung*, 117–122.
- Wibisana, H., & Utomo, N. (2017). Analisa Perlambatan Kecepatan Kendaraan Di Penghujung Traffic Light Perempatan Jalan Dengan Menggunakan Persamaan Differensial Derajat Satu. (Studi Kasus Ruas Jalan Ir. H. Soekarno–Kertajaya Indah Surabaya). *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 15(2), 61. <https://doi.org/10.12962/j2579-891x.v15i2.3058>
- Widodo, W., Wicaksono, N., & Harwin, H. (2016). Analisis Volume, Kecepatan, dan Kepadatan Lalu Lintas dengan Metode Greenshields dan Greenberg. *Semesta Teknika*, 15(2), 178–184. <https://doi.org/10.18196/st.v15i2.1361>
- Yaqin, A., Setiyowati, D. F., Yuliandari, D., Ningsih, F. S., Fitriyah, L., Putri, M. A. A., & Fathoni, M. I. A. (2023). 4.+125-136. *Buana Matematika: Jurnal Ilmiah Matematika Dan Pendidikan Matematika*, 13(2), 125–136. https://jurnal.unipasby.ac.id/index.php/buana_matematika/article/view/6509

Riwayat Hidup Penulis

Ranti Turnip



Lahir di Kabupaten Samosir, 06 Juni 2004. Saat ini sedang menempuh pendidikan tinggi di Universitas Negeri Medan Program Studi S1 Matematika di Kota Medan. Mulai menempuh pendidikan tinggi pada tahun 2024.

Yasmin



Lahir di Kota Medan, 22 Agustus 2007. Saat ini sedang menempuh pendidikan tinggi di Universitas Negeri Medan Program Studi S1 Matematika di Kota Medan. Mulai menempuh pendidikan tinggi pada tahun 2024.

Copyright © 2026

Buana Matematika:

Jurnal Ilmiah Matematika dan Pendidikan Matematika

p-ISSN: 2088-3021

e-ISSN: 2598-8077

Mutiara Anatasya

Lahir di Kabupaten Langkat, 01 Juli 2006. Saat ini sedang menempuh pendidikan tinggi di Universitas Negeri Medan Program Studi S1 Matematika di Kota Medan. Mulai menempuh pendidikan tinggi pada tahun 2024.

Zaskia Khanaya

Lahir di Kabupaten Simalungun, 22 Oktober 2005. Saat ini sedang menempuh pendidikan tinggi di Universitas Negeri Medan Program Studi S1 Matematika di Kota Medan. Mulai menempuh pendidikan tinggi pada tahun 2024.

Georgy Stevan Tarigan

Lahir di Kabupaten Dairi, 20 September 2006. Saat ini sedang menempuh pendidikan tinggi di Universitas Negeri Medan Program Studi S1 Matematika di Kota Medan. Mulai menempuh pendidikan tinggi pada tahun 2024.