

Penerapan Pewarnaan Graf pada Pengaturan Lampu Lalu Lintas di Persimpangan Jalan Cakalang

Astri Ramadhani^{1*}, St Nurul Mutmainna², Irmayanti³
^{1,2,3} Tadris Matematika, Universitas Islam Ahmad Dahlan, Sinjai, Indonesia
* Corresponding Author: E-mail: astridramadhani011116@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: Januari 18th, 2024
Revised: Februari 28th, 2024
Accepted: Maret 5th, 2024
Available: online October 31st, 2024

Kata Kunci:

Lampu lalu lintas, Pewarnaan graf,
Teori graf

Keywords:

Graph coloring, Graph theory,
Traffic light



ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menerapkan pewarnaan graf untuk pengaturan lampu lalu lintas di persimpangan Jalan Cakalang. Menggunakan pendekatan kualitatif, penelitian dilakukan melalui metode observasi langsung di lokasi penelitian serta kajian dari berbagai sumber, seperti buku, jurnal, artikel, dan laporan yang relevan. Sistem pewarnaan simpul pada graf diterapkan menggunakan algoritma Welch-Powell untuk menganalisis jalur lalu lintas yang berpotensi konflik. Dalam menghadapi tantangan pengelolaan lalu lintas di persimpangan padat, penelitian ini menawarkan pendekatan matematis yang efisien untuk mengurangi kemacetan dan risiko kecelakaan melalui optimasi pola lampu lalu lintas. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan pewarnaan graf, jalur yang saling bertabrakan saat lampu hijau dapat diidentifikasi dan diatur agar tidak menyala bersamaan. Jalur yang diwakili simpul saling terhubung melalui garis tidak dapat memiliki warna yang sama, sehingga konflik antarjalur dapat dicegah. Metode ini memberikan kontribusi dalam menciptakan sistem lalu lintas yang lebih teratur dan aman, terutama di wilayah dengan volume kendaraan tinggi.

ABSTRACT

This study aims to apply graph coloring to the traffic light management system at the Cakalang Street intersection. Using a qualitative approach, the research employed direct observation at the study location and a review of various sources, including books, journals, articles, and relevant reports. The vertex coloring system on graphs was implemented using the Welch-Powell algorithm to analyze traffic routes prone to conflict. In addressing the challenges of managing traffic at busy intersections, this study offers an efficient mathematical approach to reducing congestion and minimizing the risk of accidents through optimized traffic light patterns. The results indicate that graph coloring can identify and regulate conflicting routes that would otherwise overlap when the green light is active. Routes represented by vertices connected through edges cannot share the same color, effectively preventing route conflicts. This method contributes to creating a more organized and safer traffic system, particularly in areas with high vehicle volumes.

PENDAHULUAN

Karena kemajuan teknologi, manufaktur kendaraan meningkat pada periode ini. Kebanyakan orang memiliki kendaraan pribadi mereka sendiri. Isu peningkatan lalu lintas di jalan raya yang dapat menyebabkan kemacetan dan kecelakaan lalu lintas juga disebabkan oleh peningkatan produksi kendaraan (Fitriani & Hendrianto, 2020). Karena banyaknya kendaraan yang lalu lalang di persimpangan tersebut, sering terjadi kecelakaan di sana. Khususnya di perempatan Jalan Cakalang, salah satu persimpangan yang dilalui banyak kendaraan karena menjadi pintu gerbang TPI (Tempat Penjualan Ikan), pelabuhan, kota, kampus, dan lembaga pendidikan. Terdapat lampu lalu lintas di persimpangan Jalan Cakalang ini.

Hampir semua kota yang ada di dunia ini memiliki lampu lalu lintas. Warna pada lampu lalu lintas menggunakan warna yang sudah terkenal secara menyeluruh. Warna merah adalah warna yang menandakan untuk berhenti, warna kuning ditandai untuk berhati-hati, sedangkan warna hijau menandakan untuk berjalan (Annisa, 2019). Karena fungsinya yang sangat penting, lampu lalu lintas digunakan untuk mengatur arus lalu lintas yang efisien di persimpangan jalan. Lampu lalu lintas harus diatur, atau dikendalikan semudah mungkin, guna mempercepat arus lalu lintas di suatu persimpangan. Saat kendaraan harus berjalan dan berhenti secara bergantian dari arah yang berbeda, lampu lalu lintas berfungsi sebagai rambu. Di persimpangan jalan, lampu lalu lintas memberikan sejumlah fungsi, termasuk mencegah kecelakaan dan kemacetan yang disebabkan oleh variasi arus lalu lintas bagi pengemudi dan memungkinkan pejalan kaki menyeberang dengan aman. Ketika lampu merah berubah menjadi lampu hijau di persimpangan lalu lintas namun pengemudi tidak mematuhi peraturan lalu lintas atau terjadi kecelakaan, situasinya dikatakan macet (Mahfuza & Mulyono, 2020). Pengendalian lalu lintas diperlukan karena lampu lalu lintas memiliki peran yang sangat penting, salah satunya di perempatan Cakalang. Teori graf dapat digunakan untuk menyiasati pengaturan lampu lalu lintas.

Teori graf pertama kali digunakan pada tahun 1736 untuk memecahkan masalah jembatan Königsberg. Jembatan Königsberg adalah sebuah jembatan di kota Königsberg di negara bagian timur Prusia, Jerman. Kota Königsberg berganti nama menjadi Kaliningrad, sungai Pregar bercabang dan mengelilingi pulau Kneiphof (Sari, Cipta, & Munthe, 2022). Bidang matematika yang disebut teori graf sangat membantu dalam banyak disiplin ilmu yang berbeda. Penggunaan teori graf memiliki berbagai aplikasi. Pewarnaan graf merupakan salah satu komponen dari teori graf. Contoh unik pelabelan graf adalah pewarnaan graf (*graph coloring*). Di sini, pelabelan berfungsi untuk memberi kode warna pada simpul-simpul hingga titik tertentu. Metode pewarnaan komponen graf, termasuk pewarnaan simpul (*vertex*), sisi (*edge*), dan daerahnya (*region*), disebut "pewarnaan graf". Pewarnaan simpul adalah proses pemberian warna pada simpul-simpul graf sedemikian rupa sehingga setiap pasangan simpul yang bertetangga memiliki warna yang unik. Dalam studi ini, pewarnaan graf bertujuan untuk menunjukkan arus mana yang dapat atau tidak dapat mengalir secara bersamaan. Kita tidak hanya mewarnai simpul graf secara berbeda dari tetangga sekitarnya saat menyelesaikan masalah pewarnaan. Namun, kita juga ingin menggunakan jumlah warna sesedikit mungkin. Bilangan kromatik graf G merupakan himpunan warna terkecil yang dapat digunakan untuk mewarnai simpul (Mahfuza & Mulyono, 2020).

Masalah terkait kemacetan tipikal adalah salah satu masalah dunia nyata yang dapat diselesaikan dan ditampilkan dengan menggunakan ide teori grafik. Rambu dan lampu lalu lintas adalah hasil dari kemacetan. Namun, terkadang dianggap bahwa durasi antara lampu merah dan lampu hijau terlalu lama sehingga menyebabkan kemacetan lalu lintas di persimpangan. Secara matematis, masalah terkait lalu lintas dapat diselesaikan dengan menggunakan gagasan teori graf. Sebuah graf dapat digunakan untuk menggambarkan sebuah persimpangan, dengan setiap titik merupakan arus dan setiap sisi menunjukkan dua arus yang tidak dapat bersinggungan pada waktu yang sama (Abdullah & Rahadjeng, 2021). Penelitian ini akan membahas bagaimana penerapan pewarnaan graf pada peraturan lampu lalu lintas di persimpangan jalan Cakalang.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif yang dilaksanakan di persimpangan simpang empat Jalan Cakalang, yang terletak di Kelurahan Lappa, Sinjai, Sulawesi Selatan, Indonesia. Metode penelitian yang digunakan adalah metode observasi, yaitu dengan melakukan pengamatan dan peninjauan langsung terhadap objek yang diteliti. Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi dan pencatatan langsung di lokasi penelitian, tepatnya di lampu lalu lintas persimpangan simpang empat Jalan Cakalang. Data sekunder merupakan data pendukung yang diambil dari berbagai sumber, seperti buku, jurnal, artikel, laporan penelitian, internet, dan materi lainnya yang relevan dengan penerapan pewarnaan graf pada pengaturan lampu lalu lintas (Diana, Suryaningtyas, & Suprpti, 2016). Data dalam penelitian ini diperoleh melalui pengamatan langsung terhadap jalur akses di persimpangan simpang empat Jalan Cakalang.

Pemilihan lokasi persimpangan ini didasarkan pada posisinya yang strategis sebagai salah satu titik lalu lintas utama dengan volume kendaraan yang tinggi serta potensi kemacetan yang sering terjadi. Hal ini menjadikan lokasi ini ideal untuk menguji solusi pengelolaan lalu lintas yang lebih optimal.

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara deskriptif, di mana data yang terkumpul dikategorikan dan dianalisis menggunakan algoritma Welch-Powell untuk penerapan pewarnaan graf. Algoritma Welch-Powell adalah salah satu metode yang digunakan untuk melakukan pewarnaan graf secara efisien, terutama pada graf yang memiliki banyak simpul dan sisi. Algoritma ini bertujuan untuk memberikan warna pada simpul-simpul dalam sebuah graf sehingga dua simpul yang saling terhubung

tidak memiliki warna yang sama. Dalam konteks pewarnaan graf, setiap warna mewakili suatu kondisi tertentu, seperti lampu lalu lintas yang mengatur jalur kendaraan di persimpangan. Prinsip dasar algoritma ini adalah mengurutkan simpul-simpul berdasarkan derajatnya (jumlah sisi yang terhubung dengan simpul tersebut) secara menurun. Simpul dengan derajat tertinggi diberi warna pertama, kemudian simpul-simpul berikutnya diberi warna secara berurutan dengan memastikan tidak ada dua simpul bertetangga yang memiliki warna yang sama (West, 2001).

Penerapan algoritma Welch-Powell pada pengaturan lampu lalu lintas bertujuan untuk mengidentifikasi jalur-jalur yang dapat menyebabkan konflik jika diizinkan bergerak secara bersamaan. Dengan memanfaatkan graf sebagai model, simpul-simpul mewakili jalur kendaraan, dan sisi-sisi antara simpul menunjukkan konflik potensial. Pewarnaan simpul membantu dalam menentukan pengaturan waktu lampu lalu lintas sehingga jalur-jalur yang saling bertabrakan tidak mendapatkan sinyal hijau secara bersamaan. Metode ini sangat efektif untuk mengoptimalkan pengaturan lalu lintas di persimpangan dengan tingkat kepadatan tinggi (Gross & Yellen, 2004).

Analisis ini bertujuan mengidentifikasi potensi konflik antarjalur dan mengoptimalkan alur lalu lintas dengan memastikan simpul yang berdekatan, yang mewakili jalur yang saling bertabrakan, tidak memiliki warna yang sama. Hasil analisis kemudian diinterpretasikan untuk memberikan rekomendasi praktis dalam perbaikan pengaturan lampu lalu lintas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Persimpangan jalan memiliki peran penting dalam menjaga keselamatan dan kelancaran arus lalu lintas. Pengaturan dan pengendalian lalu lintas di persimpangan sangat krusial, terutama dengan menggunakan lampu lalu lintas, yang diharapkan dapat mengurangi keterlambatan kendaraan dan potensi kecelakaan (Pradita et al., 2020). Lampu lalu lintas sendiri merupakan mekanisme kontrol arus lalu lintas yang menggunakan bola lampu sebagai sinyal yang dipasang di persimpangan jalan (Hadi & Setiawan, 2019). Tujuan utama dari pengendalian arus lalu lintas ini adalah untuk memastikan setiap rangkaian kendaraan bergerak secara terpisah sehingga arus tidak terganggu (Iskandar et al., 2021). Metode pengaturan lalu lintas menggunakan lampu lalu lintas bergantung pada konteks dan kondisi spesifik di setiap persimpangan, sehingga fleksibilitas dalam implementasi sangat diperlukan (Rahmat & Anwar, 2018).

Dalam sistem lampu lalu lintas, terdapat tiga jenis sinyal utama: lampu hijau mengindikasikan bahwa kendaraan dapat bergerak maju; lampu kuning memberikan peringatan kepada pengemudi untuk bersiap berhenti; dan lampu merah memerintahkan kendaraan untuk berhenti sepenuhnya (Saputra & Wibisono, 2020). Dengan pengaturan yang tepat, penggunaan lampu lalu lintas dapat menurunkan hambatan lalu lintas serta meningkatkan keselamatan pengguna jalan (Hadi & Setiawan, 2019).

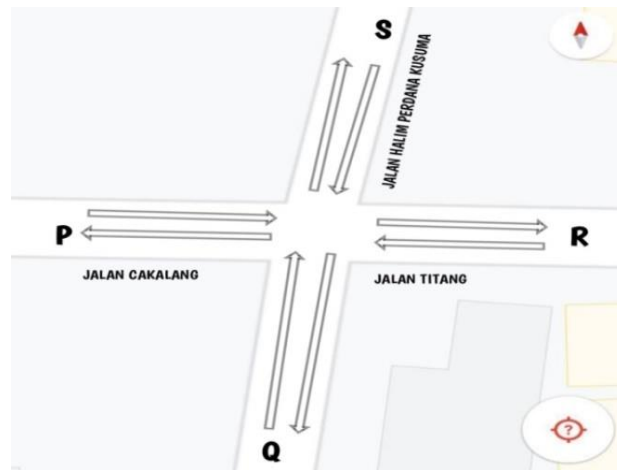
Berikut ini adalah ketentuan lampu lalu lintas yang berlaku di Indonesia.

1. Kendaraan yang mendapat lampu kuning harus berhati-hati, jika memungkinkan, mengantisipasi lampu lalu lintas berikutnya (lampu hijau atau merah) sebelum menerapkannya.
2. Pengendara yang mendapat lampu merah disuruh berhenti sebelum garis berhenti (*stop line*).
Perlu ditekankan bahwa di bawah aturan lampu lalu lintas yang baru untuk belok kiri, kendaraan dapat terus berbelok selama tidak jelas dilarang.

Lampu lalu lintas diterangi dengan menggunakan lampu yang bervariasi sesuai dengan waktunya (Miftahurrahmah, 2016).

Gambaran Persimpangan Simbang Empat Jalan Cakalang.

Persimpangan simbang empat Jalan Cakalang merupakan perpotongan Jalan Cakalang dan Jalan Titang dengan Jalan Halim Perdana Kusuma. Banyaknya kendaraan yang berlalu lalang pada persimpangan jalan ini karena merupakan jalur akses menuju TPI (Tempat Penjualan Ikan), Pelabuhan, Kota, Kampus, Sekolah sehingga tidak sedikit kendaraan yang melalui persimpangan jalan tersebut. Dari banyaknya kendaraan yang melewati persimpangan tersebut yang mengakibatkan kemacetan dan rawan kecelakaan sehingga tidak lama ini dilakukan pemasangan lampu lalu lintas. Selain itu, pada saat lampu hijau menyala secara bersamaan mengakibatkan kondisi terlawan sehingga terjadi masalah pada pergerakan lalu lintas di persimpangan simbang empat ini. Berikut gambaran persimpangan simbang empat jalan cakalang yang diambil dari Google Map



Gambar 1. Perempatan jalan cakalang

Dari gambar diatas dapat dilihat terdapat jalur P, Q, R, dan S. Dari jalur tersebut, masing masing memiliki satu lampu lalu lintas. Jalur PR, SR, dan QR adalah akses menuju kampus dan sekolah, jalur PQ, RQ, dan SQ adalah akses menuju kota, jalur PS, QS, dan RS adalah akses menuju pelabuhan serta cafe, jalur QP, RP, dan SP adalah akses menuju TPI (Tempat Penjualan Ikan) atau biasa disebut dengan pelelangan.

Pembahasan

Pewarnaan Graf

Graf G adalah Dua himpunan (V , E) yang membentuk graf G adalah V , yang merupakan himpunan semua simpul (*vertex*), dan E , yang merupakan himpunan semua sisi, atau sisi yang menghubungkan dua simpul. Salah satu teknik pelabelan graf adalah pewarnaan graf (*graph coloring*). Menambahkan warna pada simpul, sisi, atau daerah (*region*) adalah pelabelan. Angka terendah yang diperlukan untuk pewarnaan sisi graf G dikenal sebagai indeks kromatik, terkadang dikenal sebagai bilangan kromatik samping, dan digunakan dalam pewarnaan (Fakhri, Harahap, & Badruzzaman, 2021). Menurut Utami & Intan (2020), graf dapat diwarnai dengan salah satu dari tiga cara berikut:

1. Pewarnaan Simpul/ titik

Pewarnaan simpul adalah proses pemberian warna yang berbeda pada simpul graf sehingga tidak ada dua simpul yang terhubung langsung memiliki warna yang sama.

2. Pewarnaan Sisi

Kita dapat mewarnai sisi- k dalam graf G dengan sebagian warna dari k atau semua warna untuk mewarnai semua sisi graf G , dengan memastikan bahwa setiap pasang sisi memiliki simpul persekutuan dengan warna yang berbeda.

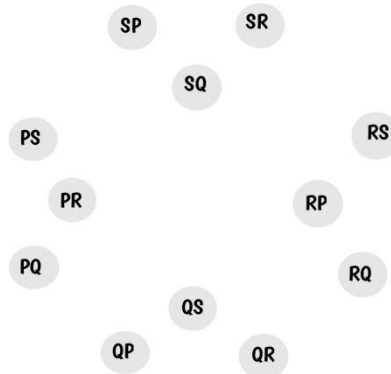
3. Pewarnaan Bidang

Tujuan pewarnaan bidang adalah untuk memastikan bahwa tidak ada dua bidang yang berdekatan yang dicat dengan warna yang sama. Untuk mewarnai suatu bidang, graf terlebih dahulu harus diubah menjadi graf planar, yang dapat didefinisikan sebagai graf dengan sisi-sisi yang tidak bersilangan satu sama lain dan digambar pada permukaan datar.

Penerapan Pewarnaan Graf Pada Lampu Lalu Lintas

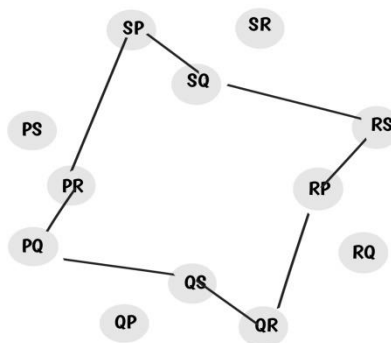
Untuk menerapkan pewarnaan graf pada lampu lalu lintas adalah dengan menggunakan teori Algoritma Welch-Powell. Yang dimaksud dengan algoritma Welch-Powell adalah suatu cara yang digunakan untuk memberi warna pada graf dengan memperhatikan derajat yang paling tinggi dari simpul/ titiknya. Algoritma Welch- Powell merupakan bagian dari Algoritma Greedy. Setiap langkah penyelesaian yang memiliki banyak solusi untuk dieksplorasi disebut dengan Algoritma Greedy (Malta, 2021). Dari gambaran persimpangan simpang empat jalan cakalang, peneliti mendapatkan informasi mengenai jalur akses mana yang digunakan untuk melintas. Setelah mengetahui informasi mengenai setiap jalur aksesnya maka dapat diketahui penerapan pewarnaan graf pada titik/ simpul menggunakan teori Algoritma Welch-Powell dengan cara:

Pertama, terlebih dahulu menentukan jalur yang dibolehkan untuk melintas kemudian membuat simpul dari jalur tersebut. Untuk letak penempatan simpulnya dibebaskan (Faisal, 2014).



Gambar 2. Jalur yang boleh melintas

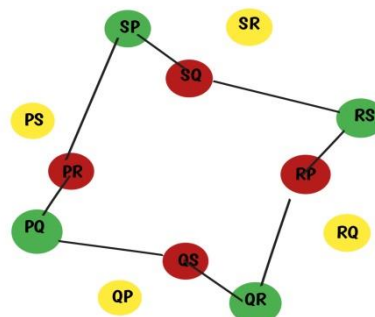
Kedua, membuat sisi pada titik yang telah dibuat dengan menghubungkan titik/ simpul yang saling melintas atau bertabrakan apabila semua lampu hijau menyala bersamaan. Setelah mengetahui jalur yang saling melintas dan bersebrangan maka langkah selanjutnya yaitu menghubungkan jalur tersebut dengan menggunakan sisi/garis.



Gambar 3. Jalur yang terhubung

Ketiga, memberikan warna pada setiap titik/ simpul dengan syarat:

- Seminimal mungkin dalam penggunaan warna
- Tidak boleh menggunakan warna yang sama pada titik/ simpul yang terhubung langsung dengan garis/ sisi.
- Boleh memberikan warna yang sama pada titik/ simpul yang tidak terhubung langsung satu sama lain dengan garis/sisi.
- Bebas memberikan warna apa aja pada titik/simpul yang tidak terhubung dengan garis karena lintasan tersebut tidak saling melintas walaupun lampu hijau akan menyala secara bersamaan.
- Pada awal pewarnaan bebas memberikan warna.



Gambar 4. Pewarnaan jalur

Dari gambar 4 di atas terlihat bahwa semua simpul/ titik sudah diberi warna. Untuk setiap simpul yang terhubung langsung dengan garis satu sama lain maka simpul diberi warna yang berbeda. Contohnya dapat dilihat pada gambar 7 bahwa PR terhubung langsung dengan SP dan PQ sehingga

warna PR berbeda dengan SP dan PQ yaitu simpul PR berwarna merah sedangkan simpul SP dan PQ berwarna hijau. Apabila simpul tidak terhubung langsung satu sama lain dengan garis maka dapat diberi warna yang sama. Seperti pada simpul SP dan PQ memiliki warna simpul yang sama yaitu berwarna hijau karena kedua simpul tersebut tidak terhubung langsung begitupun dengan simpul PR dan RP memiliki warna simpul yang sama yaitu berwarna merah. Untuk warna kuning diberikan kepada simpul/ titik yang tidak terhubung sama sekali dengan garis/ sisi atau biasa disebut dengan simpul bebas.

Keempat, langkah selanjutnya adalah mengelompokkan tiap simpul/ titik berdasarkan dengan warna simpulnya

Merah : PR, QS, RP, SQ

Hijau : PQ, QR, RS, SP

Kuning : PS, QP, RQ, SR

Dari pengelompokkan tersebut maka mendapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 1. Keadaan lampu lalu lintas Fase 1

Warna Lampu Lalu Lintas	Jalur
Hijau	PQ, QR, RS, SP, PS, QP, RQ, SR
Merah	PR, QS, RP, SQ

Tabel 2. Keadaan lampu lalu lintas Fase 2

Warna Lampu Lalu Lintas	Jalur
Hijau	PR, QS, RP, SQ, PS, QP, RQ, SR
Merah	PQ, QR, RS, SP

Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2 di atas, dapat kita lihat bahwa untuk setiap simpul yang terhubung dengan garis/sisi dan mempunyai warna yang berbeda maka tidak dibolehkan berada dalam keadaan lampu hijau menyala bersamaan. Apabila salah satu warna sudah menyala lampu hijau maka warna yang lain haruslah berwarna merah agar tidak mengalami tabrakan antar jalur. Hal tersebut juga berlaku jika simpul yang terhubung dengan garis dan memiliki lebih dari dua warna, maka yang boleh menyala lampu hijau hanya satu warna sedangkan warna sisanya haruslah berlampu merah. Untuk simpul yang tidak terhubung dengan garis atau biasa disebut simpul bebas boleh langsung melintas (Fakhri Malta, 2021). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh faisal menyatakan bahwa garis yang berada diantara dua buah simpul tidak dapat berjalan bersamaan serta setiap simpul yang berdampingan dan saling terhubung dengan garis maka tidak dapat mempunyai warna simpul yang sama (Faisal, 2013). Penelitian yang juga dilakukan oleh muhammad farhan yang menyatakan bahwa pengaturan lampu lalu lintas dapat dimodel menjadi bentuk graf dan permasalahan pengaturan lampu lalu lintas dapat diatasi dengan mencari solusi menggunakan teknik pewarnaan simpul/ titik pada graf melalui algoritma Welch-Powell (Farhan, 2018). Teori graf sangat berguna dalam kehidupan sehari-hari. Pewarnaan graf adalah salah satu bagian dari teori graf. Di dalam pewarnaan pada graf, ada tiga jenis yaitu pewarnaan simpul, pewarnaan sisi, dan pewarnaan bidang. Salah satu upaya optimalisasi pengaturan lampu lalu lintas di simpang Cakalang adalah dengan mewarnai simpul menggunakan algoritma Welch-Powell. Penyelesaian masalah *traffic light* dapat dilihat dari perspektif graf, yaitu mendeklarasikannya sebagai graf. Simpul pada grafik mewakili arah di mana jalur X ke Y diizinkan untuk bergerak, dan tepi pada grafik mewakili arah di mana jalur tidak dapat bergerak pada waktu yang sama. Kemudian menggunakan algoritma Welch-Powell untuk menyelesaikannya dengan metode pewarnaan simpul. Solusi ini akan menghasilkan arus yang dapat bekerja pada saat yang sama dan mendapatkan siklus penggantian baru (Suriyah dkk, 2021). Algoritma Welch-Powell digunakan untuk mewarnai simpul-simpul suatu graf menurut derajat tertingginya. Algoritma Welch-Powell merupakan algoritma yang termasuk ke dalam algoritma Greedy. Algoritma yang memiliki banyak opsi solusi untuk dijelajahi pada setiap langkah yang diselesaikannya disebut Algoritma Greedy (Wulandari & Sholihin, 2013).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian di persimpangan Jalan Cakalang, penerapan algoritma Welch-Powell dalam pewarnaan graf terbukti efektif untuk mengatur jalur lalu lintas dan menghindari konflik antar jalur kendaraan. Jalur-jalur di persimpangan direpresentasikan sebagai simpul pada graf, meliputi jalur Jalan Cakalang ke Jalan Titang (PQ), Jalan Cakalang ke Jalan Halim Perdana Kusuma (PS), Jalan Cakalang ke Jalan Cakalang arah sebaliknya (PR), Jalan Titang ke Jalan Halim Perdana Kusuma (QR), Jalan Titang ke Jalan Cakalang (QS), dan Jalan Halim Perdana Kusuma ke Jalan Cakalang (RS).

Hubungan antarjalur yang berpotensi bertabrakan diidentifikasi menggunakan garis pada graf, sehingga jalur-jalur yang saling bersinggungan dapat dikelompokkan dan diberi warna berbeda. Pewarnaan simpul dilakukan dengan algoritma Welch-Powell, yang mengatur bahwa dua simpul yang terhubung tidak boleh memiliki warna yang sama. Hasil pewarnaan graf menunjukkan bahwa jalur Jalan Cakalang ke Jalan Titang (PQ), Jalan Titang ke Jalan Halim Perdana Kusuma (QR), Jalan Halim Perdana Kusuma ke Jalan Cakalang (RS), dan Jalan Cakalang ke Jalan Halim Perdana Kusuma (PS) dapat bergerak bersamaan karena tidak saling bertabrakan. Sementara itu, jalur Jalan Cakalang ke Jalan Cakalang arah sebaliknya (PR) dan Jalan Titang ke Jalan Cakalang (QS) diatur pada fase lampu hijau yang berbeda untuk menghindari konflik. Kesimpulannya, penerapan pewarnaan graf pada persimpangan Jalan Cakalang memungkinkan pengaturan lampu lalu lintas yang lebih efisien dan terstruktur. Jalur Jalan Cakalang ke Jalan Titang (PQ), Jalan Titang ke Jalan Halim Perdana Kusuma (QR), Jalan Halim Perdana Kusuma ke Jalan Cakalang (RS), dan Jalan Cakalang ke Jalan Halim Perdana Kusuma (PS) berjalan bersamaan dalam satu fase lampu hijau. Sementara itu, jalur Jalan Cakalang ke Jalan Cakalang arah sebaliknya (PR) dan Jalan Titang ke Jalan Cakalang (QS) diatur pada fase yang berbeda. Dengan metode ini, risiko kecelakaan dapat diminimalkan, dan kelancaran arus kendaraan di persimpangan dengan tingkat kepadatan tinggi dapat terjaga. Pendekatan ini memberikan solusi praktis dalam optimasi pengaturan lalu lintas berbasis matematis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. D., & Rahadjeng, B. (2021). Aplikasi Pewarnaan Titik Pada Graf Untuk Optimalisasi Durasi Lampu Lalu Lintas Di Simpang Jalan Jemursari Kota Surabaya. *Jurnal Ilmiah Matematika*, 9(2), 437–446. Retrieved from <https://media.neliti.com/media/publications/249234-model-infeksi-hiv-dengan-pengaruh-percob-b7e3cd43.pdf>
- Annisa, R. A. (2019). Pemanfaatan Graf Dalam Pengaturan Warna Lampu Lalu Lintas Menggunakan Algoritma Welch Powell. *TEKNIKA*, 13, 18–23.
- Diana, E. L., Suryaningtyas, W., & Suprpti, E. (2016). Pengaturan Lampu Lalu Lintas di Persimpangan Jalan Ahmad Yani Giant dengan Aplikasi Pewarnaan Teori Graf. *MUST: Journal of Mathematics Education, Science and Technology*, 1(1), 69. <https://doi.org/10.30651/must.v1i1.99>
- Malta, F. M. (2021). Penerapan Teori Pewarnaan Graf Pada Pengaturan Lampu Lalu Lintas, (22), 1–6. Retrieved from <http://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2020-2021/matdis20-21>.
- Faisal. (2013). Teknik Menentukan Perjalanan pada Masalah Persimpangan dengan Menggunakan Metode Greedy Coloring. *Jurnal Penelitian Ilmu Komputer*, 1(1), 43–46.
- Faisal. (2014). Penerapan Metode *Greedy Coloring* dalam Menyelesaikan Masalah Persimpangan Jalan, 10, 22–27. Retrieved from <http://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2020-2021/matdis20-21>.
- Fakhri, M. Y., Harahap, E., & Badruzzaman, F. H. (2021). Implementasi Algoritma Welch-Powell pada Pengaturan Lampu Lalu Lintas Pasteur Bandung. *Jurnal Riset Matematika*, 1(2), 91–98. <https://doi.org/10.29313/jrm.v1i2.365>
- Farhan, M. (2017). *Aplikasi Pewarnaan Graf pada Pengaturan Lampu Lalu Lintas*. Makalah IF2120 Matematika Diskrit, Program Studi Teknik Informatika, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung.
- Fitriani, S. A., & Hendrianto, W. (2020). Penerapan Teori Graf Pengaturan Lampu Lalu Lintas Di Persimpangan Ring Road Utara. *Academia*, 1–8. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.31227/osf.io/k59zu>
- Gross, J. L., & Yellen, J. (2004). *Graph Theory and Its Applications*. CRC Press.
- Hadi, M., & Setiawan, A. (2019). Sistem Pengaturan Lalu Lintas Berbasis Sensor. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 12(2), 45-53.
- Iskandar, T., Rahmat, F., & Anwar, L. (2021). Efisiensi Lampu Lalu Lintas pada Simpang Empat. *Jurnal Transportasi Indonesia*, 18(3), 23-29.
- Mahfuza, D. U., & Mulyono. (2020). Penerapan Pewarnaan Graf Menggunakan Algoritma Welch- Powell Untuk Keefektifan Pada Pengaturan Lampu Lalu Lintas. *Karismatika*, 6(2), 52–65.

- Miftahurrahmah. (2016). *Aplikasi Teori Graf Dalam Pengaturan Lampu Lalu Lintas*. Undergraduate (S1) thesis, Universitas Islam Negeri Makassar.
- Pradita, R., Suryaningtyas, D., & Suprpti, I. (2020). Pengaruh Sistem Lampu Lalu Lintas terhadap Kemacetan. *Jurnal Rekayasa Transportasi*, 5(4), 12-19.
- Puput Suriyah, Jety Oktavia, Afrita Agil Syahdela, Dina Anggreini Yulia Putri, Dewi Nur Mashita5, F. K. (2021). Aplikasi Pewarnaan Graf untuk Menumbuhkan Kreativitas Matematika pada Indikator Fluency. *Nasional Pendidikan LPPM IKIP PGRI Bojonegoro*, 2(1), 10–27. Retrieved from <https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>
- Rahmat, M. R., & Anwar, L. (2018). Analisis Pengaturan Lalu Lintas pada Persimpangan. *Jurnal Teknik Jalan*, 7(1), 33-40.
- Saputra, E., & Wibisono, D. (2020). Penggunaan Lampu Lalu Lintas untuk Meningkatkan Keselamatan Jalan. *Jurnal Inovasi Transportasi*, 10(1), 56-64.
- Sari, R. F., Cipta, H., & Munthe, E. F. (2022). Implementasi Algoritma Welch-Powell Terhadap Pengaturan Lalu Lintas Persimpangan Jalan Dalam Mengatasi Kemacetan. *Jurnal Lebesgue : Jurnal Ilmiah Pendidikan Matematika, Matematika Dan Statistika*, 3(3), 576–583. <https://doi.org/10.46306/lb.v3i3.173>
- Utami, W. D., DS, A. N., & Intan, P. K. (2020). Optimasi Waktu Tunggu Lampu Lalu Lintas Pada Simpang Lima Krian-Sidoarjo Menggunakan Algoritma Welch-Powell. *MathVisioN*, 2(1), 1–6.
- West, D. B. (2001). *Introduction to Graph Theory*. Prentice Hall.
- Wulandari, N., & Sholihin, H. (2013). Pewarnaan Simpul Dengan Algoritma Welch-Powell Pada Traffic Light Di Yogyakarta. *Fourier*, 2(2), 87–96.