

Penerapan Pewarnaan Graf dan Metode Webster dalam Pengaturan Lampu Lalu Lintas pada Persimpangan Metro Jalan MT. Haryono Kota Semarang

Fristy Aulia Safitri¹, Isnaini Rosyida²

^{1,2}Universitas Negeri Semarang

¹Email: fristyaulia5@gmail.com

²Email: isnaini@mail.unnes.ac.id (corresponding author)

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode Welch-Powell pada pewarnaan graf dalam pengaturan fase lalu lintas di persimpangan Metro Kota Semarang, menentukan durasi lampu lalu lintas di persimpangan Metro dengan metode Webster, dan menganalisis galat dari perhitungan durasi lampu merah dan hijau tersebut. Metode yang digunakan adalah pewarnaan graf menggunakan algoritma Welch-Powell dan metode Webster. Hasil penelitian diperoleh pengaturan lampu lalu lintas pagi dan sore hari sebanyak 4 fase dengan fase 1 meliputi arus dari Jalan MT. Haryono (selatan) dan Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan dengan durasi lampu hijau 57 detik dan merah 83 detik pada pagi hari serta durasi lampu hijau 72 detik dan merah 103 detik pada sore hari. Fase 2 meliputi arus dari Jalan Lamper sari dengan durasi lampu hijau 26 detik dan merah 114 detik pada pagi hari serta durasi lampu hijau 26 detik dan merah 149 detik pada sore hari. Fase 3 meliputi arus dari Jalan MT. Haryono (utara) ke barat dengan durasi lampu hijau 20 detik dan merah 120 detik pada pagi hari serta durasi lampu hijau 21 detik dan merah 154 detik pada sore hari. Fase 4 meliputi arus dari Jalan Sriwijaya dengan durasi lampu hijau 29 detik dan merah 111 detik pada pagi hari serta durasi lampu hijau 48 detik dan merah 127 detik pada sore hari. Hasil perhitungan galat durasi lampu lalu lintas, diperoleh perhitungan galat durasi lampu merah dan hijau cukup kecil baik pada pagi maupun sore hari.

Kata Kunci: Pengaturan Lampu Lalu Lintas; Pewarnaan Graf; Welch-Powell; Metode Webster

ABSTRACT

This study aims to implement the Welch-Powell algorithm for graph coloring in determining traffic phases at the Semarang Metro intersection, utilize the Webster method to calculate optimal traffic light durations, and analyze the margin of error in red and green light timing. The research combines two methods: graph coloring using the Welch-Powell algorithm to identify non-conflicting traffic flows, and the Webster method to compute signal durations based on traffic volume and saturation flow. The results indicate four optimal traffic light phases for both morning and afternoon conditions. Phase 1 involves traffic from Jalan MT. Haryono (north and south), with green light durations of 57 seconds (morning) and 72 seconds (afternoon). Phase 2, covering Lamper Sari Road, shows consistent green durations of 26 seconds, with increased red durations in the afternoon. Phase 3 manages westward traffic from Jalan MT. Haryono (north) with green durations of 20 seconds (morning) and 21 seconds (afternoon). Phase 4, from Sriwijaya Street, shows green durations of 29 seconds (morning) and 48 seconds (afternoon). Across all phases, red light durations adjust accordingly. The analysis reveals only minor errors in the calculated durations of red and green lights, indicating that the combination of the Welch-Powell and Webster methods provides reliable and efficient traffic signal timing suitable for real-world implementation.

Keywords: Traffic Light Arrangement; Graph Coloring; Welch-Powell; Webster Method

PENDAHULUAN

Kemacetan lalu lintas merupakan salah satu permasalahan yang sering terjadi pada bebagai kota di Indonesia, khususnya Kota Semarang. Kondisi tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya adalah rendahnya tingkat kedisiplinan para pengguna jalan dalam mematuhi peraturan lalu lintas, seperti melanggar tanda-tanda yang terdapat pada

permukaan jalan dan menerobos lampu lalu lintas, serta semakin banyaknya kendaraan yang melintas tanpa diimbangi dengan penambahan kapasitas jalan yang memadai.

Lampu lalu lintas menurut Undang-Undang No. 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan disebut sebagai alat pemberi isyarat lalu lintas (APILL) merupakan lampu yang berfungsi untuk mengatur arus lalu lintas yang terdapat di persimpangan jalan, tempat penyeberangan pejalan kaki (*zebra cross*), dan tempat arus lalu lintas lainnya (Sendow et al., 2023). Dalam pengaturan lampu lalu lintas, terdapat tiga warna yang berperan yaitu warna merah, kuning, dan hijau yang menyala secara bergantian sesuai dengan durasi yang telah ditentukan. Lampu merah menandakan bahwa kendaraan harus berhenti karena ada persilangan jalan, lampu kuning menandakan bahwa kendaraan akan mengalami peralihan dari berhenti ke bergerak atau sebaliknya, dan lampu hijau menandakan bahwa kendaraan diperbolehkan untuk melanjutkan perjalanan karena lintasan sudah aman. Menurut Putra et al dalam penelitian (Sendow et al., 2023) pengaturan durasi pada lampu merah, kuning, dan hijau harus disesuaikan dengan memperhatikan beberapa faktor, seperti bentuk persimpangan jalan, jenis kendaraan yang melintas dan volume lalu lintas.

Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Semarang, jumlah kendaraan bermotor pada tahun 2021 tercatat sebanyak 1.467.049 unit, meningkat menjadi 1.823.982 unit pada tahun 2022, dan kembali naik menjadi 1.917.278 unit pada tahun 2023 (Badan Pusat Statistik Kota Semarang, 2023). Kenaikan jumlah kendaraan ini memungkinkan potensi terjadinya kemacetan lalu lintas. Mengutip dari laman berita yang diakses pada 10 Juni 2025 salah satu persimpangan yang cukup padat dan ramai di Kota Semarang adalah persimpangan Metro Jalan MT. Haryono, terutama pada jam sibuk di pagi dan sore hari karena merupakan jadwal berangkat dan pulang para pekerja sehingga membuat jalanan penuh dengan kendaraan (Riyanto, 2023). Persimpangan Metro Jalan MT. Haryono memiliki 4 simpang dengan durasi lampu lalu lintas dan kepadatan kendaraan yang berbeda-beda pada setiap jalur persimpangannya.



Gambar 1. Lalu Lintas Persimpangan Metro Kota Semarang

Sebagian besar pengaturan lampu lalu lintas saat ini dianggap belum berjalan dengan baik karena masih banyak persimpangan dengan durasi lampu merah dan hijau yang tidak disesuaikan berdasarkan keadaan kepadatan kendaraan salah satunya yaitu Persimpangan Metro Jalan MT. Haryono, Kota Semarang. Situasi tersebut menyebabkan peningkatan panjang antrian kendaraan di persimpangan. Disamping itu, antrian kendaraan yang lama dan ketidakseimbangan antara durasi lampu merah dan hijau mendorong pengendara untuk melanggar aturan lalu lintas dengan menerobos lampu merah sehingga dapat membahayakan pengendara lain. Untuk mengatasi hal tersebut, perlu dilakukan penyesuaian terhadap durasi lampu lalu lintas berdasarkan kepadatan arus kendaraan.

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk permasalahan dalam pengaturan lampu lalu lintas adalah dengan penerapan teori graf dan metode Webster. Teori graf adalah cabang

matematika yang banyak diterapkan dalam berbagai bidang, salah satunya dalam pengaturan lalu lintas dengan merepresentasikan arus kendaraan sebagai titik dalam sebuah graf. Dua titik akan terhubung jika kedua arus kendaraan tersebut tidak dapat berjalan bersamaan atau bertetangga. Salah satu aspek dalam teori graf adalah pewarnaan graf, yaitu metode pewarnaan elemen sebuah graf yang terdiri dari pewarnaan simpul (*vertex*), sisi (*edge*), dan wilayah (*region*) (Mahfuza & Mulyono, 2020). Dalam pengaturan lalu lintas, Algoritma yang biasanya digunakan dalam pewarnaan graf biasanya adalah algoritma Welch-Powell. Algoritma ini digunakan untuk menentukan banyaknya fase lampu lalu lintas minimum sedemikian sehingga arus kendaraan yang bersilangan tidak mendapatkan lampu hijau pada waktu yang sama. Sementara itu, Metode Webster digunakan untuk menghitung durasi nyala lampu berdasarkan dengan jumlah kendaraan dan geometri jalan sehingga dapat menjadi solusi untuk mengurangi kemacetan (Chairani et al., 2021).

Penelitian tentang penerapan teori graf dan metode Webster dalam pengaturan durasi lampu lalu lintas telah dilakukan sebelumnya dan diterapkan pada berbagai persimpangan, seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Poernamasari et al. (2019) tentang optimasi pengaturan lampu lalu lintas menggunakan graf kompatibel dan metode Webster di persimpangan Jalan Babe Palar, Kota Manado. Penelitian yang dilakukan oleh Sulistiani & Ais (2022) tentang penerapan teori graf dan metode Welch-Powell pada pengaturan lampu lalu lintas di persimpangan Jalan Demak-Dupak Surabaya. Penelitian yang dilakukan oleh Yaqin et al. (2023) tentang penerapan pewarnaan graf menggunakan algoritma Welch-Powell pada pengaturan lampu lalu lintas di perempatan alun-alun Kota Bojonegoro. Penelitian yang dilakukan oleh Sendow et al. (2023) tentang optimasi waktu tunggu lampu lalu lintas dengan mengaplikasikan graf kompatibel dan metode Webster di persimpangan Toar-Lumimuut, Kota Manado. Penelitian yang dilakukan Sikas et al. (2023) tentang penerapan graf kompatibel dan metode Webster dalam pengaturan lampu lalu lintas di persimpangan Tulip, Kota Kefamenanu. Penelitian yang dilakukan oleh Kinanti et al. (2024) tentang penerapan pewarnaan graf menggunakan algoritma Welch-Powell dalam optimasi sistem lampu lalu lintas untuk mengurangi kemacetan di simpang empat Mangli, Jember.

Sebagian besar penelitian yang telah dilakukan dalam pengaturan lampu lalu lintas pada umumnya menggunakan penerapan pewarnaan graf saja serta penerapan graf kompatibel dan Metode Webster. Hingga saat ini belum ada penelitian yang menggabungkan pewarnaan graf dan metode Webster. Oleh sebab itu dalam penelitian ini, penulis memiliki ketertarikan untuk melakukan penelitian mengenai penerapan pewarnaan graf dan metode Webster dalam pengaturan lampu lalu lintas di persimpangan Metro Jalan MT. Haryono, Kota Semarang.

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat memperoleh pengetahuan yang lebih luas dan mendalam mengenai penerapan pewarnaan graf dan metode Webster dalam pengaturan lampu lalu lintas di persimpangan jalan. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode Welch-Powell pada pewarnaan graf dalam pengaturan fase lalu lintas di persimpangan Metro Kota Semarang, menentukan durasi lampu lalu lintas di persimpangan metro dengan metode Webster disesuaikan dengan kepadatan kendaraan dan geometri jalan, dan menganalisis galat dari perhitungan durasi lampu merah dan hijau tersebut.

METODE PENELITIAN

Jenis penelitian ini adalah penelitian terapan atau disebut *applied research* dengan pendekatan kuantitatif. Menurut Punch, penelitian kuantitatif adalah penelitian dimana data-datanya tersebut dalam bentuk sesuatu yang dapat dihitung yang berfokus pada pengumpulan dan analisis data dalam bentuk numerik (Abdullah et al., 2023). Penelitian terapan memiliki tujuan untuk mengatasi permasalahan yang ada dalam kehidupan sehari-hari melalui

penggunaan metode-metode yang berbasis ilmiah dan praktis (Sugiyono, 2013). Penelitian ini dilakukan di persimpangan Metro Jalan MT. Haryono, Kota Semarang yang berlokasi di dekat Java Supermall Jalan MT. Haryono, Kota Semarang, Jawa Tengah. Persimpangan ini dipilih sebagai lokasi penelitian karena merupakan salah satu persimpangan yang memiliki kepadatan kendaraan cukup tinggi, terutama pada jam sibuk pagi dan sore hari. Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan April-Mei 2025.

Data yang dibutuhkan pada penelitian ini meliputi data geometri, kondisi sinyal, dan volume lalu lintas. Data geometri mencakup informasi mengenai nama jalan, bentuk persimpangan, jumlah jalur pada setiap persimpangan, dan lebar jalan pada setiap jalur simpang. Kondisi sinyal mencakup data durasi nyala lampu lalu lintas, sedangkan volume lalu lintas berupa jumlah kendaraan yang melintas selama satu jam, kemudian dikonversi ke dalam satuan mobil penumpang (smp/jam) dengan menggunakan ekivalen kendaraan penumpang (emp). Pada masing-masing pendekat telindung dan terlawan, dilakukan dengan mengalikan total jumlah setiap jenis kendaraan menggunakan faktor konversi yang terdapat pada MKJI (1997). Jenis kendaraan yang melintas dikategorikan sebagai kendaraan ringan atau *light vehicle* (LV), kendaraan berat atau *heavy vehicle* (HV), dan sepeda motor atau *motorcycle* (MC). Data tersebut diperoleh secara langsung di lapangan dan dari Dinas Perhubungan (DISHUB) Kota Semarang.

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan dengan studi literatur, observasi langsung, dan dokumentasi. Studi literatur diperoleh dari berbagai referensi seperti buku dan artikel yang relevan dengan penerapan teori graf dan metode Webster dalam pengaturan lalu lintas. Selain itu, peneliti juga melakukan observasi langsung ke lokasi penelitian untuk memperoleh data berupa bentuk persimpangan, banyaknya arus di setiap jalur simpang serta pola pergerakan arus yang mencakup pergerakan belok kiri, lurus, dan belok kanan. Dokumentasi dilakukan dengan mengumpulkan data dari Dinas Perhubungan (DISHUB) Kota Semarang mencakup data durasi lampu lalu lintas dan rekaman video CCTV yang digunakan untuk menghitung jumlah kendaraan.

Teknik analisis data pada penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, dimulai dari pengumpulan data yang dibutuhkan dalam penelitian. Data tersebut kemudian digunakan untuk memodelkan arus lalu lintas pada persimpangan ke dalam bentuk suatu graf, di mana setiap titik menyatakan arus lalu lintas pada tiap jalur dan sisi menyatakan pasangan arus yang tidak dapat berjalan bersamaan. Setelah itu, dilakukan pewarnaan graf menggunakan algoritma Welch-Powell dengan bantuan perangkat lunak berupa *python* untuk menentukan pengaturan fase lalu lintas di persimpangan. Adapun definisi k -pewarnaan titik, yaitu pemetaan $c: V \rightarrow \{1, 2, \dots, k\}$. Bilangan k ini adalah bilangan kromatik titik dari graf G tersebut dan dinotasikan dengan $X(G)$ (Diestel, 2005, p. 111). Dengan kata lain, bilangan kromatik graf G adalah minimum banyaknya warna yang diperlukan untuk mewarnai semua titik pada graf G sedemikian sehingga setiap dua titik yang berhubungan langsung atau bertetangga mendapatkan warna yang berbeda (Budayasa, 2007). Pada penerapan ini bilangan kromatik k menyatakan banyaknya fase minimum k untuk pengaturan lampu lalu lintas di persimpangan.

Tahapan berikutnya adalah menghitung durasi lampu lalu lintas menggunakan metode Webster. Perhitungan durasi lampu lalu lintas menggunakan metode Webster adalah sebagai berikut.

1. Menghitung arus jenuh pada setiap persimpangan

Nilai untuk arus jenuh berdasarkan lebar jalur menurut Webster dalam penelitian Asih et al. (2023) dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Arus Jenuh untuk Lebar Jalan kurang dari 5,5 m

Lebar jalan (m)	3	3,5	4	4,5	5	5,5
Arus jenuh (s) (smp/jam)	1.850	1.875	1.975	2.175	2.550	2.900

Jika lebar jalan lebih dari 5,5 m, maka arus jenuh dihitung menggunakan rumus ini.

$$s = w \times 525 \text{ (smp/jam)}$$

2. Menghitung rasio arus lalu lintas (y) menggunakan rumus

$$y = \frac{Q}{s}$$

3. Menghitung waktu hilang total (L) menggunakan rumus

$$L = 2n + R$$

4. Menghitung waktu siklus optimum (C_0) menggunakan rumus

$$C_0 = \frac{1,5 \times L + 5}{1 - Y}$$

5. Menghitung waktu hijau pada setiap fase (g) menggunakan rumus

$$g = \frac{y(C_0 - L)}{Y}$$

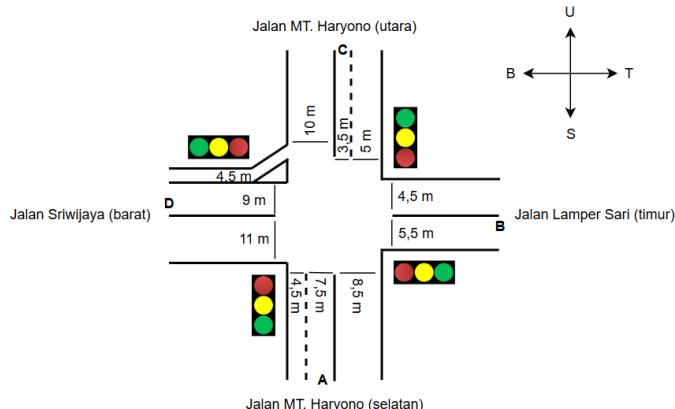
6. Menghitung waktu lampu merah pada setiap fase menggunakan rumus

$$\text{waktu merah} = C_0 - \text{waktu hijau} - \text{waktu kuning}$$

Setelah diperoleh hasil perhitungan durasi lampu lalu lintas yang baru menggunakan metode Webster, dilakukan perhitungan tingkat efektivitas melalui perbandingan total durasi lampu hijau dan merah yang baru dengan total durasi lampu hijau dan merah pada kondisi di lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap awal pada penelitian ini dimulai dengan penyajian data geometri, kondisi sinyal, dan volume lalu lintas. Data geometri dapat dilihat pada Gambar 2. berikut.



Gambar 2. Persimpangan Metro Jalan MT. Haryono, Kota Semarang

Lebar jalan pada setiap simpang di persimpangan Metro Jalan MT. Haryono, Kota Semarang adalah sebagai berikut.

1. Bagian (A) merupakan Jalan MT. Haryono (selatan) yang memiliki 3 lajur jalan, dengan lebar jalan masuk 7,5 m dan w_{LTO} 4,5 m serta lebar jalan keluar 10 m.
2. Bagian (B) merupakan Jalan Lamper Sari (timur) yang memiliki 2 lajur jalan, dengan lebar jalan masuk 5,5 m dan lebar jalan keluar 4,5 m.

3. Bagian (C) merupakan Jalan MT. Haryono (utara) yang memiliki 3 lajur jalan, dengan lebar jalan masuk Jalan MT. Haryono (utara) ke barat 3,5 m dan lebar jalan masuk Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan 5 m serta lebar jalan keluar 8,5 m.
4. Bagian (D) merupakan Jalan Sriwijaya (barat) yang memiliki 3 lajur jalan, dengan lebar jalan masuk 9 m dan w_{LTOB} 4,5 m serta lebar jalan keluar 11 m.

Data durasi lampu lalu lintas dapat dilihat pada Tabel 2. dan Tabel 3. berikut.

Tabel 2. Data Durasi Lampu Lalu Lintas pada Pagi Hari di Persimpangan Metro Jalan MT. Haryono, Kota Semarang

Ruas Jalan	Merah (detik)	Kuning (detik)	Hijau (detik)	Total Waktu
Jalan MT. Haryono (selatan)	93	2	50	145
Jalan Lamper Sari (timur)	118	2	25	145
Jalan Sriwijaya (barat)	113	2	30	145
Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan	73	2	70	145
Jalan MT. Haryono (utara) ke barat	123	2	20	145

(Sumber: DISHUB Kota Semarang)

Tabel 3. Data Durasi Lampu Lalu Lintas pada Sore Hari di Persimpangan Metro Jalan MT. Haryono, Kota Semarang

Ruas Jalan	Merah (detik)	Kuning (detik)	Hijau (detik)	Total Waktu
Jalan MT. Haryono (selatan)	108	2	40	150
Jalan Lamper Sari (timur)	123	2	25	150
Jalan Sriwijaya (barat)	103	2	45	150
Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan	88	2	60	150
Jalan MT. Haryono (utara) ke barat	128	2	20	150

(Sumber: DISHUB Kota Semarang)

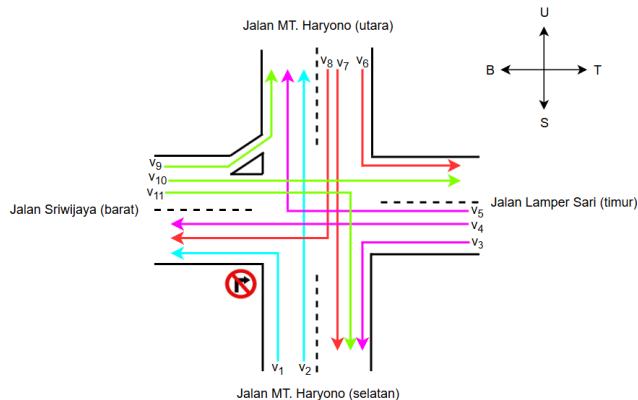
Pengumpulan data jumlah kendaraan yang melintas di persimpangan Metro Jalan MT. Haryono dilakukan dalam 5 hari kerja, yaitu pada Rabu, 23 April 2025 sampai Selasa, 29 April 2025. Pengumpulan data dilakukan per-jam dalam dua periode waktu, yaitu pagi hari pada pukul 06.30 - 07.30 WIB dengan asumsi banyaknya pekerja yang mulai melakukan aktivitas pada pukul tersebut dan sore hari pada pukul 16.00 - 17.00 WIB dengan asumsi banyaknya pekerja yang selesai melakukan aktivitas dan pulang pada pukul tersebut. Dari hasil pengumpulan data, diperoleh rata-rata volume kendaraan dalam lima hari kerja yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Volume Kendaraan di Persimpangan Metro Jalan MT. Haryono, Kota Semarang

Ruas Jalan	Kendaraan	Waktu	
		06.30-07.30	16.00-17.00
Jalan MT. Haryono (selatan)	smp/jam	1195,4	1001,84
Jalan Lamper Sari (timur)	smp/jam	468,24	389,44
Jalan Sriwijaya (barat)	smp/jam	867,28	1166,2
Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan	smp/jam	910,88	952,2
Jalan MT. Haryono (utara) ke barat	smp/jam	241,32	205,14

Pemodelan Graf pada Arus Lalu Lintas di Persimpangan

Sistem arus lalu lintas di persimpangan Metro Jalan MT. Haryono Kota Semarang dapat dilihat pada Gambar 3.



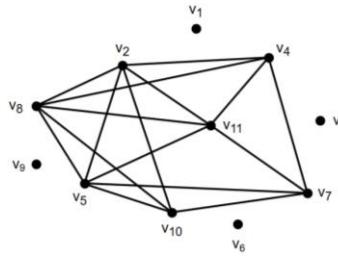
Gambar 3. Ilustrasi Arus Lalu Lintas pada Persimpangan Metro

Keterangan:

- v_1 = arus dari Jalan MT. Haryono (selatan) menuju Jalan Sriwijaya
- v_2 = arus dari MT. Haryono (selatan) menuju Jalan MT. Haryono (utara)
- v_3 = arus dari Jalan Lamper Sari menuju Jalan MT. Haryono (selatan)
- v_4 = arus dari Jalan Lamper Sari menuju Jalan Sriwijaya
- v_5 = arus dari Jalan Lamper Sari menuju Jalan MT. Haryono (utara)
- v_6 = arus dari Jalan MT. Haryono (utara) menuju Jalan Lamper Sari
- v_7 = arus dari Jalan MT. Haryono (utara) menuju Jalan MT. Haryono (selatan)
- v_8 = arus dari Jalan MT. Haryono (utara) menuju Jalan Sriwijaya
- v_9 = arus dari Jalan Sriwijaya Sari menuju Jalan MT. Haryono (utara)
- v_{10} = arus dari Jalan Sriwijaya menuju Jalan Lamper Sari
- v_{11} = arus dari Jalan Sriwijaya menuju Jalan MT. Haryono (selatan)

Berdasarkan Gambar 3. arus-arus yang tidak dapat berjalan bersamaan adalah sebagai berikut.

- Arus v_2 tidak dapat berjalan bersamaan dengan v_4 , v_5 , v_8 , v_{10} , dan v_{11} .
- Arus v_4 tidak dapat berjalan bersamaan dengan v_2 , v_7 , v_8 , dan v_{11} .
- Arus v_5 tidak dapat berjalan bersamaan dengan v_2 , v_7 , v_8 , v_{10} , dan v_{11} .
- Arus v_7 tidak dapat berjalan bersamaan dengan v_4 , v_5 , v_{10} , dan v_{11} .
- Arus v_8 tidak dapat berjalan bersamaan dengan v_2 , v_4 , v_5 , v_{10} , dan v_{11} .
- Arus v_{10} tidak dapat berjalan bersamaan dengan v_2 , v_5 , v_7 , dan v_8 .
- Arus v_{11} tidak dapat berjalan bersamaan dengan v_2 , v_4 , v_5 , v_7 , dan v_8 .



Gambar 4. Graf Arus Lalu Lintas pada Persimpangan Metro

Melalui representasi graf pada Gambar 4. diketahui bahwa titik v_1 , v_3 , v_6 , dan v_9 merupakan titik-titik yang saling asing. Hal ini berarti arus yang dinyatakan oleh v_1 , v_3 , v_6 , dan v_9 dapat langsung beriringan dengan arus lain. Selanjutnya untuk titik yang tersisa akan diberikan warna dengan algoritma Welch-Powell.

Pewarnaan Graf menggunakan Algoritma Welch- Powell

Pada bagian ini disajikan pewarnaan graf menggunakan algoritma Welch-Powell dengan bantuan perangkat lunak berupa *python* untuk mendapatkan pengaturan fase lalu lintas pada persimpangan.

```
!pip install networkx matplotlib

import networkx as nx
import matplotlib.pyplot as plt
import time

def gambar_graf_berwarna(G, warna, langkah):
    # Palet warna
    palet_warna = ['red', 'yellow', 'green', 'purple', 'blue', 'gray']
    warna_simpul = []
    for simpul in G.nodes():
        if simpul in warna:
            warna_simpul.append(palet_warna[warna[simpul] - 1])
        else:
            warna_simpul.append("lightgray") # Belum diwarnai

    pos = nx.spring_layout(G, seed=42)
    plt.figure(figsize=(9, 5))
    nx.draw(G, pos, with_labels=True, node_color=warna_simpul, node_size=1000, font_color='white', font_weight='bold')
    plt.title("Pewarnaan Graf - Langkah " + str(langkah))
    plt.axis('off')
    plt.show()
    time.sleep(1) # Delay 1 detik untuk animasi bertahap

def langkah_welch_powell_visual(graph):
    G = nx.Graph()
    for simpul, tetangga in graph.items():
        for tetangga in tetangga:
            G.add_edge(simpul, tetangga)
    urutan_simpul = sorted(G.nodes, key=lambda simpul: len(G[simpul]), reverse=True)
    warna = {} # Simpul -> warna
    warna_sekarang = 1
    langkah = 1
    for simpul in urutan_simpul:
        if simpul not in warna:
            warna[simpul] = warna_sekarang
            print(f"Langkah {langkah}: Titik {simpul} diberi warna {warna_sekarang}")
            gambar_graf_berwarna(G, warna, langkah)
            langkah += 1
            for simpul_lain in urutan_simpul:
                if simpul_lain not in warna:
                    # Cek konflik dengan tetangga
                    if all(warna.get(tetangga) != warna_sekarang for tetangga in G[simpul_lain]):
                        warna[simpul_lain] = warna_sekarang
                        print(f"Langkah {langkah}: Karena titik {simpul_lain} tidak bertetangga dengan titik {simpul}, sehingga titik {simpul_lain} diberi warna yang sama")
                        gambar_graf_berwarna(G, warna, langkah)
                        langkah += 1
            warna_sekarang += 1
    return warna

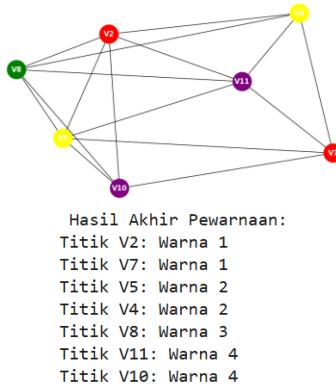
# Contoh graf persimpangan
graf_persimpangan = {
    'V2': ['V4', 'V5', 'V8', 'V10', 'V11'],
    'V4': ['V2', 'V7', 'V8', 'V11'],
    'V5': ['V2', 'V7', 'V8', 'V10', 'V11'],
    'V7': ['V4', 'V5', 'V10', 'V11'],
    'V8': ['V2', 'V4', 'V5', 'V10', 'V11'],
    'V10': ['V2', 'V5', 'V7', 'V8'],
    'V11': ['V2', 'V4', 'V5', 'V7', 'V8'],
}

hasil_pewarnaan = langkah_welch_powell_visual(graf_persimpangan)

print("\nHasil Akhir Pewarnaan:")
for Titik, warna in hasil_pewarnaan.items():
    print(f"Titik {Titik}: Warna {warna}")
```

Gambar 5. Source Code Python Pewarnaan Graf

Hasil output yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 6. Hasil Pewarnaan Graf pada Persimpangan Metro

Berdasarkan Gambar 6. dapat dibentuk fase pengaturan lampu lalu lintas sebagai berikut.

1. Fase pertama adalah arus v_2 dapat berjalan bersamaan dengan arus v_7 , yaitu arus dari Jalan MT. Haryono (selatan) ke utara dan arus dari Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan.
2. Fase kedua adalah arus v_5 dapat berjalan bersamaan dengan arus v_4 , yaitu arus dari Jalan Lamper sari.
3. Fase ketiga adalah arus v_8 akan berjalan sendiri, yaitu arus dari Jalan MT. Haryono (utara) ke barat atau Jalan Sriwijaya.
4. Fase keempat adalah arus v_{11} dapat berjalan bersamaan dengan arus v_{10} , yaitu arus dari Jalan Sriwijaya.

Pemodelan arus lalu lintas di persimpangan Metro Jalan MT Haryono Kota Semarang melalui graf yang dapat dilihat pada Gambar 4. untuk merepresentasikan hubungan antara titik dan sisi. Setiap titik pada graf merepresentasikan arus lalu lintas, sementara sisi menunjukkan pasangan arus yang tidak dapat bergerak atau berjalan bersamaan. Selain itu, dalam pemodelan graf ini, arus kendaraan yang melakukan belok kiri dapat berjalan terus tanpa mengikuti nyala lampu selama tidak ada konflik. Hal ini karena arah belok kiri biasanya tidak berpotongan dengan arus dari arah berlawanan.

Dalam pemodelan ini, digunakan algoritma Welch-Powell sebagai metode pewarnaan graf untuk menentukan pengaturan fase lalu lintas. Algoritma ini bekerja dengan cara mengurutkan titik berdasarkan derajat tertinggi, kemudian memberikan warna yang berbeda pada titik-titik yang saling bertetangga atau dapat dilihat pada Gambar 6. Warna dalam konteks ini merepresentasikan pengaturan fase lalu lintas, yaitu arus lalu lintas yang dapat berjalan secara bersamaan tanpa menyebabkan terjadinya suatu konflik. Dari pewarnaan graf dengan menggunakan algoritma Welch-Powell diperoleh bahwa jumlah fase untuk mengatur arus lalu lintas di Persimpangan Metro Jalan MT. Haryono, Kota Semarang adalah sebanyak 4 fase, yang kemudian akan digunakan untuk menghitung menghitung durasi lampu lalu lintas menggunakan metode Webster pada persimpangan tersebut.

Durasi Lampu Lalu Lintas menggunakan Metode Webster

Setelah didapatkan jumlah fase pada persimpangan Metro Jalan MT. Haryono Kota Semarang dengan pewarnaan graf menggunakan algoritma Welch-Powell, selanjutnya akan dicari durasi lampu lalu lintas pada persimpangan tersebut dalam dua periode waktu yaitu pagi dan sore hari yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Durasi Lampu Lalu Lintas menggunakan Metode Webster

Perhitungan Metode Webster Pagi Hari	Perhitungan Metode Webster Sore Hari
Waktu hilang (R) = 5 detik	Waktu hilang (R) = 5 detik
Arus jenuh pada setiap jalan persimpangan	Arus jenuh pada setiap jalan persimpangan
1. Jalan MT. Haryono (selatan) $s_A = 7,5 \times 525 = 3.937,5$ smp/jam	1. Jalan MT. Haryono (selatan) $s_A = 7,5 \times 525 = 3.937,5$ smp/jam
2. Jalan Lamper Sari $s_B = 2.900$ smp/jam	2. Jalan Lamper Sari $s_B = 2.900$ smp/jam
3. Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan $s_C = 2.550$ smp/jam	3. Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan $s_C = 2.550$ smp/jam
4. Jalan MT. Haryono (utara) ke barat $s_C = 1.875$ smp/jam	4. Jalan MT. Haryono (utara) ke barat $s_C = 1.875$ smp/jam
5. Jalan Sriwijaya $s_D = 9 \times 525 = 4.725$ smp/jam	5. Jalan Sriwijaya $s_D = 9 \times 525 = 4.725$ smp/jam
Rasio arus lalu lintas pada setiap fase	Rasio arus lalu lintas pada setiap fase
$y = \frac{Q}{s}$	$y = \frac{Q}{s}$
1. Rasio arus lalu lintas pada Jalan MT. Haryono (selatan) $y_1 = \frac{Q_A}{s_A} = \frac{1195,6}{3.937,5} = 0,3036$	1. Rasio arus lalu lintas pada Jalan MT. Haryono (selatan) $y_1 = \frac{Q_A}{s_A} = \frac{1001,84}{3.937,5} = 0,2544$
2. Rasio arus lalu lintas pada Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan $y_1 = \frac{Q_C}{s_C} = \frac{910,88}{2.550} = 0,3572$	2. Rasio arus lalu lintas pada Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan $y_1 = \frac{Q_C}{s_C} = \frac{952,2}{2.550} = 0,3734$
3. Rasio arus lalu lintas pada Jalan Lamper Sari $y_2 = \frac{Q_B}{s_B} = \frac{468,24}{2.900} = 0,1615$	3. Rasio arus lalu lintas pada Jalan Lamper Sari $y_2 = \frac{Q_B}{s_B} = \frac{389,44}{2.900} = 0,1343$
4. Rasio arus lalu lintas pada Jalan MT. Haryono (utara) ke barat $y_3 = \frac{Q_C}{s_C} = \frac{241,32}{1.875} = 0,1287$	4. Rasio arus lalu lintas pada Jalan MT. Haryono (utara) ke barat $y_3 = \frac{Q_C}{s_C} = \frac{205,14}{1.875} = 0,1094$
5. Rasio arus lalu lintas pada Jalan Sriwijaya $y_4 = \frac{Q_D}{s_D} = \frac{867,28}{4.725} = 0,1836$	5. Rasio arus lalu lintas pada Jalan Sriwijaya $y_4 = \frac{Q_D}{s_D} = \frac{1.166,2}{4.725} = 0,2468$
Jumlah y untuk semua fase (Y) $Y = 0,3572 + 0,1615 + 0,1287 + 0,1836 = 0,8309$	Jumlah y untuk semua fase (Y) $Y = 0,3734 + 0,1343 + 0,1094 + 0,2468 = 0,8639$
Waktu hilang total (L) $L = 2n + R = 2(4) + 5 = 13$	Waktu hilang total (L) $L = 2n + R = 2(4) + 5 = 13$
Waktu siklus optimum $C_0 = \frac{1,5 \times L + R}{1 - Y} = \frac{1,5 \times 13 + 5}{1 - 0,8309} = 144,91 \approx 145$ detik	Waktu siklus optimum $C_0 = \frac{1,5 \times L + R}{1 - Y} = \frac{1,5 \times 13 + 5}{1 - 0,8639} = 180,05 \approx 180$ detik

<p>Waktu hijau pada setiap fase</p> $g = \frac{y(C_0 - L)}{Y}$ <ol style="list-style-type: none"> Waktu hijau fase 1 (Jalan MT. Haryono (selatan) dan Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan) $g_1 = \frac{0,3572(145 - 13)}{0,8309}$ $= 56,7 \approx 57 \text{ detik}$ Waktu hijau fase 2 (Jalan Lamper Sari) $g_2 = \frac{0,1615(145 - 13)}{0,8309}$ $= 25,63 \approx 26 \text{ detik}$ Waktu hijau fase 3 (Jalan MT. Haryono (utara) ke barat) $g_3 = \frac{0,1287(145 - 13)}{0,8309}$ $= 20,41 \approx 20 \text{ detik}$ Waktu hijau fase 4 (Jalan Sriwijaya) $g_4 = \frac{0,1836(145 - 13)}{0,8309}$ $= 29,13 \approx 29 \text{ detik}$ 	<p>Waktu hijau pada setiap fase</p> $g = \frac{y(C_0 - L)}{Y}$ <ol style="list-style-type: none"> Waktu hijau fase 1 (Jalan MT. Haryono (selatan) dan Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan) $g_1 = \frac{0,3734(180 - 13)}{0,8639}$ $= 72,2 \approx 72 \text{ detik}$ Waktu hijau fase 2 (Jalan Lamper Sari) $g_2 = \frac{0,1343(180 - 13)}{0,8639}$ $= 25,96 \approx 26 \text{ detik}$ Waktu hijau fase 3 (Jalan MT. Haryono (utara) ke barat) $g_3 = \frac{0,1094(180 - 13)}{0,8639}$ $= 21,15 \approx 21 \text{ detik}$ Waktu hijau fase 4 (Jalan Sriwijaya) $g_4 = \frac{0,2468(180 - 13)}{0,8639}$ $= 47,72 \approx 48 \text{ detik}$
<p>Waktu merah pada setiap fase</p> <p>waktu merah = C_0 – waktu hijau – waktu kuning</p> <ol style="list-style-type: none"> Waktu merah fase 1 (Jalan MT. Haryono (selatan) dan Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan) $\text{waktu merah}_{fase\ 1} = 145 - 57 - 5$ $= 83 \text{ detik}$ Waktu merah fase 2 (Jalan Lamper Sari) $\text{waktu merah}_{fase\ 2} = 145 - 26 - 5$ $= 114 \text{ detik}$ Waktu merah fase 3 (Jalan MT. Haryono (utara) ke barat) $\text{waktu merah}_{fase\ 3} = 145 - 20 - 5$ $= 120 \text{ detik}$ Waktu merah fase 4 (Jalan Sriwijaya) $\text{waktu merah}_{fase\ 4} = 145 - 29 - 5$ $= 111 \text{ detik}$ 	<p>Waktu merah pada setiap fase</p> <p>waktu merah = C_0 – waktu hijau – waktu kuning</p> <ol style="list-style-type: none"> Waktu merah fase 1 (Jalan MT. Haryono (selatan) dan Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan) $\text{waktu merah}_{fase\ 1} = 180 - 72 - 5$ $= 103 \text{ detik}$ Waktu merah fase 2 (Jalan Lamper Sari) $\text{waktu merah}_{fase\ 2} = 180 - 26 - 5$ $= 149 \text{ detik}$ Waktu merah fase 3 (Jalan MT. Haryono (utara) ke barat) $\text{waktu merah}_{fase\ 3} = 180 - 21 - 5$ $= 154 \text{ detik}$ Waktu merah fase 4 (Jalan Sriwijaya) $\text{waktu merah}_{fase\ 4} = 180 - 48 - 5$ $= 127 \text{ detik}$

Hasil perhitungan durasi lampu lalu lintas yang baru menggunakan metode Webster dapat dilihat pada Tabel 6. dan Tabel 7. berikut.

Tabel 6. Perbandingan Durasi Lampu Lalu Lintas Data Aktual dan menggunakan Metode Webster Periode Pagi Hari

Ruas Jalan	Data Aktual			Metode Webster		
	Merah (detik)	Kuning (detik)	Hijau (detik)	Merah (detik)	Kuning (detik)	Hijau (detik)
Jalan MT. Haryono (selatan)	93	2	50	83	5	57
Jalan Lamper Sari (timur)	118	2	25	114	5	26
Jalan Sriwijaya (barat)	113	2	30	111	5	29
Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan	73	2	70	83	5	57
Jalan MT. Haryono (utara) ke barat	123	2	20	120	5	20

Tabel 7. Perbandingan Durasi Lampu Lalu Lintas Data Aktual dan menggunakan Metode Webster Periode Sore Hari

Ruas Jalan	Data Aktual			Metode Webster		
	Merah (detik)	Kuning (detik)	Hijau (detik)	Merah (detik)	Kuning (detik)	Hijau (detik)
Jalan MT. Haryono (selatan)	108	2	40	103	5	72
Jalan Lamper Sari (timur)	123	2	25	149	5	26
Jalan Sriwijaya (barat)	103	2	45	127	5	48
Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan	88	2	60	103	5	72
Jalan MT. Haryono (utara) ke barat	128	2	20	154	5	21

Berdasarkan Tabel 6. dan Tabel 7. pada periode pagi dan sore hari, diperoleh bahwa durasi nyala lampu lalu lintas pada tiap ruas jalan berbeda-beda. Hal ini disesuaikan dengan kepadatan kendaraan atau volume kendaraan serta keadaan geometri jalan.

Analisis Galat Perhitungan Durasi Lampu Lalu Lintas

Galat dari perhitungan durasi lampu lalu lintas pada periode waktu pagi hari sebagai berikut.

1. Galat perhitungan durasi lampu merah pagi hari:

$$\begin{aligned}
 & \frac{|jml\text{durasi lampu merah baru} - jml\text{durasi lampu merah lama (real)}|}{jml\text{durasi lampu merah lama (real)}} \times 100\% \\
 &= \frac{|511 - 520|}{520} \times 100\% \\
 &= 1,7\%
 \end{aligned}$$

2. Galat perhitungan durasi lampu hijau pagi hari:

$$\begin{aligned}
 & \frac{|jml\text{durasi lampu hijau baru} - jml\text{durasi lampu hijau lama (real)}|}{jml\text{durasi lampu hijau lama (real)}} \times 100\% \\
 &= \frac{|189 - 195|}{195} \times 100\% \\
 &= 3,07\%
 \end{aligned}$$

Galat dari perhitungan durasi lampu lalu lintas pada periode waktu sore hari sebagai berikut.

1. Galat perhitungan durasi lampu merah sore hari:

$$\frac{|jml\text{durasi lampu merah baru} - jml\text{durasi lampu merah lama (real)}|}{jml\text{durasi lampu merah lama (real)}} \times 100\%$$

$$= \frac{|636 - 550|}{550} \times 100\% \\ = 15,63\%$$

2. Galat perhitungan durasi lampu hijau sore hari:

$$\frac{|jumlah durasi lampu hijau baru - jumlah durasi lampu hijau lama (real)|}{jumlah durasi lampu hijau lama (real)} \times 100\% \\ = \frac{|239 - 190|}{190} \times 100\% \\ = 25,78\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan galat durasi lampu lalu lintas di atas diperoleh perhitungan galat durasi lampu merah dan hijau cukup kecil baik pada pagi maupun sore hari. Dengan kata lain perhitungan durasi lampu lalu lintas ini mendekati durasi yang diterapkan di sistem saat ini.

PENUTUP

Berdasarkan hasil dan pembahasan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Pemodelan arus lalu lintas di Persimpangan Metro Jalan MT. Haryono, Kota Semarang dilakukan menggunakan graf untuk merepresentasikan hubungan antara arus kendaraan. Dalam pemodelan ini, algoritma Welch-Powell digunakan sebagai metode pewarnaan graf untuk menentukan pengaturan fase lalu lintas. Berdasarkan hasil pewarnaan graf, diperoleh bahwa jumlah fase untuk mengatur arus lalu lintas di Persimpangan tersebut adalah sebanyak 4 fase.
2. Hasil perhitungan yang didapatkan menggunakan metode Webster, diperoleh waktu siklus pada periode pagi hari yaitu 145 detik. Pada Jalan MT. Haryono (selatan) dan Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan menghasilkan durasi nyala lampu hijau 57 detik, kuning 5 detik, dan merah 83 detik. Jalan Lamper Sari (timur) menghasilkan durasi nyala lampu hijau 26 detik, kuning 5 detik, dan merah 114 detik. serta Jalan MT. Haryono (utara) ke barat menghasilkan durasi nyala lampu hijau 20 detik, kuning 5 detik, dan merah 120 detik serta Jalan Sriwijaya (barat) menghasilkan durasi nyala lampu hijau 29 detik, kuning 5 detik, dan merah 111 detik. Pada periode sore hari bernilai lebih besar dari waktu siklus saat ini dan waktu siklus pada periode pagi hari. Terjadi penambahan waktu siklus, yaitu dari 150 detik menjadi 180 detik. Hal ini terjadi karena total kendaraan yang melintas mengalami puncaknya pada sore hari di jam kepulangan kerja yaitu pukul 16.00 – 17.00 WIB. Pada Jalan Jalan MT. Haryono (selatan) dan Jalan MT. Haryono (utara) ke selatan menghasilkan durasi nyala lampu hijau 72 detik, kuning 5 detik, dan merah 103 detik. Jalan Lamper Sari (timur) menghasilkan durasi nyala lampu hijau 26 detik, kuning 5 detik, dan merah 149 detik. Jalan MT. Haryono (utara) ke barat menghasilkan durasi nyala lampu hijau 21 detik, kuning 5 detik, dan merah 154 detik serta Jalan Sriwijaya (barat) menghasilkan durasi nyala lampu hijau 48 detik, kuning 5 detik, dan merah 127 detik.
3. Hasil perhitungan galat durasi lampu lalu lintas, diperoleh perhitungan galat durasi lampu merah dan hijau cukup kecil baik pada pagi maupun sore hari. Dengan kata lain perhitungan durasi lampu lalu lintas ini mendekati durasi yang diterapkan di sistem saat ini.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan algoritma pewarnaan graf selain algoritma Welch-Powell.

REFERENSI

- Abdullah, K., Jannah, M., Aiman, U., Hasda, S., Fadilla, Z., Taqwin, Masita, Ardiawan, K. N., & Sari, M. E. (2023). *Metodologi Penelitian Kuantitatif*.
- Asih, T. S. N., Hidayati, S. N., Mulyono, & Rosyida, I. (2023). Application of Compatible Graph and Webster Methods for Traffic Light Arrangement in Jepara. *JTAM (Jurnal Teori Dan Aplikasi Matematika)*, 7(4), 999–1010.
- Badan Pusat Statistik Kota Semarang. (2023). *Jumlah Kendaraan Bermotor Kota Semarang*. <Https://Semarangkota.Bps.Go.Id/Id/Infographic?Id=241>.
- Bernaldy, & Palgunadi. (1997). *Highway Capacity Manual Project (HCM)*. In Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI).
- Budayasa, I. K. (2007). *Teori Graph dan Aplikasinya*. Unesa University Press.
- Chairani, Jaya, I., & Cipta, H. (2021). Optimasi Waktu Tunggu Total dengan Metode Webster dalam Mengatasi Kemacetan Lalu Lintas Persimpangan Jalan Kolonel Yos Sudarso. *FARABI: Jurnal Matematika Dan Pendidikan Matematika*, 4(2), 175–180.
- Diestel, R. (2005). *Graph Theory*.
- Kinanti, H. A., Agatha, A. B., & Prihandini, R. M. (2024). Application of Graph Theory in Traffic Light System Optimization to Alleviate Congestion at the Mangli Road Intersection. *ResearchGate*.
- Mahfuza, D. U., & Mulyono. (2020). Penerapan Pewarnaan Graf menggunakan Algoritma Welch-Powell untuk Keefektifan pada Pengaturan Lampu Lalu Lintas. *KARISMATIKA*, 6(2), 53–54.
- Poernamasari, I., Tumilaar, R., & Montolalu, C. E. (2019). Optimasi Pengaturan Lampu Lalu Lintas dengan menggunakan Metode Webster (Studi Kasus Persimpangan Jalan Babe Palar). *D'CartesiaN: Jurnal Matematika Dan Aplikasi*, 8(1), 27–35.
- Riyanto, S. B. (2023). *Selalu Macet, Adakah Solusi untuk Mengurangi Kemacetan di Semarang*. <Https://Rri.Co.Id/Daerah/140410/Selalu-Macet-Adakah-Solusi-Untuk-Mengurangi-Kemacetan-Di-Semarang>.
- Sendow, E. S., Sulistyaningsih, M., & Monoarfa, J. F. (2023). Optimasi Waktu Tunggu Lampu Lalu Lintas dengan Mengaplikasikan Teori Graf dan Metode Webster. *Journal on Education*, 6(1), 2272–2284.
- Sikas, O. R., Mada, G. S., Blegur, F. M. A., & Nabu, A. G. (2023). Application of Graph Theory and Webster Method in Traffic Light Settings at the Tulip Intersection in Kefamenanu City. *Desimal: Jurnal Matematika*, 6(3), 323–336.
- Sugiyono. (2013). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Alfabeta Bandung.
- Sulistiani, D. A., & Ais, C. (2022). Application of GraphTheory and Welch-Powell Method at Traffic Light Regulation. *JUTI: Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*, 20(2), 54–60.
- Yaqin, A., Setiyowati, D. F., Yuliandari, D., Ningsih, F. S., Fitriyah, L., Putri, M. A. A., Oktaviani, R. D., Aguzzawa, R. F., Ruliyani, & Fathoni, M. I. A. (2023). Penerapan Teori Graf pada Pengaturan Lampu Lalu Lintas di Perempatan Alun Alun Kota Bojonegoro. *Buana Matematika: Jurnal Ilmiah Matematika Dan Pendidikan Matematika*, 13(2), 125–136.