

Penentuan Fase dan Waktu Siklus Optimum Simpang Bersinyal dengan Graf Kompatibel dan Webster Modifikasi (Studi Kasus: Persimpangan Sokaraja, Banyumas)

Dian Pratama¹, Kukuh Rahayu²

^{1,2} Universitas Nahdlatul Ulama Purwokerto, Jawa Tengah, d.pratama@unupurwokerto.ac.id

Abstract. Traffic congestion at signalized intersections can be reduced through proper signal timing. This study aims to optimize traffic-signal settings at the Sokaraja intersection, Banyumas Regency, using a directed compatibility graph and a modified Webster method. Primary data collected from October 2025 to Desember 2025 include intersection geometry (approach widths), existing signal timings, and traffic volumes (heavy vehicles, light vehicles, and motorcycles) observed over two weeks during morning, midday, and afternoon periods. Traffic movements were modeled using a directed compatibility graph to identify non-conflicting movements that can run simultaneously; weighting based on approach width and traffic volume was then used to form phases and allocate green splits. The modified Webster calculation yields an optimal cycle length of 149 s for the maximum-demand condition (and 35 s for the minimum-demand condition). Compared with field timings (e.g., red/green 117/70 s on Jl Jendral Soedirman and 137/22 s on Jl Ajibarang–Secang), the recommended timings under maximum demand are 50/86 s and 81/54 s, respectively. Effectiveness evaluation indicates that the red intervals on Jl Jendral Soedirman and Jl Ajibarang–Secang are longer than required, while the other approaches are closer to the optimized settings. These results provide a practical basis for signal retiming and for developing more adaptive control at the Sokaraja intersection.

Keywords: Signalized intersection; compatibility graph; modified Webster; cycle length; signal timing

Abstrak. Kemacetan pada simpang bersinyal dapat diminimalkan melalui pengaturan waktu sinyal yang tepat. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan durasi lampu lalu lintas pada Persimpangan Sokaraja, Kabupaten Banyumas, menggunakan teori graf kompatibel dan metode Webster modifikasi. Data primer yang digunakan dari Oktober 2025 sampai Desember 2025 meliputi geometri simpang (lebar pendekat), durasi sinyal eksisting, serta volume lalu lintas (HV, LV, dan MC) yang diamati selama dua minggu pada periode pagi, siang, dan sore. Pergerakan arus dimodelkan sebagai graf berarah kompatibel untuk menentukan pasangan arus yang dapat berjalan bersamaan, kemudian pembobotan dilakukan berdasarkan lebar jalan dan volume lalu lintas sebagai dasar penyusunan fase dan pembagian waktu hijau. Hasil perhitungan Webster pada kondisi volume maksimum menghasilkan waktu siklus optimum 149 detik (dan 35 detik pada volume minimum). Dibandingkan dengan kondisi lapangan (misalnya merah/hijau 117/70 detik di Jl Jendral Soedirman dan 137/22 detik di Jl Ajibarang–Secang), rekomendasi pada kondisi maksimum adalah 50/86 detik (Jl Jendral Soedirman) dan 81/54 detik (Jl Ajibarang–Secang). Evaluasi efektivitas menunjukkan dua pendekat—Jl Jendral Soedirman dan Jl Ajibarang–Secang—memiliki durasi merah yang belum optimal, sementara pendekat lainnya relatif lebih mendekati hasil optimasi. Temuan ini dapat digunakan sebagai dasar penyesuaian pengaturan sinyal dan pengembangan pengendalian yang lebih adaptif.

Kata Kunci: Simpang bersinyal; graf kompatibel; Webster modifikasi; waktu siklus; pengaturan sinyal

1 Pendahuluan

Transportasi jalan merupakan kebutuhan penting untuk mendukung mobilitas manusia dan distribusi barang. Seiring meningkatnya aktivitas dan kepemilikan kendaraan, volume lalu lintas pada ruas-ruas utama cenderung bertambah dan memunculkan titik kemacetan, terutama pada persimpangan. Pada simpang bersinyal, kinerja lalu lintas sangat dipengaruhi oleh pengaturan waktu sinyal, khususnya waktu siklus, pembagian hijau (green split), interval perubahan (kuning), interval pembersihan (all-red), serta waktu hilang (lost time) yang secara langsung berpengaruh terhadap kapasitas, tundaan, dan panjang antrian. Selain itu, pemilihan waktu siklus pada dasarnya merupakan kompromi antara peningkatan kapasitas dan potensi peningkatan tundaan serta antrian apabila siklus dibuat terlalu panjang [1].

Persimpangan Sokaraja di Kabupaten Banyumas merupakan simpang bersinyal yang melayani pertemuan beberapa arus dari pendekat-pendekat utama. Variasi volume antarpendekat dan konflik pergerakan kendaraan (lurus, belok kanan, belok kiri) menuntut pengaturan fase dan pembagian waktu hijau yang proporsional. Dalam praktik operasi simpang bersinyal, perubahan pola lalu lintas (misalnya jam puncak yang bergeser atau pertumbuhan arus pada salah satu pendekat) dapat menyebabkan timing yang sebelumnya memadai menjadi kurang optimal, sehingga evaluasi dan penyesuaian timing perlu dilakukan secara berkala melalui prosedur rekayasa lalu lintas yang sistematis [1].

Optimasi waktu sinyal dapat dilakukan menggunakan pendekatan analitis; salah satu metode klasik yang banyak digunakan adalah **metode Webster**, yang menurunkan rumus pendekatan untuk menentukan waktu siklus optimum dan pembagian hijau berdasarkan arus kritis dan waktu hilang dengan tujuan meminimalkan tundaan rata-rata pada simpang bersinyal. Berbagai pengembangan juga dilakukan untuk memperbaiki pendekatan Webster pada kondisi tertentu, namun prinsip dasarnya tetap menjadikan arus kritis dan lost time sebagai komponen kunci dalam penentuan cycle dan split [2].

Peningkatan mobilitas dan kepemilikan kendaraan membuat banyak persimpangan bersinyal mengalami kemacetan karena waktu sinyal yang tidak selaras dengan pola arus aktual dan tingginya volume kendaraan; pada studi kasus Simpang Empat Andalas, kemacetan dikaitkan dengan kurangnya sinkronisasi waktu sinyal dan volume kendaraan yang tinggi [3], [4]. Untuk menata ulang pengaturan sinyal secara lebih sistematis, pergerakan lalu lintas dapat dimodelkan dengan **graf kompatibel** yaitu mengelompokkan arus yang dapat berjalan bersamaan tanpa menimbulkan konflik/kecelakaan [5] lalu durasi fase dan pembagian hijau dihitung menggunakan **metode Webster** yang bertujuan mengoptimasi panjang siklus dan meminimalkan tundaan berdasarkan kepadatan/volume dan lebar jalan. Pendekatan gabungan ini relevan karena praktik di lapangan sering belum mempertimbangkan lebar jalan dan volume kendaraan sehingga memicu kemacetan (seperti dicatat pada Tulip Intersection) [6], sementara bukti empiris menunjukkan manfaatnya: penerapan graf kompatibel + Webster pada Simpang Empat Andalas menurunkan waktu tunggu total dari 578 detik menjadi 114 detik dibanding pengaturan eksisting [7], [8]. Berangkat dari penelitian tersebut, beberapa fokus seperti (i) identifikasi konflik-kompatibilitas pergerakan untuk membentuk fase yang efisien, lalu (ii) perhitungan waktu siklus optimum dan

alokasi hijau berbasis arus kritis, sehingga rekomendasi pengaturan sinyal yang dihasilkan lebih terukur dan selaras dengan kondisi lalu lintas aktual.

Di sisi lain, tantangan penting dalam penerapan metode analitis adalah penyusunan fase yang efisien, yaitu pengelompokan pergerakan yang dapat berjalan bersamaan tanpa konflik. Untuk menyusun fase secara lebih terstruktur, pergerakan dapat dimodelkan sebagai **graf kompatibel**, di mana kelompok pergerakan kompatibel (misalnya clique maksimal) dapat diperlakukan sebagai kelompok sinyal dan digunakan sebagai dasar pembentukan fase serta penyusunan urutan fase [9], [10], [11]. Pendekatan ini membantu memastikan bahwa fase dibentuk berdasarkan hubungan konflik/kompatibilitas yang eksplisit, bukan sekadar asumsi, sehingga lebih mudah diverifikasi dan direplikasi.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan pengaturan waktu sinyal lalu lintas pada Persimpangan Sokaraja, Kabupaten Banyumas, yang meliputi rekomendasi fase, waktu siklus, dan pembagian waktu hijau yang lebih optimal dibandingkan dengan kondisi eksisting. Optimasi dilakukan dengan memodelkan pergerakan lalu lintas menggunakan teori graf kompatibel guna mengidentifikasi pasangan pergerakan yang tidak saling konflik dan membentuk fase sinyal secara terstruktur. Selanjutnya, metode Webster modifikasi diterapkan untuk menentukan waktu siklus optimum dan alokasi waktu hijau pada kondisi volume lalu lintas maksimum dan minimum berdasarkan data lalu lintas aktual. Untuk menjaga kesesuaian dengan karakteristik lalu lintas di Indonesia, parameter arus jenuh/kapasitas serta evaluasi kinerja mengacu pada pedoman kapasitas nasional yang dikembangkan dan dimutakhirkan dari MKJI [12]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi penataan ulang pengaturan sinyal yang lebih efisien, mengurangi tundaan dan antrian, serta menjadi dasar pengembangan pengendalian simpang bersinyal yang lebih adaptif.

2 Landasan Teori

2.1 Simpang Bersinyal dan Parameter Pengaturan Sinyal

Simpang bersinyal adalah persimpangan yang pengaturan arusnya dikendalikan oleh sinyal lalu lintas untuk mengurangi konflik dan meningkatkan keteraturan. Parameter utama dalam pengaturan sinyal meliputi [13], [14]:

- Waktu siklus (C): total waktu satu putaran sinyal hingga kembali ke kondisi awal.
- Waktu hijau (g): waktu kendaraan diberi hak jalan pada suatu fase.
- Waktu merah (r): waktu kendaraan berhenti karena tidak mendapat hak jalan.
- Waktu hilang (*lost time*, L): waktu yang “tidak efektif” untuk melayani arus (misalnya saat kuning, *all-red*, atau *start-up lost time*).
- Fase: kelompok pergerakan yang diberi hijau bersamaan pada satu interval waktu karena tidak saling konflik.

Kinerja simpang bersinyal dipengaruhi oleh kesesuaian fase dan pembagian waktu hijau terhadap besarnya arus pada masing-masing pendekat/pergerakan.

2.2 Konflik Pergerakan dan Konsep Kompatibilitas

Pada simpang, pergerakan kendaraan dapat saling konflik (misalnya dua arus yang berpotongan atau saling bersilangan). Dua pergerakan dikatakan kompatibel apabila keduanya dapat dilayani secara bersamaan tanpa konflik yang membahayakan atau mengganggu kapasitas secara signifikan. Konsep kompatibilitas ini digunakan untuk menyusun fase yang efisien: semakin banyak pergerakan kompatibel yang digabung dalam satu fase (tanpa mengorbankan keselamatan/aturan), semakin efektif pemanfaatan waktu hijau.

2.3 Teori Graf untuk Pemodelan Pergerakan Lalu Lintas

Teori graf dapat digunakan untuk merepresentasikan dan menganalisis hubungan antar pergerakan lalu lintas dalam penyusunan fase sinyal. Graf didefinisikan sebagai pasangan $G = (V, E)$, dengan [15], [16]:

- V = himpunan simpul (vertex/node),
- E = himpunan sisi (edge) yang menghubungkan pasangan simpul.

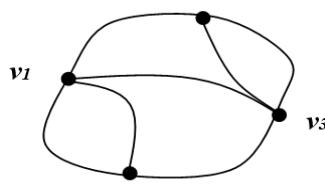
Dalam konteks simpang:

- Simpul (vertex) merepresentasikan pergerakan/arus tertentu (mis. dari pendekat A ke arah lurus, belok kanan, dll).
- Sisi (edge) merepresentasikan hubungan antarpergerakan.

Pada pemodelan sistem lalu lintas banyak digunakan beberapa jenis graf sebagai sistem pengendaliannya. Berikut ini adalah contoh graf yang sering digunakan [15]:

1. Graf ganda

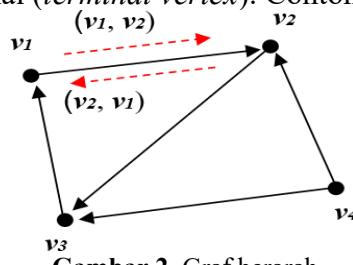
Graf ganda adalah graf yang memiliki lebih dari satu sisi untuk menghubungkan dua simpul. Contoh graf ganda.



Gambar 1. Graf ganda

2. Graf berarah

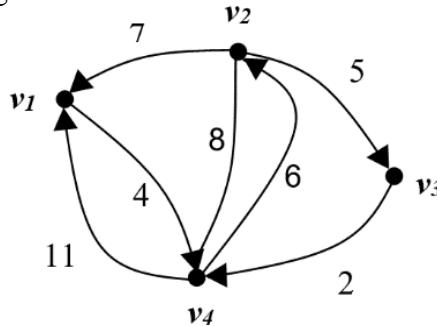
Graf yang setiap sisinya diberikan orientasi arah disebut graf berarah. Kita lebih suka menyebut sisi berarah dengan sebutan busur (arc). Pada graf berarah (v_1, v_2) dan (v_2, v_1) menyatakan dua buah busur yang berbeda dimana v_1 dan v_2 adalah suatu indeks, dengan kata lain $(v_1, v_2) \neq (v_2, v_1)$. Untuk busur (v_1, v_2) , simpul v_1 dinamakan simpul asal (initial vertex), dan simpul v_2 dinamakan simpul terminal (terminal vertex). Contoh graf berarah.



Gambar 2. Graf berarah

3. Graf ganda berarah berbobot

Graf ganda berarah berbobot adalah gabungan dari Gambar 1 dan Gambar 2 diatas. Contoh graf ganda berarah berbobot.



Gambar 3. Graf ganda berarah berbobot

4. Graf kompatibel

Graf kompatibilitas sering diaplikasikan untuk menentukan waktu tunggu total dan mengatur pergerakan arus lalu lintas. Graf-graf kompatibilitas digunakan secara luas dalam memecahkan masalah yang melibatkan pengaturan data dalam urutan tertentu. Arus lalu lintas tertentu dapat disebut kompatibel jika kedua arus tidak akan menghasilkan kecelakaan apapun [17]. Yang artinya arus tersebut dapat berjalan dalam waktu yang bersamaan tanpa saling membahayakan [18]. Metode Webster adalah metode yang digunakan untuk menentukan waktu penyalaan lampu lalu lintas yang telah dikembangkan oleh F.V. Webster. Metode Webster memiliki sistem untuk mengoptimasi durasi waktu panjang siklus lampu lalu lintas dan meminimalkan waktu penundaan rata-rata kendaraan berdasarkan perhitungan matematis. Konsep metode Webster yaitu untuk menentukan panjang siklus waktu yang optimal dan menghitung durasi waktu lampu lalu lintas berdasarkan kepadatan kendaraan dan lebar jalan.

Jika digunakan graf kompatibel, maka:

- sisi menghubungkan dua simpul yang kompatibel (dapat berjalan bersamaan), atau
- alternatifnya, bisa dibuat graf konflik (sisi = konflik). Yang penting: definisi sisi harus konsisten dengan cara Anda membentuk fase.

Untuk menyusun fase, graf kompatibel dapat digunakan untuk mencari kelompok pergerakan kompatibel (misalnya himpunan pergerakan yang bisa berjalan bersamaan). Dalam implementasi praktis, kelompok ini dapat dipilih sebagai kandidat fase, lalu disusun menjadi urutan fase yang melayani semua pergerakan dengan konflik minimal.

Dalam studi simpang, bobot dapat ditetapkan berdasarkan 2 hal yaitu volume lalu lintas (semakin besar volume, semakin tinggi prioritas), dan lebar pendekat (semakin lebar/kapasitas lebih besar, dapat memengaruhi alokasi hijau atau kelayakan penggabungan fase). Pembobotan ini membantu ketika ada beberapa alternatif fase yang sama-sama kompatibel: fase/pergerakan dengan bobot lebih tinggi dapat diprioritaskan dalam pembagian waktu hijau.

2.4 Metode Webster (Dasar Optimasi Waktu Sinyal)

Metode Webster adalah pendekatan analitis untuk menentukan: 1) waktu siklus optimum, dan 2) pembagian waktu hijau (green split). Berdasarkan rasio arus kritis pada fase-fase yang terbentuk. Secara umum, konsep Webster memanfaatkan [19]:

- Rasio arus kritis tiap fase (berkaitan dengan arus dan arus jenuh),
- Total waktu hilang (L) dalam satu siklus, untuk menghasilkan siklus yang efisien dan alokasi hijau yang proporsional terhadap kebutuhan tiap fase.

Pada penelitian ini, Webster digunakan dalam bentuk modifikasi agar sesuai dengan kondisi dan asumsi pengamatan di lapangan (misalnya perlakuan terhadap fase tertentu, pengaturan belok kiri, atau penyesuaian parameter waktu hilang sesuai kondisi simpang).

3 Metode Penelitian

3.1 Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif-deskriptif dengan pendekatan analitis untuk optimasi pengaturan sinyal simpang bersinyal. Optimasi dilakukan melalui dua tahapan utama: (1) penyusunan fase sinyal menggunakan graf kompatibel berbasis konflik pergerakan, dan (2) perhitungan waktu siklus optimum serta pembagian waktu hijau menggunakan metode Webster modifikasi pada kondisi volume maksimum dan minimum.

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Persimpangan Sokaraja, Kabupaten Banyumas. Pengambilan data lapangan dilakukan pada periode Oktober 2021–April 2022 dengan survei lalu lintas selama dua minggu pada tiga rentang waktu (pagi, siang, sore) untuk menangkap variasi demand harian.



Gambar 4. Peta persimpangan Sokaraja

3.3 Data dan Peralatan

Data primer yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data geometri simpang berupa lebar tiap pendekat dan/atau lebar lajur efektif, jumlah lajur, serta

kondisi fisik simpang yang memengaruhi kapasitas. Selain itu, dikumpulkan data pengaturan sinyal eksisting yang mencakup durasi lampu hijau, merah, kuning, interval all-red (jika tersedia), serta waktu siklus pada masing-masing fase atau pendekat. Data volume lalu lintas juga dihimpun dalam bentuk jumlah kendaraan menurut jenis kendaraan berat (HV), kendaraan ringan (LV), dan sepeda motor (MC) pada setiap pergerakan atau pendekat dalam interval waktu pengamatan 15 menit. Pengumpulan data didukung oleh penggunaan formulir pencacahan atau *hand tally counter*, stopwatch atau rekaman video (opsional), meteran atau alat ukur lebar jalan, serta perangkat lunak spreadsheet untuk proses rekapitulasi dan perhitungan data.

3.4 Prosedur Pengumpulan Data

Subbab ini menjelaskan prosedur pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian, meliputi tahapan survei lapangan yang dilakukan secara sistematis untuk memperoleh data geometri simpang, pengaturan waktu sinyal eksisting, dan volume lalu lintas. Prosedur ini disusun untuk memastikan bahwa data yang dikumpulkan akurat, representatif, dan sesuai dengan kebutuhan analisis optimasi waktu sinyal pada Persimpangan Sokaraja.

1. Survei geometri dilakukan dengan mengukur lebar pendekat dan mencatat kondisi simpang (marka, hambatan samping, dll.) yang relevan.
2. Survei waktu sinyal dilakukan dengan mengamati beberapa siklus untuk mendapatkan nilai rata-rata durasi hijau, merah, kuning, dan waktu siklus eksisting.
3. Survei volume lalu lintas dilakukan pada tiap pendekat/pergerakan sesuai interval pengamatan. Volume dicatat untuk HV, LV, dan MC, lalu direkap menjadi volume jam puncak (maksimum) dan volume jam rendah (minimum).

3.5 Pengolahan Data Volume (Konversi ke smp/jam)

Volume kendaraan hasil survei dikonversi ke satuan setara smp/jam agar dapat digunakan dalam perhitungan kapasitas dan rasio arus. Konversi dilakukan menggunakan faktor ekivalensi kendaraan:

$$Q_{\text{smp}} = (Q_{\text{LV}} \cdot e_{\text{LV}}) + (Q_{\text{HV}} \cdot e_{\text{HV}}) + (Q_{\text{MC}} \cdot e_{\text{MC}}) \quad (1)$$

dengan:

- $Q_{\text{LV}}, Q_{\text{HV}}, Q_{\text{MC}}$ = volume kendaraan (kend/jam) untuk masing-masing jenis, (Ketentuan volume kendaraan berdasarkan:
 1. Untuk volume > 2000 kendaraan/jam maka diberi skor 5
 2. Untuk volume antara $1500 - 1999$ kendaraan/jam maka diberi skor 4
 3. Untuk volume antara $1000 - 1499$ kendaraan/jam maka diberi skor 3
 4. Untuk volume antara $500 - 999$ kendaraan/jam maka diberi skor 2
 5. Untuk volume antara $0 - 499$ kendaraan/jam maka diberi skor 1)
- $e_{\text{LV}}, e_{\text{HV}}, e_{\text{MC}}$ = ekivalensi smp untuk masing-masing jenis kendaraan (Konversi volume kendaraan ke smp/jam mengacu pada MKJI 1997 dengan $e_{\text{LV}} = 1,0$, $e_{\text{HV}} = 1,3$, dan $e_{\text{MC}} = 0,2$ (pergerakan terlindung). Untuk kondisi pergerakan terlawan, MKJI 1997 menyediakan $e_{\text{MC}} = 0,4$; namun penelitian ini menggunakan nilai $e_{\text{MC}} = 0,2$ secara konsisten karena fase disusun berbasis kompatibilitas untuk meminimalkan konflik),

- Q_{smp} = volume lalu lintas dalam smp/jam.

Pengolahan dilakukan untuk dua kondisi:

- kondisi maksimum: volume puncak (jam tersibuk),
- kondisi minimum: volume terendah (jam sepi).

3.6 Pemodelan Pergerakan dengan Graf Kompatibel

3.6.1 Definisi Simpul (Vertex) sebagai Pergerakan

Setiap pergerakan pada simpang (misalnya dari pendekat A ke arah lurus/kanan/kiri) didefinisikan sebagai simpul:

$$V = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$$

dengan m_i adalah satu pergerakan spesifik (contoh penamaan: A-Lurus, A-Kanan, B-Lurus, dst.).

3.6.2 Matriks Konflik dan Aturan Kompatibilitas

Hubungan konflik antarpergerakan ditentukan berdasarkan geometri simpang dan lintasan kendaraan. Dua pergerakan dikatakan:

- konflik jika lintasan saling berpotongan/bersilangan atau saling menghalangi secara signifikan,
- kompatibel jika dapat dilayani bersamaan tanpa konflik.

Dibuat matriks konflik/kompatibilitas K berukuran $n \times n$, dengan:

- $K_{ij} = 1$ jika m_i kompatibel dengan m_j ,
- $K_{ij} = 0$ jika konflik.

3.6.3 Pembentukan Graf Kompatibel

Graf kompatibel dibentuk sebagai:

$$G = (V, E)$$

dengan E adalah himpunan sisi yang menghubungkan pasangan pergerakan yang kompatibel:

$$E = \{(m_i, m_j) \mid K_{ij} = 1\}$$

3.7 Pembentukan Fase Berbasis Graf (Kelompok Pergerakan Kompatibel)

Satu fase didefinisikan sebagai himpunan pergerakan yang saling kompatibel dan dapat diberi hijau bersamaan. Secara graf, fase dapat dipandang sebagai clique (himpunan simpul yang saling terhubung/kompatibel). Prosedur pembentukan fase dilakukan sebagai berikut:

1. Menentukan kandidat fase sebagai clique maksimal pada graf kompatibel.
2. Memilih kombinasi clique yang menutup semua pergerakan (setiap pergerakan masuk minimal satu fase).
3. Menyusun urutan fase sehingga seluruh pergerakan terlayani dengan jumlah fase yang efisien dan konflik minimal.

Jika Anda memakai cara manual (berdasarkan Tabel kompatibilitas), tuliskan bahwa fase dipilih dari pasangan/kelompok pergerakan yang kompatibel, lalu diverifikasi terhadap konflik lintasan.

3.8 Pembobotan (Lebar Pendekat dan Volume) untuk Prioritas

Untuk membantu pemilihan fase ketika ada beberapa alternatif yang sama-sama kompatibel, dilakukan pembobotan berdasarkan:

- lebar pendekat (merepresentasikan kapasitas fisik),
- volume lalu lintas (merepresentasikan kebutuhan layanan).

Bobot per pergerakan m_i dapat ditentukan menggunakan skema diskrit (sesuai draft Anda) atau skema kontinu. Jika memakai skema diskrit, tuliskan pemetaan secara eksplisit, misalnya:

- 1) Bobot lebar $b_w(m_i) = 1 - 4$ berdasarkan interval lebar

Ketentuan lebar jalan:

- Untuk lebar jalan < 3 m maka diberi skor 4
- Untuk lebar jalan antara 3 m - 4 m maka diberi skor 3
- Untuk lebar jalan antara 4 m - 5 m maka diberi skor 2
- Untuk lebar jalan > 5 m maka diberi skor 1,

- 2) Bobot volume $b_q(m_i) = 1-5$ berdasarkan interval volume

Ketentuan volume kendaraan:

- Untuk volume diatas 2000 kendaraan/jam maka diberi skor 5
- Untuk volume antara 1500 - 1999 kendaraan/jam maka diberi skor 4
- Untuk volume antara 1000 - 1499 kendaraan/jam maka diberi skor 3
- Untuk volume antara 500 - 999 kendaraan/jam maka diberi skor 2
- Untuk volume antara 0 - 499 kendaraan/jam maka diberi skor 1

Pada penelitian ini, bobot merepresentasikan prioritas (nilai lebih besar = prioritas lebih tinggi) dalam pemilihan fase/green split. Skor prioritas pergerakan:

$$W(m_i) = \alpha b_w(m_i) + \beta b_q(m_i) \quad (2)$$

dengan α dan β adalah koefisien penimbang ($\alpha = \beta = 1$ bobot setara).

Skor fase (untuk memilih fase yang diprioritaskan) dihitung sebagai jumlah bobot pergerakan di dalam fase:

$$W(F_k) = \sum_{m_i \in F_k} W(m_i), \quad (3)$$

dengan m_i = pergerakan/arus ke- i (simpul ke- i) dan F_k = fase ke- k (himpunan pergerakan yang kompatibel).

3.9 Perhitungan Waktu Siklus dan Pembagian Hijau dengan Webster Modifikasi

3.9.1 Rasio Arus Kritis per Fase

Untuk tiap fase k , ditentukan arus kritis (*critical movement*) yaitu pergerakan dengan rasio arus terbesar di fase tersebut. Rasio arus untuk pergerakan i :

$$y_i = \frac{q_i}{s_i}, \quad (4)$$

dengan:

- q_i = arus lalu lintas pergerakan i (smp/jam),
- s_i = arus jenuh pergerakan i (smp/jam).

Rasio kritis fase k diambil dari nilai terbesar y_i dalam fase tersebut:

$$y_k = \max (y_i \in F_k)$$

Jumlah rasio kritis seluruh fase:

$$Y = \sum_{k=1}^p y_k, \quad (5)$$

dengan p = jumlah fase.

3.9.2 Waktu Hilang (Lost Time)

Total waktu hilang per siklus:

$$L = \sum_{k=1}^p l_k, \quad (6)$$

dengan l_k adalah waktu hilang pada fase k (misalnya kombinasi kuning + all-red + start-up lost time).

3.9.3 Waktu Siklus Optimum (Webster)

Waktu siklus optimum:

$$C_0 = \frac{1.5L + 5}{1 - Y}. \quad (7)$$

Perhitungan dilakukan untuk kondisi maksimum dan kondisi minimum (menggunakan q_i masing-masing kondisi).

3.9.4 Pembagian Waktu Hijau Efektif

Total hijau efektif tersedia:

$$G = C_0 - L$$

Pembagian hijau efektif untuk fase k :

$$g_k = \frac{y_k}{Y} (C_0 - L). \quad (8)$$

Jika diperlukan, hijau aktual dapat disesuaikan dengan pembulatan dan batas minimum hijau. Durasi merah untuk fase k dapat dihitung sebagai:

$$r_k = C_0 - g_k \quad (9)$$

atau dengan memasukkan kuning/all-red sesuai definisi waktu merah yang Anda gunakan di lapangan.

3.10 Evaluasi Efektivitas terhadap Kondisi Eksisting

Efektivitas pengaturan sinyal dievaluasi dengan membandingkan durasi eksisting (g^{eks}, r^{eks}) terhadap hasil optimasi pada:

- kondisi maksimum (g^{max}, r^{max}),
- kondisi minimum (g^{min}, r^{min}).

Kriteria sederhana yang dapat digunakan (sesuai konsep interval max–min):

- Pengaturan eksisting dinilai efektif jika berada dalam rentang:

$$g^{min} \leq g^{eks} \leq g^{max} \text{ dan/atau } r^{min} \leq r^{eks} \leq r^{max}$$

Jika di luar rentang, dinilai belum efektif dan direkomendasikan penyesuaian menuju nilai optimasi (maksimum sebagai desain jam puncak, minimum sebagai batas bawah).

Selain itu, dapat ditambahkan ukuran deviasi:

$$\Delta g = g^{eks} - g^{opt}, \Delta r = r^{eks} - r^{opt} \quad (10)$$

dengan g^{opt}, r^{opt} diambil dari kondisi maksimum (jam puncak) sebagai skenario desain utama.

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Asumsi Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa asumsi, antara lain: lokasi penelitian berada di Persimpangan Sokaraja; ruas Karangduren dan Jalan Ahmad I diabaikan karena tidak berpengaruh signifikan; kendaraan yang dihitung terdiri dari HV, LV, dan MC; belok kiri tidak mengikuti lampu lalu lintas tetapi tetap dihitung dalam volume; pelanggaran rambu/human error diabaikan; volume dicatat per 15 menit dan dikonversi menjadi smp/jam; serta durasi merah–hijau yang digunakan untuk Jl Jendral Soedirman adalah durasi yang paling lama.

4.2 Kondisi Geometri dan Durasi Sinyal Eksisting

Hasil pengukuran geometri menunjukkan lebar jalur masuk–keluar pada masing-masing pendekat, antara lain Jl Jendral Soedirman (6 m), Jl Imam Bonjol (3,5 m), Jl Letjend Suprapto (6,5 m), dan Jl Ajibarang–Secang (6,5 m).

Tabel 1. Durasi siklus lampu lalu lintas

Ruas Jalan	Merah (detik)	Kuning (detik)	Hijau (detik)
Jl Jendral Soedirman	117	5	70
Jl Imam Bonjol	60	5	53
Jl Letjend Suprapto	50	5	41
Jl Ajibarang–Secang	137	5	22

Durasi sinyal eksisting (Tabel 1) menunjukkan variasi waktu merah dan hijau antarpendedekat. Misalnya, Jl Jendral Soedirman memiliki merah 117 detik dan hijau 70 detik, sedangkan Jl Ajibarang–Secang memiliki merah 137 detik dan hijau 22 detik.

5.3 Volume Lalu Lintas Maksimum dan Minimum

Berdasarkan hasil konversi ke smp/jam, kondisi **volume maksimum** terjadi pada:

- Jl Jendral Soedirman: 10 Desember 2025 (16.30–17.30) sebesar 2162 smp/jam,
- Jl Imam Bonjol: 5 Desember 2025 (16.30–17.30) sebesar 800 smp/jam,
- Jl Letjend Suprapto: 6 Desember 2025 (16.30–17.30) sebesar 2094,8 smp/jam,

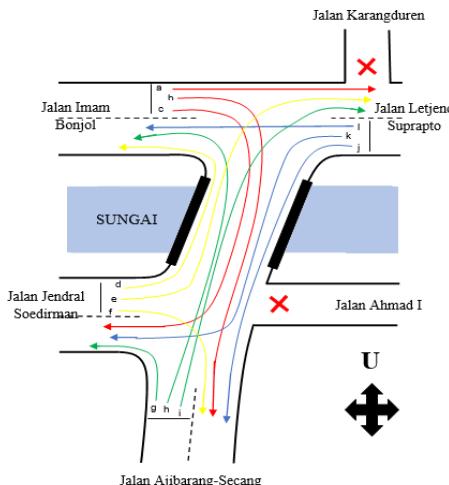
- Jl Ajibarang–Secang: 23 November 2025 (16.30–17.30) sebesar 1492,8 smp/jam.

Kondisi **volume minimum** tercatat, antara lain:

- Jl Jendral Soedirman: 19 November 2025 (06.45–07.45) sebesar 796 smp/jam,
- Jl Imam Bonjol: 10 November 2025 (06.45–07.45) sebesar 205,2 smp/jam,
- Jl Letjend Suprapto: 19 November 2025 (06.40–07.45) sebesar 1020 smp/jam,
- Jl Ajibarang–Secang: 9 Desember 2025 (06.40–07.45) sebesar 607,2 smp/jam.

5.4 Pemodelan Graf Kompatibel dan Pembentukan Fase

Berdasarkan gambaran simpang yang telah disesuaikan dengan pergerakan arus lalu lintas (Gambar 5),



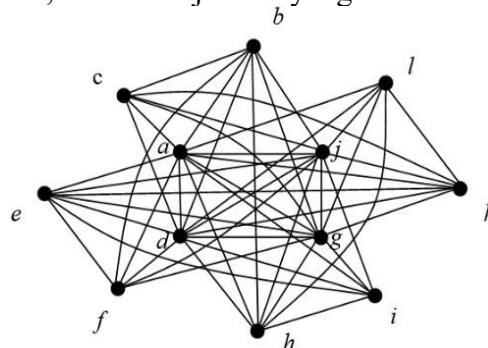
Gambar 5. Persimpangan Sokaraja

dapat ditentukan arus lalu lintas yang kompatibel dan yang tidak kompatibel. Perhatikan tabel dibawah ini.

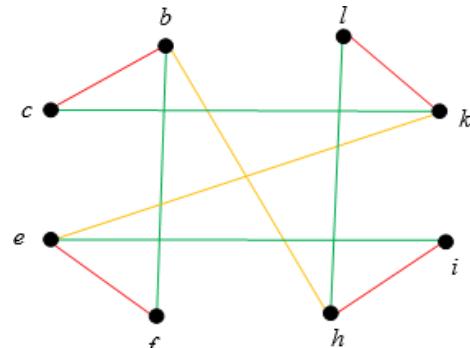
Tabel 2. Data volume lalu lintas minimum

Arus Lalu Lintas	“Kompatibel dengan”	“Tidak kompatibel dengan”
a	b, c, d, e, f, g, h, i, j, k dan l	–
b	a, c, d, f, g, h dan j	e, i, k dan l
c	a, b, d, g, j dan k	e, f, h, i dan l
d	a, b, c, e, f, g, h, i, j, k dan l	–
e	a, d, f, g, i, j dan k	b, c, h dan l
f	a, b, d, e, g dan j	c, h, i, k dan l
g	a, b, c, d, e, f, h, i, j, k dan l	–
h	a, b, d, g, i, j dan l	c, e, f dan k
i	a, d, e, g, h dan j	b, c, f, k dan l
j	a, b, c, d, e, f, g, h, i, k dan l	–
k	a, c, d, e, g, j dan l	b, f, h dan i
l	a, d, g, h, j dan k	b, c, e, f dan i

Berdasarkan Tabel 2, Simpang Sokaraja terdiri dari 12 lajur dengan nama masing-masing $a, b, c, d, e, f, g, h, I, j, k$, dan l . Selanjutnya, dibentuk graf kompatibel (Gambar 6) dan disederhanakan (Gambar 7). Pada graf hasil penyederhanaan, sisi dibedakan untuk menunjukkan pasangan arus yang berjalan bersamaan, berlawanan arah, atau menuju arah yang sama.

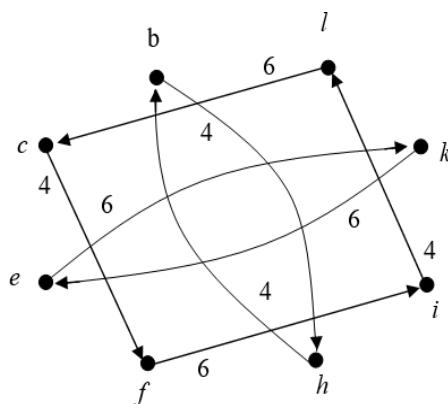


Gambar 6. Graf kompatibel



Gambar 7. Graf kompatibel yang disederhanakan

Tahap berikutnya adalah mengubah graf kompatibel menjadi graf ganda berarah berbobot (Gambar 8) sebagai dasar penentuan prioritas pada proses pembagian waktu sinyal.



Gambar 8. Graf ganda berarah berbobot

5.5 Hasil Perhitungan Webster: Waktu Siklus Optimum

Berdasarkan kondisi volume maksimum, hasil perhitungan menunjukkan waktu siklus optimum persimpangan sebesar 149 detik. Sementara pada kondisi volume minimum, waktu siklus optimum yang diperoleh adalah 35 detik. Nilai siklus optimum ini selanjutnya digunakan untuk menghitung waktu hijau efektif dan durasi merah pada tiap fase/pendekat (sesuai pengaturan fase yang dibentuk dari graf).

5.6 Evaluasi Efektivitas Durasi Sinyal: Lapangan vs Hasil Optimasi

Hasil evaluasi (Tabel 3) membandingkan durasi sinyal eksisting dengan hasil Webster pada kondisi volume maksimum dan minimum.

Tabel 3. Efektifitas durasi lampu lalu lintas di lapangan

Ruas Jalan	Berdasarkan Data Pengamatan di Lapangan			Berdasarkan Metode Webster Data Volume Lalu Lintas Maksimum			Berdasarkan Metode Webster Data Volume Lalu Lintas Minimum		
	M (detik)	K (detik)	H (detik)	M (detik)	K (detik)	H (detik)	M (detik)	K (detik)	H (detik)
	117	5	70	50	5	86	5	5	16
Jl Jendral Soedirman	60	5	53	81	5	54	11	5	10
Jl Letjend Suprapto	50	5	41	50	5	86	5	5	16
Jl Ajibarang-Secang	137	5	22	81	5	54	11	5	10

Keterangan :

- : Warna kuning merupakan data durasi lampu lalu lintas di lapangan yang sudah efektif
- : Warna coklat merupakan data durasi lampu lalu lintas di lapangan yang kurang efektif

Ringkasan temuan utama berdasarkan Tabel 3 menunjukkan bahwa pada pendekat Jl Jendral Soedirman, durasi merah eksisting sebesar 117 detik lebih besar dibandingkan dengan durasi merah hasil optimasi baik pada kondisi volume maksimum (50 detik) maupun minimum (5 detik), sehingga fase merah dinilai kurang efektif. Namun demikian, durasi hijau eksisting sebesar 70 detik masih berada di antara hasil optimasi pada volume maksimum (86 detik) dan minimum (16 detik), sehingga fase hijau pada pendekat ini dinilai relatif efektif. Pada pendekat Jl Ajibarang–Secang, durasi merah eksisting sebesar 137 detik juga berada di luar rentang hasil optimasi, yaitu 81 detik pada volume maksimum dan 11 detik pada volume minimum, sehingga dinilai kurang efektif pada fase merah. Sebaliknya, durasi hijau eksisting sebesar 22 detik masih berada dalam rentang hasil optimasi (54 detik pada volume maksimum dan 10 detik pada volume minimum), sehingga fase hijau dinilai efektif. Sementara itu, pada pendekat Jl Imam Bonjol dan Jl Letjend Suprapto, durasi merah dan hijau eksisting masih berada dalam rentang hasil optimasi pada kondisi volume maksimum dan minimum, sehingga berdasarkan kriteria interval keduanya dinilai lebih efektif dibandingkan dua pendekat sebelumnya.

Secara implikatif, dua pendekat yang “tidak efektif” berada pada durasi merah yang terlalu panjang sehingga berpotensi menambah waktu tunggu dan antrian. Berdasarkan hasil optimasi volume maksimum, penyesuaian paling nyata adalah penurunan merah pada:

- Jl Jendral Soedirman dari 117 → 50 detik (turun 67 detik),
- Jl Ajibarang–Secang dari 137 → 81 detik (turun 56 detik).

5 Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pemodelan graf kompatibel dan perhitungan Webster modifikasi pada Persimpangan Sokaraja, diperoleh waktu siklus optimum sebesar 149 detik pada kondisi volume maksimum dan 35 detik pada kondisi volume minimum. Nilai siklus ini menjadi dasar pembagian waktu hijau dan merah pada tiap pendekat/fase sesuai hasil pembentukan fase dari graf kompatibel.

Hasil perbandingan antara pengaturan sinyal eksisting dan hasil optimasi menunjukkan bahwa terdapat dua pendekat dengan durasi merah yang belum optimal, yaitu Jl Jendral Soedirman dan Jl Ajibarang–Secang. Pada kondisi volume lalu lintas maksimum, rekomendasi perubahan yang paling signifikan terjadi pada kedua pendekat tersebut. Pada Jl Jendral Soedirman, pengaturan waktu sinyal merah dan hijau direkomendasikan berubah dari 117/70 detik pada kondisi eksisting menjadi 50/86 detik pada hasil optimasi, yang menunjukkan pengurangan durasi merah disertai peningkatan alokasi waktu hijau. Sementara itu, pada Jl Ajibarang–Secang, durasi merah dan hijau direkomendasikan berubah dari 137/22 detik pada kondisi eksisting menjadi 81/54 detik pada hasil optimasi, yang juga mencerminkan pengurangan durasi merah dan peningkatan alokasi waktu hijau.

Sementara itu, pada Jl Imam Bonjol dan Jl Letjend Suprapto, durasi merah dan hijau eksisting relatif berada dalam rentang hasil optimasi (maksimum–minimum), sehingga dinilai lebih mendekati pengaturan yang efektif berdasarkan kriteria interval yang digunakan. Dengan demikian, optimasi berbasis graf kompatibel dan Webster modifikasi dapat digunakan sebagai dasar rekomendasi penyesuaian waktu sinyal, terutama untuk mengurangi waktu merah yang berlebihan pada pendekat dengan ketidaksesuaian terbesar.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil penelitian ini adalah agar instansi terkait melakukan penyesuaian pengaturan sinyal dengan mengacu pada hasil optimasi kondisi volume maksimum, terutama pada pendekat yang menunjukkan ketidaksesuaian terbesar seperti Jl Jendral Soedirman dan Jl Ajibarang–Secang, dengan fokus utama pada pengurangan durasi merah dan penyesuaian alokasi waktu hijau sesuai hasil perhitungan. Setelah penyesuaian dilakukan, disarankan adanya uji implementasi lapangan (*trial retiming*) untuk memantau perubahan kinerja simpang melalui indikator sederhana seperti panjang antrian dan waktu tundaan pada tiap pendekat, sehingga hasilnya dapat digunakan untuk penyetelan lanjutan (*fine-tuning*) tanpa mengubah struktur fase yang telah dibentuk. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan pengambilan data dilakukan pada variasi hari yang lebih beragam (hari kerja dan akhir pekan) serta pada beberapa periode pengamatan yang berbeda agar pola volume lalu lintas lebih representatif dan rekomendasi pengaturan sinyal lebih kuat. Selain itu, penelitian berikutnya dapat menambahkan indikator kinerja kuantitatif seperti derajat kejemuhan, tundaan rata-rata, dan panjang antrian, serta melakukan perbandingan dengan metode optimasi lain agar evaluasi efektivitas pengaturan sinyal yang diusulkan menjadi lebih komprehensif.

6 Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam penyusunan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada instansi terkait di Kabupaten Banyumas yang telah memberikan izin dan kemudahan dalam pelaksanaan survei lalu lintas di Persimpangan Sokaraja, sehingga proses pengumpulan data dapat berjalan dengan lancar. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang terlibat dalam kegiatan survei lapangan dan pengolahan data, atas kerja sama dan dedikasi yang diberikan. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat sebagai bahan pertimbangan dalam evaluasi dan penataan pengaturan sinyal lalu lintas, khususnya di Persimpangan Sokaraja, Kabupaten Banyumas, serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya di bidang rekayasa lalu lintas.

7 Daftar Pustaka

- [1] P. Koonce *et al.*, *Traffic Signal Timing Manual*. Washington, DC: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2008.
- [2] K. Ohno and H. Mine, “Optimal traffic signal settings—II. A refinement of Webster’s method,” *Transportation Research*, vol. 7, no. 3, pp. 269–292, Sep. 1973, doi: 10.1016/0041-1647(73)90018-X.
- [3] A. Verma, G. Nagaraja, C. S. Anusha, and S. K. Mayakuntla, “Traffic Signal Timing Optimization for Heterogeneous Traffic Conditions Using Modified Webster’s Delay Model,” *Transportation in Developing Economies 2018* 4:2, vol. 4, no. 2, pp. 13-, Aug. 2018, doi: 10.1007/S40890-018-0064-2.
- [4] R. F. Sari, H. Cipta, and E. F. Munthe, “Implementasi Algoritma Welch Powell Terhadap Pengaturan Lalu Lintas Persimpangan Jalan Dalam Mengatasi Kemacetan,” *Lebesgue: Jurnal Ilmiah Pendidikan Matematika, Matematika dan Statistika*, vol. 3, no. 3, p. 18, Dec. 2022.
- [5] Monalisa, N. Agusduri, and F. B. Castama, “Penerapan Graf Kompatible Pada Durasi Lampu Lalu Lintas di Simpang Empat Andalas Kota Padang,” *International Journal of Engineering, Economic, Social Politic and Government (IJESPG)*, vol. 1, no. 4, pp. 1–9, 2023.
- [6] O. R. Sikas, G. S. Mada, F. M. A Blegur, A. G. Nabu, and A. History, “Application of graph theory and webster method in traffic light settings at the tulip intersection in kefamenanu city,” *Desimal: Jurnal Matematika*, vol. 6, no. 3, pp. 323–336, Dec. 2023, doi: 10.24042/djm.
- [7] P. Tavakolian, “Optimal Sequencing of Traffic Streams at a Signalized Junction,” Northeastern University, 2011.
- [8] A. J. Calle-Laguna, J. Du, and H. A. Rakha, “Computing optimum traffic signal cycle length considering vehicle delay and fuel consumption,” *Transp Res Interdiscip Perspect*, vol. 3, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.trip.2019.100021.
- [9] M. Suyudi, M. Mamat, and A. Talib Bon, “Signal Groups of Clique Compatible Graph in Traffic Control Problems,” in *Proceedings of the*

- International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Jul. 2018, pp. 1–8.
- [10] P. Gora *et al.*, “Solving Traffic Signal Setting Problem Using Machine Learning,” *MT-ITS 2019 - 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems*, Jun. 2019, doi: 10.1109/MTITS.2019.8883380.
- [11] B. Alonso, S. Del Giudice, G. Musolino, and A. Vitetta, “Traffic Signal Setting at Urban Junctions and Fundamental Diagram: A Before–After Study,” *J Adv Transp*, vol. 2025, no. 1, p. 3475935, Jan. 2025, doi: 10.1155/ATR/3475935.
- [12] S. Direktorat Jenderal Bina Marga, P. Direktur di Direktorat Jenderal Bina Marga, P. Kepala Balai Besar, B. Pelaksanaan Jalan Nasional di Direktorat Jenderal Bina Marga, and P. Kepala Satuan Kerja di Direktorat Jenderal Bina Marga, “Direktorat Jenderal Binamarga,” Jakarta Selatan, 2023.
- [13] P. G. Furth, B. Cesme, and T. H. J. Muller, “Lost time and cycle length for actuated traffic signal,” *Transp Res Rec*, no. 2128, pp. 152–160, 2009, doi: 10.3141/2128-16;requestedjournal:journal:trra;page:string:article/chapter.
- [14] R. Yao, H. Zhou, and Y. E. Ge, “Optimizing signal phase plan, green splits and lane length for isolated signalized intersections,” *Transport*, vol. 33, no. 2, pp. 520–535, Jan. 2018, doi: 10.3846/16484142.2017.1297327.
- [15] R. Munir, *Matematika Diskrit*, Edisi ke 4. Bandung: Informatika Bandung, 2010.
- [16] K. H. Rosen, *Discrete Mathematics and its Applications*, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [17] R. D. Hardianti, R. Rochmad, and R. Arifudin, “Penerapan Graf Kompatibel Pada Penentuan Waktu Tunggu Total Optimal di Persimpangan Jalan Kaligarang Kota Semarang,” *Unnes Journal of Mathematics*, vol. 2, no. 1, May 2013, doi: 10.15294/UJM.V2I1.1045.
- [18] Y. Farida, A. Fanani, I. Purwanti, L. Wulandari, and N. J. Zaen, “Pemodelan Arus Lalu Lintas dan Waktu Tunggu Total Optimal di Persimpangan Jl. Jemur Andayani – Ahmad Yani Sebagai Upaya Mengurai Kemacetan,” *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, vol. 14, no. 3, pp. 389–398, Oct. 2020, doi: 10.30598/BAREKENG VOL14ISS3PP389-398.
- [19] Monalisa, N. Algusduri, and F. B. Castama, “Penerapan Graf Kompatible Pada Durasi Lampu Lalu Lintas di Simpang Empat Andalas Kota Padang,” *International Journal of Engineering, Economic, Social Politic and Government (IJESPG)*, vol. 1, no. 4, pp. 72–80, 2023.