

APLIKASI PEWARNAAN GRAF UNTUK OPTIMALISASI PENGATURAN *TRAFFIC LIGHT* DI SUKOHARJO

Cahyo Heny Meiliana¹, Dwi Maryono²

¹Mahasiswa Prodi Pendidikan Matematika FKIP UNS
Jl. Ir. Sutami 36A Surakarta

²Dosen Prodi PTIK FKIP UNS
Kampus V FKIP UNS di Jl. Ahmad Yani 200, Pabelan, Surakarta
email:dwimarus@yahoo.com

ABSTRAK

Kemacetan lalu lintas menjadi permasalahan yang dihadapi berbagai kota di Indonesia. Salah satu solusinya adalah dengan menggunakan lampu *Traffic Light*. Keberadaan lampu *Traffic Light* sangat membantu untuk menertibkan pengguna jalan, namun dalam banyak kasus kurang optimal, terkait dengan penentuan arus mana yang harus merah maupun hijau dan berapa lama masing-masing. Untuk mengatasi masalah tersebut digunakan pendekatan graf dengan aplikasi pewarnaan titik sebagai penyelesaian masalah penjadwalan. Algoritma yang digunakan adalah Welch-Powell. Kasus *traffic Light* diambil dari beberapa titik di Kabupaten Sukoharjo, meliputi Simpang 3 Bekonang, Simpang 4 Gayam, dan Simpang 5 Sukoharjo.

Dari pembahasan diperoleh hasil bahwa penggunaan pewarnaan graf dengan algoritma Welch-Powell mampu meningkatkan efektifitas *traffic light* dilihat dari durasi total lampu hijau dan merah menyala.

Kata Kunci: *Traffic Light*, Penjadwalan, Pewarnaan Graf, Welch-Powell

PENDAHULUAN

dijumpai di kota-kota besar di Indonesia. Beberapa faktor penyebab kemacetan adalah kurangnya disiplin pengguna jalan dan volume kendaraan yang semakin bertambah. Permasalahan ini dapat diselesaikan salah satunya dengan pengaturan lampu lalu lintas (*traffic light*).

Lampu lalu lintas (menurut UU no. 22/2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan: alat pemberi isyarat lalu lintas atau APILL) adalah lampu yang mengendalikan arus lalu lintas yang terpasang di persimpangan jalan, tempat penyeberangan pejalan kaki (*zebra cross*), dan tempat arus lalu lintas lainnya. Lampu ini menandakan waktu kendaraan harus berjalan dan berhenti secara bergantian dari berbagai arah. Lampu lalu lintas yang tersedia di persimpangan jalan mempunyai beberapa tujuan antara lain menghindari hambatan karena adanya perbedaan arus jalan bagi pergerakan kendaraan, memfasilitasi pejalan kaki agar dapat menyebrang dengan aman dan mengurangi tingkat kecelakaan yang diakibatkan oleh tabrakan karena perbedaan arus jalan. Karena fungsinya yang begitu penting maka lampu lalu lintas harus dapat dikendalikan atau dikontrol dengan semudah mungkin demi memperlancar arus lalu lintas di suatu persimpangan jalan.

Kemacetan lalu lintas merupakan masalah yang sering. Sebagian besar pengaturan lampu lalu lintas (*traffic light*) pada saat ini masih kurang optimal karena pada persimpangan jalan banyak ditemui lampu lalu lintas (*traffic light*) dengan durasi lampu hijau yang singkat dan lampu merah yang lama. Misalkan beberapa persimpangan di Kabupaten Sukoharjo. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan antrian kendaraan pada persimpangan tersebut.

Teori graf merupakan pokok bahasan yang mempunyai manfaat besar dalam kehidupan sehari-hari. Salah satu bagian dari teori graf adalah pewarnaan graf. Ada tiga macam pewarnaan graf, yaitu pewarnaan simpul, pewarnaan sisi, dan pewarnaan wilayah (*region*). Salah satu upaya untuk mengoptimalkan pengaturan lampu lalu lintas (*traffic light*) pada persimpangan jalan adalah dengan pewarnaan simpul menggunakan algoritma *Welch-Powell*.

Penyelesaian masalah lampu lalu lintas (*traffic light*) dapat ditinjau dalam perspektif graf, yaitu dengan merepresentasikan persimpangan dalam bentuk graf. Simpul graf menunjukkan arah perjalanan yang diperbolehkan dari jalan X menuju Y, sedangkan sisi graf menunjukkan arah perjalanan yang tidak boleh dilakukan secara bersamaan. Selanjutnya menyelesaikannya dengan metode pewarnaan simpul menggunakan algoritma *Welch-Powell*. Penyelesaian ini akan

menghasilkan arus-arus yang dapat berjalan secara bersamaan, selain itu juga diperoleh alternatif durasi siklus baru.

Algoritma ini telah digunakan Detty dkk (2012) untuk mengoptimalkan lalu lintas di Simpang Empat Kalimas Bekasi Timur, sedangkan Riwinoto, dkk (2010) juga menggunakan algoritma serupa di Kota Depok. Sedangkan pada artikel ini studi kasus diambil di Kabupaten Sukoharjo. Hasil perhitungan durasi siklus baru akan dibandingkan dengan siklus waktu data sekunder dari Dinas Perhubungan Kabupaten Sukoharjo tahun 2014 dan diharapkan bisa menjadi solusi bagi penggunaan jalan dalam rangka mempercepat masa tunggu ketika lampu merah menyala.

Efektivitas pengaturan lampu lalu lintas yang baru diukur dari seberapa besar peningkatan durasi total durasi lampu hijau dan penurunan total durasi lampu merah dibandingkan dengan data sekunder yang telah diperoleh dalam satu siklus.

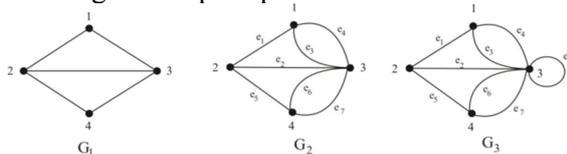
LANDASAN TEORI

Teori Graf

Sebuah graf G terdiri dari suatu himpunan V yang merupakan *vertex-vertex* (simpul-simpul) dan suatu himpunan E dari sisi-sisi sedemikian rupa sehingga setiap sisi dikaitkan dengan pasangan simpul tak terurut. Jika terdapat sebuah sisi e yang menghubungkan simpul v dan w , dapat dinyatakan dengan $e = (v,w)$ atau $e = (w,v)$. Dalam konteks ini, (v,w) menyatakan sebuah sisi antara simpul v dan simpul w dalam sebuah graf dan bukan sebuah pasangan terurut.

(Richard Johnsonbaugh, 2002: 3)

Graf disajikan dalam bentuk diagram, dimana simpul (*vertex*) disajikan berupa titik dan dapat dinotasikan dengan huruf seperti v_1, v_2, \dots, v_n atau dengan bilangan asli $1, 2, 3, \dots$, atau gabungan keduanya. Sedangkan sisi (*edge*) disajikan berupa garis lurus atau garis lengkung yang menghubungkan dua buah simpul (v_i, v_j) dan dapat dinotasikan dengan (v_i, v_j) ($i, j = 1, 2, 3, \dots, n$). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh graf seperti pada Gambar 1 berikut:



Gambar 1. Contoh Graf

adalah graf dengan himpunan simpul dan sisi adalah :

$$= \{1, 2, 3, 4\}$$

$$= \{(1, 2), (1, 3), (2, 3), (2, 4), (3, 4)\}$$

adalah graf dengan himpunan simpul dan sisi adalah :

$$= \{1, 2, 3, 4\}$$

$$= \{(1, 2), (2, 3), (1, 3), (1, 3), (2, 4), (3, 4)\}$$

$$= \{ \dots \}$$

adalah graf dengan himpunan simpul dan sisi adalah :

$$= \{1, 2, 3, 4\}$$

$$= \{(1, 2), (2, 3), (1, 3), (1, 3), (2, 4), (3, 4), (3, 4), (3, 3)\}$$

$$= \{ \dots \}$$

Graf yang dibahas dalam penelitian ini adalah graf yang tidak berarah, di mana setiap sisinya tidak mempunyai orientasi arah. Tandanya adalah urutan pasangan simpul yang dihubungkan oleh sisi tidak diperhatikan. Jadi, $(v_i, v_k) = (v_k, v_i)$ adalah sisi yang sama.

Berikut ini beberapa istilah dalam Graf, menurut Munir (2005)

- 1) Sebuah sisi yang menghubungkan sepasang simpul yang sama yakni (v_i, v_i) disebut *loop* dan dua buah atau lebih sisi yang mempunyai simpul-simpul ujung yang sama disebut sisi berganda (*multiple edges* atau *parallel edges*).

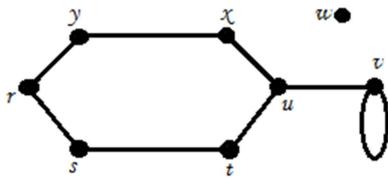
Pada Gambar 1 dapat dilihat bahwa graf tidak memiliki *loop* maupun sisi berganda sedangkan graf tidak memiliki *loop* tetapi memiliki sisi berganda yaitu $(2, 3)$ dan $(3, 4)$. Pada graf memiliki *loop* yaitu $(3, 3)$ dan sisi berganda yaitu $(1, 3)$ dan $(3, 4)$.

Graf yang tidak mengandung gelang maupun sisi ganda dinamakan graf sederhana.

- 2) Dua buah simpul pada graf dikatakan bertetangga bila kedua simpul tersebut terhubung langsung. Dapat kita sebut bertetangga dengan (v_i, v_j) pada graf jika (v_i, v_j) adalah sisi pada sebuah graf.

- 3) Untuk sebarang sisi $e = (v_i, v_j)$ dikatakan bersisian dengan simpul v_k atau bersisian dengan simpul v_l .

Derajat dari sebuah simpul v_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) dalam graf adalah jumlah sisi yang bersisian dengan v_i , dengan *loop* dihitung dua kali. Bila jumlah sisi yang bersisian dengan jumlah simpul adalah D maka derajat dari v_i adalah d_i , sehingga $\sum d_i = 2D$.



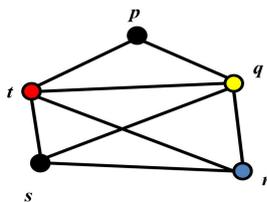
Gambar 2. Graf G_4

Derajat masing-masing simpul graf G_4 pada Gambar 2 adalah

$$d(r) = 2, d(s) = 2, d(t) = 2, d(u) = 3, d(v) = 3, d(w) = 0, d(x) = 2, d(y) = 2.$$

Pewarnaan Simpul

Menurut Koh Khee Meng, Dong Fengming dan Tay Eng Guan (2006), misalkan G adalah graf dan k adalah bilangan bulat positif. Suatu pewarnaan- k untuk graf G adalah cara mewarnai simpul pada graf G dengan sebanyak k -warna sedemikian sehingga simpul yang *adjacent* diwarnai dengan warna yang berbeda.



Gambar 3 Pewarnaan simpul graf G

Misalkan G adalah graf. Bilangan Kromatik dari graf G dinyatakan dengan $\chi(G)$ adalah jumlah warna minimum yang digunakan untuk mewarnai simpul pada graf G sedemikian sehingga simpul yang *adjacent* diwarnai dengan warna yang berbeda.

Pada graf G pada Gambar 3 mempunyai bilangan kromatik $\chi(G) = 4$

Algoritma Welch-Powell

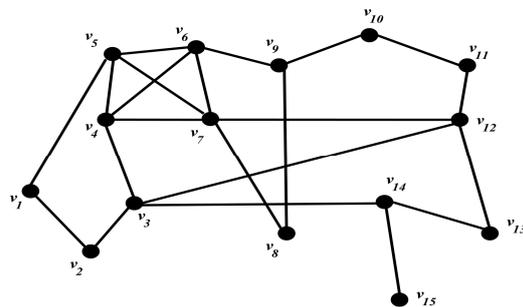
Algoritma Welch Powell digunakan untuk mewarnai simpul suatu graf berdasarkan derajat tertinggi dari simpul-simpulnya. Menurut Munir (2007), algoritma Welch Powell adalah sebagai berikut :

1. Urutkan simpul-simpul dari graf G dalam derajat yang menurun (urutan seperti ini mungkin tidak unik karena beberapa simpul mungkin berderajat sama)
2. Gunakan satu warna untuk mewarnai simpul pertama (yang mempunyai derajat tertinggi) dan simpul-simpul lain (dalam urutan yang berurutan) yang tidak bertetangga dengan simpul pertama ini.

3. Mulai lagi dengan simpul derajat tertinggi berikutnya di dalam daftar terurut yang belum diwarnai dan ulangi proses pewarnaan simpul dengan menggunakan warna kedua.
4. Ulangi penambahan warna-warna sampai semua simpul telah diwarnai.

Algoritma Welch Powell tidak selalu memberikan jumlah warna minimum dalam pewarnaan graf, tetapi memberikan batas atas jumlah warna yang dapat dipakai untuk mewarnai suatu graf.

Contoh pewarnaan graf G pada Gambar 4 menggunakan algoritma Welch Powell



Gambar 4. Graf G

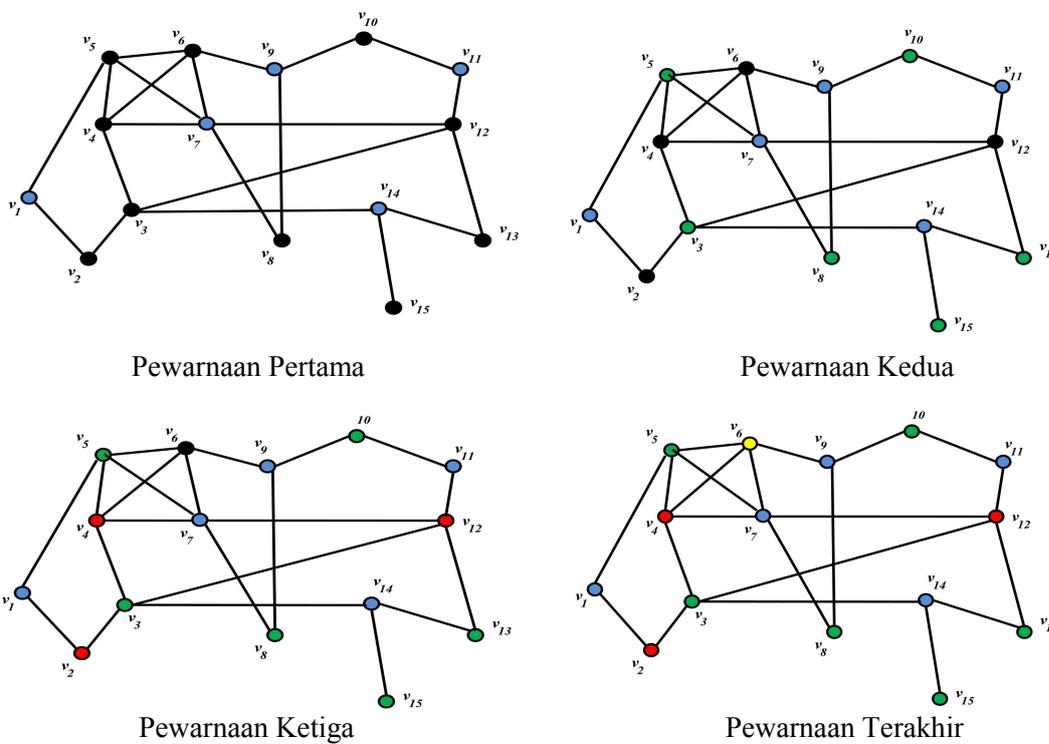
Langkah-langkah penyelesaiannya sebagai berikut:

1. Jumlah simpul graf G pada gambar 3.2 adalah 15. Urutan simpul dari derajat yang tertinggi hingga yang terendah, seperti pada Tabel 1.
2. Karena v_7 mempunyai derajat tertinggi, maka simpul v_7 dapat diwarnai dengan warna biru, kemudian simpul v_9, v_{14}, v_1, v_{11} yang tidak saling *adjacent* dengan v_7 juga diwarnai dengan biru.
3. Selanjutnya mewarnai simpul v_3 yang merupakan simpul dengan derajat tertinggi berikutnya dengan warna hijau dan $v_5, v_8, v_{10}, v_{13}, v_{15}$ yang *adjacent* dengan v_3 juga diwarnai warna hijau.
4. Langkah berikutnya mewarnai simpul v_4 sebagai simpul dengan derajat tertinggi berikutnya dengan warna merah begitu juga dengan simpul v_2 dan v_{12} yang tidak saling *adjacent* dengan v_4 .
5. Simpul terakhir yang belum diwarnai adalah v_6 . Karena simpul ini saling *adjacent* dengan simpul $v_4, v_5,$ dan v_7 maka warna yang digunakan harus berbeda dengan simpul-simpul tersebut. Jadi v_6 diwarnai dengan warna kuning.

Lihat Gambar 5 untuk lebih jelasnya

Tabel 1 Jumlah derajat simpul graf G

Simpul	v_7	v_3	v_4	v_5	v_6	v_{12}	v_9	v_{14}	v_1	v_2	v_8	v_{10}	v_{11}	v_{13}	v_{15}
Derajat Simpul	5	4	4	4	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2	1



Gambar 5 Langkah-langkah pewarnaan simpul graf G dengan Algoritma Welch Powell

PEMBAHASAN

Aplikasi Pewarnaan Simpul pada *Traffic Light* di Persimpangan Jalan

Traffic Light yang tersedia di persimpangan jalan mempunyai beberapa tujuan antara lain menghindari hambatan karena adanya perbedaan arus jalan bagi pergerakan kendaraan, memfasilitasi pejalan kaki agar dapat menyebrang dengan aman dan mengurangi tingkat kecelakaan yang diakibatkan oleh tabrakan karena perbedaan arus jalan. Namun *traffic light* juga memiliki beberapa permasalahan yang perlu diselesaikan, salah satunya pengaturan durasi lampu merah dan hijau. Permasalahan ini dapat dikaji pengaturannya menggunakan prinsip pewarnaan simpul.

Untuk lebih jelasnya berikut adalah langkah-langkah aplikasi pewarnaan simpul pada *traffic light* di persimpangan jalan.

1. Mentransformasikan persimpangan jalan beserta arusnya ke bentuk graf. Simpul merepresentasikan arus dan garis merepresentasikan arus-arus yang tidak boleh

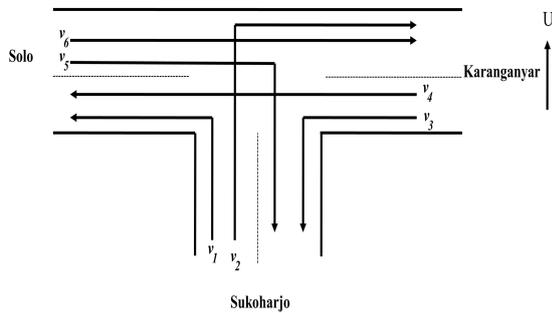
berjalan bersamaan, yang selanjutnya simpul-simpul tersebut saling dihubungkan.

2. Mewarnai setiap simpul pada graf dengan menggunakan algoritma Welch Powell. Selain untuk mengetahui arus mana saja yang bisa berjalan bersamaan, diperoleh juga jumlah bilangan kromatik yang akan bermanfaat pada tahap berikutnya.
3. Menentukan alternatif penyelesaian durasi lampu hijau dan lampu merah menyala dengan siklus waktu tertentu. Hal ini dapat dilakukan dengan membagi satu siklus yang terdiri dari total durasi lampu merah dan lampu hijau menyala dengan bilangan kromatik yang telah diperoleh dari langkah 2, hasil pembagiannya menunjukkan durasi lampu hijau menyala. Adapun durasi siklus waktu pada setiap persimpangan yang diteliti merujuk pada data sekunder dari Dinas Perhubungan Kabupaten Sukoharjo tahun 2014.

Berikut akan dipaparkan penyelesaian kasus pengaturan *traffic light* pada beberapa persimpangan di Sukoharjo.

Simpang 3 Bekonang

Pada Gambar 6 diilustrasikan simpang 3 Bekonang



Gambar 6 Ilustrasi Arus Simpang 3 Bekonang

Keterangan:

- v_1 = arus dari Sukoharjo menuju Solo
- v_2 = arus dari Sukoharjo menuju Karanganyar
- v_3 = arus dari Karanganyar menuju Sukoharjo
- v_4 = arus dari Karanganyar menuju Solo
- v_5 = arus dari Solo menuju Sukoharjo
- v_6 = arus dari Solo menuju Karanganyar

Arus-arus yang *uncompatible* (tidak boleh berjalan bersamaan) adalah

- a. Arus v_2 tidak boleh berjalan bersamaan dengan v_4, v_5, v_6
- b. Arus v_4 tidak boleh berjalan bersamaan dengan v_2, v_5
- c. Arus v_5 tidak boleh berjalan bersamaan dengan v_2, v_4
- d. Arus v_6 tidak boleh berjalan bersamaan dengan v_2

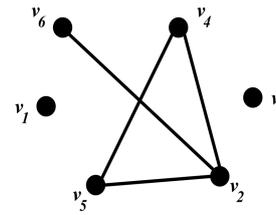
Data *traffic light* Simpang 3 Bekonang dari Dinas Perhubungan Kabupaten Sukoharjo sebagai berikut.

Tabel 2
Data sekunder simpang 3 Bekonang

Kaki simpang	Selatan	Timur	Barat	Total
Merah	46	42	46	134
Hijau	18	22	18	58
Total	64	64	64	192

Langkah-langkah penyelesaian perhitungan *traffic light* di simpang 3 Bekonang sebagai berikut:

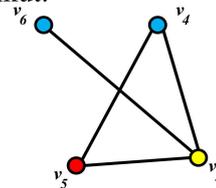
- 1) Mentransformasi simpang 3 Bekonang ke bentuk graf sebagai berikut:



Gambar 7 Graf Simpang 3 Bekonang

Dari transformasi graf di atas diketahui simpul v_1 dan v_3 merupakan simpul asing yaitu simpul yang tidak saling terhubung dengan simpul lain, sehingga arus yang dinyatakan dengan simpul v_1 dan v_3 dapat berlangsung beriringan dengan arus lain atau dapat berlaku terus lampu hijau.

- 2) Mewarnai graf dengan algoritma *Welch-Powell* untuk mencari bilangan kromatik. Dengan menggunakan algoritma Welch Powell dihasilkan pewarnaan graf sebagai berikut:



Gambar 8 Hasil pewarnaan graf pada simpang 3 Bekonang

Dari pewarnaan graf di atas diperoleh bilangan kromatik = 3. Untuk kasus pada simpang 3 Bekonang, simpul v_6 tidak saling *adjacent* dengan simpul v_4 dan v_5 sehingga warna simpul v_6 bisa diseragamkan dengan simpul v_4 atau v_5 . Hal ini akan berpengaruh pada penyelesaian arus yang dapat berjalan secara bersamaan. Penyelesaian arus-arus yang dapat berjalan bersamaan disajikan dalam Tabel 3 berikut.

Tabel 3
Warna simpul graf simpang 3 Bekonang

Warna	Simpul
Kuning	v_2
Biru	v_4, v_6
Merah	v_5, v_6

Dari Tabel 3 di atas dapat dibuat 3 partisi pengaturan lampu, di mana pada partisi pertama, arus v_2 berjalan sendiri, pada partisi kedua, arus v_4 akan berjalan bersama arus v_6 , dan pada Partisi ketiga, arus v_5 akan berjalan bersama arus v_6

- 3) Menentukan alternatif penyelesaian durasi lampu merah dan lampu menyala.

Berdasarkan data sekunder, durasi waktu satu siklus 64 detik, setelah dilakukan pembagian dengan bilangan kromatik = 3, diperoleh durasi lampu hijau menyala yaitu 21.33 detik dan durasi lampu merah menyala yaitu 42.67 detik. Namun untuk v_6 yang dapat berjalan bersamaan dengan v_4 dan v_5 maka durasi lampu hijau akan bertambah menjadi 42.66 detik dan durasi lampu merah menyala berkurang menjadi 21.34 detik. Data *traffic light* baru hasil perhitungan disajikan pada Tabel 4.

Selanjutnya data baru durasi lampu hijau dan merah untuk *traffic light* simpang 3 Bekonang pada Tabel 5.

Tabel 4
Penyelesaian *traffic light* simpang 3 Bekonang

Simpul	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
Merah	0	42.6 7	0	42.6 7	42.6 7	21.3 4
Hijau	6 4	21.3 3	6 4	21.3 3	21.3 3	42.6 6

Tabel 5
Data baru *traffic light* simpang 3 Bekonang

Kaki simpang	Selatan	Timur	Barat	Total
Merah	42.67	42.67	21.34	106.68
Hijau	21.33	21.33	42.66	85.32
Total	64	64	64	192

Berdasarkan durasi lampu merah dan lampu hijau di simpang 3 Bekonang dapat diketahui bahwa data baru hasil penyelesaian pewarnaan simpul dengan algoritma Welch Powell lebih efektif daripada data sekunder dari Dinas Perhubungan Kabupaten Sukoharjo tahun 2014. Berikut disajikan tabel data sekunder dan data baru.

Tabel 6
Data Sekunder dan data baru *traffic light* simpang 3 Bekonang

Kaki Simpang	Data Sekunder		Data Baru	
	Merah	Hijau	Merah	Hijau
Selatan	46	18	42.67	21.33
Timur	42	22	42.67	21.33

Barat	46	18	21.34	42.66
Total	134	58	106.68	85.32

Durasi total lampu hijau menyala dari data sekunder adalah 58 detik, sedangkan dengan pewarnaan simpul durasi total lampu hijau menyala adalah 85.32 detik. Tingkat efektivitasnya yaitu:

$$= \frac{85.32}{58} \times 100\% = 47.10\%$$

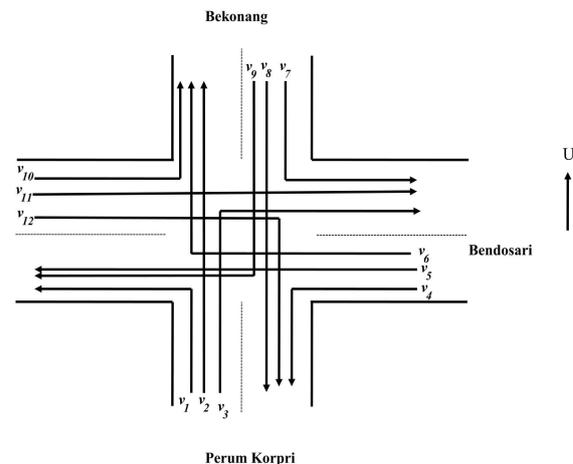
Durasi total lampu merah menyala dari data sekunder adalah 134 detik, sedangkan dengan pewarnaan simpul durasi total lampu merah menyala adalah 106.68 detik. Tingkat efektivitasnya yaitu:

$$= \frac{106.68}{134} \times 100\% = 20.39\%$$

Jadi untuk kasus simpang 3 Bekonang durasi lampu hijau menyala akan meningkat sebesar 47.10 % sedangkan durasi lampu merah menyala dapat dikurangi sebesar 20.39%.

Simpang 4 Gayam

Berikut disajikan ilustrasi simpang 4 Gayam.



Gambar 9. Ilustrasi Arus Simpang 4 Gayam

Keterangan:

- v_1 = arus dari Perum Korpri menuju simpang 5
- v_2 = arus dari Perum Korpri menuju Bekonang
- v_3 = arus dari Perum Korpri menuju Bendosari
- v_4 = arus dari Bendosari menuju Perum Korpri
- v_5 = arus dari Bendosari menuju simpang 5
- v_6 = arus dari Bendosari menuju Bekonang
- v_7 = arus dari Bekonang menuju Bendosari
- v_8 = arus dari Bekonang menuju Perum Korpri
- v_9 = arus dari Bekonang menuju simpang 5

Arus-arus yang *uncompatible* (tidak boleh berjalan bersamaan) adalah

- Arus v_2 tidak boleh berjalan bersamaan dengan $v_5, v_6, v_9, v_{11}, v_{12}$.
- Arus v_3 tidak boleh berjalan bersamaan dengan $v_5, v_6, v_8, v_9, v_{11}, v_{12}$.
- Arus v_5 tidak boleh berjalan bersamaan dengan $v_2, v_3, v_8, v_9, v_{12}$.
- Arus v_6 tidak boleh berjalan bersamaan dengan $v_2, v_3, v_8, v_9, v_{11}, v_{12}$.
- Arus v_8 tidak boleh berjalan bersamaan dengan $v_3, v_5, v_6, v_{11}, v_{12}$.
- Arus v_9 tidak boleh berjalan bersamaan dengan $v_2, v_3, v_5, v_6, v_{11}, v_{12}$.
- Arus v_{11} tidak boleh berjalan bersamaan dengan v_2, v_3, v_6, v_8, v_9 .
- Arus v_{12} tidak boleh berjalan bersamaan dengan $v_2, v_3, v_5, v_6, v_8, v_9$.

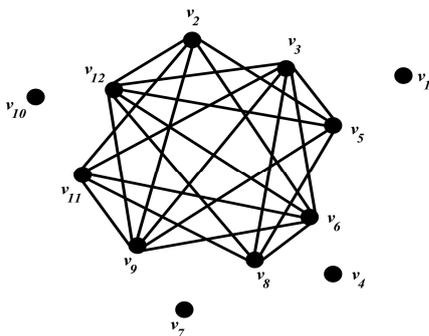
Data *traffic light* di simpang 4 Gayam dari Dinas Perhubungan Kabupaten Sukoharjo sebagai berikut.

Tabel 7
Data sekunder simpang 4 Gayam

Kaki simpang	Utara	Timur	Selatan	Barat	Total
Merah	95	89	99	89	372
Hijau	21	27	17	27	92
Total	116	116	116	116	464

Langkah-langkah penyelesaian perhitungan *traffic light* di simpang 4 Gayam sebagai berikut:

- Mentransformasi simpang 4 Gayam ke bentuk graf sebagai berikut:



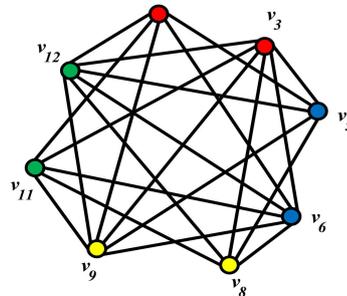
Gambar 10 Graf Simpang 4 Gayam

Dari transformasi graf di atas diketahui simpul v_1, v_4, v_7, v_{10} , merupakan simpul asing, ini berarti arus yang dinyatakan v_1, v_4, v_7, v_{10} dapat berlangsung beriringan dengan arus lain. Jadi untuk arus yang dinyatakan oleh v_1, v_4, v_7, v_{10}

selalu berlaku lampu hijau. Selanjutnya untuk simpul yang tersisa akan diberi warna dengan algoritma Welch Powell.

- Mewarnai graf dengan algoritma Welch Powell untuk mencari bilangan kromatik.

Dengan menggunakan algoritma Welch Powell dihasilkan pewarnaan graf sebagai berikut:



Gambar 11 Hasil pewarnaan graf pada simpang 4 Gayam

Dari pewarnaan graf di atas diperoleh bilangan kromatik = 4 dan arus-arus yang dapat berjalan bersamaan sebagai berikut:

Tabel 8
Warna simpul graf pada simpang 4 Gayam

Warna	Simpul
Merah	v_2, v_3
Biru	v_5, v_6
Kuning	v_8, v_9
Hijau	v_{11}, v_{12}

Dari Tabel 8, dapat dibentuk partisi pengaliran lalu lintas sebagai berikut.

- Partisi pertama, arus v_2 berjalan bersama dengan arus v_3
- Partisi kedua, arus v_5 akan berjalan bersama arus v_6
- Partisi ketiga, arus v_8 akan berjalan bersama arus v_9
- Partisi keempat, arus v_{11} akan berjalan bersama arus v_{12}

- Menentukan alternatif penyelesaian durasi lampu merah dan lampu menyala.

Berdasarkan data sekunder simpang 4 Gayam yang memiliki durasi waktu satu siklus 116 detik, setelah dilakukan pembagian dengan bilangan kromatik = 4, diperoleh durasi lampu hijau menyala yaitu 29 detik dan durasi lampu merah menyala yaitu 87 detik. Data *traffic light* baru hasil perhitungan disajikan pada Tabel 9

Tabel 9. Penyelesaian *traffic light* simpang 4 Gayam

Simpul	v ₁	v ₂	v ₃	v ₄	v ₅	v ₆	v ₇	v ₈	v ₉	v ₁₀	v ₁₁	v ₁₂
Merah	116	29	29	116	29	29	116	29	29	116	29	29
Hijau	0	87	87	0	87	87	0	87	87	0	87	87

Selanjutnya data baru untuk *traffic light* simpang 4 Gayam sebagai berikut.

Tabel10

Data baru *traffic light* simpang 4 Gayam

Kaki Simpan g	Utara	Timur	Selatan	Barat	Total
Merah	87	87	87	87	348
Hijau	29	29	29	29	116
Total	116	116	116	116	464

Berdasarkan durasi lampu merah dan lampu hijau di simpang 4 Gayam dapat diketahui bahwa data baru hasil penyelesaian pewarnaan simpul dengan algoritma Welch Powell lebih efektif daripada data sekunder dari Dinas Perhubungan Kabupaten Sukoharjo tahun 2014. Berikut disajikan tabel data sekunder dan data baru.

Tabel 11

Data Sekunder dan data baru *traffic light* simpang 4 Gayam

Kaki Simping	Data Sekunder		Data Baru	
	Merah	Hijau	Merah	Hijau
Utara	95	21	87	29
Timur	89	27	87	29
Selatan	99	17	87	29
Barat	89	27	87	29
Total	372	92	348	116

Durasi total lampu hijau menyala dari data sekunder adalah 92 detik, sedangkan dengan pewarnaan simpul durasi total lampu hijau menyala adalah 116 detik. Tingkat efektivitasnya yaitu:

$$= \frac{116}{92} \times 100\% = 26.09\%$$

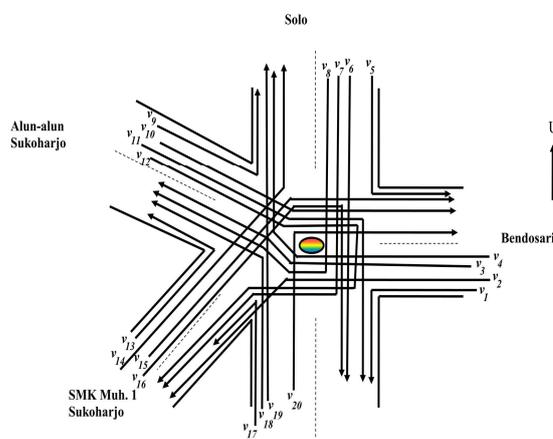
Durasi total lampu merah menyala dari data sekunder adalah 372 detik, sedangkan dengan pewarnaan simpul durasi total lampu merah menyala adalah 348 detik. Tingkat efektivitasnya yaitu:

$$= \frac{348}{372} \times 100\% = 6.45\%$$

Jadi untuk kasus simpang 4 Gayam durasi lampu hijau menyala akan meningkat sebesar 26.09 % sedangkan durasi lampu merah menyala dapat dikurangi sebesar 6.45 %.

Simpang 5 Sukoharjo

Berikut disajikan ilustrasi simpang 5 Sukoharjo



Gambar 12 Ilustrasi Arus *Simpang 5 Sukoharjo*

Keterangan:

- v₁ = arus dari Bendosari menuju Wonogiri
- v₂ = arus dari Bendosari menuju SMK Muh 1 Sukoharjo
- v₃ = arus dari Bendosari menuju Alun-alun Sukoharjo
- v₄ = arus dari Bendosari menuju Solo
- v₅ = arus dari Solo menuju Bendosari
- v₆ = arus dari Solo menuju Wonogiri
- v₇ = arus dari Solo menuju SMK Muh 1 Sukoharjo
- v₈ = arus dari Solo menuju Alun-alun Sukoharjo
- v₉ = arus dari Alun-alun Sukoharjo menuju Solo
- v₁₀ = arus dari Alun-alun Sukoharjo menuju Bendosari
- v₁₁ = arus dari Alun-alun Sukoharjo menuju Wonogiri
- v₁₂ = arus dari Alun-alun Sukoharjo menuju SMK Muh 1 Sukoharjo
- v₁₃ = arus dari SMK Muh 1 Sukoharjo menuju Alun-alun Sukoharjo

v_{14} = arus dari SMK Muh 1 Sukoharjo menuju Solo

v_{15} = arus dari SMK Muh 1 Sukoharjo menuju Bendosari

v_{16} = arus dari SMK Muh 1 Sukoharjo menuju Wonogiri

v_{17} = arus dari Wonogiri menuju SMK Muh 1 Sukoharjo

v_{18} = arus dari Wonogiri menuju Alun-alun Sukoharjo

v_{19} = arus dari Wonogiri menuju Solo

v_{20} = arus dari Wonogiri menuju Bendosari

Dengan menyelesaikan permasalahan di atas dengan pewarnaan graf diperoleh partisi pengaturan lampu lalu lintas seperti pada tabel 12.

Tabel 12

Warna simpul graf pada simpang 5 Sukoharjo

Warna	Simpul
Biru	v_2, v_3, v_4
Ungu	v_6, v_7, v_8
Kuning	v_{10}, v_{11}, v_{12}
Merah	v_{14}, v_{15}, v_{16}
Hijau	v_{18}, v_{19}, v_{20}

Berdasarkan Tabel 12, partisi yang dibuat, yaitu:

- Partisi pertama, arus v_2 berjalan bersama dengan arus v_3 dan v_4
- Partisi kedua, arus v_6 akan berjalan bersama arus v_7 dan v_8
- Partisi ketiga, arus v_{10} akan berjalan bersama arus v_{11} dan v_{12}
- Partisi keempat, arus v_{14} akan berjalan bersama arus v_{15} dan v_{16}
- Partisi kelima, arus v_{18} akan berjalan bersama arus v_{19} dan v_{20}

Berdasarkan data sekunder *traffic light* simpang 5 Sukoharjo durasi waktu satu siklus 131 detik, setelah dilakukan pembagian dengan bilangan kromatik = 5, diperoleh durasi lampu hijau menyala yaitu 26.2 detik dan durasi lampu merah menyala yaitu 104.8 detik. Data *traffic light* baru hasil perhitungan disajikan pada Tabel 13.

Selanjutnya data baru untuk *traffic light* simpang 5 Sukoharjo disajikan pada Tabel 14.

Berdasarkan durasi lampu merah dan lampu hijau di simpang 5 Sukoharjo dapat diketahui bahwa data baru hasil penyelesaian pewarnaan simpul dengan algoritma Welch Powell lebih efektif daripada data sekunder dari Dinas Perhubungan Kabupaten Sukoharjo tahun 2014. Pada Tabel 15 disajikan perbandingan data baru dengan data sekunder.

Durasi total lampu hijau menyala dari data sekunder adalah 110 detik, sedangkan dengan pewarnaan simpul durasi total lampu hijau menyala adalah 131 detik. Tingkat efektivitasnya yaitu:

$$\text{Hijau} = \frac{131}{110} \times 100\% = 19.09\%$$

Durasi total lampu merah menyala dari data sekunder adalah 545 detik, sedangkan dengan pewarnaan simpul durasi total lampu merah menyala adalah 524 detik. Tingkat efektivitasnya yaitu:

$$\text{Merah} = \frac{524}{545} \times 100\% = 3.85\%$$

Jadi untuk kasus simpang 5 Sukoharjo durasi lampu hijau menyala akan meningkat sebesar 19.09 % sedangkan durasi lampu merah menyala dapat dikurangi sebesar 3.85 %.

Tabel 13

Penyelesaian *traffic light* simpang 5 Sukoharjo

Simpul	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}
Merah	0	104.8	104.8	104.8	0	104.8	104.8	104.8	0	104.8
Hijau	131	26.2	26.2	26.2	131	26.2	26.2	26.2	131	26.2
Total	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131

Simpul	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}	v_{16}	v_{17}	v_{18}	v_{19}	v_{20}
Merah	104.8	104.8	0	104.8	104.8	104.8	0	104.8	104.8	104.8
Hijau	26.2	26.2	131	26.2	26.2	26.2	131	26.2	26.2	26.2
Total	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131

Tabel 14 Data baru *traffic light* simpang 5 Sukoharjo

Kaki simpang	Barat Laut	Barat Daya	Timur	Selatan	Utara	Total
Merah	104.8	104.8	104.8	104.8	104.8	524
Hijau	26.2	26.2	26.2	26.2	26.2	131

Total	131	131	131	131	131	655
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabel 15 Data Sekunder dan data baru *traffic light* simpang 5 Sukoharjo

Kaki Simpang	Data Sekunder		Data Baru	
	Merah	Hijau	Merah	Hijau
Barat Laut	109	22	104.8	26.2
Barat Daya	119	12	104.8	26.2
Timur	109	22	104.8	26.2
Selatan	99	32	104.8	26.2
Utara	109	22	104.8	26.2
Total	545	110	524	131

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan penjelasan yang telah diuraikan sebelumnya, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pewarnaan simpul dengan algoritma Welch Powell dapat diaplikasikan untuk menyelesaikan perhitungan durasi waktu pada *traffic light*. Langkah yang ditempuh yaitu dengan mentransformasi persimpangan jalan beserta arusnya ke bentuk graf. Simpul merepresentasikan arus dan garis merepresentasikan arus yang *uncompatible*. Selanjutnya mewarnai simpul pada graf dengan algoritma Welch Powell untuk mengetahui arus yang dapat berjalan bersamaan dan memperoleh bilangan kromatik yang berfungsi untuk menentukan alternatif penyelesaian durasi waktu

traffic light. Berdasarkan durasi lampu merah dan lampu hijau di beberapa persimpangan di Sukoharjo dapat diketahui bahwa data baru hasil penyelesaian pewarnaan simpul dengan algoritma Welch Powell lebih efektif daripada data sekunder dari Dinas Perhubungan Kabupaten Sukoharjo tahun 2014.

2. Penyelesaian perhitungan durasi waktu pada *traffic light* dengan pewarnaan simpul memberikan alternatif hasil yang lebih efektif dibandingkan data sekunder dari Dinas Perhubungan Kabupaten Sukoharjo tahun 2014.

Saran

Penelitian ini dapat dikembangkan dengan menambahkan program komputer agar penyelesaian masalah pewarnaan simpul pada *traffic light* menjadi lebih singkat.

DAFTAR PUSTAKA

- Detty Purnamasari, Muhammad Zidni Iman, & Dessy Wulandari A.P. 2012. "Algoritma Welch-Powell untuk Pengendalian Lampu Lalu Lintas". *UG Jurnal*. 6(03): 26-33.
- Koh Khee Meng, Dong Fengming dan Tay Eng Guan. *Introduction to Graph Theory*. Singapore: World Scientific.
- Jong Jek Siang. 2002. *Matematika Diskrit dan Aplikasinya pada Ilmu Komputer*. Yogyakarta: Andi.
- Joan M. Aldous dan Robin J. Wilson. 1996. *Introduction to Graph Theory*. Practice Hall.
- Munir, Rinaldi. 2005. *Matematika Diskrit*. Bandung: Informatika.
- Richard Johnsonbaugh. 2002. *Matematika Diskrit*. Jakarta: PT Prenhallindo.
- Riwinoto, R. Yugo Kartono Isal. 2010. *Simulasi Optimasi Pengaturan Lampu Lalu Lintas di Kota Depok dengan Menggunakan Pendekatan Greedy Berbasis Graf*. Prosiding Seminar Nasional Sistem dan Informatika 2010, 13 November 13, 2010. Bali.