

APLIKASI ALGORITMA *ANT DISPERSION ROUTING* (ADR) UNTUK PENYELESAIAN MASALAH PENYEBARAN RUTE LALU LINTAS SEBAGAI UPAYA UNTUK MENGURANGI KEMACETAN

Lia Malihah, Rini Marwati, Fitriani Agustina

Departemen Pendidikan Matematika FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia

ABSTRAK: Salah satu metode optimasi yang berhubungan dengan optimasi perutean lalu lintas untuk mencapai keseimbangan jaringan lalu lintas adalah optimasi koloni semut (*Ant Colony Optimization – ACO*). Suatu metode optimasi yang menggunakan metode dasar ACO dengan kombinasi model prediksi lalu lintas dikenal dengan algoritma penyebaran rute semut (*Ant Dispersion Routing – ADR*), objek dari algoritma ini adalah penyebaran rute lalu lintas untuk mencapai keseimbangan jaringan lalu lintas. Kebanyakan algoritma perutean hanya mengejar keseimbangan pengguna (*User Equilibrium – UE*) dan tidak mempertimbangkan dampak dari tindakan pengguna terhadap jaringan lalu lintas sementara algoritma ADR yang merupakan perluasan dari algoritma ACO dikembangkan untuk mencapai keseimbangan pengguna (*UE*) dan keseimbangan sistem (*System Optimum – SO*). Secara umum algoritma ADR terbagi menjadi dua langkah utama yang terpisah yaitu pemangkasan jaringan dan optimasi arus. Hasil yang diperoleh dari algoritma ADR merupakan rekomendasi rute optimal dimana ADR akan mendistribusikan lalu lintas menuju beberapa rute optimal sehingga dapat mengurangi kemacetan.

Kata Kunci : *Ant Colony Optimization (ACO)*, *Ant Dispersion Routing (ADR)*, keseimbangan jaringan lalu lintas, penyebaran rute lalu lintas, rute optimal

PENDAHULUAN

Kemacetan merupakan salah satu masalah lalu lintas yang dihadapi oleh negara berkembang seperti Indonesia dan biasa terjadi di daerah perkotaan yang padat. Dewasa ini kemacetan sudah menjadi bagian dari ciri khas suatu kawasan pusat perkotaan tertentu dikarenakan waktu terjadinya yang rutin terutama pada waktu-waktu puncak seperti yang biasa dikenal dengan jam pergi kantor, jam pulang kantor, akhir pekan dan hari libur.

Banyak dampak yang dihasilkan oleh kemacetan dan bersifat negatif. Ditinjau dari berbagai aspek, kemacetan menimbulkan banyak kerugian baik dari segi materi,

waktu dan tenaga. Seperti dari aspek ekonomi kemacetan menghambat proses produksi dan distribusi sehingga laju perekonomian menjadi terganggu. Dari aspek kesehatan pun kemacetan menyumbangkan dampak negatif yaitu mempengaruhi kondisi fisik dan psikis para pengguna lalu lintas, terlebih lagi bagi mereka yang kemudian melakukan berbagai aktivitas seperti bekerja, belajar dan lain sebagainya.

Terjadinya kemacetan adalah sebagai akibat dari ketidakseimbangan jaringan lalu lintas yang ada, yaitu adanya penumpukan kendaraan yang menyebabkan kepadatan lalu lintas pada suatu jaringan jalan tertentu menjadi tinggi sehingga arus lalu lintas menjadi tersendat bahkan terhenti. Salah satu upaya untuk menyeimbangkan jaringan lalu lintas supaya arus lalu lintas menjadi optimal yaitu melalui penyebaran rute pada kawasan tertentu. Wardrop (1952) (Alves *et al.*, 2010) menyusun keseimbangan jaringan lalu lintas yang dikenalkan oleh Knight (1924), terdiri dari dua prinsip yaitu:

1. Setiap pengemudi dalam jaringan lalu lintas secara tidak kooperatif mencari rute yang lebih menguntungkan dirinya sendiri (sesuai dengan kenyataan yang sering terjadi pada kondisi lalu lintas di sekitar kita). Pada keseimbangan ini tidak ada yang mendorong pengemudi untuk mengubah rute sehingga keadaan ini didefinisikan sebagai keseimbangan pengguna (UE – *User Equilibrium*).
2. Prinsip kedua mengasumsikan adanya pusat pembuat keputusan yang menugaskan atau menunjukkan rute kepada pengemudi. Jika tujuan tercapai maka seluruh pengemudi secara bersama-sama mengoptimalkan pemanfaatan dari jaringan lalu lintas dan rata-rata waktu perjalanan menjadi minimum. Pernyataan ini didefinisikan sebagai sistem optimum (SO - *System Optimum*).

Beragam metode optimasi dalam riset operasi dikenal dengan teknik *mathematical programming*. Metode optimasi yang berhubungan dengan tujuan untuk arus lalu lintas optimal dari keseimbangan lalu lintas, salah satunya adalah optimasi koloni semut (*Ant Colony Optimization* – ACO). Objek dari algoritma ini adalah penyebaran rute lalu lintas untuk mengendalikan keseimbangan jaringan lalu lintas sehingga arus lalu lintas optimal (Alves, 2009; Alves *et al.*, 2010).

Aplikasi ACO tersebar luas dalam kajian lalu lintas seperti simulasi lalu lintas, algoritma perutean dan penghindaran kemacetan. Menurut Alves (2009: 2), kebanyakan algoritma perutean mengejar keseimbangan pengguna atau UE dan tidak mempertimbangkan dampak dari tindakan pengguna terhadap jaringan lalu lintas. Perluasan ACO, dimana memiliki tujuan optimasi rute lalu lintas yang tidak hanya untuk mencapai keseimbangan pengguna (UE) tetapi juga untuk keseimbangan sistem (SO), telah dikembangkan dan kemudian dikenal dengan algoritma penyebaran rute semut (*Ant Dispersion Routing* – ADR).

Algoritma ADR merupakan penggunaan metode dasar ACO dengan kombinasi model prediksi lalu lintas untuk menganalisis dampak keputusan perutean

pada jaringan lalu lintas. Secara umum algoritma ADR terbagi menjadi dua langkah utama yang terpisah yaitu pemangkasan jaringan lalu lintas dan optimasi arus lalu lintas.

Ant System (AS)

Sistem semut (AS) merupakan algoritma optimasi koloni semut (ACO) dasar. Bermula dari pengamatan terhadap perilaku koloni semut dalam pencarian rute dari sarang menuju sumber makanan. Satu hal yang mengejutkan dari pola tingkah laku semut adalah kemampuan dari spesies semut tertentu untuk menemukan apa yang dikatakan ilmuwan sebagai lintasan terpendek. Ahli biologi telah menunjukkan melalui eksperimen bahwa pencarian lintasan terpendek ini terjadi dengan memanfaatkan komunikasi antar semut berdasarkan feromon.

Feromon merupakan zat kimia yang diproduksi oleh semut, dimana melalui feromon ini semut dan koloninya berkomunikasi. Goss *et al.* (1989) (Dorigo dan Stützle, 2004: 2) menyatakan jejak feromon merupakan jenis spesifik dari feromon dimana banyak spesies semut seperti *Lasius niger* atau semut Argentina *Iridomyrmex humilis* menggunakannya untuk menandai lintasan pada tanah, misalkan lintasan dari sarang menuju sumber makanan. Dengan mencium jejak feromon, semut yang mencari makanan dapat mengikuti lintasan menuju makanan yang ditemukan semut sebelumnya yang telah menemukan lintasan tersebut.

Misalkan dalam permasalahan pencarian lintasan terpendek dari dua titik, permasalahan direpresentasikan dalam sebuah jaringan. Permasalahan ini dapat diselesaikan dengan meminimumkan biaya perjalanan dari lintasan antara dua simpul dalam jaringan $G = (V(G), A(G))$, dimana $V(G)$ adalah himpunan simpul dan $A(G)$ adalah himpunan busur. Jaringan tersebut memiliki n simpul. Misalkan panjang lintasan L^a merupakan panjang jarak yang dilalui semut $a = 1, \dots, n_a$ dari simpul awal sampai dengan simpul tujuan. Setiap busur (v_i, v_j) pada jaringan memiliki nilai feromon τ_l .

Dorigo dan Stützle (2004: 70) menyatakan, dalam sistem semut (AS) untuk menginisialisasi jejak feromon adalah dengan menetapkan sebuah nilai yang lebih besar dibandingkan jumlah harapan dari endapan feromon dalam satu iterasi, estimasi kasar untuk nilai tersebut dapat diperoleh dengan menetapkan:

$$\forall (v_i, v_j); \tau_l = \tau_u = \frac{m}{L^m} \quad (1)$$

dengan $m = n_a$ adalah jumlah semut yang ditetapkan pada simpul awal dan L^m merupakan panjang dari lintasan yang dibangun oleh semut dari simpul awal sampai dengan simpul tujuan dimana berasal dari perjalanan yang dilakukan secara acak oleh semut yang menggunakan fungsi jarak tujuan terpendek dan tanpa kendala kapasitas tertentu.

Algoritma dimulai dengan inisialisasi dari n_a semut pada simpul awal dimana semut-semut tersebut memulai perjalanan menuju simpul tujuan. Pada setiap iterasi t , setiap semut memutuskan menuju simpul mana ia akan menuju selanjutnya berdasarkan probabilitas distribusi, berdasarkan Alves (2009: 9) didefinisikan dengan:

$$p_{l_i}(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{l_i}^\alpha(t)}{\sum_{j \in \mathcal{N}_i} \tau_{l_j}^\alpha(t)} & j_i \quad j \in \mathcal{N}_i \\ 0 & u \quad l_i \end{cases} \quad (2)$$

yaitu probabilitas semut dari simpul v_i untuk memilih simpul v_j , dengan \mathcal{N}_i merupakan himpunan dari simpul yang belum dikunjungi dan mungkin dipilih semut, dan simpul-simpul tersebut terhubung dengan simpul v_i . Parameter α digunakan untuk memperoleh pengaruh feromon. Nilai dari parameter α yang semakin meningkat menjadikan bias yang tinggi untuk sisi pada graf dengan feromon tinggi.

Setelah semut mencapai tujuan, lintasan yang telah dilalui dianalisis untuk pengulangan yang mungkin terjadi dengan memeriksa apakah ada simpul yang sama yang dikunjungi dua kali. Jika terjadi, barisan dari sisi-sisi antara simpul yang terulang kemudian dibuang. Semut kemudian kembali menyelidiki langkah tersebut dengan mengendapkan feromon pada sisi yang dipilih. Dorigo dan Stützle, (2004: 72) mendefinisikan bahwa endapan feromon harus berbanding terbalik dengan panjang lintasan perjalanan, dimana fungsi biaya perjalanan selanjutnya diminimumkan. Persamaan endapan feromon semut a pada iterasi t , $\Delta\tau_{l_i}^a(t)$ berdasarkan Alves (2009: 9) adalah:

$$\Delta\tau_{l_i}^a(t) = \frac{1}{L^a(t)} \quad (3)$$

Semut yang menggunakan sisi tertentu dalam perjalanannya mengendapkan feromon dan ditentukan dengan menggunakan persamaan endapan feromon pada sisi tersebut. Berdasarkan Alves (2009: 10) nilai feromon yang baru dapat diperoleh menggunakan perumusan:

$$\tau_{l_i}(t+1) = (1 - \rho_e) \tau_{l_i}(t) + \rho_e \sum_{a=1}^{n_a} \Delta\tau_{l_i}^a(t) \quad (4)$$

Pembaruan nilai feromon pada persamaan (4) selalu dilakukan pada busur setiap kali semut melewatinya, setelah setiap semut mencapai simpul tujuan. Nilai feromon ini kemudian akan mempengaruhi semut yang lain dalam probabilitas pemilihan simpul. Setelah melalui satu iterasi, pembaruan feromon juga dilakukan pada akhir iterasi yaitu setelah seluruh semut menyelesaikan perjalanan dari simpul awal sampai simpul tujuan. Lintasan yang telah dilalui semut akan mempengaruhi nilai feromon pada iterasi selanjutnya.

Endapan feromon $\Delta\tau_l^a(t)$ pada pembaruan nilai feromon akan berdasarkan pada persamaan (3) jika busur (v_i, v_j) yang dilalui merupakan bagian dari lintasan telah ditempuh semut a dari perjalanan awal dan bernilai 0 jika lintasan tidak dilalui semut, dengan ρ_e merupakan laju penguapan feromon dan $0 < \rho_e \leq 1$.

$$\Delta\tau_l^a(t) = \begin{cases} \frac{1}{L^a(t)} & \text{jika } (v_i, v_j) \text{ merupakan bagian dari lintasan } a \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (5)$$

Menurut Dorigo dan Stützle (2004: 72) parameter laju penguapan digunakan untuk menghindari akumulasi tidak terbatas dari jejak feromon dan memungkinkan algoritma untuk mengabaikan keputusan kurang baik yang sebelumnya telah diambil. Laju penguapan tersebut menjadikan semut tidak konvergen terlalu cepat dan tidak banyak menghabiskan banyak waktu untuk menjelajahi graf. Hanya sisi yang menerima endapan feromon baru yang menguap, sehingga algoritma tidak akan konvergen pada hasil yang sub-optimal. Jika ρ_e menuju 0, maka hampir tidak terjadi penguapan dan semut tidak dapat mempengaruhi satu sama lain untuk menemukan lintasan terpendek sebagaimana permasalahan yang akan dicapai, karena tidak terjadi pengendapan feromon, sementara jika ρ_e mendekati 1, pada setiap iterasi hampir seluruh feromon menguap dan semut memutar pemilihan simpul selanjutnya semata-mata berdasarkan pada langkah iterasi terakhir (Alves, 2009: 10).

Dasar perencanaan rute adalah berdasarkan pada penyelesaian permasalahan lintasan terpendek untuk jaringan jalan. Ketika ACO digunakan untuk perencanaan lalu lintas, sebuah graf berarah digunakan untuk merepresentasikan jaringan jalan dan graf ini digunakan untuk menemukan lintasan terpendek antara simpul. Sisi pada graf merepresentasikan jalan dan simpul merepresentasikan jalan memutar, persimpangan dan lain-lain. (Burrows *et al.*, 2012: 14)

Dalam Burrows *et al.* (2012: 14) dijelaskan, perutean akan memilih lintasan yang paling efisien yaitu lintasan yang tidak padat. Lintasan yang efisien tidak akan padat karena probabilitas semut untuk memilih sisi-sisi pada lintasan tersebut berada dibawah batas tertentu, sehingga algoritma semut akan mengarahkannya menuju beberapa lintasan.

Keseimbangan Jaringan Lalu Lintas

Untuk memperoleh rute optimal dalam keseimbangan pengguna (UE) dan sistem optimum (SO), maka digunakan sebuah biaya perjalanan yang diberikan untuk suatu rute. Terdapat berbagai macam cara untuk menyatakan biaya perjalanan untuk sebuah rute seperti waktu perjalanan, panjang rute, kepadatan lalu lintas pada rute atau pertimbangan kombinasinya dan sebagainya. Sebagaimana dalam Alves (2009), komponen utama dari biaya perjalanan adalah waktu perjalanan. Oleh sebab

itu, waktu perjalanan menjadi pertimbangan, karena waktu perjalanan merupakan faktor yang lebih banyak dirugikan dalam kemacetan lalu lintas, sehingga dalam optimasi rute lalu lintas, waktu perjalanan ini menjadi minimal.

Objek dalam keseimbangan lalu lintas diterjemahkan ke dalam keseimbangan dinamis antara keseimbangan pengguna (UE) dan sistem optimum (SO) yang dikuantifikasi dengan fungsi biaya perjalanan. Alves (2009: 3) menjelaskan bahwa keseimbangan ini haruslah memenuhi kondisi berikut:

A : menghindari *stuck*, dimana keadaan arus lalu lintas berhenti total dengan menjaga arus pada lalu lintas jalur sempit berada di bawah kapasitas.

B : perbandingan waktu perjalanan antara rute tercepat dengan rute terlambat harus berada di bawah batas tertentu.

C : rute tercepat harus memuat kendaraan sebanyak mungkin di bawah suatu batasan yang ditetapkan oleh kondisi A dan kondisi B.

γ_r merupakan waktu yang ditempuh untuk perjalanan sebuah trayek dari suatu jalan r . Pada keadaan statis, waktu perjalanan ditentukan dengan cara membagi panjang dari jalan dengan rata-rata kecepatan kendaraan pada jalan tersebut ($t = \frac{x}{v}$). Alves (2009: 11) mendefinisikan waktu perjalanan sebagai berikut:

$$\gamma_r = \frac{L_r}{V_r(\rho_r)} \quad (6)$$

dimana, L_r merupakan panjang total dari jalan r dan $V_r(\rho_r)$ merupakan rata-rata kecepatan kendaraan, V_r , berhubungan dengan kepadatan lalu lintas ρ_r pada jalan r .

Terdapat kepadatan di luar sistem lalu lintas yang tidak stabil, yang dihasilkan dari lalu lintas dalam kemacetan yaitu $\rho_{c,r}$. Alves *et al.* (2010) menyatakan fungsi biaya waktu perjalanan yang diperbaharui haruslah berdasar pada persamaan (6), didefinisikan:

$$\gamma_r = f_{\gamma}(\rho_r) = \begin{cases} \frac{L_r}{V_r(\rho_r)} + M \exp\left(-\frac{(\rho_r - \rho_{c,r})^2}{\epsilon}\right) & \text{jika } \rho_r \leq \rho_{c,r} \\ \frac{L_r}{V_r(\rho_r)} + M & \text{jika } \rho_r > \rho_{c,r} \end{cases} \quad (7)$$

dengan M menyatakan konstanta positif dan $M \in \mathbb{N}$, $\rho_{c,r}$ menyatakan kepadatan kritis untuk jalan r serta ϵ menyatakan koefisien kecuraman dari fungsi kepadatan lalu lintas terhadap waktu perjalanan, dimana ϵ yang kecil diperoleh dari fungsi yang curam.

Berdasarkan Alves (2009), nilai dari parameter M dan ϵ pada fungsi biaya perjalanan dapat ditetapkan berdasarkan pada tujuan yang diinginkan untuk memenuhi algoritma ADR, salah satunya untuk menghindari kemacetan yang mungkin terjadi, dengan menetapkan suatu batasan yang tegas. Nilai M yang semakin besar akan memberikan akurasi yang tinggi namun memunculkan risiko

yang tinggi pula yaitu ketidakstabilan sistem. Nilai dari ϵ yang kecil merepresentasikan kecuraman yang mendekati nilai kritis dari kepadatan lalu lintas sedangkan nilai ϵ yang besar akan meningkatkan biaya waktu perjalanan yang dimaksud pada persamaan (7). Batasan nilai yang baik untuk M adalah $[2, 10]$ dan batasan nilai yang baik untuk ϵ adalah $[0,1; 0,5]$ (Alves, 2009).

Keseimbangan pengguna (UE) mengasumsikan seluruh pengemudi memilih rutenya (untuk setiap keadaan) yang meminimalkan biaya waktu perjalanan mereka. Alves *et al.* (2010) menyatakan φ_l sebagai biaya waktu perjalanan dari rute l antara asal dan tujuan yang tetap, dimana merupakan jumlah dari biaya waktu perjalanan masing-masing jalan yang berada dalam rute tersebut, didefinisikan,

$$\varphi_l = \sum_{r \in \mathcal{R}_l} \gamma_r \quad (8)$$

dengan \mathcal{R}_l merupakan himpunan dari jalan-jalan dalam rute l . Oleh karena itu, proses keputusan untuk setiap pengemudi direpresentasikan sebagai optimasi dari fungsi J_U^* , yaitu fungsi biaya waktu perjalanan untuk keseimbangan pengguna berikut:

$$J_U^* = \min \varphi_l \quad (9)$$

Keseimbangan sistem (SO) dapat tercapai apabila rata-rata biaya waktu perjalanan dari pengemudi yang menggunakan jaringan lalu lintas tersebut minimum. Misalkan n_k adalah jumlah kendaraan pada rute l dan n_r merupakan jumlah rute dalam jaringan lalu lintas, proses keputusan dalam SO merupakan optimasi dari fungsi J_S^* , yang merupakan fungsi biaya waktu perjalanan untuk sistem:

$$J_S^* = \min \frac{\sum_{l=1}^{n_r} \varphi_l \cdot n_k}{\sum_{l=1}^{n_r} n_{kl}} \quad (10)$$

(Alves *et al.*, 2010).

Ant Dispersion Routing (ADR)

Algoritma ADR tersusun dari dua langkah utama yang terpisah, yaitu pemangkasan jaringan dan optimasi arus. Prosedur pemangkasan jaringan memuat algoritma rute semut dasar yang menemukan banyak lintasan dan biaya waktu perjalanan dari lintasan minimum, berdasarkan pada kondisi lalu lintas. Prosedur optimasi arus memuat penentuan distribusi arus yang tepat pada lintasan tersebut sedemikian sehingga kondisi jaringan lalu lintas keseluruhan (yang dinyatakan dengan fungsi biaya waktu perjalanan) dioptimalkan.

Sejalan dengan itu, AS menjadi dasar untuk algoritma ADR dan didesain sehingga konvergen ke solusi terbaik, dimana pada masalah perutean bersesuaian dengan rute dengan biaya perjalanan minimum. Pada ADR, solusi yang dihasilkan

tidak berdasarkan karena konvergen ke sebuah solusi tertentu dengan banyaknya jumlah semut yang menggunakannya namun berdasarkan pada banyaknya solusi yang dibangun oleh semut. Nilai feromon pada solusi tersebut meningkat sampai seluruh semut menggunakannya (Alves, 2009: 12).

Pemangkasan Jaringan

Pada prosedur pemangkasan jaringan, algoritma secara garis besar mengikuti struktur dari sistem semut (AS) yang telah dijelaskan. Pada tahap awal, nilai feromon pada semua jalan ditetapkan dengan nilai awal yang kecil. Fungsi probabilitas dari persamaan (2) berubah, dimana notasi yang digunakan dalam ADR menyesuaikan agar interpretasi dari fungsi sesuai. Parameter α yang digunakan sesuai dengan nilai parameter baik yang ditetapkan Dorigo dan Stützle (2004: 71), yaitu $\alpha = 1$. Fungsi probabilitas untuk pemilihan jalan yang akan dilewati selanjutnya dari jalan r menuju jalan r' berdasarkan Alves *et al.* (2010) adalah:

$$p_{r,r'} = \begin{cases} \frac{\tau_{r'}}{\sum_{j \in \mathcal{N}_r} \tau_j} & \text{jika } r' \in \mathcal{N}_r \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (11)$$

dengan $\tau_{r'}$ merupakan nilai feromon pada jalan r' dan \mathcal{N}_r merupakan himpunan jalan yang terhubung dengan jalan r pada persimpangan. Seluruh semut secara iteratif membuat keputusan mengenai jalan mana yang akan dilalui melalui persamaan (11), dalam kaitannya untuk menemukan rute dalam jaringan.

Nilai feromon awal τ_0 dapat juga mengikuti aturan dalam AS sebagaimana yaitu:

$$\forall r; \tau_r = \tau_0 = \frac{m}{\varphi_m} \quad (12)$$

dimana $m = n_{se}$ yang ditetapkan pada inisialisasi algoritma ADR, yaitu jumlah semut pada simpul awal dan φ_m merupakan biaya waktu perjalanan minimum yang diperoleh berdasarkan rute yang dibangun oleh semut dari simpul awal sampai dengan simpul tujuan dimana berasal dari perjalanan yang dilakukan secara acak oleh semut yang menggunakan fungsi biaya waktu perjalanan tercepat dan tanpa kendala kapasitas tertentu.

Setelah seluruh semut menemukan rute dengan menyelesaikan perjalanan dari simpul awal sampai simpul tujuan, kemudian seluruh rute yang telah dilalui dievaluasi untuk mendapatkan rute tercepat yang akan digunakan dalam proses optimasi arus, yaitu melalui perhitungan endapan feromon yang dihasilkan. Hal ini dilakukan dengan menghitung biaya waktu perjalanan φ_i pada setiap rute i berdasarkan kepadatan lalu lintas untuk setiap jalan r , yaitu ρ_r . Selanjutnya biaya waktu perjalanan γ_r untuk setiap jalan r dan biaya waktu perjalanan φ_i untuk setiap rute i dihitung menggunakan persamaan (7) dan persamaan (8).

Karena endapan feromon dalam jaringan jalan bersesuaian dengan biaya waktu perjalanan, pada akhirnya algoritma perutean menambahkan endapan feromon tersebut ke dalam rute, yang diidentifikasi sebagai rute tercepat $i = 1, 2, \dots, n_i$ dan juga menetapkan seluruh nilai feromon dengan 0 untuk jalan yang bukan bagian dari rute tercepat tersebut. Jika nilai feromon pada rute ditetapkan dengan 0, maka jalan-jalan pada rute menjadi tidak terlihat untuk semut. Jadi, pemangkasan jaringan juga akan mengurangi penjelajahan semut yang tidak perlu pada rute-rute yang tidak akan dipilih.

Endapan feromon pada setiap rute merupakan invers dari biaya pada rute itu sendiri (Alves, 2009: 13) yaitu:

$$\Delta\tau_i = \frac{1}{\varphi_i} \quad (13)$$

Berdasarkan endapan feromon yang dihasilkan semut pada perjalanannya, maka nilai feromon baru berdasarkan Alves *et al.* (2010) adalah:

$$\tau_r \leftarrow (1 - \rho_e) \tau_r + \rho_e \sum_{i \in \mathcal{J}} \Delta\tau_i, \forall r; \exists i \in \mathcal{J}; r \in \mathcal{R}_i \quad (14)$$

dengan ρ_e adalah laju penguapan feromon dan \mathcal{J} adalah himpunan jalan-jalan yang membangun rute-rute yang ditemukan oleh semut.

Pembaruan nilai feromon ini dilakukan oleh setiap semut setelah mereka menyelesaikan perjalanannya dari simpul awal menuju simpul tujuan. Algoritma perutean sederhana ini mentransformasi jaringan lalu lintas menjadi jaringan tereduksi yang hanya memuat rute yang lebih disukai dan dipilih, yang selanjutnya akan digunakan pada bagian optimasi arus dalam algoritma ADR.

Optimasi Arus

Algoritma ADR selanjutnya memproses optimasi distribusi dari arus lalu lintas pada jaringan tereduksi yang dihasilkan pada bagian pemangkasan jaringan. Keberangkatan yang jelas ditentukan dari sistem semut (AS) ketika dimaksudkan untuk optimasi arus, karena jika AS konvergen, maka selalu konvergen hanya untuk satu rute optimal. Keadaan ini terjadi oleh karena kebanyakan semut menggunakan sebuah rute yang kemudian rute tersebut menjadi rute yang menarik minat semut dengan endapan feromonnya.

Optimasi dari distribusi arus adalah untuk penggunaan jaringan supaya lebih baik dimana tidak semata-mata untuk mencari satu rute optimal. Endapan feromon pada ADR tidak berdasarkan pada banyaknya semut yang menggunakan rute tersebut melainkan berdasarkan pada jumlah solusi dari seluruh semut. Oleh karena itu, fungsi endapan feromon harus menggabungkan pernyataan kondisi keseimbangan yang telah dijelaskan. Fungsi endapan feromon memuat biaya waktu

perjalanan dari rute φ_l dan biaya waktu perjalanan dari jaringan Ω (Alves, 2009: 14).

Sebagaimana pada prosedur pemangkasan jaringan, pada prosedur optimasi arus, sasaran semut dalam mencari solusi terbaik adalah berdasarkan pada fungsi probabilitas yang telah didefinisikan sebelumnya. Alves *et al.* (2010) menjelaskan bahwa jumlah semut kemudian dikonversi ke dalam jumlah kendaraan sehingga kepadatan dapat ditentukan dengan tepat berdasarkan model lalu lintas yang digunakan dalam ADR.

Misalkan $n_{k,l}$ adalah jumlah kendaraan yang menggunakan rute l , $n_{s,l}$ adalah jumlah semut yang menggunakan rute l . Jumlah total kendaraan dinotasikan dengan n_k dan jumlah total semut dinotasikan dengan n_s . Banyaknya kendaraan yang menggunakan setiap rute l berdasarkan Alves (2009: 14) adalah:

$$n_{k,l} = n_k \frac{n_{s,l}}{n_s} \quad (15)$$

Model lalu lintas berdasarkan pada data yang ada, yang digunakan dalam ADR, dapat menghitung kepadatan pada setiap jalan dalam jaringan. Berdasarkan Alves (2009: 14), dengan menggunakan arus masuk pada jaringan, kepadatan $\rho_{a,r}$ secara teoritis diprediksi dari algoritma ADR adalah:

$$\rho_{a,r} = \frac{n_{s,r} q_{l,o}}{\lambda_r V(\rho_c)} \quad (16)$$

dengan $n_{s,r}$ menyatakan banyaknya semut yang menggunakan jalan r , $q_{l,o}$ menyatakan arus dari simpul o , λ_r menyatakan banyaknya lajur pada jalan r dan $V(\rho_c)$ menyatakan kecepatan rata-rata kendaraan, V_r , berhubungan dengan kepadatan lalu lintas ρ_c pada jalan r .

Kepadatan pada setiap jalan berdasarkan ADR, $\rho_{a,r}$, digunakan untuk menghitung fungsi biaya waktu perjalanan dari persamaan (7) yaitu,

$$Y_r = f_Y(\rho_{a,r}) \quad (17)$$

Berdasarkan persamaan (17), dapat diperoleh nilai dari fungsi biaya waktu perjalanan φ_l untuk setiap rute l , yang merupakan jumlah dari seluruh biaya waktu perjalanan dari setiap jalan dalam rute. Biaya jaringan Ω dapat dihitung sebagai rata-rata biaya seluruh pengemudi dalam jaringan yang tereduksi berdasarkan pada bagian pemangkasan jaringan (Alves, 2009: 15) yaitu:

$$\Omega = \frac{\sum_{l=1}^{n_l} \varphi_l \cdot n_{k,l}}{\sum_{l=1}^{n_l} n_{k,l}} \quad (18)$$

dimana n_l adalah banyaknya rute tercepat dari jaringan tereduksi hasil pemangkasan jaringan.

Berdasarkan kondisi keseimbangan yang telah dijelaskan sebelumnya, kondisi A dipenuhi melalui persamaan fungsi biaya waktu perjalanan τ_i serta kondisi B dan C direpresentasikan melalui kerangka berikut, dimana perbandingan antara rute tercepat dan rute terlambat berada pada batas tertentu dan menggunakan secara penuh rute tercepat, melalui persamaan endapan feromon yang baru yang berbeda dengan persamaan endapan feromon pada ACO (Alves *et al.*, 2010), yaitu:

$$\Delta\tau_i = \frac{1}{\varphi_i} + \frac{W}{\Omega} \quad (19)$$

Dengan W adalah faktor tertimbang. Persamaan (19) merupakan pengganti persamaan endapan feromon, yang menyatakan minimasi dari biaya waktu perjalanan, persamaan tersebut menyatakan minimasi dari selisih antara biaya waktu perjalanan, yaitu biaya dari setiap rute φ_i dan biaya jaringan Ω . Persamaan endapan feromon baru di atas merupakan jumlah tertimbang dari invers dari komponen-komponen tersebut.

Meminimasi selisih antara biaya konstan jaringan Ω dan biaya dari setiap rute φ_i dirumuskan dengan:

$$\min_{i = 1, 2, \dots, n_i} |\varphi_i - \Omega| \quad (20)$$

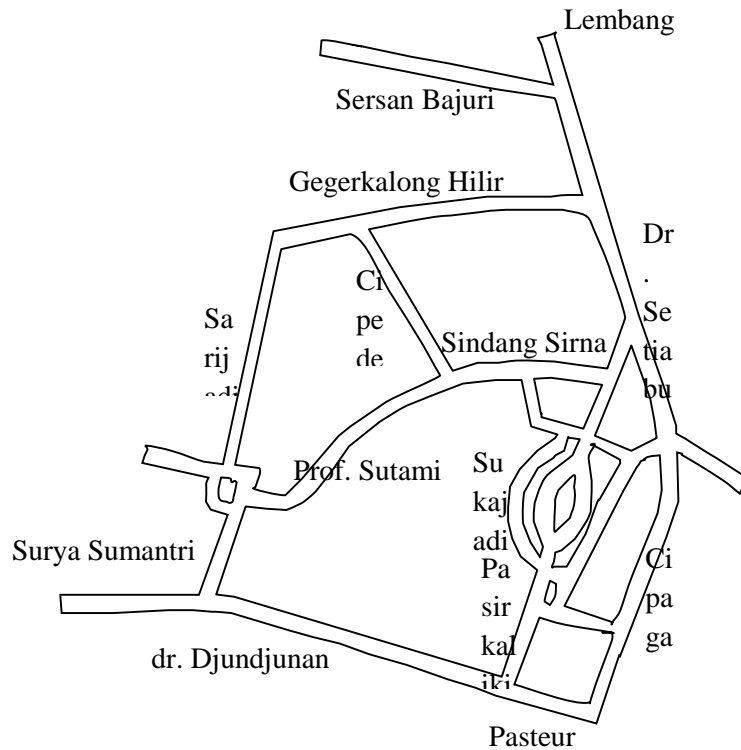
Akan mencapai minimum jika $\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_{n_i} = \Omega$, yaitu ketika biaya waktu perjalanan pada seluruh rute sama. Selisih biaya waktu perjalanan pada persamaan (20) supaya mencapai minimum, maka harus dipilih $W = -1$.

Namun jika tidak diinginkan biaya waktu perjalanan pada seluruh rute tepat sama, tapi memiliki bias tertentu terhadap rute terpendek, berdasarkan Alves *et al.* (2010) harus dipilih $-1 \leq W < 0$. Penetapan W adalah berdasarkan pada batas yang ingin ditetapkan untuk perbandingan antara rute dengan biaya waktu perjalanan paling besar dengan rute dengan biaya waktu perjalanan paling kecil. Misalkan jika diinginkan perbandingan antara biaya waktu perjalanan berada diantara 5% sampai dengan 10%, maka bobot W haruslah mendekati -1 , untuk perbandingan yang besar sekitar 20% bobot W haruslah menuju 0 (Alves, 2009: 16). Langkah terakhir dari algoritma ADR adalah mengulang persamaan nilai feromon baru (14).

Penerapan ADR Sebagai Upaya untuk Mengurangi Kemacetan

Pesona pariwisata di kota Bandung mengundang banyak wisatawan baik dari dalam kota maupun dari luar kota. Dengan tingginya tingkat kedatangan pengunjung menuju tempat-tempat wisata di kota Bandung, sementara kapasitas jalan yang menampung tidak bertambah, salah satunya menyebabkan kemacetan. Kemacetan menjadi permasalahan penting transportasi yang dihadapi kota Bandung. Kelancaran

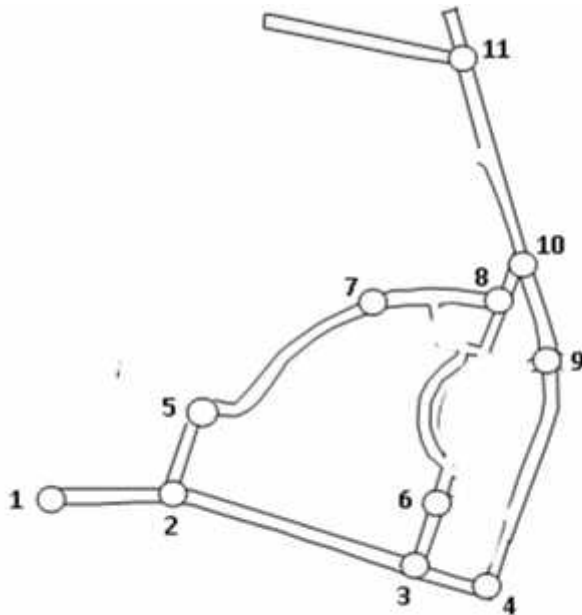
transportasi akan turut menunjang perbaikan kualitas fungsi ekonomi kota Bandung (LPPM ITB, 2012).



Gambar 1. Peta Jaringan Jalan Pasteur-Setiabudhi

Titik kemacetan lalu lintas kota Bandung semakin hari semakin bertambah, terutama pada akhir pekan pada lalu lintas menuju kawasan wisata. Kendaraan roda empat dari luar kota maupun dalam kota mendominasi kemacetan yang terjadi pada jalur wisata pada akhir pekan.

Salah satu titik tujuan wisata kota Bandung adalah kawasan Setiabudhi dimana dari kawasan ini merupakan akses untuk menuju kawasan wisata yang berada di daerah Sersan Bajuri, Lembang dan sekitarnya. Serta salah satu titik kedatangan yang terdekat dengan kawasan Setiabudhi adalah pintu tol Pasteur. Oleh karenanya dalam pembahasan mengenai penerapan algoritma ADR sebagai upaya untuk mengurangi kemacetan, penulis mengambil permasalahan kemacetan yang sering terjadi pada lalu lintas wisata Pasteur-Setiabudhi, terutama kemacetan pada akhir pekan.



Gambar 4.2 Rute Perjalanan Pasteur-Setiabudhi

Pada lalu lintas wisata Pasteur-Setiabudhi, sebagaimana dalam peta wisata kota Bandung, terdapat beberapa rute yang menghubungkan simpul awal, dalam hal ini pintu tol Pasteur, menuju simpul tujuan yaitu kawasan Setiabudhi. Namun yang akan menjadi fokus permasalahan dalam skripsi ini adalah rute dengan penyesuaian data lalu lintas yang diperoleh dari Dinas Perhubungan Kota Bandung tahun 2012, sehingga ada beberapa rute yang ada pada peta wisata, yang tidak disertakan untuk perhitungan untuk menjaga kesesuaian dengan kondisi lalu lintas yang dimiliki dinas terkait (lihat Gambar 2) sehingga terdapat tiga rute dari kawasan Pasteur menuju kawasan Setiabudhi, yaitu rute yang melalui jalan Surya Sumantri, melalui jalan Pasirkaliki-Sukajadi dan melalui jalan Cipaganti.

Data pada Tabel 1 berikut adalah berdasarkan model prediksi lalu lintas yang digunakan oleh Dinas Perhubungan Kota Bandung yang diperoleh dari pemodelan menggunakan *software* SATURN.

Tabel 1. Data Lalu Lintas Tahun 2012 Setiap Jalan pada Rute Perjalanan Pasteur-Setiabudhi

Tabel 1. Data Lalu Lintas Tahun 2012 Setiap Jalan pada Rute Perjalanan Pasteur-Setiabudhi

No.	Jalan	Arus (kend/jam)	Kapasitas (kend/jam)	Kecepatan (km/jam)	Kepadatan (kend/km)
1	Cipaganti	3.837,31125	3.135	11,905	1.555,535717
2	dr. Djundjuran	6.872,066364	5.700	7,246363636	3.184,34141
3	Pasirkaliki	3.061,29	3.136	28,35	107,9820106
4	Pasteur	5.842,58875	7.529	30,06	648,5851426
5	Setiabudhi	7.581,997667	5.700	10,82733333	5.982,135735
6	Sukajadi	3.843,598571	3.136	6,803809524	1.935,765094
7	Surya Sumantri	2.491,16	1.300	0,805	4.393,940333
8	Prof. Dr. Ir. Sutami	2.452,121667	2.755	16,80666667	316,2754359
9	Sindang Sirna	2.664,661429	2.755	16,18428571	1.327,662563

Sumber: Dinas Perhubungan, 2012

Algoritma ADR pada tahap pemangkasan jaringan menghasilkan dua rute tercepat yang dioptimasi oleh 100 semut dengan waktu perjalanan pada masing-masing rute ($\varphi_i (s)$) ada pada kolom yang bersesuaian, persentase penggunaan untuk ketiga rute sebagai berikut:

Tabel 2. Penggunaan Setiap Rute dengan Algoritma ADR Menggunakan 100 Semut

	R_1	R_2	R_3
$\varphi_i (s)$	3.859,816 s	4.042,411 s	7.496,513 s
Penggunaan Rute (%)	81%	12%	7%

Rute pertama dan kedua merupakan dua rute tercepat yang dihasilkan dari perjalanan 100 semut pada tahap pemangkasan jaringan yang kemudian kedua rute ini akan dioptimasi arusnya agar kepadatan serta waktu perjalanannya menjadi optimal sehingga keseimbangan lalu lintas pada jaringan yang memuat rute perjalanan Pasteur-Setiabudhi tercapai.

Hasil yang diperoleh berdasarkan langkah optimasi arus dengan iterasi maksimum sebesar 10 pada algoritma ADR adalah rute yang disebar untuk mencegah terjadinya penumpukan kendaraan pada satu rute optimal saja. Dengan asumsi bahwa seluruh kendaraan yang keluar dari pintu tol Pasteur pada akhir pekan

pada tahun 2012 (kendaraan golongan I, kendaraan roda 4 termasuk bis pariwisata) yaitu sebanyak 28.529 kendaraan melakukan perjalanan wisata menuju kawasan Setiabudhi dan diasumsikan pula arus yang masuk menuju jalan dr. Djundjunan sebesar 6.872,0664 kendaraan/jam merupakan arus yang akan memasuki jaringan (rute perjalanan Pasteur-Setiabudhi), serta diinginkan perbandingan antara rute tercepat dengan rute terlambat berada di sekitar 5-10%, maka hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 3.

Berdasarkan Tabel 3. kondisi penyebaran arus optimal untuk mengurangi kemacetan adalah pada iterasi ke 6 dimana hasil yang diperoleh adalah banyaknya kendaraan yang melalui rute 2 atau rute yang melalui jalan Sukajadi lebih banyak dibandingkan dengan rute 1 yang melewati jalan Cipaganti. Pada kondisi ini dikatakan mencapai keseimbangan dikarenakan jumlah kendaraan tidak banyak yang menggunakan rute tercepat yang jika terjadi justru akan menyebabkan kemacetan. Oleh karena itu rekomendasi rute untuk perjalanan wisata Kota Bandung adalah melalui kedua rute tersebut bergantung pada arus serta jumlah kendaraan yang berasal dari pintu tol Pasteur.

Jika arus yang keluar dari pintu tol Pasteur besar, maka kondisi B pada kondisi keseimbangan yang telah dijelaskan, yaitu perbandingan antara rute tercepat dengan rute terlambat berada di bawah batasan yang ditetapkan (φ_m / φ_m) menjadi tidak penting karena pada algoritma diabaikan dan algoritma akan menyebarkan rute dengan menghindari kemacetan yaitu mengarahkannya menuju rute dengan waktu yang lebih lambat supaya arus optimal dan keseimbangan tercapai. Pada kondisi ini juga, jika arus yang menuju jaringan tinggi maka algoritma akan mengurangi kemacetan dan tidak akan mengindahkan kondisi C, namun arus dalam jaringan menjadi optimal. Dan, jika algoritma mengarahkannya menuju rute tercepat seperti yang ditetapkan pada kondisi C yaitu, rute tercepat memuat kendaraan lebih banyak di bawah batasan kondisi A dan B, maka kemacetan akan terjadi.

Tabel 3. Optimasi Arus Sebanyak 10 Iterasi

Iterasi	n_k (%) ¹	n_k (%) ²	φ_1 (s)	φ_2 (s)	Ω (s)	φ_2 / φ_1
1	50	50	2.199,3916	2.858,7287	2.529,0601	1,2998
2	50	50	2.199,3916	2.858,7287	2.529,0601	1,2998
3	50	50	2.199,3916	2.858,7287	2.529,0601	1,2998
4	50	50	2.199,3916	2.858,7287	2.529,0601	1,2998
5	50	50	2.199,3916	2.858,7287	2.529,0601	1,2998
6	49	51	2.192,5289	2.878,7781	2.542,5160	1,3129
7	1	99	1.863,1199	3.841,1507	3.821,3704	2,0617
8	100	0	2.542,5259	0	2.542,5259	0
9	100	0	2.542,5259	0	2.542,5259	0
10	100	0	2.542,5259	0	2.542,5259	0

Kondisi masing-masing rute berdasarkan hasil perutean optimal adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Banyaknya Kendaraan pada Setiap Rute

	\mathcal{R}_1	\mathcal{R}_2
φ_i (s)	2.192,5289 s	2.878,7781 s
n_k ⁱ	13.979	14.550

\mathcal{R}_1 adalah rute pertama yang merupakan rute yang melalui jalan Cipaganti, merupakan rute dengan waktu perjalanan sebesar 2192,5289 s dan jumlah kendaraan yang melaluinya sebanyak 13.979 kendaraan dari total jumlah kendaraan yang diasumsikan melakukan perjalanan dalam jaringan. \mathcal{R}_2 adalah rute kedua, merupakan rute yang melalui jalan Sukajadi memiliki waktu perjalanan sebesar 28,7781 s dan jumlah kendaraan yang melaluinya sebanyak 14.550 kendaraan.

Perutean optimal menyebarkan arus lalu lintas dari titik keberangkatan pintu tol Pasteur menuju kedua rute tersebut yang dianggap merupakan dua rute tercepat dibandingkan rute lainnya dalam jaringan. Hasil penyebaran rute menghasilkan arus yang memasuki jaringan sebesar 6.872,0664 kendaraan/jam tersebar menuju kedua rute masing-masing rute pertama dan kedua sebesar 3.504,7538 kendaraan/jam dan 3.367,3126 kendaraan/jam. Kedua rute juga merupakan rekomendasi rute yang dapat dipilih untuk melakukan perjalanan wisata dari pintu tol Pasteur menuju kawasan

Setiabudhi. Waktu perjalanan pada kedua rute ini lebih baik dibandingkan waktu perjalanan sebelum menggunakan algoritma ADR yaitu masing-masing sebesar 3859,816 s dan 4042,411 s.

Pada langkah pertama dalam algoritma ADR, yaitu langkah pemangkas jaringan menunjukkan bahwa algoritma ini mengakomodasi keseimbangan pengguna atau UE dimana hasil yang dipilih adalah rute dengan waktu perjalanan tercepat serta jumlah semut yang menggunakan rute tersebut banyak. Jika dimaknai dengan seksama maka hal ini juga berarti bahwa algoritma mencoba untuk mencapai keseimbangan pengemudi yang selalu mencari rute tercepat yang lebih menguntungkan dirinya sendiri, jumlah semut yang menggunakan rute tercepat pun dapat dianalogikan bahwa kebanyakan pengemudi lebih memilih jalur tersebut.

Sebagai upaya untuk menghindari kemacetan maka algoritma mengarahkannya menuju rute yang tidak padat, yaitu rute yang sebelumnya tidak banyak dipilih, hal ini dalam rangka ADR juga mengakomodasi untuk mencapai keseimbangan sistem atau SO. Keuntungan dari algoritma ADR untuk mengurangi kemacetan dengan mencapai keseimbangan lalu lintas ini akan terlihat melalui kebijakan pengarahan rute untuk pengemudi yang dapat diterapkan oleh pihak berwenang, pun dapat diimplementasikan misalkan untuk rencana jangka panjang dengan menggunakan *road pricing* dimana aturannya hampir sama dengan jalan tol di Indonesia, pengemudi yang ingin menggunakan jalur tercepat harus membayar.

KESIMPULAN

1. Algoritma *Ant Dispersion Routing* (ADR) untuk penyebaran rute lalu lintas merupakan penggunaan metode dasar dari algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) yang menggunakan koloni semut untuk mengoptimalkan solusi permasalahan, dengan kombinasi model prediksi lalu lintas untuk menganalisis dampak dari keputusan perutean pada jaringan lalu lintas. Algoritma ADR dibuat untuk menghindari seluruh semut konvergen ke sebuah lintasan tunggal, dalam hal ini untuk mengoptimalkan rute dari simpul awal menuju simpul tujuan. ADR dikembangkan untuk mencapai keseimbangan pengguna (UE) dan keseimbangan sistem (SO) yang merupakan keseimbangan jaringan lalu lintas. Algoritma penyebaran rute ini akan memilihkan rute yang paling efisien, yaitu rute yang tidak padat. Akhirnya algoritma ADR akan mendistribusikan arus lalu lintas menuju beberapa rute optimal sehingga waktu perjalanan menjadi minimum sebagai upaya untuk mengurangi kemacetan, sehingga hasil yang diperoleh tidak hanya satu rute tunggal karena dengan mengarahkan lalu lintas menuju beberapa rute optimal tidak akan terjadi penumpukan kendaraan pada suatu rute tertentu.

2. Penerapan algoritma ADR untuk mengoptimalkan rute lalu lintas melalui penyebaran rute untuk mengurangi kemacetan dalam pembahasan ini menggunakan permasalahan perjalanan wisata Pasteur-Setiabudhi pada akhir pekan. Diawali dengan menetapkan variabel-variabel yang diperlukan menggunakan data antara lain, data arus lalu lintas, kapasitas, panjang jalan dan kepadatan setiap jalan serta kondisi lalu lintas setiap jalan. Kemudian menetapkan rute yang akan dioptimasi, dimana melalui dua tahap yaitu pemangkasan jaringan dengan bantuan sejumlah semut, dan optimasi arus pada jaringan tereduksi, dimana pada langkah terakhir ini jumlah semut dikonversi kedalam jumlah kendaraan. Hasil yang diperoleh dari algoritma ADR berdasarkan data lalu lintas dari Dinas Perhubungan Kota Bandung tahun 2012 adalah rekomendasi dua rute optimal yaitu rute yang melalui jalan dr. Djundjuran-Pasteur-Cipaganti-Setiabudhi dan rute yang melalui jalan dr. Djundjuran-Pasirkaliki-Sukajadi-Setiabudhi. Selain untuk mengurangi kemacetan di akhir pekan pada perjalanan menuju kawasan wisata, hasil rute optimal dari algoritma ADR ini juga dapat membantu untuk situasi yang darurat, jalur evakuasi ambulans, polisi dan pelayanan publik lainnya.

REKOMENDASI

Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Rute perjalanan Pasteur-Setiabudhi yang dibahas dalam skripsi ini hanya tiga rute yang bersesuaian dengan data yang tersedia dari Dinas Perhubungan Kota Bandung tahun 2012, untuk itu dapat pula dikaji penyebaran rute lalu lintas untuk perjalanan Pasteur-Setiabudhi dengan berbagai kemungkinan rute yang tersedia dengan catatan bahwa data yang digunakan mewakili kondisi sebenarnya.
2. Pembahasan dalam skripsi ini dibatasi hanya untuk kemacetan pada akhir pekan. Algoritma dapat juga digunakan dan dikembangkan untuk kondisi lalu lintas yang lebih luas dengan pembatasan yang jelas juga untuk perutean dengan banyak simpul awal (*multi origin*) dan banyak simpul tujuan (*multi destination*).

DAFTAR PUSTAKA

- Alves, D. (2009). *Ant Dispersion Routing for Traffic Optimization*. Tesis Master pada Faculty of Mechanical Engineering, Delft University of Technology, Netherland: tidak diterbitkan.

- Alves, D., Ast, J. Van, Cong, Z., Schutter, B. De, & Babu, R. (2010). "Ant Colony Optimization for Traffic Dispersion Routing". *Proceeding of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2010)*. 19, 683-688.
- Burrows, P., Reed, K., Templer, K., & Walker, J. (2012). Efficient Traffic Routing using ACO.
- Dorigo, M., dan Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. Cambridge: The MIT Press.
- LPPM ITB. (2012). Dinas Perhubungan Kota Bandung: Laporan Akhir Survey Lalu Lintas Kota Bandung. Bandung: LPPM ITB.