BAB III

ALGORITMA *ANT DISPERSION ROUTING* (ADR)

Pada permasalahan pencarian rute optimal dalam rangka penyebaran rute lalu lintas untuk mencapai keseimbangan jaringan lalu lintas sebagai upaya untuk mengurangi kemacetan dalam skripsi ini bukanlah pencarian satu rute optimal melainkan beberapa rute optimal, hal ini supaya penggunaan jaringan menjadi lebih baik. Rute optimal yang dimaksud adalah rute dengan biaya waktu perjanan minimum sehingga waktu tempuh menjadi lebih baik. Berikut akan dijelaskan mengenai fungsi biaya waktu perjalanan yang selanjutnya fungsi ini akan dioptimalkan.

3.1 Biaya Waktu Perjalanan

Berdasarkan persamaan (2.1) yaitu persamaan waktu perjalanan, keseimbangan kecepatan pada jalan r, V_r, berhubungan dengan kepadatan lalu lintas ρ_r. Terdapat kepadatan di luar sistem lalu lintas yang tidak stabil, yang dihasilkan dari lalu lintas dalam kemacetan yaitu ρ_{crit}. Alves *et al*. (2010) menyatakan fungsi biaya waktu perjalanan yang diperbaharui haruslah berdasar pada persamaan (2.1), didefinisikan:

$$\gamma_r = f_\gamma(\rho_r) = \begin{cases} \dfrac{L_r}{V_r(\rho_r)} + M \exp\left(-\dfrac{\left(\rho_r - \rho_{crit,r}\right)^2}{\epsilon}\right) & jika\ \rho_r \le \rho_{crit,r} \\ \dfrac{L_r}{V_r(\rho_r)} + M & jika\ \rho_r > \rho_{crit,r} \end{cases} \tag{3.1}$$

dengan M menyatakan konstanta positif dan $M \in \mathbb{N}$, $\rho_{crit,r}$ 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 (3.1). Batasan nilai yang baik untuk M adalah $[2, 10]$ dan batasan nilai yang baik untuk ϵ adalah $[0{,}1;\ 0{,}5]$ (Alves, 2009).

Ilustrasi 3.1 : Misalkan akan menentukan waktu perjalanan dari suatu jalan r dengan panjang jalan $L_r = 2{,}72\ km = 2.720\ m$, kepadatan maksimum pada jalan tersebut adalah $\rho_{crit,r} = 60\ kendaraan/km$. Untuk suatu konstanta positif $M = 10$ dan koefisien kecuraman $\epsilon = 0{,}5$, biaya waktu perjalanan yang ditempuh pada jalan tersebut dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3.1) pada dua kondisi yang berbeda adalah:

Jika kepadatan pada jalan tersebut $\rho_r = 56\ kendaraan/km$ dan kecepatan rata-rata pada jalan tersebut berdasarkan kepadatannya adalah $V_r(\rho_r) = 29\ km/jam = 8{,}056\ m/s$, maka biaya waktu perjalanannya:

$$\gamma_r = f_\gamma(\rho_r) = \frac{L_r}{V_r(\rho_r)} + M \exp(-\frac{\left(\rho_r - \rho_{crit,r}\right)^2}{\epsilon})$$

$$= \frac{2720}{8{,}056} + (10) \exp\left(-\frac{(56-60)^2}{0{,}5}\right) = 337{,}636\ s$$

Sedangkan jika kepadatan pada jalan tersebut $\rho_r = 65\ kendaraan/km$ dan kecepatan rata-rata pada jalan tersebut berdasarkan kepadatannya adalah $V_r(\rho_r) = 15\ km/jam = 4{,}167\ m/s$, maka biaya waktu perjalan menjadi:

$$\gamma_r = f_\gamma(\rho_r) = \frac{L_r}{V_r(\rho_r)} + M$$

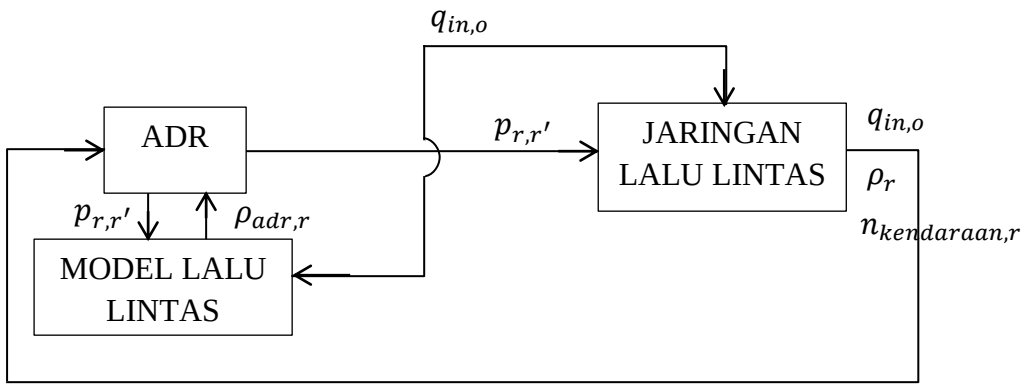
$$= \frac{2720}{4{,}167} + 10 = 662{,}748\ s$$

Berdasarkan Ilustrasi 3.1 diketahui bahwa biaya waktu perjalanan pada saat kepadatan pada jalan yang bersangkutan kurang dari kepadatan kritis, lebih cepat dibandingkan dengan biaya waktu perjalanan pada saat kepadatannya lebih dari kepadatan kritis, hal ini juga dipengaruhi oleh kecepatan pada kedua keadaan tersebut yang jelas berbeda.

Fungsi biaya waktu perjalanan pada persamaan (3.1), akan memenuhi kondisi A pada kondisi keseimbangan yang telah dijelaskan pada bab 2, karena biaya waktu perjalanan pada jalan tersebut, dimana kepadatan pada jalan yang lebih besar dari nilai kritis dari kepadatan $\rho_{crit,r}$, menjadi lebih besar (waktu perjalanan yang lebih lama) dan akan mengurangi minat semut melewati jalan r sehingga mencegah distribusi baru dari arus untuk dihitung dalam algoritma selanjutnya.

3.2 Algoritma *Ant Dispersion Routing* (ADR)

Representasi bagan dari operasi pengulangan tertutup dari algoritma ADR (Alves *et al*., 2010; Alves, 2009) adalah:



Gambar 3.1 Bagan Operasi Pengulangan Tertutup dari Algoritma 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.

Sistem semut (AS) yang merupakan ACO dasar digunakan sebagai *starting point* untuk algoritma ADR. Hal tersebut karena pada ACO yang lebih kompleks mengharuskan *feature* tertentu yang tidak akan banyak membantu menyelesaikan masalah yang akan dipecahkan. Sebagai contoh dalam *Ant Colony System* (ACS) yang menggunakan *elitist feature*, dimana dalam ACS ini hanya semut yang menemukan solusi terbaik yang mengendapkan feromon pada jalan yang dilaluinya dalam lintasan, sementara dalam permasalahan penyebaran rute ini tujuannya adalah mengoptimasi solusi rute dari jaringan sehingga membutuhkan solusi dari setiap semut yang merupakan prinsip utama dari AS (Alves, 2009: 12).

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).

3.2.1 Pemangkasan Jaringan

Pada prosedur pemangkasan jaringan, algoritma secara garis besar mengikuti struktur dari sistem semut (AS) yang telah dijelaskan pada bab 2. Pada tahap awal, nilai feromon pada semua jalan ditetapkan dengan nilai awal yang kecil. Fungsi probabilitas dari persamaan (2.6) 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:

$$p_{r,r'} = \begin{cases} \dfrac{\tau_{r'}}{\sum_{j \in \mathcal{N}_r} \tau_j} & jika\, r' \in \mathcal{N}_r \\ 0 & untuk\ lainnya \end{cases} \tag{3.2}$$

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 (3.2), dalam kaitannya untuk menemukan rute dalam jaringan.

Nilai feromon awal τ_0 dapat juga mengikuti aturan dalam AS sebagaimana pada bab 2 yaitu:

$$\forall r;\ \tau_r = \tau_0 = \frac{m}{\varphi_{min}} \tag{3.3}$$

dimana $m = n_{semut}$ yang ditetapkan pada inisialisasi algoritma ADR, yaitu jumlah semut pada simpul awal dan φ_{min} 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 (3.1) dan persamaan (2.2).

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:

$$\Delta\tau_i = \frac{1}{\varphi_i} \tag{3.4}$$

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

$$\tau_r \leftarrow (1 - \rho_{ev})\tau_r + \rho_{ev} \sum_{i \in \mathcal{J}} \Delta\tau_i \,, \forall r;\ \exists i \in \mathcal{J}; r \in \mathcal{R}_i \tag{3.5}$$

dengan ρ_{ev} 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 algortima ADR.

3.2.2 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 pada bab 2. Fungsi endapan feromon memuat biaya waktu perjalanan dari rute φ_i 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 $n_{kendaraan,i}$ adalah jumlah kendaraan yang menggunakan rute i, $n_{semut,i}$ adalah jumlah semut yang menggunakan rute i. Jumlah total kendaraan dinotasikan dengan $n_{kendaraan}$ dan jumlah total semut dinotasikan dengan n_{semut}. Banyaknya kendaraan yang menggunakan setiap rute i berdasarkan Alves (2009: 14) adalah:

$$n_{kendaraan,i} = n_{semut,i} \frac{n_{kendaraan}}{n_{semut}} \tag{3.6}$$

Ilustrasi 3.2 : Misalkan jumlah total kendaraan pada jaringan, $n_{kendaraan} = 500$ dan jumlah total semut pada inisialisasi yang digunakan pada algoritma ADR, $n_{semut} = 100$, jumlah semut yang yang menggunakan rute i pada perjalanannya dari simpul awal menuju simpul tujuan misalkan $n_{semut,i} = 35$, maka konversi untuk banyaknya kendaraan yang menggunakan rute i berdasarkan persamaan (3.6) diperoleh:

$$n_{kendaraan,i} = n_{semut,i}\frac{n_{kendaraan}}{n_{semut}} = 35\frac{500}{100} = 175$$

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 $\rho_{adr,r}$ secara teoritis diprediksi dari algoritma ADR adalah:

$$\rho_{adr,r} = \frac{\frac{n_{semut,r}}{n_{semut}}q_{in,o}}{\lambda_r V(\rho_{crit})} \tag{3.7}$$

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

Ilustrasi 3.3 : Untuk jumlah total semut sebagaimana dalam Ilustrasi 3.2, $n_{semut} = 100$ dan banyaknya semut yang melewati suatu jalan r, $n_{semut,r} = 55$, misalkan arus yang masuk ke dalam jaringan $q_{in,o} = 1.631\ kendaraan/jam$, banyaknya lajur pada jalan yang bersangkutan $\lambda_r = 2$ dan kecepatan rata-rata kendaraan berdasarkan kepadatan kritis pada jalan tersebut $V(\rho_{crit}) = 18\ km/jam$, maka kepadatan pada jaringan untuk setiap jalan r dalam algoritma ADR berdasarkan persamaan (3.7) akan menjadi:

$$\rho_{adr,r} = \frac{\frac{n_{semut,r}}{n_{semut}}q_{in,o}}{\lambda_r V(\rho_{crit})} = \frac{\frac{55}{100}1631}{(2)(18)} = 24{,}918\ kendaraan/km$$

Persamaan (3.7) di atas berasal dari teori makroskopis lalu lintas bahwa hubungan antara arus, kepadatan dan kecepatan adalah $\rho = \frac{q}{V}$ (Alves, 2009: 15). Sehingga arus pada suatu jalan tertentu merupakan fraksi dari semut yang menggunakan jalan tersebut ($\frac{n_{semut,r}}{n_{semut}}$) dikalikan dengan arus masuk pada jaringan (arus dari simpul o, $q_{in,o}$) dan kepadatan merupakan pembagian dari arus dengan

banyaknya lajur pada jalan (λ_r), karena kepadatan didefinisikan sebagai fungsi dari banyaknya lajur. Kepadatan pada setiap jalan berdasarkan ADR, $\rho_{adr,r}$, digunakan untuk menghitung fungsi biaya waktu perjalanan dari persamaan (3.1) yaitu,

$$\gamma_r = f_\gamma(\rho_{adr,r}) \tag{3.8}$$

Ilustrasi 3.4 : Berdasarkan Ilustrasi 3.1 untuk panjang jalan $L_r = 2{,}72\ km = 2.720\ m$, kepadatan maksimum pada jalan tersebut adalah $\rho_{crit,r} = 60\ kendaraan/km$. Untuk suatu konstanta positif $M = 10$ dan koefisien kecuraman $\epsilon = 0{,}5$ serta berdasarkan Ilustrasi 3.3 untuk kepadatan setiap jalan dalam ADR $\rho_{adr,r} = 24{,}918\ kendaraan/km$, dapat diperoleh biaya waktu perjalanan yang kemudian digunakan dalam algoritma ADR berdasarkan persamaan (3.8) yaitu:

Untuk kecepatan rata-rata pada jalan tersebut berdasarkan kepadatannya misalkan $V_r(\rho_{adr,r}) = 40\ km/jam = 11{,}111\ m/s$ maka biaya waktu perjalanan pada jalan tersebut:

$$\gamma_r = f_\gamma(\rho_{adr,r}) = \frac{L_r}{V_r(\rho_{adr,r})} + M \exp(-\frac{(\rho_{adr,r} - \rho_{crit,r})^2}{\epsilon})$$

$$= \frac{2.720}{11{,}111} + (10)\exp\left(-\frac{(24{,}918 - 60)^2}{0{,}5}\right) = 244{,}80\ s$$

Berdasarkan persamaan (3.8), dapat diperoleh nilai dari fungsi biaya waktu perjalanan φ_i untuk setiap rute i, 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:

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} \varphi_i . n_{kendaraan,i}}{\sum_{i=1}^{n_i} n_{kendaraan,i}} \tag{3.9}$$

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

Ilustrasi 3.5 : Misalkan terdapat dua rute tercepat dari hasil pemangkasan jaringan untuk perjalanan dari simpul awal menuju simpul tujuan dengan biaya waktu perjalanan untuk rute 1, $\varphi_1 = 1.120\ s$ dan banyaknya kendaraan yang melewati rute 1, $n_{kendaraan,1} = 175$ serta biaya waktu perjalanan untuk rute 2, $\varphi_2 = 1.435\ s$ dan banyaknya kendaraan yang melewati rute 2, $n_{kendaraan,2} = 90$, maka biaya jaringan berdasarkan persamaan (3.9) diperoleh:

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} \varphi_i . n_{kendaraan,i}}{\sum_{i=1}^{n_i} n_{kendaraan,i}} = \frac{(1.120)(175) + (1.435)(90)}{175 + 90} = 1.226{,}981\ s$$

Berdasarkan kondisi keseimbangan yang telah dijelaskan sebelumnya, kondisi A dipenuhi melalui persamaan fungsi biaya waktu perjalanan γ_r 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:

$$\Delta\tau_i = \frac{1}{\varphi_i} + \frac{W}{\Omega} \tag{3.10}$$

Dengan W adalah faktor tertimbang. Persamaan (3.10) 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:

$$\min|\varphi_i - \Omega| \quad i = 1, 2, \dots, n_i \tag{3.11}$$

Akan mencapai minimum jika $\varphi_1 = \varphi_2 = \cdots = \varphi_{ni} = \Omega$, yaitu ketika biaya waktu perjalanan pada seluruh rute sama. Selisih biaya waktu perjalanan pada persamaan (3.10) 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 (3.5).