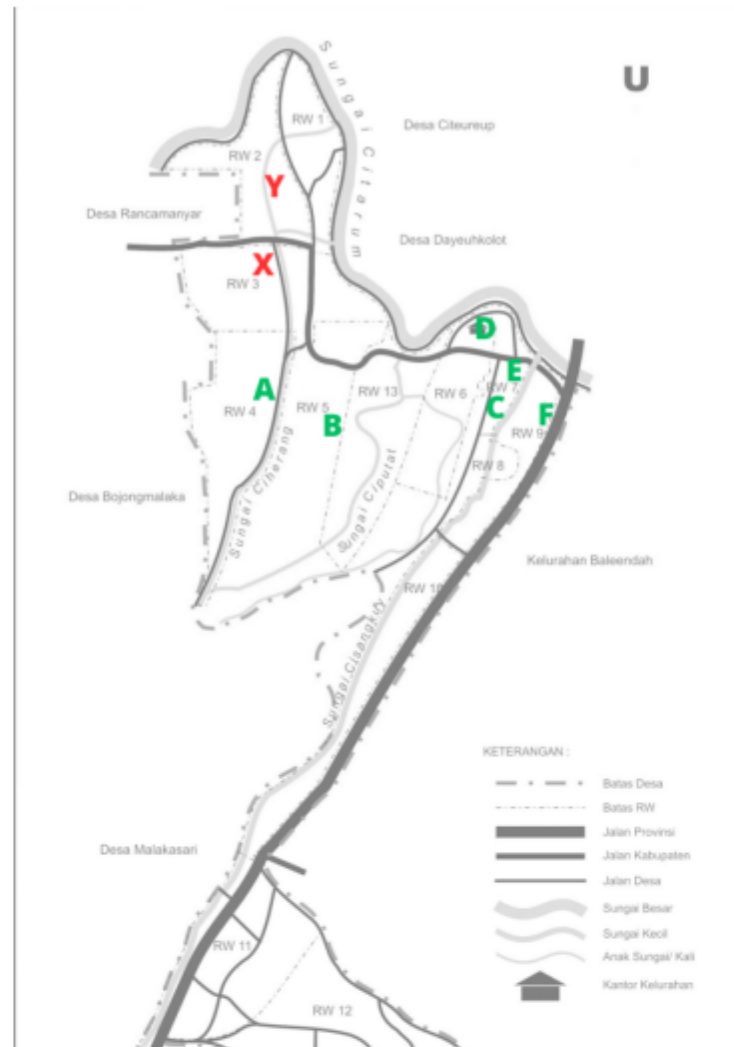


## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Data Penelitian

Penelitian ini membahas tentang penentuan rute evakuasi bencana banjir yang optimal di Kelurahan Andir, Baleendah, Bandung, yaitu rute evakuasi yang memiliki waktu tempuh terkecil. Kelurahan Andir merupakan kawasan yang rawan akan bencana banjir dikarenakan curah hujan yang tinggi sehingga menyebabkan sungai Cisangkuy meluap. Melalui *website* Sitaruna Bandung, Pemerintah kota Bandung sedang mengembangkan rencana evakuasi bencana serta memberikan informasi berupa peta kawasan rawan bencana dan peta evakuasinya.

Rute evakuasi menentukan rute dari titik evakuasi menuju titik berkumpul. Titik kumpul adalah titik yang ditunjuk sebagai kawasan yang aman terhadap dampak bencana banjir. Sedangkan titik evakuasi merupakan titik yang menggambarkan kawasan yang sangat besar terdampak bencana banjir. Bappelitbang Kota Bandung telah membagi daerah rawan banjir menjadi tiga kategori, yaitu daerah zona resiko bahaya tinggi, daerah zona resiko bahaya sedang, dan daerah zona resiko bahaya rendah. Dalam penelitian ini tempat-tempat pada ketiga zona tersebut diambil sebagai titik evakuasi. Dua titik evakuasinya adalah Kantor Kelurahan Andir baru dan lapangan *shelter* parunghalang. Sedangkan untuk titik berkumpul terdapat enam titik, yaitu TK Ulul Albab, MT Al-Hikmah, SDN Dayeuhkolot XIV, RA Riyadusholihin, SDN Andir 01, dan Yayasan Cinta Yatim Dhuafa Shodaqoh. Selengkapnya posisi masing-masing titik berkumpul dan titik evakuasi diilustrasikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Peta Kelurahan Andir  
(Bkm, 2011)

Keterangan:

X: Kantor Kelurahan Andir Baru

Y: Lapangan *Shelter* Parunghalang

A: TK Ulul Albab

B: MT. Al-Hikmah

C: Yayasan Cinta Yatim Dhuafa Shodaqoh

D: SDN Dayeuhkolot XIV

E: RA Riyadusholihin 4 Muara

F: SDN Andir 01

Widia Ayu Sugandi, 2023

*OPTIMASI RUTE EVAKUASI BENCANA BANJIR MENGGUNAKAN ALGORITMA IMPROVED ANT COLONY OPTIMIZATION (Studi Kasus: Rute Evakuasi Bencana Banjir di Kelurahan Andir Bandung)*

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

### 3.2 Representasi Graf

Pada penelitian ini, titik mewakili titik evakuasi, titik berkumpul, dan persimpangan jalan. Busur mewakili jalan yang menghubungkan dua lokasi, dimana arah dari busur tersebut menunjukkan arah jalan seperti jalan satu arah atau jalan dua arah. Tahap pertama dalam penyelesaian masalah evakuasi masalah banjir adalah merepresentasikan permasalahan dalam bentuk *network*, yaitu memodelkan titik sumber dan titik tujuan, dan rute yang digunakan untuk evaluasi.

Berdasarkan himbauan dari BNPB, evakuasi ditekankan hanya untuk pejalan kaki. Oleh karena itu arah busur dianggap menuju titik tujuan. Kapasitas busur menyatakan kapasitas jalan. Selain kapasitas jalan, setiap busur  $(i,j)$  mempunyai waktu tempuh, yaitu waktu yang dibutuhkan untuk menempuh perjalanan dari titik  $i$  ke titik  $j$ .

### 3.3 Model Evakuasi Masalah MCMF

Masalah penentuan rute evakuasi bencana banjir dapat dipandang sebagai masalah penentuan rute dari titik evakuasi menuju titik berkumpul yang dapat meminimumkan waktu tempuh dan memaksimalkan jumlah penduduk yang dievakuasi. Dengan demikian masalah ini termasuk dalam kategori *Minimum Cost Maximum Flow Problem* (MCMFP). Selanjutnya, MCMFP akan dimodelkan sebagai model optimisasi dengan sebuah fungsi tujuan dan sejumlah kendala. Untuk kepentingan pemodelan digunakan beberapa variabel sebagai berikut.

$A$  : Himpunan *Arc* / Busur

$c_{ij}$  : Kapasitas Busur

$f_{ij}$  : Aliran (*flow*) atau Banyaknya Penduduk yang Dievakuasi

$b_{ij}$  : Waktu Tempuh pada Aliran di setiap *Arc* / Busur

$v_s$  : Titik Sumber

$v_t$  : Titik Tujuan

Masalah MCMF adalah untuk menemukan aliran maksimum  $f$  yang mana fungsi  $cost\ b(f) = \sum_{(v_i,v_j) \in A} b_{ij}f_{ij}$  mencapai minimum. Masalah evakuasi di atas berdasarkan MCMF dapat diekspresikan sebagai persamaan berikut:

Widia Ayu Sugandi, 2023

OPTIMASI RUTE EVAKUASI BENCANA BANJIR MENGGUNAKAN ALGORITMA IMPROVED ANT COLONY OPTIMIZATION (Studi Kasus: Rute Evakuasi Bencana Banjir di Kelurahan Andir Bandung)

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

$$F = \min \sum_{(v_i, v_j) \in A} b_{ij} f_{ij} \quad (14)$$

$$\text{Dengan kendala } 0 \leq f_{ij} \leq c_{ij} \quad \forall (v_i, v_j) \in A \quad (15)$$

$$\text{dan } \sum_{(v_i, v_j) \in A} f_{ij} - \sum_{(v_k, v_i) \in A} f_{ki} = \begin{cases} v(f) & (i = s) \\ 0 & (i \neq s, t) \\ -v(f) & (i = t) \end{cases} \quad (16)$$

Formula (14) adalah fungsi objektif. Formula (15) adalah kendala sehingga *flow* dari busur jalan dan persimpangan tidak melebihi kapasitas busur. Formula (16) adalah kendala sehingga *flow* masuk sama dengan *flow* keluar.

### 3.4 Metode Penyelesaian model MCMF menggunakan Algoritma IACO

Pada penelitian ini, Algoritma IACO akan diimplementasikan pada masalah MCMF. Terdapat 5 tahapan dalam Algoritma IACO, yaitu inisialisasi, konstruksi rute, mutasi, *local search*, dan *update pheromone*. Penjelasan untuk setiap tahapan tersebut akan dibahas pada subbab berikutnya.

#### 3.4.1 Inisialisasi

Tahap pertama dalam Algoritma IACO adalah inisialisasi parameter-parameter yang akan digunakan untuk tahapan selanjutnya. Parameter-parameter yang digunakan dalam Algoritma IACO adalah sebagai berikut (Zarman, Irfan, & Uriawan, 2016):

1. Intensitas jejak semut yang menandakan intensitas *pheromone* ( $\tau_{ij}$ ), Parameter ini digunakan untuk mencari peluang pemilihan titik yang akan dikunjungi selanjutnya pada suatu rute.
2. Visibilitas jejak ( $\eta_{ij}$ ), Parameter ini digunakan untuk mencari peluang pemilihan titik yang akan dikunjungi selanjutnya pada suatu rute. Nilai  $\eta_{ij}$  merupakan hasil perhitungan dari  $\eta_{ij} = b_{ij}$ , dimana nilai  $b_{ij}$  adalah waktu tempuh antar titik.
3. Tetapan pengendali intensitas ( $\alpha$ ), parameter ini digunakan untuk mencari peluang pemilihan titik yang akan dikunjungi selanjutnya pada suatu rute dan berfungsi sebagai pengendali intensitas jejak semut. Nilai  $\alpha$  ditentukan oleh penulis.

4. Tetapan pengendali visibilitas ( $\beta$ ), parameter ini digunakan untuk mencari peluang pemilihan titik yang akan dikunjungi selanjutnya pada suatu rute dan berfungsi sebagai pengendali nilai visibilitas antar titik ( $\eta_{ij}$ ). Nilai  $\beta$  ditentukan oleh penulis.
5. Tetapan penguapan jejak semut ( $\rho$ ), parameter ini digunakan untuk menentukan nilai  $\tau_{ij}$  untuk iterasi selanjutnya. Nilai  $\rho$  ditentukan oleh penulis.
6. Tetapan perjalanan semut ( $Q$ ), parameter ini merupakan konstanta yang digunakan untuk menentukan perubahan intensitas jejak semut antar titik ( $\Delta\tau_{ij}$ ) yang akan menentukan nilai  $\tau_{ij}$  pada iterasi selanjutnya. Nilai  $Q$  ditentukan oleh penulis.
7. Banyak semut ( $m$ ), parameter ini menentukan banyaknya semut yang akan melakukan iterasi dalam algoritma ini. Nilai  $m$  ditentukan oleh penulis.
8. Jumlah iterasi maksimum (NCmax), NCmax adalah jumlah maksimum iterasi yang akan terjadi. Iterasi akan berhenti sesuai dengan NCmax yang telah ditentukan. Nilai NCmax ditentukan oleh penulis.

Setelah menentukan nilai untuk parameter-parameter tersebut, langkah selanjutnya adalah menempatkan setiap semut pada sebuah titik. Kemudian setiap semut akan melakukan perjalanan dan membuat rutenya masing-masing.

### 3.4.2 Konstruksi Rute

Tahapan konstruksi rute pada algoritma IACO sama dengan tahapan konstruksi rute pada algoritma ACO. Penjelasan untuk tahapan ini telah dibahas pada Subbab 2.2.

### 3.4.3 Mutasi

Mutasi adalah tahapan yang tidak ada dalam Algoritma ACO. Sehingga tahapan ini menjadi salah satu pembedanya dengan Algoritma

IACO. Tujuan dari mutasi ini untuk mendapat nilai yang lebih baik sehingga mendapat rute perjalanan terpendek dalam penelitian ini. Mutasi yang digunakan pada penelitian ini adalah *Reciprocal Exchange Mutation*. Metode mutasi ini paling sederhana dibandingkan dengan metode mutasi lainnya, proses mutasi dilakukan dengan cara mengganti posisi titik yang terpilih dengan posisi titik lainnya yang dipilih secara acak. Setiap titik yang akan dimutasi ditentukan oleh nilai parameter yang dinamakan *mutation rate* ( $\rho_m$ ). Akan dipilih nilai acak  $\rho$  dari 0 sampai 1 pada setiap titik untuk semua rute. Apabila terpenuhi  $\rho < \rho_m$ , maka akan terjadi mutasi. Berdasarkan Bin, Zhong-Zhen, dan Baozhen (2009), persamaan yang digunakan untuk mencari nilai  $\rho_m$  adalah sebagai berikut:

$$\rho_m(k) = \rho_m^{min} + (\rho_m^{max} - \rho_m^{min})^{1-\frac{k}{n}} \quad (17)$$

Di mana  $\rho_m^{min} = \frac{1}{n}$  dan  $\rho_m^{max} = \frac{1}{m}$ , dengan k adalah urutan semut, m adalah jumlah semut, dan n adalah jumlah titik yang ada pada suatu rute.

Urutan perjalanan awal

A	B	D	C	E
---	---	---	---	---



Urutan perjalanan baru

D	B	A	C	E
---	---	---	---	---

Gambar 3. 2 *Reciprocal Exchange Mutation*

#### 3.4.4 Local Search

*Local search* yang digunakan pada Algoritma IACO ini merupakan tahapan untuk menentukan nilai jarak yang terbaik. Nilai tersebut akan diperoleh dari nilai jarak rute yang telah melalui proses mutasi. Sehingga, tahapan ini dilakukan setelah tahapan mutasi dilakukan. Setiap rute perjalanan yang terbentuk dari proses mutasi akan masuk pada proses *Local search* 1, kemudian dipilih perjalanan dengan nilai jarak yang lebih baik. Jika nilai jarak yang terbentuk tidak lebih baik, maka rute perjalanan baru

diabaikan. Sedangkan setiap rute yang tidak mengalami proses mutasi, akan masuk proses *Local search 2*, yaitu langsung digunakan nilai total jaraknya.

### 3.4.5 Update Pheromone

Tahapan *update pheromone* pada algoritma IACO sama dengan tahapan *update pheromone* pada algoritma ACO. Penjelasan untuk tahapan ini telah dibahas pada subbab 2.2.

## 3.5 Validasi

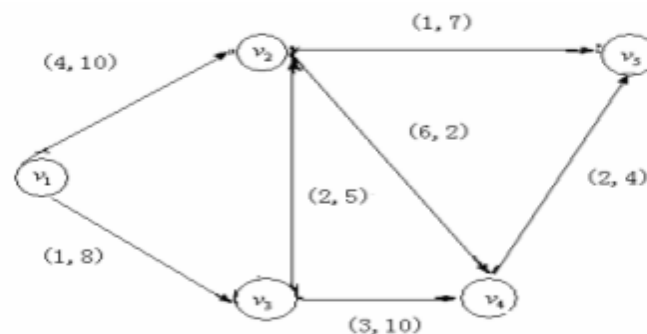
Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan dengan pengujian terhadap beberapa nilai parameter serta hasil perhitungan yang sesuai dengan teorema *maximum flow* sama dengan *minimum cut* terbukti bahwa algoritma IACO yang diterapkan telah sesuai untuk menyelesaikan permasalahan MCMF.

## 3.6 Penarikan Kesimpulan

Pada tahapan ini, kesimpulan akan diambil berdasarkan hasil implementasi Algoritma AICO dalam perencanaan rute evakuasi banjir di lokasi penelitian.

## 3.7 Ilustrasi Penyelesaian Masalah MCMF Menggunakan Algoritma IACO

Untuk memperjelas langkah-langkah dari metode penyelesaian pada subbab 3.4 perhatikan penyelesaian masalah MCMF menggunakan Algoritma *Improved Ant Colony Optimization* dari Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3. 3 Contoh *Network*

(De-Shuang, Wunsch, Levine, & Hyun Jo, 2008)

Sebelum melakukan perhitungan terlebih dahulu dilakukan Inisialisasi parameter seperti yang tertera pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1

## Inisialisasi Parameter

$\alpha$	$\rho$	$C$	$Q$	$m$	$NC$
1	0.2	1	50	3	3

Gambar 3.3 menunjukkan *network* dari tata letak bangunan sederhana. Pada setiap busur  $(v_i, v_j)$  terdapat waktu tempuh (menit) dan kapasitas, titik  $v_1$  dan  $v_5$  masing-masing adalah titik sumber dan titik tujuan. Langkah-langkah penyelesaiannya adalah sebagai berikut:

- Langkah pertama, dilakukan pendaftaran nilai *flow* yang mungkin terpilih pada setiap busurnya. Kemungkinan nilai *flow* yang terpilih untuk setiap busurnya terdapat pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2

Kemungkinan Nilai *Flow*

Busur	Nilai <i>Flow</i>										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(V_1, V_2)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(V_1, V_3)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8		
$(V_2, V_4)$	0	1	2								
$(V_2, V_5)$	0	1	2	3	4	5	6	7			
$(V_3, V_2)$	0	1	2	3	4	5					
$(V_3, V_4)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(V_4, V_5)$	0	1	2	3	4						

Nilai dari semua *pheromone* ( $\tau$ ) pada awal perhitungan ditetapkan oleh penulis. Pada contoh perhitungan dalam penelitian ini digunakan nilai  $\tau$  awal sebesar 1. Penetapan nilai *pheromone* awal dimaksudkan agar setiap nilai *flow* pada masing-masing busur memiliki nilai ketertarikan yang sama untuk dikunjungi setiap semut. Nilai *pheromone* untuk setiap busur terdapat pada Tabel 3.3.



Tabel 3.3  
 Nilai *Pheromone*

$\tau$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(V_1, V_2)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$(V_1, V_3)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
$(V_2, V_4)$	1	1	1								
$(V_2, V_5)$	1	1	1	1	1	1	1	1			
$(V_3, V_2)$	1	1	1	1	1	1					
$(V_3, V_4)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$(V_4, V_5)$	1	1	1	1	1						

- b. Langkah kedua, dilakukan perhitungan untuk pemilihan nilai *flow* selanjutnya yang dituju. Untuk mempermudah perhitungan, ditetapkan nilai tetapan pengendali intensitas, yaitu  $\alpha = 1$ . Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai probabilitas untuk mengunjungi setiap kemungkinan nilai *flow* pada masing-masing busur menggunakan formula (10). Sebagai contoh, perhitungan nilai probabilitas kunjungan untuk setiap nilai *flow* pada busur  $(V_1, V_2)$  adalah

$$p(12, k) = \frac{[\tau(12, k)]^\alpha}{\sum [\tau(12, s)]^\alpha} = \frac{1}{11} = 0,0909, k = 0,1,2, \dots, 10$$

Hasil perhitungan nilai *flow* iterasi pertama untuk semut 1 terdapat pada penyelesaian Tabel 3.4.

Tabel 3. 4  
Perhitungan Nilai Probabilitas Memilih Nilai *Flow*

$(V_1, V_2)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{ijk}$	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
$p_{ijk}$ Kumulatif	0,09	0,18	0,27	0,36	0,46	0,55	0,64	0,73	0,82	0,91	1
$f$ terpilih	0	0	0	0,36	0	0	0	0	0	0	0
$(V_1, V_3)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8		
$p_{ijk}$	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11		
$p_{ijk}$ Kumulatif	0,11	0,22	0,33	0,44	0,56	0,67	0,78	0,89	1		
$f$ terpilih	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
$(V_2, V_4)$	0	1	2								
$p_{ijk}$	0,33	0,33	0,33								
$p_{ijk}$ Kumulatif	0,33	0,67	1								
$f$ terpilih	0	0,67	0								
$(V_2, V_5)$	0	1	2	3	4	5	6	7			
$p_{ijk}$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13			
$p_{ijk}$ Kumulatif	0,13	0,25	0,38	0,50	0,63	0,75	0,88	1			
$f$ terpilih	0	0	0	0	0	0	0	1			
$(V_3, V_2)$	0	1	2	3	4	5					
$(V_3, V_4)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(V_4, V_5)$	0	1	2	3	4						

Bilangan *random* yang dibangkitkan pada busur  $(V_1, V_2)$  adalah  $r_1 = 0.33$ , pada busur  $(V_1, V_3)$  adalah  $r_2 = 0.97$ , pada busur  $(V_2, V_4)$  adalah  $r_3 = 0.65$ , dan pada busur  $(V_2, V_5)$  adalah  $r_4 = 0.89$ . Pemilihan nilai *flow* pada busur lainya akan menyesuaikan hasil pemilihan nilai *flow* yang sudah terpilih sehingga memenuhi formula (11) dan (12).

Pilih nilai *flow* jika bilangan *random* yang dibangkitkan pada masing-masing busur lebih besar dibandingkan dengan nilai probabilitas kumulatifnya. Berdasarkan nilai *random* maka terpilih  $f(V_1, V_2) = 3$  (nilai *flow* yang terpilih ditandai dengan warna hijau pada Tabel 3.4),  $f(V_1, V_3) = 8$ ,  $f(V_2, V_4) = 1$ , dan  $f(V_2, V_5) = 7$ , pemilihan nilai *flow* pada busur

lainnya yaitu  $f(V_3, V_2)$ ,  $f(V_3, V_4)$ , dan  $f(V_4, V_5)$  ditentukan menggunakan formula (11) dan (12), hasil perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$f(V_3, V_2) = f(V_2, V_4) + f(V_2, V_5) - f(V_1, V_2) = 1 + 7 - 3 = 5$$

$$f(V_3, V_4) = f(V_1, V_3) - f(V_3, V_2) = 8 - 5 = 3$$

$$f(V_4, V_5) = f(V_2, V_4) + f(V_3, V_4) - 0 = 1 + 3 = 4$$

Jadi, nilai *flow* yang diperoleh adalah  $f(V_3, V_2) = 5$ ,  $f(V_3, V_4) = 3$ , dan  $f(V_4, V_5) = 4$ . Berdasarkan perhitungan pada langkah kedua didapatkan nilai *flow* untuk network pada Gambar 3.3.

$$\begin{aligned} val(f) &= f(V_1, V_2) + f(V_1, V_3) = f(V_2, V_5) + f(V_4, V_5) \\ &= 3 + 8 = 7 + 4 = 11 \end{aligned}$$

dan nilai *cost*

$$\begin{aligned} F &= 4 \cdot f(V_1, V_2) + 1 \cdot f(V_1, V_3) + 6 \cdot f(V_2, V_4) + \\ &1 \cdot f(V_2, V_5) + 2 \cdot f(V_3, V_2) + 3 \cdot f(V_3, V_4) + 2 \cdot f(V_4, V_5) \\ &= 12 + 8 + 6 + 7 + 10 + 9 + 8 = 60 \end{aligned}$$

- c. Langkah ketiga, dilakukan proses mutasi dengan terlebih dahulu menghitung *mutation rate* ( $\rho_m$ ). Berdasarkan formula (17), perhitungannya adalah sebagai berikut:

Diketahui, jumlah semut  $m = 3$ , dan banyaknya titik pada rute  $n = 5$

sehingga diperoleh  $\rho_m = \frac{1}{5} + \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{5}\right)^{1-\frac{1}{5}} = 0.4$ . Hasil proses mutasi pada iterasi pertama untuk semut 1 disajikan pada Tabel 3.5.

Tabel 3. 5  
 Nilai *Flow* Setelah Proses Mutasi

$\rho_m$	0,40										
r	0,83	0,32	0,40		0,27	0,30	0,89	0,12	0,69	0,58	0,60
Mutasi ( $V_1, V_2$ )	0	1	2	7	3	5	6	4	8	9	10
$\rho_m$	0,40										
r	0,93	0,03	0,55	0,80	0,02	0,31	0,94	0,85			
Mutasi ( $V_1, V_3$ )	0	1	2	3	8	5	8	7	4		
( $V_2, V_4$ )	0	1	2								
$p_{ijk}$	0,33	0,33	0,33								
$p_{ijk}$ Kumulatif	0,33	0,67	1								
$f$ terpilih	0,33	0	0								
( $V_2, V_5$ )	0	1	2	3	4	5	6	7			
$p_{ijk}$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13			
$p_{ijk}$ Kumulatif	0,13	0,25	0,38	0,50	0,63	0,75	0,88	1			
$f$ terpilih	0	0	0	0	0	0	0	1			
( $V_3, V_2$ )	0	1	2	3	4	5					
( $V_3, V_4$ )	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
( $V_4, V_5$ )	0	1	2	3	4						

Busur yang terhubung ke titik sumber akan dimutasi yaitu busur ( $V_1, V_2$ ) dan ( $V_1, V_3$ ), jika bilangan *random* (r) yang dibangkitkan pada masing-masing kemungkinan nilai *flow* lebih kecil daripada  $\rho_m$  maka pilih nilai *flow* yang bersesuaian, apabila terdapat lebih dari satu r yang kurang dari  $\rho_m$  maka pilih nilai *flow* dengan r yang paling kecil. Berdasarkan hasil mutasi terpilih  $f(V_1, V_2) = 7$  dan  $f(V_1, V_3) = 4$  sebagai *flow* baru. Proses selanjutnya yaitu pemilihan *flow* yang perhitungannya seperti pada langkah kedua, pada busur ( $V_2, V_4$ ) bilangan *random* yang dibangkitkan adalah  $r_5 = 0,05$ , dan pada busur ( $V_2, V_5$ ) adalah  $r_6 = 0,94$ , sehingga diperoleh  $f(V_2, V_4) = 0$  dan  $f(V_2, V_5) = 7$ .

Hasil perhitungan untuk pemilihan nilai *flow*  $f(V_3, V_2)$ ,  $f(V_3, V_4)$ , dan  $f(V_4, V_5)$  adalah sebagai berikut:

$$f(V_3, V_2) = f(V_2, V_4) + f(V_2, V_5) - f(V_1, V_2) = 0 + 7 - 7 = 0$$

$$f(V_3, V_4) = f(V_1, V_3) - f(V_3, V_2) = 4 - 0 = 4$$

$$f(V_4, V_5) = f(V_2, V_4) + f(V_3, V_4) - 0 = 0 + 4 = 4$$

Jadi, nilai *flow* yang diperoleh adalah  $f(V_3, V_2) = 0$ ,  $f(V_3, V_4) = 4$ , dan  $f(V_4, V_5) = 4$ . Berdasarkan perhitungan pada langkah kedua didapatkan nilai *flow* untuk network pada Gambar 3.3.

$$\begin{aligned} val(f) &= f(V_1, V_2) + f(V_1, V_3) = f(V_2, V_5) + f(V_4, V_5) \\ &= 7 + 4 = 11 \end{aligned}$$

dan nilai *cost*

$$\begin{aligned} F &= 4 \cdot f(V_1, V_2) + 1 \cdot f(V_1, V_3) + 6 \cdot f(V_2, V_4) + 1 \cdot f(V_2, V_5) + \\ &2 \cdot f(V_3, V_2) + 3 \cdot f(V_3, V_4) + 2 \cdot f(V_4, V_5) \\ &= 28 + 4 + 0 + 7 + 0 + 12 + 8 = 59. \end{aligned}$$

- d. Langkah keempat, lakukan proses *local search* yaitu dengan cara memilih solusi yang lebih baik antara solusi sebelum dan sesudah mutasi. Solusi sebelumnya telah didapatkan dari langkah dua dan langkah tiga. Sebelum proses mutasi ditunjukkan bahwa waktu tempuh minimumnya adalah 60 menit dan jumlah penduduk yang dievakuasi maksimum sebanyak 11 orang, sedangkan setelah proses mutasi ditunjukkan bahwa minimum waktu tempuhnya adalah 59 menit dan jumlah maksimum penduduk yang dievakuasi adalah sebanyak 60 orang. Hal ini menunjukkan bahwa solusi setelah mutasi lebih baik daripada solusi sebelumnya, oleh karena itu solusi setelah mutasi dipilih sebagai solusi terbaik untuk semut 1 pada iterasi pertama.
- e. Lakukan kembali langkah kedua sampai langkah keempat untuk perhitungan semut 2 dan semut 3, hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut:

Pada iterasi 1 untuk semut 2 diperoleh solusi seperti pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6

Solusi Sementara Semut 2 pada Iterasi 1

Solusi	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{24}$	$f_{25}$	$f_{32}$	$f_{34}$	$f_{45}$	$val(f)$	$F$	<i>Local Search</i>	
Sebelum Mutasi	1	3	1	2	2	1	2	4	26	$val(f)$	$F$
Sesudah Mutasi	7	4	1	7	1	3	4	11	64	11	64

Pada iterasi 1 untuk semut 3 diperoleh solusi seperti pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7

Solusi Sementara Semut 3 pada Iterasi 1

Solusi	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{24}$	$f_{25}$	$f_{32}$	$f_{34}$	$f_{45}$	$val(f)$	$F$	<i>Local Search</i>	
Sebelum Mutasi	6	4	0	7	1	3	3	10	52	$val(f)$	$F$
Sesudah Mutasi	7	2	2	7	2	0	2	9	57	10	52

f. Langkah kelima, lakukan *update pheromone* berdasarkan formula (13).

Hasil perhitungannya adalah sebagai berikut:

Inisialisasi parameter-parameter untuk perhitungan *update pheromone* tersaji pada Tabel 3.8

Tabel 3.8

Parameter-Parameter untuk Perhitungan *Update Pheromone*

Semut	1	2	3
Q	50		
F	59	64	57
$\Delta\tau_{ijk}(Q/F)$	0.85	0.78	0.88

Hasil penambahan pheromone untuk semut 1 tersaji pada Tabel 3.9.

Tabel 3. 9

Tambahan *Pheromone* Dari Semut 1

$\tau$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(V_1, V_2)$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1.05	0.2	0.2	0.2
$(V_1, V_3)$	0.2	0.2	0.2	0.2	1.05	0.2	0.2	0.2	0.2		
$(V_2, V_4)$	1.05	0.2	0.2								
$(V_2, V_5)$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1.05			
$(V_3, V_2)$	1.05	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2					
$(V_3, V_4)$	0.2	0.2	0.2	0.2	1.05	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$(V_4, V_5)$	0.2	0.2	0.2	0.2	1.05						

Hasil penambahan pheromone untuk semut 2 tersaji pada Tabel 3.10.

Tabel 3. 10

Tambahan *Pheromone* Dari Semut 2

$\tau$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(V_1, V_2)$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1.83	0.2	0.2	0.2
$(V_1, V_3)$	0.2	0.2	0.2	0.2	1.83	0.2	0.2	0.2	0.2		
$(V_2, V_4)$	1.05	0.98	0.2								
$(V_2, V_5)$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1.83			
$(V_3, V_2)$	1.05	0.98	0.2	0.2	0.2	0.2					
$(V_3, V_4)$	0.2	0.2	0.2	0.98	1.05	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$(V_4, V_5)$	0.2	0.2	0.2	0.2	1.83						

Hasil penambahan pheromone untuk semut 3 tersaji pada Tabel 3.11.

Tabel 3. 11

Tambahan *pheromone* dari semut 3

$\tau$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(V_1, V_2)$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1.08	1.83	0.2	0.2	0.2
$(V_1, V_3)$	0.2	0.2	0.2	0.2	2.71	0.2	0.2	0.2	0.2		
$(V_2, V_4)$	1.92	0.98	0.2								
$(V_2, V_5)$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	2.71			
$(V_3, V_2)$	1.05	1.86	0.2	0.2	0.2	0.2					
$(V_3, V_4)$	0.2	0.2	0.2	1.86	1.05	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$(V_4, V_5)$	0.2	0.2	0.2	1.08	1.83						

Hasil *update pheromone* pada Tabel 3.11 akan digunakan pada iterasi kedua. Ulangi langkah kedua sampai langkah kelima untuk iterasi-iterasi

selanjutnya sampai mencapai iterasi maksimum yang mana pada contoh ini iterasi maksimumnya adalah 3. Hasil optimal yang didapatkan menggunakan *Microsoft excel* ditunjukkan pada Tabel 3.12.

Tabel 3. 12

Hasil simulasi optimal

$val(f)$	$f$						$F$	
	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{24}$	$f_{25}$	$f_{32}$	$f_{34}$		$f_{45}$
11	3	8	0	7	4	4	4	55

Untuk memvalidasi kebenaran hasil perhitungan maksimum *flow* ( $f^*$ ) pada Tabel 3.13 maka dilakukan perhitungan minimum *cut* ( $\tilde{K}$ ) sesuai dengan teori sebelumnya pada subbab 2.1.

$$\tilde{K} = c(V_2, V_5) + c(V_4, V_5) = 7 + 4 = 11 = f^* = 11$$

Dapat disimpulkan bahwa hasil perhitungan maksimum *flow* pada Tabel 3.13 sudah benar sehingga cara perhitungan yang dilakukan sudah tepat untuk menyelesaikan permasalahan MCMF.