

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas representasi jaringan dari sebuah gedung, model optimisasi penentuan jalur evakuasi, dan metode penyelesaiannya menggunakan metode MDFP.

3.1 Deskripsi Masalah

Penelitian ini membahas masalah penentuan jalur evakuasi yang optimal di sebuah gedung. Posisi awal pengungsi adalah di dalam ruangan atau koridor. Jalur evakuasi adalah rute yang harus dilalui pengungsi dari posisi awal, yang disebut titik evakuasi, ke titik kumpul yang berada di luar gedung. Jalur evakuasi yang optimal didefinisikan sebagai jalur evakuasi yang dapat mengevakuasi pengungsi sebanyak-banyaknya yang berada di dalam gedung dalam waktu minimum. Lebih jauh, penelitian ini akan meneliti masalah perencanaan jalur evakuasi di Gedung FPMIPA A UPI. Penelitian mengenai jalur evakuasi Gedung FPMIPA A UPI sangatlah penting dilakukan untuk memastikan tingkat efektivitas jalur evakuasi yang diterapkan di Gedung FPMIPA A UPI. Terlebih lagi, belum adanya penelitian serupa yang pernah dilakukan sebelumnya menambahkan nilai kepentingan dari penelitian ini.

Gedung FPMIPA A UPI memiliki empat sayap; *North*, *East*, *South*, dan *West*, serta dilengkapi dengan sebuah taman pada titik tengah bangunan dan lobi utama pada Lantai 1 Sayap *South*. Masing-masing sayap memiliki ruangan dan banyak lantai yang berbeda-beda; *North* memiliki lima lantai, *East* memiliki empat lantai, dan *South* serta *West* memiliki tiga lantai. Gedung FPMIPA A UPI hanya memiliki satu pintu utama pada Sayap *South* yang dapat diakses untuk masuk dan keluar gedung. Dikarenakan banyaknya pengungsi pada suatu waktu tidak dapat dipastikan, maka akan digunakan model MDFM. Penelitian ini bertujuan mencari jalur evakuasi yang optimal menggunakan model optimisasi berbasis *Maximum Dynamic Flow Model*.

3.2 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. **Studi Pustaka**
Pada tahapan ini dilakukan studi pustaka terkait teori optimisasi, teori graf dan pemodelan jalur evakuasi dengan MDFM dari buku-buku dan jurnal baik nasional maupun internasional.
2. **Pengumpulan Data**
Data-data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah data ruangan, lobi, dan koridor serta panjang, lebar, dan luas Gedung FPMIPA A UPI.
3. **Representasi Jaringan**
Denah Gedung FPMIPA A UPI akan direpresentasikan dalam bentuk jaringan yang terdiri dari simpul, busur, dan bobotnya.
4. **Pembangunan Model Optimisasi**
Pada tahapan ini, akan dibangun model optimisasi berbasis *MDFM* dengan terlebih dahulu mendefinisikan asumsi-asumsi.
5. **Penyelesaian Model Optimisasi**
Pada tahapan ini, model optimisasi *MDFP* akan diselesaikan dengan menggunakan pendekatan *Temporally Repeated Flow*.
6. **Validasi**
Model dan teknik penyelesaian akan divalidasi dengan cara membandingkan hasil dari metode *MDFM* pada contoh kasus yang telah diketahui penyelesaiannya pada referensi. Jika hasilnya belum valid, maka tahapan akan diulang dari langkah pemodelan. Jika hasilnya valid, maka akan dilanjutkan ke tahapan implementasi.
7. **Implementasi**
Model optimisasi dan teknik penyelesaian yang telah valid selanjutnya akan diimplementasikan pada studi kasus.
8. **Penarikan Kesimpulan**
Pada tahap ini akan ditarik kesimpulan berdasarkan analisis hasil implementasi.

3.3 Data Penelitian

Gedung FPMIPA A UPI memiliki dua titik kumpul yang berada di luar gedung. Karena sampai saat ini masih belum ditetapkan pembagian titik evakuasi

gedung, maka dalam penelitian ini diasumsikan terdapat 28 titik evakuasi seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Pembagian titik evakuasi Gedung FPMIPA A UPI.

Lantai	Titik Evakuasi	Total
1, 2, 3	Sayap <i>North</i> , Sayap <i>East</i> , Sayap <i>West</i> , serta sudut-sudut Timur Laut, Tenggara, Barat Daya, dan Barat Laut	21
4	Sayap <i>North</i> , Sayap <i>East</i> , serta sudut-sudut Timur Laut dan Barat Laut	4
5	Sayap <i>North</i> , serta sudut-sudut Timur Laut dan Barat Laut	3

Titik evakuasi Sayap *North*, *East*, *South*, dan *West* merujuk kepada ruangan-ruangan yang berada di tengah sayap masing-masing seperti ruang kelas, ruang dosen, laboratorium, auditorium, kantin, dan mushola, sedangkan sudut-sudut gedung merujuk kepada ruang *restroom*. Denah lengkap dari Gedung FPMIPA A dapat dilihat di Lampiran 1, Lampiran 2, Lampiran 3, dan Lampiran 4.

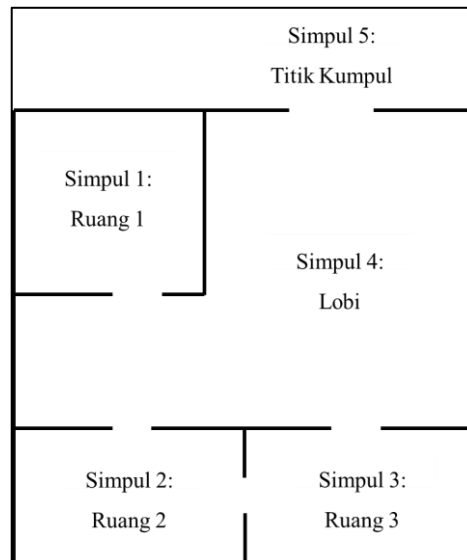
Masalah penentuan jalur evakuasi optimal akan diselesaikan dengan pendekatan MDFP dengan metode *Temporally Repeated Flow*. Metode penyelesaian secara lengkapnya akan dibahas pada sub bab berikutnya.

3.4 Representasi Jaringan

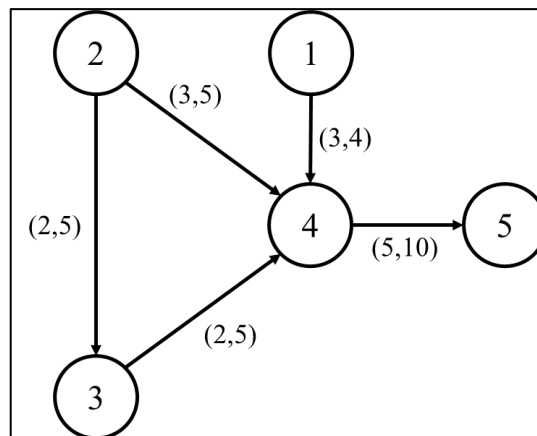
Tahap awal dalam menyelesaikan suatu masalah jalur evakuasi adalah merepresentasikan jalur evakuasi tersebut dalam sebuah jaringan statis yang terdiri dari simpul sumber, simpul perantara, simpul tujuan, dan busur. Simpul mewakili ruangan, lobi, dan persimpangan koridor, sedangkan busur mewakili jalur antar simpul seperti tangga dan lorong yang dapat dilalui pengungsi. Simpul sumber merepresentasikan titik-titik pada bangunan gedung dengan tingkat kepadatan pengungsi yang tinggi seperti ruang kelas, ruang dosen, laboratorium, auditorium, kantin, dan mushola, simpul tujuan mewakili titik kumpul di luar bangunan, dalam kasus ini adalah titik evakuasi, sedangkan simpul perantara merupakan simpul-simpul yang menghubungkan simpul sumber ke simpul tujuan. Setiap busur memiliki bobot berupa waktu tempuh antar simpul dan kapasitas busur. Kapasitas busur merepresentasikan kapasitas maksimum pengungsi yang dapat melewati

busur (jalan) tersebut. Arah busur diasumsikan selalu menuju simpul tujuan terdekat.

Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 adalah salah satu contoh bagaimana merepresentasikan gedung dalam bentuk jaringan.



Gambar 3.1 Contoh denah bangunan.



Gambar 3.2 Representasi jaringan statis dari denah gedung pada Gambar 3.1.

Dalam penelitian ini diasumsikan bahwa kecepatan berjalan pengungsi adalah 1.25 m/s berdasarkan penelitian Alves dkk. (2020) dan 0.625 m/s ketika menggunakan tangga berdasarkan penelitian Poulos dkk. (2018). Diasumsikan rata-rata orang dalam situasi kerumunan padat memakan ruang sebesar 0.4 m² (Exner, 2016). Maka kapasitas lorong dihitung dengan rumus:

$$b_{ij} = \left\lfloor \frac{\text{luas lorong } (i, j)}{0.4} \right\rfloor$$

Diasumsikan pula bahwa setiap anak tangga memiliki lebar 0.3125 m dan hanya dapat ditempati oleh maksimal dua orang. Maka kapasitas tangga dihitung sebagai:

$$b_{ij} = \text{banyak anak tangga } (i, j) \times 2$$

3.5 Asumsi

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan jalur evakuasi yang optimal, yaitu jalur evakuasi yang dapat memaksimalkan banyaknya pengungsi yang terevakuasi dalam rentang waktu T . Adapun asumsi-asumsi yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Tujuan model adalah memaksimalkan banyaknya pengungsi dengan keterbatasan kapasitas jalur.
2. Bobot busur dan rentang waktu evakuasi diketahui.
3. Setiap koridor dan tangga pada gedung memiliki panjang, lebar, dan luas yang sama.
4. Tidak terdapat gangguan selama proses evakuasi, sehingga kecepatan berjalan pengungsi dan kapasitas jalur adalah konstan.
5. Atribut pengungsi seperti usia, jenis kelamin, dan lain-lain diabaikan.
6. Setiap pengungsi mengenal dengan baik setiap komponen dan tata letak gedung.

3.6 Model Optimasi

Masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah penentuan jalur evakuasi yang optimal, yaitu jalur evakuasi yang dapat mengevakuasi pengungsi sebanyak mungkin dalam rentang waktu T . Masalah ini dikategorikan sebagai masalah *Maximum Dynamic Flow Problem* (MDFP). Selanjutnya akan dibentuk model optimisasi penentuan jalur evakuasi berbasis MDFP yang merujuk pada Hamacher dan Tjandra (2001).

Diberikan T sebagai rentang waktu maksimal untuk melakukan evakuasi. Misalkan λ_{ij} adalah waktu tempuh busur (i, j) . Variabel $x_{ij}(t)$ mendefinisikan banyaknya aliran (banyaknya pengungsi) yang meninggalkan simpul i pada waktu

t dan sampai ke simpul j pada waktu $t + \lambda_{ij}$. Aliran dari simpul i pada waktu t ke dirinya sendiri selama waktu $\lambda_{ii} = 1$ merepresentasikan banyaknya pengunjung yang memutuskan untuk menetap pada suatu simpul selama setidaknya satu satuan waktu. Aliran ini dinyatakan dengan $y_i(t + 1) = x_{i(t),i(t+1)}$ di mana $i(t)$ menyatakan simpul i pada waktu t . Kapasitas busur (i, j) pada waktu t dinyatakan dengan $b_{ij}(t)$, sedangkan kapasitas simpul i pada waktu t dinyatakan dengan $a_i(t)$. Misalkan $\emptyset(X)$ adalah fungsi tujuan yang menyatakan banyaknya aliran pada seluruh busur pada jaringan, maka fungsi tersebut dapat diekspresikan sebagai:

$$\emptyset(X) := \sum_{t=0}^{t=T} \sum_{i \in D} x_{id}(t)$$

di mana D adalah himpunan simpul tujuan pada jaringan statis G dan d adalah simpul tujuan jaringan dinamis G_T yang berkorespondensi.

Dengan demikian, formulasi MDFM dengan waktu tempuh serta kapasitas busur yang konstan dapat diformulasikan sebagai model optimisasi berikut:

Memaksimumkan:

$$\sum_{t=0}^{t=T} \sum_{i \in D} x_{id}(t) \quad (1)$$

Terhadap:

$$y_i(t + 1) - y_i(t) = \sum_{k \in \text{pred}(i)} x_{ki}(t - \lambda_{ki}) - \sum_{j \in \text{succ}(i)} x_{ij}(t); \quad (2)$$

$$t = 0, \dots, T; \forall i \in N$$

$$y_i(0) = 0; \forall i \in N \quad (3)$$

$$y_i(t) = 0; \forall i \in S \cup D; t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$0 \leq y_i(t) \leq a_i; t = 1, \dots, T; \forall i \in N - S \cup D \quad (5)$$

$$0 \leq x_{ij}(t) \leq b_{ij}; t = 0, \dots, T - \lambda_{ij}; \forall (i, j) \in A \quad (6)$$

di mana $\text{pred}(i) := \{j | (j, i) \in A\}$ adalah simpul *predecessor*, yaitu simpul pendahulu dari simpul i dan $\text{succ}(i) := \{j | (i, j) \in A\}$ adalah simpul *successor*, yaitu simpul penerus dari simpul i . S merupakan himpunan simpul sumber pada jaringan statis G . Fungsi Tujuan (1) digunakan untuk memaksimalkan banyaknya pengunjung yang dievakuasi. Kendala (2) menyatakan bahwa selisih aliran pada simpul i pada waktu t dan pada waktu $t + 1$ merupakan selisih dari jumlah seluruh

aliran pada busur (k, i) pada waktu $t - \lambda_{ki}$ dan aliran pada busur (i, j) pada waktu t . Kendala (3) memastikan bahwa kapasitas simpul nol untuk setiap simpul pada waktu $t = 0$. Kendala (4) mengharuskan kapasitas simpul nol untuk setiap simpul tujuan dan simpul sumber pada waktu $t = 1, \dots, T$. Kendala (5) dan (6) menjamin bahwa banyaknya aliran pada simpul dan busur tidak boleh melebihi kapasitasnya.

Berdasarkan penelitian Hamacher dan Tjandra (2001), MDFP dengan kapasitas busur serta waktu tempuh busur yang konstan tidak memerlukan parameter kapasitas simpul. Oleh karena itu, variabel $y_i(t)$ dapat diabaikan dari model yang telah dirumuskan.

3.7 Metode Penyelesaian

Dalam penelitian ini, penyelesaian dari model MDFP dilakukan dengan menggunakan teknik yang dikembangkan oleh Ford dan Fulkerson (1958). Tujuan penyelesaian model adalah menentukan komposisi aliran dinamis maksimum dalam rentang waktu T . Sejauh ini, terdapat berbagai macam metode untuk menyelesaikan MDFP. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan menyelesaikan *Minimum Cost Flow Problem* (MCFP) berdasarkan penelitian Hamacher dan Tjandra (2001) yang dinyatakan dalam Proposisi 3.1.

Proposisi 3.1

Menyelesaikan sebuah MDFP ekuivalen dengan memecahkan masalah MCFP. Khususnya, *temporally repeated flow* yang diperoleh dari dekomposisi rantai pada suatu *minimum cost flow* adalah aliran dinamis maksimum.

MCFP dapat diselesaikan dengan mengimplementasikan algoritma pencarian jarak terpendek, dalam penelitian ini digunakan Algoritma Dijkstra. Algoritma Dijkstra merupakan sebuah algoritma yang dapat memecahkan masalah pencarian jarak terpendek antar simpul pada sebuah jaringan atau graf. Adapun langkah-langkah kalkulasi Algoritma Dijkstra menggunakan bantuan aplikasi *Microsoft Excel* yang merujuk ke penelitian oleh Darmawan (2021) yaitu sebagai berikut.

1. Bangun tabel di mana baris mewakili kumpulan simpul-simpul yang akan dituju dan kolom mewakili simpul inisial yang akan digunakan untuk memeriksa waktu tempuh (jarak).

2. Pilih simpul inisial pertama yaitu simpul sumber pada jaringan statis.
3. Catat waktu tempuh pada kolom dan baris yang sesuai dengan keterangan 'X|Y' di mana X adalah waktu tempuh dan Y adalah simpul inisial. Jika ada waktu tempuh baru, maka pilih waktu tempuh yang terkecil.
4. Pilih simpul inisial baru. Jika simpul inisial sebelumnya berajasan dengan lebih dari satu simpul, maka pilih yang memiliki waktu tempuh terkecil terlebih dahulu. Jika tidak, maka satu-satunya simpul yang dituju oleh simpul inisial sebelumnya dapat langsung dipilih sebagai simpul inisial baru.
5. Ulangi dari Langkah 3 sampai simpul tujuan telah dikunjungi. Jika simpul tujuan telah dikunjungi, maka hentikan algoritma. Pemilihan rantai dilakukan dengan mempertimbangkan simpul *predecessor* (simpul pendahulu) dari tiap-tiap simpul inisial.

Setelah Algoritma Dijkstra diimplementasikan, maka diperoleh jarak terpendek dari seluruh simpul sumber ke simpul tujuan terdekat. Selanjutnya, akan dicari komposisi pendistribusian aliran untuk seluruh rantai P yang menghubungkan simpul sumber ke simpul tujuan pada jaringan statis. Pendistribusian aliran akan diulang sepanjang rantai P dalam rentang waktu T dengan pendekatan *Temporally Repeated Flow* (TRF) berdasarkan penelitian Hamacher dan Tjandra (2001). Berikut adalah langkah-langkah pengimplementasian metode TRF berdasarkan Definisi 2.1:

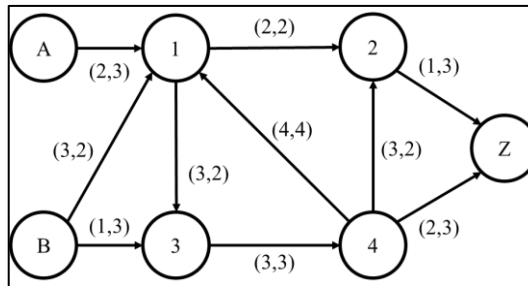
1. Aplikasikan Algoritma Dijkstra untuk menemukan jalur dengan jarak terpendek pada jaringan statis. Misalkan diperoleh solusi optimal x^* .
2. Dekomposisi x^* menjadi k aliran rantai pada P_1, P_2, \dots, P_l sedemikian sehingga

$$x^* = \sum_{i=1}^{i=l} |P_i|$$

3. Ulangi aliran rantai P_i dari waktu nol sampai waktu $T + 1 - \lambda(P_i)$.

di mana $\lambda(P)$ merupakan jumlah waktu tempuh seluruh busur pada rantai P .

Dengan pengimplementasian algoritma TRF, dapat diperoleh total aliran maksimal yang dapat dialirkan dari semua simpul sumber ke simpul tujuan terdekat dalam rentang waktu T . Untuk memperjelas langkah penyelesaian di atas, diberikan contoh kasus sebagai berikut.



Gambar 3.3 Jaringan statis G.

Gambar 3.3 memperlihatkan sebuah interpretasi jaringan statis dari sebuah bangunan dengan bobot busur konstan (x, y) di mana x adalah waktu tempuh busur dan y adalah kapasitas maksimum busur. Simpul A dan B merupakan simpul sumber, sedangkan Simpul Z merupakan simpul tujuan dan Simpul 1, 2, 3, dan 4 menyatakan simpul perantara.

Langkah pertama adalah mencari nilai waktu rentang T untuk menentukan batas waktu maksimal evakuasi. Nilai T dapat diperoleh dengan mengimplementasikan Algoritma Dijkstra ke semua simpul sumber, yaitu sebagai berikut:

A. A – Z

Tabel 3.2 Tabel kalkulasi Algoritma Dijkstra untuk rute A – Z.

	A	1	2	Z	3	4
1	2 A	2 A	2 A	2 A	2 A	2 A
2		4 1	4 1	4 1	4 1	4 1
3		5 1	5 1	5 1	5 1	5 1
4					8 3	8 3
Z			5 2	5 2	5 2	5 2

Berdasarkan perhitungan pada Tabel 3.2, diperoleh jalur evakuasi optimal A – Z adalah $P_1 = \{A, 1, 2, Z\}$ dengan waktu tempuh 5 satuan waktu.

B. B – Z

Tabel 3.3 Tabel kalkulasi Algoritma Dijkstra untuk rute B – Z.

	B	3	4	Z	1	2
1	3 B	3 B	3 B	3 B	3 B	3 B
2			7 4	7 4	5 1	5 1
3	1 B	1 B	1 B	1 B	1 B	1 B
4		4 3	4 3	4 3	4 3	4 3
Z			6 4	6 4	6 4	6 4

Berdasarkan perhitungan pada Tabel 3.3, diperoleh jalur evakuasi optimal B – Z adalah $P_2 = \{B, 3, 4, Z\}$ dengan waktu tempuh 6 satuan waktu.

Dengan demikian, diperoleh waktu rentang $T = 6$ dikarenakan waktu tersebut adalah waktu tempuh terlama dari salah satu simpul sumber ke simpul tujuan terdekat.

Langkah kedua adalah mencari komposisi pengulangan pendistribusian aliran, yaitu sebagai berikut.

1. $P_1 = (A, 1, 2, Z)$

$$\text{Waktu tempuh } \lambda(P_1) = \lambda_{A1} + \lambda_{12} + \lambda_{2Z} = 2 + 2 + 1 = 5;$$

$$\text{Total aliran } |P_1| = \min\{b_{A1}, b_{12}, b_{2Z}\} = \min\{3, 2, 3\} = 2;$$

Maka aliran pada P_1 harus diulang sebanyak $T + 1 - \lambda(P_1) = 6 + 1 - 5 = 2$ kali untuk $t = 0, 1$.

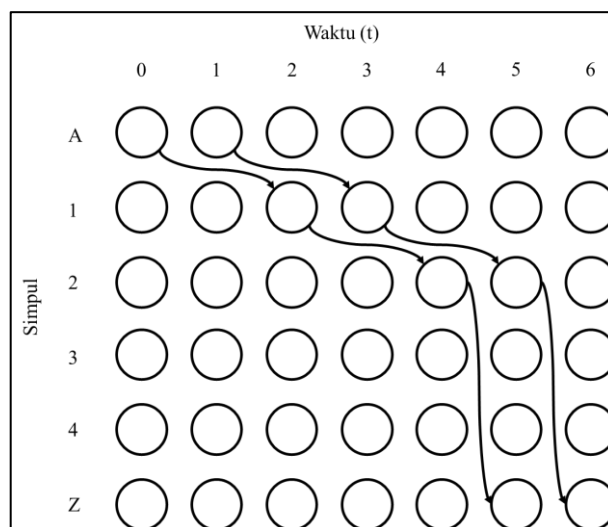
2. $P_2 = (B, 3, 4, Z)$

$$\text{Waktu tempuh } \lambda(P_2) = \lambda_{B3} + \lambda_{34} + \lambda_{4Z} = 1 + 3 + 2 = 6;$$

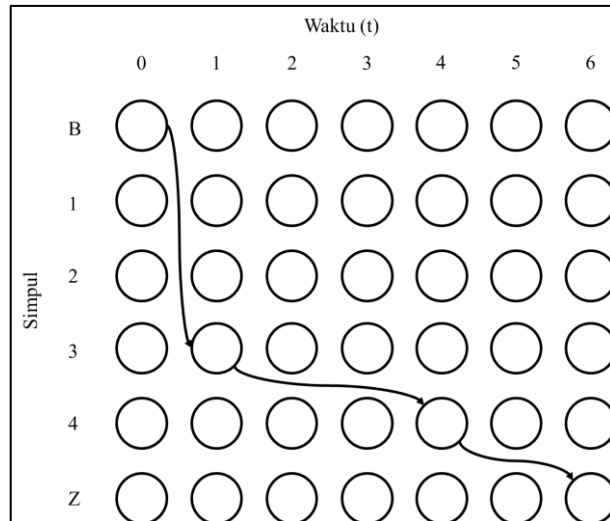
$$\text{Total aliran } |P_2| = \min\{b_{B3}, b_{34}, b_{4Z}\} = \min\{3, 3, 3\} = 3;$$

Maka aliran pada P_2 harus diulang sebanyak $T + 1 - \lambda(P_2) = 6 + 1 - 6 = 1$ kali untuk $t = 0$.

Diperoleh aliran dinamis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5.



Gambar 3.4 Ilustrasi aliran dinamis rantai P_1 .



Gambar 3.5 Ilustrasi aliran dinamis rantai P_2 .

Untuk contoh kasus yang diberikan, diperoleh jalur evakuasi yang optimal adalah $P_1 = \{A, 1, 2, Z\}$ untuk Simpul A dan $P_2 = \{B, 3, 4, Z\}$ untuk Simpul B. Rantai P_1 menghasilkan aliran dinamis sebanyak 2 satuan aliran yang diulang sebanyak dua kali, sedangkan Rantai P_2 menghasilkan aliran dinamis sebanyak 3 satuan aliran yang diulang sebanyak satu kali. Dengan demikian, diperoleh aliran dinamis maksimal yaitu $2 \times 2 + 3 \times 1 = 7$ satuan aliran di mana 2 satuan aliran sampai pada simpul tujuan pada $t = 5$ dan 5 satuan aliran sampai pada simpul tujuan pada $t = 6$.