

## Model Matematika Jalur Evakuasi Dinamis Berbasis *Improved Ant Colony System* pada Gedung Bertingkat

YASMINE AZZAHRA, KARTIKA YULIANTI\*, DAN LUKMAN

Program Studi Matematika, FPMIPA, Universitas Pendidikan Indonesia,  
Jl. Dr. Setiabudhi No. 229 Bandung 40154

Email: kartika.yulianti@upi.edu

### Abstrak

Pada penelitian ini dibangun model matematika untuk menentukan jalur evakuasi yang memperhatikan adanya perubahan kepadatan jalur evakuasi. Model yang diusulkan bertujuan untuk meminimalkan waktu evakuasi dari pengungsi terakhir dalam mencapai titik kumpul, yang dibatasi beberapa kendala. Salah satu kendala tersebut adalah variasi kecepatan berjalan yang dipengaruhi oleh usia dan kepadatan kerumunan. Model diselesaikan dengan algoritma Improved Ant Colony System (IACS) dan mengintegrasikan metode Increasing Flow. Model beserta algoritma tersebut diimplementasikan pada Gedung Sekolah Pascasarjana Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) guna memberikan referensi yang lebih realistis dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Hasil implementasi menunjukkan jalur evakuasi dengan waktu tempuh minimum sebesar 609,47 detik (sekitar 10 menit 16 detik). Temuan ini menunjukkan bahwa algoritma IACS mampu menghasilkan jalur evakuasi yang optimal secara efektif.

**Kata kunci:** Jalur evakuasi dinamis, Improved Ant Colony System (IACS), pemodelan berbasis usia, kepadatan kerumunan.

### Abstract

*In this study, a mathematical model was developed to determine evacuation routes that account for changes in route density. The proposed model aims to minimize the evacuation time of the last evacuee in reaching the assembly point, subject to several constraints. One of these constraints is the variation in walking speed influenced by age and crowd density. The model is solved using the Improved Ant Colony System (IACS) algorithm and integrates the Increasing Flow method. The model and algorithm were implemented at the Graduate School Building of Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) to provide a more realistic reference compared to previous studies. The implementation results show an evacuation route with a minimum travel time of 609.47 seconds (approximately 10 minutes and 16 seconds). These findings demonstrate that the IACS algorithm is effective in producing optimal evacuation routes.*

**Keywords:** *Dynamic evacuation routing, Improved Ant Colony System (IACS), age-based modeling, crowd density.*

## 1. PENDAHULUAN

Manusia melakukan banyak kegiatan di dalam gedung untuk kegiatan keagamaan, pendidikan, sosial, maupun kegiatan khusus lainnya [8]. Sistem evakuasi pada bangunan bertingkat di tengah kepadatan aktivitas manusia adalah merupakan hal yang penting, karena jalur evakuasi yang efektif akan memastikan penghuni bangunan dapat keluar dengan cepat dan aman. Hal ini bersesuaian dengan Peraturan Pemerintah RI no 36 tahun 2025 [7], yang menyebutkan bahwa setiap bangunan gedung harus menyediakan jalur evakuasi yang optimal atau dapat membawa pengguna menuju pintu keluar dengan aman dan cepat ketika keadaan darurat terjadi. Hal ini bertujuan agar risiko cedera akibat bahaya tidak meningkat.

Untuk menentukan jalur evakuasi yang optimal tersebut, terdapat dua model yang dapat dibangun yaitu model statis dan model dinamis. Menurut Huang dkk. [5], model statis menganggap aliran pengungsi sebagai nilai tetap; tidak berubah seiring berjalannya waktu. Pengoptimalan dengan model ini memiliki beberapa algoritma penyelesaian yang digunakan oleh peneliti terdahulu dalam membuat perencanaan jaringan transportasi. Sedangkan pada nyatanya, aliran pada saat proses evakuasi terjadi bisa saja berubah-ubah setiap waktu. Untuk itu, agar penentuan jalur evakuasi lebih efektif dan realistis, penelitian ini membangun model dinamis dengan mempertimbangkan perubahan kecepatan dari setiap pengungsi yang dipengaruhi oleh kepadatan jalur dan usia. Pertimbangan ini penting untuk diperhitungkan karena pada proses evakuasi nyata, usia mempengaruhi kecepatan awal setiap pengungsi dan kerumunan bisa saja terlalu mendominasi suatu jalur sehingga menyebabkan adanya kepadatan. Lebih jauh lagi, kepadatan aktivitas manusia di bangunan bertingkat meningkatkan risiko kesulitan dalam proses evakuasi, seperti kemacetan di lorong atau tangga.

Model dinamis pada penelitian ini diselesaikan menggunakan algoritma *Improved Ant Colony System* (IACS) yang sebelumnya berhasil digunakan Liu [9] dalam menyelesaikan masalah penentuan jalur evakuasi di sebuah kapal pesia. Algoritma IACS merupakan peningkatan dari algoritma *Ant Colony System* (ACS) di mana di dalamnya juga diperkenalkan metode *Increasing Flow* untuk meningkatkan aliran pengungsi secara bertahap untuk meniru proses evakuasi berbasis kelompok di dunia nyata [9]. Penelitian menggunakan algoritma ACS telah banyak dilakukan oleh peneliti terdahulu. Huang dkk. [5] meneliti rencana evakuasi dengan mekanisme *Incremental Flow Assignment* (IFA) dan menjadikan ACS sebagai pengoptimal dasar untuk mensimulasikan perilaku kerumunan selama evakuasi. Gomez dkk. [3] menggabungkan ACS dengan algoritma Aliran Muatan Sistem Distribusi Konvensional untuk menyelesaikan masalah perencanaan sistem distribusi primer jaringan listrik. Montemanni [10] membahas *Dynamic Vehicle Routing Problem* (DVRP) yang harus diintegrasikan secara dinamis dalam jadwal yang berkembang dengan mengusulkan strategi pemecahan berbasis ACS pada studi kasus nyata di kota Lugano, Swiss.

Berbeda dengan ACS, Liu [9] menunjukkan bahwa IACS dapat merencanakan jalur evakuasi darurat dengan efektif dan efisien untuk kerumunan di kapal pesiar. Algoritma ini merupakan strategi konstruksi solusi yang baru karena kemampuannya dalam membangun beberapa rute lengkap secara bersamaan. Pengenalan *Increasing Flow* di dalamnya juga berguna untuk meniru proses evakuasi berbasis kelompok di dunia nyata dengan menentukan tingkat granularitas aliran bertahap. Berbeda dengan Liu [9], pada penelitian ini algoritma IACS diimplementasikan untuk memberikan rujukan baru terkait jalur evakuasi pada gedung bertingkat, yaitu Gedung Sekolah Pascasarjana Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) dalam memberikan hasil yang lebih realistis dengan tujuan meminimumkan waktu tempuh yang dihitung dari lamanya pengungsi terakhir mencapai titik kumpul. Pengimplementasian dikatakan lebih realistis karena waktu evakuasi mempertimbangkan kecepatan setiap pengungsi berdasarkan usianya, yang di mana hal ini dianggap konstan pada penelitian Helmy [4]. Penyelesaian masalah penentuan jalur evakuasi dari penelitian ini diharapkan dapat memudahkan sivitas UPI dalam mengakses pintu keluar ketika keadaan darurat terjadi.

## 2. METODE PENELITIAN

Masalah penentuan jalur evakuasi dinamis yang optimal termasuk persoalan optimisasi. Rohman [12] menyatakan masalah optimisasi pada dasarnya menentukan berbagai nilai variabel suatu fungsi menjadi maksimum atau minimum dengan memperhatikan keterbatasan yang ada. Sedangkan menurut Silalahi [14] optimisasi adalah cabang ilmu matematika yang mempelajari teknik-teknik pencarian nilai maksimum atau minimum dari suatu problem. Model optimisasi yang dibangun pada penelitian ini diselesaikan menggunakan algoritma IACS. Algoritma IACS mampu menyelesaikan permasalahan penentuan beberapa jalur evakuasi di suatu kapal pesiar dengan mempertimbangkan kepadatan kerumunan dan kecepatan pada modelnya [9]. Hal ini menjadikan IACS lebih unggul dibandingkan algoritma *Ant Colony System* (ACS) yang hanya menyelesaikan masalah satu jalur evakuasi. ACS merupakan varian terkenal dari *Ant Colony Optimization* (ACO) yang pertama kali dikemukakan oleh Dorigo & Gambardella [2] dengan mengadaptasi perilaku semut dalam mencari makanan, dimana jalur yang optimal adalah jalur yang dilalui oleh paling banyak semut.

Kerumunan pengungsi pada penelitian ini dibagi menjadi beberapa kelompok berdasarkan titik evakuasi dan usia. Kelompok-kelompok tersebut direpresentasikan oleh semut pada algoritma. Variabel usia mempengaruhi perhitungan kecepatan pengungsi ketika mengevakuasi diri dikarenakan setiap rentangnya memiliki kecepatan awal yang berbeda-beda. Menurut Seike, Kawabata, dan Hasegawa [13], kecepatan rata-rata awal setiap orang di dalam ruang tertutup dan berasap ditunjukkan pada Gambar 1.



GAMBAR 1. Kecepatan rata-rata orang dari berbagai struktur usia

Berdasarkan Gambar 1, kecepatan rata-rata awal orang muda, orang tua, anak-anak, dan kelompok usia lainnya adalah masing-masing 1.46, 1.23, 1.21, dan 0.78 m/s. Selain itu, kecepatan pengungsi juga dipengaruhi oleh kepadatan pada setiap waktu. Kepadatan pada jalur  $i$  menuju  $j$  didefinisikan pada Persamaan (1):

$$\rho_{ij}(T) = \frac{Num_{ij}(T)}{W_{ij}} \quad (1)$$

di mana  $\rho_{ij}$  merepresentasikan kepadatan pada jalur  $i$  menuju  $j$ ,  $Num_{ij}(T)$  adalah jumlah orang yang mengalir di antara  $i$  dan  $j$  pada waktu  $T$ , dan  $W_{ij}$  merepresentasikan luas jalur  $i$  menuju  $j$ . Zhang (dikutip dalam Liu [9]), menunjukkan hubungan antara kecepatan dan kepadatan pada Persamaan (2):

$$v_{ij}^m(T) = v_{ij}^m(0) \cdot e^{-c \cdot \rho_{ij}(T)} \quad (2)$$

di mana  $v_{ij}^m(0)$  adalah kecepatan awal kerumunan pada jalur  $i$  menuju  $j$  dan  $c$  adalah konstanta perubahan kecepatan. Pada penelitian ini, kecepatan awal dari kerumunan memiliki nilai yang berbeda sesuai kelompok usianya.

Dalam menyelesaikan masalah penentuan jalur evakuasi, denah dan struktur Gedung Sekolah Pascasarjana UPI direpresentasikan terlebih dahulu menjadi sebuah jaringan yang terdiri atas tiga simpul dan busur yang diberi bobot. Bobot jaringan dapat berupa jarak, waktu, biaya, dan lain lain [1]. Pada penelitian ini, bobot yang digunakan adalah kapasitas maksimum dari setiap jalur. Kapasitas maksimum diperhitungkan menggunakan Persamaan (3). Menurut Exner (Novianingsih), dalam situasi padat, rata-rata setiap orang memakan ruang sebesar  $0.4 m^2$ . Sedangkan, Novianingsih [6] menyatakan bahwa kapasitas maksimum tangga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4).

$$H_{ij} = \left\lfloor \frac{W_{ij}}{\text{ruang per orang}} \right\rfloor \quad (3)$$

$$H_{ij} = \text{banyak anak tangga} \times 2 \quad (4)$$

Ketiga simpul pada jaringan ini meliputi simpul sumber ( $U$ ), simpul sementara, dan simpul tujuan ( $D$ ) yang kemudian dihimpun menjadi himpunan simpul  $V$ . Simpul sumber dan simpul tujuan berturut-turut merepresentasikan titik-titik evakuasi atau tempat para pengungsi berpusat seperti ruang kelas, ruang dosen, maupun *restroom* dan titik kumpul yang berada di luar gedung. Sedangkan simpul sementara merepresentasikan tangga atau persimpangan antar koridor. Menurut Munir [11], hubungan antar sepasang simpul dapat ditulis sebagai  $e = (u, v)$ .  $u$  dan  $v$  tersebut merupakan titik yang saling bertetangga karena keduanya merupakan titik akhir dari sisi  $e$ . Sedangkan sisi  $e$  disebut bersisian karena menghubungkan simpul  $u$  dan  $v$  [12]. Jaringan juga diberikan arah dengan asumsi selalu menuju ke simpul tujuan. Jaringan berarah ini menyatakan bahwa  $(u, v) \neq (v, u)$  karena simpul asal dan simpul terminalnya berbeda [11].

**2.1. Teknik Penyelesaian.** Penelitian ini membahas permasalahan penentuan jalur evakuasi di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI pada saat keadaan darurat terjadi dengan mempertimbangkan kepadatan dan kecepatan kerumunan. Penelitian ini menggunakan metode *Improved Ant Colony System* (IACS) yang ditingkatkan efisiensinya menggunakan metode *Increasing Flow*. Metode ini digunakan dalam penelitian yang dilakukan oleh Liu dkk. [9] dalam merencanakan evakuasi di kapal pesiar dengan tujuan yang sama yaitu semua pengungsi dapat mencapai titik kumpul dengan selamat dalam jangka waktu yang paling minimum. IACS dapat menghasilkan solusi yang optimum hanya ketika semua semut mencapai tujuan akhir. Semut pada metode ini merepresentasikan sekelompok orang dengan jumlah di setiap kelompoknya disebut sebagai bilangan kardinal yang menentukan tingkat perincian peningkatan arus. Langkah kerja IACS dalam menyelesaikan masalah perencanaan rute evakuasi dinamis adalah sebagai berikut:

#### 1. Inisialisasi

Tahap pertama langkah kerja IACS yaitu menginisialisasi parameter yang akan digunakan. Parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

#### 2. Penempatan Semut

Semut ditempatkan atau diinisialisasi pada titik keberangkatan  $i$  sesuai dengan lokasi kerumunan yang sebenarnya. Setiap semut dari simpul sumber yang sama membawa kelompok usia dan jumlah orang yang berbeda-beda.

#### 3. Konstruksi Solusi

Semut yang telah ditempatkan sebelumnya di titik keberangkatan memilih jalan berdasarkan probabilitas tertinggi menuju titik tujuan sementara  $j$  dengan menggunakan aturan transisi keadaan pada Persamaan (5) - (7).

TABEL 1. Parameter

Parameter	Keterangan
$T$	Interval waktu
$\tau(i, j)$	Konsentrasi feromon pada jalur di antara $i$ dan $j$
$\eta(i, j)$	Fungsi heuristik yang merepresentasikan derajat ekspektasi semut dari simpul $i$ ke $j$
$\beta$	Faktor heuristik yang diharapkan
$c$	Konstanta yang mengontrol perubahan kecepatan
$\Delta_b(i, j)$	Total kuantitas feromon yang dilepaskan oleh semut
$\Delta_k(i, j)$	Jumlah entitas feromon yang dilepaskan oleh koloni semut dengan generasi ke- $k$ dari solusi optimal.
$\xi$	Faktor peluruhan feromon ( $0 < \xi < 1$ )
$\omega$	Parameter ranking
$q_0$	Bilangan acak ( $0 < q_0 < 1$ ) yang menentukan kepentingan relatif dari eksploitasi terhadap eksplorasi
$S_n$	Iterasi solusi ke- $n$
$G$	Generasi
$P$	Total pengungsi yang berhasil dievakuasi di titik kumpul.

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{u \in J_k(i)} \{[\tau(i, u)] \cdot [\eta(i, u)]^\beta\}, & \text{jika } q \leq q_0 \text{ (eksploitasi)} \\ p_k(i, j), & \text{lainnya (eksplorasi bias)} \end{cases} \quad (5)$$

$$p_k(i, j) = \begin{cases} \frac{[\tau(i, j)] \cdot [\eta(i, j)]^\beta}{\sum_{u \in J_k(r)} [\tau(i, u)] \cdot [\eta(i, u)]^\beta}, & \text{jika } u \in J_k(r) \\ 0, & \text{sebaliknya} \end{cases} \quad (6)$$

$$\eta(i, j) = \frac{1}{\operatorname{Num}_{ij}(T)} \quad (7)$$

di mana  $J_k(r)$  merepresentasikan simpul-simpul yang dapat dikunjungi oleh semut di  $i$ .

#### 4. Peningkatan Aliran

Tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa peningkatan aliran semut pada suatu jalan dari titik  $i$  menuju suatu titik  $j$  tidak lebih besar dari kapasitas maksimumnya. Peningkatan aliran ini berdasarkan kepada Persamaan (8) - (10) [9]. Sedangkan kapasitas maksimum diperhitungkan menggunakan Persamaan (4).

$$\operatorname{add}(i, j) = \varepsilon, \quad \text{jika } H_{ij} \geq \varepsilon \quad (8)$$

$$\operatorname{add}(i, j) = 0, \quad \text{jika } H_{ij} < \varepsilon \quad (9)$$

$$\operatorname{Num}_{ij}(T) = \operatorname{Num}_{ij}(T) + \operatorname{add}(i, j) \quad (10)$$

Setelah peningkatan aliran tersebut, terbentuklah rangkaian jalur yang lengkap. Di tahap ini, waktu tempuh pengungsi dihitung dengan mempertimbangkan jarak dari jalur  $i$  menuju  $j$  dan kecepatan dari masing-masing pengungsi dan kepadatan seperti pada Persamaan (11) - (13).

$$\rho_{ij} = \frac{\operatorname{Num}_{ij}}{W_{ij}} \quad (11)$$

$$v_{ij}^m(T) = v_{ij}^m(0) \cdot e^{-c \cdot \rho_{ij}(T)} \quad (12)$$

$$t_{ij}^m = \frac{d_{ij}}{v_{ij}^m(T)} \quad (13)$$

Menurut Zhang (dalam Liu [9]), Persamaan (12) menunjukkan hubungan antara kecepatan dan kepadatan.

### 5. Pembaruan Feromon Lokal

Ketika semut-semut membentuk rangkaian jalur lengkap, secara bersamaan mereka juga meninggalkan feromon pada jalan yang dilewatinya dari simpul keberangkatan awal  $i$  hingga simpul  $j$ . Pada tahap ini, menurut Huang dkk. [5] feromon akan diperbarui dengan Persamaan (14) untuk mencegah semut tereksplorasi di jalur yang sama dan mendorongnya untuk bereksplorasi.

$$\tau(i, j) = (1 - \xi) \cdot \tau(i, j) + \xi \cdot \tau_0 \quad (14)$$

Parameter peluruhan feromon  $\xi$  yang terlalu kecil dapat menyebabkan algoritma terjebak di solusi lokal dikarenakan pengeksplorasi jalur yang sama secara terus menerus. Oleh karena itu, besarnya dapat disesuaikan dengan kondisi dalam algoritma penyelesaian.

### 6. Evaluasi Solusi

Pada tahap ini, solusi yang telah dihasilkan melewati proses evaluasi. Solusi haruslah sesuai dengan fungsi tujuan yang diberikan dan memenuhi semua fungsi kendalanya. Jika sebuah solusi sesuai dengan keduanya, maka solusi tersebut disebut sebagai solusi terbaik. Selain itu, jika jumlah iterasi  $S_n$  telah mencapai jumlah maksimum, maka iterasi dihentikan. Jalur terbaik yang telah ditemukan menjadi rangkaian jalur yang optimal dan algoritma berlanjut ke tahap 7. Sebaliknya, penyelesaian kembali ke tahap 3.

### 7. Pembaruan Feromon Global

Tahap ini memperkuat jalur dengan solusi terbaik dan mengurangi intensitas feromon pada jalur lainnya untuk meningkatkan eksplorasi jalur baru oleh semut. Syarat pembaruan feromon global tertulis pada Persamaan (15) - (18).

$$\tau(i, j) = (1 - \xi) \cdot \tau(i, j) + \xi \sum_{k=1}^{w-1} mNum_{ij}^k [(\omega - k)\Delta_k(i, j) + mNum_{ij}^b \omega \Delta_b(i, j)] \quad (15)$$

$$mNum_{ij} = \frac{\int_0^{T_{total}} Num_{ij} dt}{p} \quad (16)$$

$$\Delta_k(i, j) = \begin{cases} (T_k)^{-1}, & \text{jika } (i, j) \in \text{jalan}^k \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (17)$$

$$\Delta_b(i, j) = \begin{cases} (T_b)^{-1}, & \text{jika } (i, j) \in \text{jalan}^b \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (18)$$

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas implementasi algoritma *Improved Ant Colony System* pada penentuan jalur evakuasi Gedung Sekolah Pascasarjana UPI yang telah dirumuskan pada bab sebelumnya. Tujuan dari implementasi ini adalah agar pengungsi terakhir mencapai titik kumpul dalam waktu yang paling minimum.

**3.1. Data Penelitian.** Data penelitian yang digunakan adalah data sekunder berupa struktur dan denah bangunan Gedung Sekolah Pascasarjana UPI pada Helmy [4]. Data ini meliputi ruangan-ruangan pada gedung, dan jarak serta luas koridor dan tangga. Gedung Sekolah Pascasarjana UPI terdiri atas enam lantai. Titik evakuasi di setiap lantainya meliputi ruangan-ruangan yang merupakan tempat para pengungsi berpusat seperti ruang kelas, ruang dosen, ruang administrasi, ruang staf, auditorium, dan *restroom*. Sedangkan, titik kumpul berada di luar gedung. Untuk mencapai titik kumpul tersebut, pengungsi dapat melakukan mobilisasi melalui koridor dan tangga. Setiap lantai di gedung ini dihubungkan oleh empat tangga dan memiliki dua koridor utama yang direpresentasikan sebagai busur pada jaringan dengan bobot jarak dan kapasitas maksimum. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan jalur evakuasi

dinamis pada Gedung Sekolah Pascasarjana UPI dengan mempertimbangkan kepadatan dan kecepatan kerumunan pada perhitungan waktu. Selain itu, variabel usia juga diperhitungkan di dalamnya untuk menentukan kecepatan awal pengungsi. Dengan demikian, penelitian ini juga melibatkan data jumlah dan usia pengguna setiap ruangan di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI setiap harinya yang diperoleh dari pengamatan langsung. Diasumsikan rentang usia pengguna dikelompokkan menjadi empat, yaitu kelompok anak-anak/A (6 - 12 tahun), orang muda/OM (13 - 29 tahun), orang tua/OT (30 - 50 tahun), dan lainnya/L (50 tahun ke atas dan orang dengan alat bantu jalan). Data ruangan dan jumlah pengungsi di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI dapat dilihat pada Tabel 2.

TABEL 2. Ruangan-ruangan dan jumlah pengungsi di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI

Simpul	Ruangan	Jumlah Pengungsi
A1	Seluruh ruangan dari <i>restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 1 sampai persimpangan koridor dan tangga (B1)	1 A, 5 OM, 16 OT
H1	Seluruh ruangan dari <i>restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 1 sampai persimpangan koridor dan tangga (G1)	4 OM, 12 OT
Z	Titik kumpul	-
A2	<i>Restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 2	2 OM, 3 OT
C2	Seluruh ruangan pada bagian Timur Laut (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Laut lantai 2	29 OM, 12 OT, 1 L
F2	Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Laut lantai 2	17 OM, 25 OT
H2	<i>Restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 2	2 OM, 3 OT
A3	<i>Restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 3	4 OM, 1 OT
C3	Seluruh ruangan pada bagian Timur Laut (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Laut lantai 3	50 OM, 50 OT
E3	Seluruh ruangan dan <i>student space</i> pada bagian Barat lantai 3	20 OM, 10 OT
G3	Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Daya lantai 3	30 OM, 30 OT
I3	<i>Restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 3	4 OM, 1 OT
A4	<i>Restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 4	4 OM, 1 OT
C4	Seluruh ruangan pada bagian Timur Laut (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Laut lantai 4	30 OM, 30 OT
E4	Seluruh ruangan dan <i>student space</i> pada bagian Barat lantai 4	20 OM, 10 OT
G4	Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Daya lantai 4	35 OM, 24 OT, 1 L
I4	<i>Restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 4	5 OM
A5	<i>Restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 5	3 OM, 2 OT
C5	Seluruh ruangan pada bagian Timur Laut (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Laut lantai 5	41 OM, 41 OT
E5	Ruang auditorium pada bagian Barat lantai 5	60 OM, 60 OT
G5	Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan Barat Daya lantai 5	41 OM, 41 OT
I5	<i>Restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 5	3 OM, 2 OT
A6	<i>Restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 6	3 OM, 2 OT
C6	Seluruh ruangan pada bagian Timur Laut (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Daya lantai 6	50 OM, 50 OT

Simpul	Ruangan	Jumlah Pengungsi
F6	Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>re-stroom</i> ) dan bagian Barat Daya lantai 6	50 OM, 50 OT
H6	<i>Restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 6	4 OM, 1 OT
<b>Total =</b>		996 pengungsi (1A, 516 OM, 477 OT, 4L)

Berdasarkan Tabel 2, jumlah pengungsi yang akan dievakuasi pada penelitian ini sebanyak 996 orang dengan jumlah masing-masing setiap kelompok usia adalah 1 anak, 516 orang muda, 477 orang tua, dan 4 lainnya. Jumlah ini didapat dari mengasumsikan bahwa seluruh ruangan di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI terisi penuh.

**3.2. Model Matematika.** Penelitian ini membahas penentuan jalur evakuasi yang optimal. Optimal yang dimaksud adalah meminimalkan total waktu yang ditempuh oleh pengungsi terakhir dalam mencapai titik kumpul. Model optimasi yang dibangun akan memerhatikan asumsi-asumsi sebagai berikut: 1. Tujuan model adalah meminimumkan waktu yang ditempuh pengungsi terakhir dalam mencapai titik kumpul selama proses evakuasi berlangsung; 2. Semua pengungsi dapat mencapai titik tujuan; 3. Kecepatan berubah-ubah berdasarkan kepadatan jalan/lorong/tangga dan usia pengungsi; 4. Kecepatan pengungsi saat di dalam lorong atau saat menuruni tangga diasumsikan sama; 5. Tidak mempertimbangkan perilaku kelompok keluarga. Dengan demikian, model optimasi dalam penentuan jalur evakuasi dinamis berbasis metode IACS dituliskan pada Persamaan (19) - (24):

Meminimumkan

$$\min f = \max_{m \in M} \sum_{i=s_u^m}^{j=route_m} t_{ij}^m \quad (19)$$

Terhadap

$$Num_{ij} \leq H_{ij}, \quad \forall (i, j) \in V, \text{ dengan } H_{ij} = \left\lfloor \frac{W_{ij}}{\text{ruang per orang}} \right\rfloor \quad (20)$$

$$\sum_{j \in V} Num_{ij} - \sum_{i \in V} Num_{ij} = 0, \quad \forall (i, j) \in V - (U \cup D) \quad (21)$$

$$v_{ij}^m(T) = v_{ij}^m(0) \cdot e^{-c \cdot \rho_{ij}(T)}, \quad \text{dengan } \rho_{ij} = \frac{Num_{ij}}{W_{ij}} \quad (22)$$

$$t_{ij}^m = \frac{d_{ij}}{v_{ij}^m(T)} \quad (23)$$

$$\max_{m \in M} \sum_{i=s_u^m}^{j=route_m} t_{ij}^m \leq T_{total} \quad (24)$$

di mana  $H_{ij}$  adalah kapasitas maksimum jalur  $i$  menuju  $j$ ,  $d_{ij}$  adalah jarak dari  $i$  menuju  $j$ ,  $t_{ij}^m$  merepresentasikan waktu yang ditempuh pengungsi  $m$  dari  $i$  menuju  $j$ , dan  $T_{total}$  adalah waktu maksimum evakuasi yang telah diinisialisasi (pada penelitian ini: 15 menit).

Fungsi tujuan pada penelitian ini dinyatakan pada Persamaan (19) yaitu meminimumkan waktu tempuh evakuasi yang dihitung dari lamanya pengungsi terakhir dalam mencapai simpul tujuan atau titik kumpul. Fungsi tujuan tersebut memperhatikan beberapa kendala seperti yang tertulis pada Persamaan (20) hingga Persamaan (24). Persamaan (20) menyatakan bahwa aliran pengungsi di jalur  $i$  menuju  $j$  tidak boleh melebihi kapasitas maksimum  $H_{ij}$ . Persamaan (21) menyatakan bahwa jumlah pengungsi yang masuk ke simpul sementara atau simpul selain simpul sumber dan simpul tujuan harus berjumlah sama dengan jumlah pengungsi yang keluar. Persamaan (22) menyatakan bahwa kecepatan dari setiap pengungsi berbeda-beda dikarenakan adanya faktor kepadatan kerumunan di setiap waktu yang memengaruhinya. Persamaan (23) menyatakan bahwa waktu yang ditempuh setiap pengungsi dipengaruhi oleh jarak dan kecepatan. Persamaan (24) menyatakan bahwa total waktu yang ditempuh oleh pengungsi

terakhir yang mencapai titik tujuan harus kurang dari atau sama dengan waktu maksimum evakuasi.

**3.3. Hasil Implementasi.** Model dinamis dalam penentuan jalur evakuasi di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI diselesaikan menggunakan algoritma *Improved Ant Colony System* (IACS). Penelitian ini menggunakan *software* Google Colab dengan bahasa pemrograman Python yang dijalankan pada laptop dengan Intel Core i7-1165G7 dan 16 GB RAM. Parameter-parameter yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Banyaknya semut yang digunakan adalah 52 semut. Semut-semut ini merepresentasikan kelompok pengungsi dengan rentang usia dan simpul sumber yang sama;
2. Feromon awal ( $\tau_0$ ) sebesar 0.5;
3. Feromon peluruhan ( $\xi$ ) sebesar 0.3;
4. Nilai beta ( $\beta$ ) atau faktor heuristik adalah 2;
5. Bilangan acak  $q_0$  adalah 0.5;
6.  $c$  atau konstanta yang mengatur perubahan kecepatan adalah 0.2;
7. Ranking iterasi ( $\omega$ ) sebanyak 6 jalur. Melalui percobaan 30 kali running program dengan 20 generasi dan 100 iterasi, didapat jalur evakuasi di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI yang paling minimum adalah 609.47 detik atau sekitar 10 menit 16 detik. Waktu tersebut dihitung dari lamanya pengungsi terakhir sampai ke titik tujuan. Pada solusi minimum ini, semut yang terakhir sampai ke titik tujuan adalah semut dengan ID 22 (Gambar 2). Semut ini berasal dari simpul sumber C5 dan membawa kelompok usia orang tua dengan jumlah 41 orang pengungsi.

```

Semut 21 dari C5
Rute: ['C5', 'B5', 'B4', 'B3', 'B2', 'B1', 'C1', 'I1',
'J1', 'Z']
Orang dibawa: 41
Waktu tempuh: 513.45 detik
Semut 22 dari C5
Rute: ['C5', 'B5', 'B4', 'B3', 'B2', 'B1', 'C1', 'I1',
'J1', 'Z']
Orang dibawa: 41
Waktu tempuh: 609.47 detik
Semut 23 dari C6
Rute: ['C6', 'D6', 'E6', 'J6', 'K5', 'K4', 'K3', 'J2',
'E1', 'F1', 'I1', 'J1', 'Z']
Orang dibawa: 50
Waktu tempuh: 245.04 detik
Semut 24 dari C6
Rute: ['C6', 'D6', 'E6', 'J6', 'K5', 'K4', 'K3', 'J2',
'E1', 'F1', 'I1', 'J1', 'Z']
Orang dibawa: 50
Waktu tempuh: 290.86 detik

```

GAMBAR 2. Semut terakhir pada solusi jalur evakuasi di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI

Semut ID 22, yang merupakan semut terakhir yang mencapai titik kumpul pada solusi optimal, menempuh total jarak 106.5 meter. Dari perhitungan tersebut, didapat bahwa kecepatan semut menurun dari kecepatan awalnya yaitu sebesar  $1.23 \text{ m/s}$  menjadi  $0.175 \text{ m/s}$  ketika tiba di simpul tujuan. Dengan kecepatan akhir tersebut, maka kepadatan sepanjang jalur yang ditempuh oleh semut ini rata-rata sebesar  $9.75 \text{ orang/m}$  dan tergolong tinggi. Jalur yang diperoleh untuk masalah penentuan jalur evakuasi di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI adalah seperti pada Tabel 3.

TABEL 3. Solusi optimal jalur evakuasi di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI

ID Semut	Jalur Evakuasi
A1 - Z	Seluruh ruangan dari <i>restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 1 sampai persimpangan koridor dan tangga (B1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.

ID Semut	Jalur Evakuasi
H1 - Z	Seluruh ruangan dari <i>restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 1 sampai persimpangan koridor dan tangga (G1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
A2 - Z	<i>Restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 2 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 2 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
C2 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Timur Laut (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Laut lantai 2 Tangga bagian Timur Laut lantai 2 (J2) Tangga bagian Timur lantai 1 (E1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
B2 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Timur Laut (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Laut lantai 2 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 2 (B2) Tangga pada bagian Timur Laut lantai 1 (B1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
F2 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Laut lantai 2 Tangga pada bagian Tenggara lantai 2 (G2) Tangga pada bagian Tenggara lantai 1 (G1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
H2 - Z	<i>Restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 2 Tangga pada bagian Tenggara lantai 2 Tangga pada bagian Tenggara lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
A3 - Z	<i>Restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 3 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 3 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
C3 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Timur Laut (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Laut lantai 3 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 3 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
E3 - Z	Seluruh ruangan dan <i>student space</i> pada bagian Barat lantai 3 Tangga pada bagian Timur lantai 3 (J3) Tangga pada bagian Timur lantai 1 (D1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi. Seluruh ruangan dan <i>student space</i> pada bagian Barat lantai 3 Tangga pada bagian Timur lantai 3 (K3) Tangga pada bagian Timur lantai 1 (E1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
G3 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Daya lantai 3 Tangga pada bagian Timur lantai 3 (K3) Tangga pada bagian Timur lantai 1 (E1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi. Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Daya lantai 3 Tangga pada bagian Tenggara lantai 3 Tangga pada bagian Tenggara lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
I3 - Z	<i>Restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 3 Tangga pada bagian Tenggara lantai 3 Tangga pada bagian Tenggara lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
A4 - Z	<i>Restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 4 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 4 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
C4 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Timur Laut (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Laut lantai 4 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 4 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Lobi Titik kumpul evakuasi.
E4 - Z	Seluruh ruangan dan <i>student space</i> pada bagian Barat lantai 4 Tangga pada bagian Timur lantai 4 (J4) Tangga pada bagian Timur lantai 1 (D1) Persimpangan antar koridor (I1) Lobi Titik kumpul evakuasi.

ID Semut	Jalur Evakuasi
E4 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Daya lantai 4 Tangga pada bagian Timur lantai 4 (K4) Tangga pada bagian Timur lantai 1 (E1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
G4 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Daya lantai 4 Tangga pada bagian Tenggara lantai 4 Tangga pada bagian Timur lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi
I4 - Z	<i>Restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 4 Tangga pada bagian Tenggara lantai 4 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
A5 - Z	<i>Restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 5 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 5 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
C5 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Timur Laut (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Laut lantai 5 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 5 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
E5 - Z	Ruang auditorium pada bagian Barat lantai 5 Tangga pada bagian Timur lantai 5 (J5) Tangga pada bagian Timur lantai 1 (D1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
G5 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan Barat Daya lantai 5 Tangga pada bagian Timur lantai 5 (K5) Tangga pada bagian Timur lantai 1 (E1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi. Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan Barat Daya lantai 5 Tangga pada bagian Tenggara lantai 5 Tangga pada bagian Tenggara lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
I5 - Z	<i>Restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 5 Tangga pada bagian Tenggara lantai 5 Tangga pada bagian Tenggara lantai 1 Persimpangan antar koridor Lobi Titik kumpul evakuasi.
A6 - Z	<i>Restroom</i> perempuan pada bagian Timur Laut lantai 6 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 6 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
C6 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Timur Laut (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Daya lantai 6 Tangga pada bagian Timur Laut lantai 6 Tangga pada bagian Timur lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
F6 - Z	Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Daya lantai 6 Tangga pada bagian timur lantai 6 (J6) Tangga pada bagian Timur lantai 1 (E1) Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi. Seluruh ruangan pada bagian Tenggara (kecuali <i>restroom</i> ) dan bagian Barat Daya lantai 6 Tangga pada bagian Tenggara lantai 6 Tangga pada bagian Tenggara lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.
H6 - Z	<i>Restroom</i> laki-laki pada bagian Tenggara lantai 6 Tangga pada bagian Tenggara lantai 6 Tangga pada bagian Tenggara lantai 1 Persimpangan antar koridor (I1) Titik kumpul evakuasi.

Berdasarkan Tabel 3, dapat divisualisasikan jaringan-jaringan pada pergerakan pertama, kedua, dan rute lengkap beserta total jumlah pengungsi yang melewati masing-masing jalurnya seperti pada Gambar 3 dan Gambar ???. Visualisasi ini dapat diterjemahkan sebagai berikut:

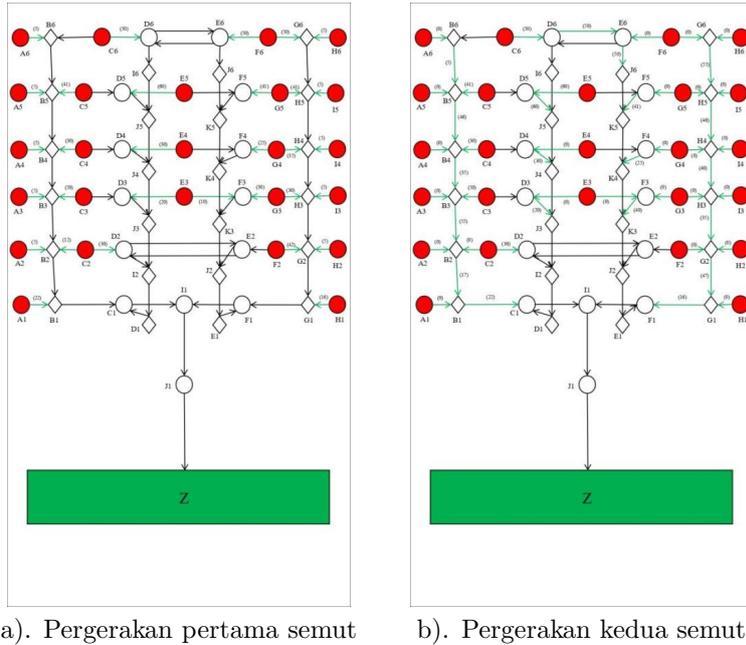
- Seluruh pengungsi yang berada di ruangan dan *restroom* perempuan pada bagian Timur Laut dan Barat Laut, kecuali kode C6, dan 28,6% pengungsi dari kode C2, dapat menggunakan tangga-tangga pada bagian Timur Laut atau sebelah ujung kiri pintu masuk.

- Seluruh pengungsi yang berada di ruangan dan *restroom* laki-laki pada bagian Tenggara dan Barat Daya, masing-masing 50% pengungsi dari kode F6, G5 dan G3, serta 58,3% pengungsi

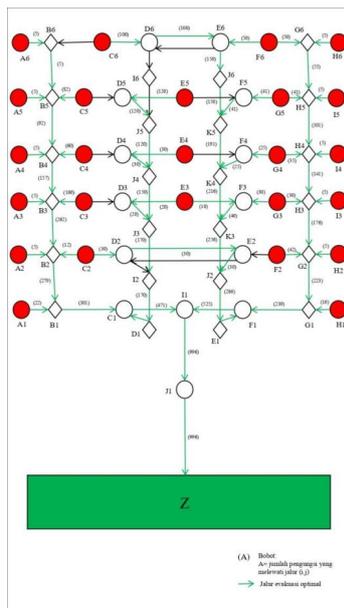
dari kode G4 dapat menggunakan tangga-tangga pada bagian Tenggara atau sebelah ujung kanan pintu masuk.

- Seluruh pengungsi yang berada di ruangan pada bagian Barat dan 71,4% pengungsi dari kode C2, kecuali 33,3% dari kode E3 dapat menggunakan tangga di sebelah kiri lift.

- Selain ruangan-ruangan yang disebutkan pada poin sebelumnya, jumlah pengungsi yang tersisa dapat menggunakan tangga di sebelah kanan lift.



GAMBAR 3. Pergerakan Semut



GAMBAR 4. Jalur evakuasi optimal di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI

Jalur evakuasi di Gedung Sekolah Pascasarjana UPI yang dihasilkan menggunakan algoritma IACS pada penelitian ini sudah mempertimbangkan fungsi-fungsi kendala pada model optimasi di subbab 2.1. Fungsi-fungsi tersebut yaitu aliran setiap pengungsi diperhitungkan di setiap jalannya sehingga semut dapat memilih jalan lain ketika kapasitas mencapai maksimum, total pengungsi di seluruh simpul sumber berjumlah sama dengan jumlah pengungsi di simpul tujuan pada iterasi terakhir, semut dengan simpul sumber sama tidak mencapai simpul tujuan dalam waktu yang sama juga dikarenakan adanya kecepatan setiap semut yang dipengaruhi oleh usia dan kepadatan kerumunan, dan waktu evakuasi minimum yang didapat tidak melebihi  $T_{total}$  yaitu 15 menit. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa jalur evakuasi yang diperoleh, yaitu 609.47 detik atau sekitar 10 menit 9 detik, sudah optimal dan memiliki tingkat kepadatan yang tinggi.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, Helmy [4] berhasil menemukan jalur evakuasi berbeda dengan waktu yang lebih minimum yaitu 9 menit 26 detik. Hal ini dikarenakan jumlah pengungsi yang dievakuasi lebih sedikit yaitu 819 orang dan kecepatan setiap pengungsinya diasumsikan sama atau tidak dikelompokkan berdasarkan usia. Selain itu, model dan juga algoritma penyelesaian yang digunakan berbeda. Meskipun begitu, penelitian ini dapat menjadi pertimbangan dalam menentukan jalur evakuasi di gedung tersebut karena mempertimbangkan kepadatan kerumunan dan perbedaan kecepatan pada setiap kelompok usia.

#### 4. SIMPULAN

Berdasarkan pembahasan pada penelitian ini, dapat diambil kesimpulan bahwa masalah penentuan jalur evakuasi di suatu gedung dapat dimodelkan secara dinamis dengan fungsi tujuan meminimumkan waktu tempuh yang dihitung dari lamanya pengungsi terakhir mencapai titik kumpul. Selain itu, terdapat juga fungsi kendala yaitu kapasitas maksimum dari koridor atau tangga sebagai akses jalan, kecepatan yang dipengaruhi oleh faktor usia dan kepadatan dari kerumunan, serta semua pengungsi harus terevakuasi. Model ini diselesaikan menggunakan algoritma IACS. Hasil implementasi pada Gedung Sekolah Pascasarjana UPI menghasilkan jalur dengan waktu yang optimal atau paling minimum yaitu 609,47 detik atau sekitar 10 menit 9 detik. Jalur tersebut membagi setiap pengguna Gedung Pascasarjana UPI pada setiap lantainya untuk melakukan mobilisasi menggunakan tangga yang berbeda-beda sesuai dengan kepadatan kerumunan pada waktu ke- $T$ . Pada pengimplementasian secara nyata, hasil penelitian ini dapat menjadi salah satu referensi bagi pengelola Gedung Pascasarjana UPI dengan memberikan penanda arah jalur evakuasi pada setiap ruangan atau lorong, sehingga setiap individu dapat mengevakuasi dirinya dengan baik dan cepat saat keadaan darurat terjadi. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, dapat dikonstruksi model matematika yang mempertimbangkan perbedaan kecepatan pengungsi pada zona yang berbeda, misalnya lorong atau tangga..

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chantique, J. R., Napitupulu, H., & Subartini, B. (2021). Perbandingan Algoritme Dijkstra dan Node Combination Dalam Perhitungan Betweenness Centrality pada Graf Jaringan Listrik Universitas Padjadjaran Jatinangor. *Jurnal Matematika Integratif*, 17(2), 137–145.
- [2] Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transaction on evolutionary computation*, 1(1), 53–66.
- [3] Gomez, J. F., Khodr, H. M., De Oliveira, P. M., Ocque, L., Yusta, J. M., Villasana, R., & Urdaneta, A. J. (2004). Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits. *IEEE Transactions on power systems*, 19(2), 996–1004.
- [4] Helmy, N. D. (2024). *Penentuan Jalur Evakuasi Gedung Bertingkat Menggunakan Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)*. (Skripsi). Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Pendidikan Indonesia. Bandung
- [5] Huang, Z. M., Chen, W. N., Li, Q., Luo, X. N., Yuan, H. Q., & Zhang, J. (2020). Ant colony evacuation planner: An ant colony system with incremental flow assignment for multipath crowd evacuation. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 51(11), 5559–5572.

- [6] Novianingsih, K., Ilham, B., Yulianti, K., & Gozali, S. M. (2024, September). Planning Evacuation Routes in Rise Buildings Using Maximum Dynamic Flow Approach. In 9th Mathematics, Science, and Computer Science Education International Seminar (MSCEIS 2023) (pp. 142–148). Atlantis Press.
- [7] Indonesia. (2007). *Peraturan pemerintah Republik Indonesia nomor 36 tahun 2005 tentang peraturan pelaksanaan undang-undang nomor 28 tahun 2002 tentang bangunan gedung*. Direktorat Jenderal Cipta Karya.
- [8] Indonesia. (2023). *Undang-undang republik indonesia nomor 28 tahun 2002 tentang bangunan gedung*. Panca Usaha.
- [9] Liu, L., Zhang, H., Xie, J., & Zhao, Q. (2021). An ant colony system algorithm for dynamic evacuation planning on cruise ships based on a limited number of safety instructions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 220.
- [10] Montemanni, R., Gambardella, L. M., Rizzoli, A. E., & Donati, A. V. (2005). Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem. *Journal of combinatorial optimization*, 10, 327–343.
- [11] Munir, R. (2005). *Matematika Diskrit*. Bandung: Informatika.
- [12] Rohman, S., Zakaria, L., Asmiati, A., & Nuryaman, A. (2020). Optimisasi travelling salesman problem dengan algoritma genetika pada kasus pendistribusian barang pt. pos indonesia di kota bandar lampung. *Jurnal Matematika Integratif*, 16(1), 61–73.
- [13] Seike, M., Kawabata, N., & Hasegawa, M. (2016). Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel. *Tunneling and Underground Space Technology*, 53, 61–67.
- [14] Silalahi, B. P., Fatihin, K., Supriyo, P. T., & Gurtiman, S. (2020). Algoritme sweep dan particle swarm optimization dalam optimisasi rute kendaraan dengan kapasitas. *Jurnal Matematika Integratif*, 16(1), 29–40.