

Perancangan Jalur Evakuasi Pada Gedung Apartemen Menggunakan Metode *Ant Colony Optimization*

Agung Setiyo Budi¹, Moch Luqman Ashari¹, dan Mades Darul Khairansyah^{1*}

¹Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111

*E-mail: mades@ppns.ac.id

Abstrak

Jurnal ini membahas perancangan jalur evakuasi pada gedung apartemen 15 lantai menggunakan metode *Ant Colony Optimization* (ACO). Dalam situasi keadaan darurat, jalur evakuasi yang efektif dan efisien sangat penting untuk menyelamatkan penghuni gedung. ACO merupakan metode yang diadopsi dari perilaku koloni semut dalam mencari jalur terpendek menuju sumber makanan. Dalam penelitian ini, simulasi komputer dilakukan untuk memodelkan gedung apartemen 15 lantai dan memperoleh jalur evakuasi optimal menggunakan algoritma ACO. Metode ACO digunakan untuk mengoptimalkan jalur evakuasi dengan mempertimbangkan beberapa faktor, termasuk jarak tempuh, kemiringan, kepadatan populasi, dan hambatan lainnya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ACO dapat menghasilkan jalur evakuasi yang optimal pada gedung apartemen 15 lantai. Jalur evakuasi tersebut mempertimbangkan faktor-faktor kritis dan menghasilkan rute yang meminimalkan jarak tempuh serta menghindari hambatan yang mungkin terjadi. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam bidang perancangan jalur evakuasi pada gedung tinggi dengan menggunakan pendekatan ACO. Hasil dan temuan dari penelitian ini dapat menjadi panduan untuk perancang dan pengembang gedung dalam mempertimbangkan aspek keselamatan dan evakuasi pada tahap perencanaan dan desain.

Kata Kunci: *Ant Colony Optimization* (ACO), Keselamatan, Evakuasi, Perancangan Jalur Evakuasi

Abstract

This journal discusses the design of an evacuation route in a 15-storey apartment building using the Ant Colony Optimization (ACO) method. In an emergency situation, an effective and efficient evacuation route is very important to save the occupants of the building. ACO is a method adopted from the behavior of ant colonies in finding the shortest path to a food source. In this study, computer simulations were carried out to model a 15-storey apartment building and obtain the optimal evacuation route using the ACO algorithm. The ACO method is used to optimize evacuation routes by considering several factors, including distance traveled, slope, population density, and other obstacles. The simulation results show that the ACO method can produce an optimal evacuation route for a 15-storey apartment building. The evacuation route considers critical factors and produces a route that minimizes travel distance and avoids obstacles that may occur. This research contributes to the design of evacuation routes for tall buildings using the ACO approach. The results and findings of this study can serve as a guide for building designers and developers in considering safety and evacuation aspects at the planning and design stages.

Keywords: *Ant Colony Optimization (ACO), Evacuation, Evacuation Route Design, Safety*

1. PENDAHULUAN

Gedung besar dan bertingkat tinggi yang dapat menampung banyak orang berpotensi menimbulkan korban apabila terjadi bencana. Keselamatan pada gedung bertingkat menjadi hal yang penting dan harus diperhatikan. Kesadaran akan pentingnya penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada gedung harus diperhatikan karena dapat menimbulkan kerugian berupa korban jiwa, kerugian materi, maupun terganggunya fungsi utama dari gedung itu sendiri sebagai tempat hunian maupun layanan jasa. Selain itu, diaplikasikannya K3 yang baik pada sebuah gedung akan membuat penghuni gedung merasa aman dan tidak khawatir akan keselamatan dirinya. Dengan dampak tersebut maka prosedur K3 sangatlah penting diterapkan pada gedung terutama gedung bertingkat, hal ini dikarenakan gedung bertingkat memiliki risiko lebih besar terhadap penyebab-penyebab terjadinya kecelakaan. Kecelakaan atau bahaya yang terjadi pada gedung terjadi dikarenakan beberapa faktor penyebab, diantaranya adalah konstruksi gedung yang tidak sesuai standar, kebakaran, gempa bumi dan lain-lain.

National Fire Protection Association (NFPA) pada 2013 merilis "U.S. Structure Fires in Office Properties",

NFPA memperkirakan Departemen Pemadam Kebakaran Amerika merespon rata-rata 3.340 kebakaran per tahun. Fenomena kebakaran ini menyebabkan 4 kematian warga, 44 warga luka bakar, dan kerusakan properti senilai \$112 Miliar rata-rata per tahun.

Kasus kebakaran juga sering kita jumpai di Negara Indonesia. Salah satu contoh bencana kebakaran apartemen yang mengakibatkan kerugian adalah kasus kebakaran di Unit apartemen di Apartemen City Resort, Cengkareng Timur, Cengkareng, Jakarta Barat, kejadian kebakaran terjadi pada Kamis 7 April 2022. Kebakaran terjadi di salah satu unit apartemen di lantai 12, kebakaran diduga terjadi karena korsleting listrik. Kerugian ditaksir mencapai 50 Juta (Hapsari, 2022). Kasus kebakaran pada gedung apartemen juga terjadi pada apartemen Ambassade Residence di Jalan Denpasar Raya, Kelurahan Karet Kuningan, Kecamatan Setiabudi, Jakarta Selatan pada Minggu 24 April 2022. Kebakaran terjadi pada lantai *basement* apartemen. Namun penyebab kebakaran masih belum diketahui, tidak terdapat korban dari kejadian kebakaran tersebut (Achmad, N. M. 2022).

Dari Gambar 1. diketahui bahwa Indonesia merupakan negara dengan risiko gempa bumi yang sangat tinggi. Letak Indonesia yang berada diantara tiga lempeng tektonik, yaitu lempeng Pasifik, lempeng Eurasia dan lempeng Indo Australia membuat Indonesia sering mengalami gempa bumi. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) mencatat aktivitas gempa tektonik tahun 2021 meningkat dibanding tahun lalu. Sepanjang tahun 2021, BMKG mencatat sebanyak 10.570 kali gempa bumi tektonik. Sementara itu, di tahun 2020 Indonesia mengalami 8.264 kali gempa bumi tektonik. Aktivitas gempa yang dicatat BMKG terhitung dari berbagai variasi magnitudo dan kedalaman, yang bersumber dari gempa subduksi lempeng dan sesar aktif. Gempa yang terhitung signifikan (di atas M 5) terjadi sebanyak 244 kali sepanjang tahun 2021. Angka tersebut persis sama seperti tahun lalu. "Jumlah ini ternyata sama persis dengan aktivitas gempa (signifikan) yang terjadi pada tahun 2020 yaitu 244 kali," tulis keterangan yang dikirim Koordinator Mitigasi Gempa Bumi dan Tsunami BMKG, Daryono. Gempa dengan skala 5 magnitudo termasuk kedalam kategori gempa sedang dan dapat menimbulkan kerusakan kecil hingga ringan untuk bangunan. Dari jumlah gempa tektonik tersebut, gempa yang mengguncang hingga dirasakan masyarakat sebanyak 764 kali. Angka ini meningkat sejak tahun lalu, di mana sepanjang 2020 terdapat 754 gempa yang terasa.

Dengan potensi terjadinya bencana yang sangat besar, penyediaan jalur evakuasi dalam sebuah Gedung bertingkat merupakan salah satu wujud mitigasi. Ketentuan - Ketentuan Untuk Membantu Keselamatan Jiwa Dari Keadaan Darurat Serta Kebakaran Telah Diatur Pada SNI 03-1746-2000 tentang Tata Cara Perencanaan dan Pemasangan Sarana Jalan Keluar Untuk Penyelamatan Terhadap Bahaya Kebakaran Pada Bangunan Gedung, telah menetapkan kriteria minimal untuk perancangan fasilitas jalan keluar yang aman, sehingga memungkinkan penghuni menyelamatkan diri dengan cepat dari dalam bangunan, atau bila dikehendaki ke dalam daerah aman di dalam bangunan.

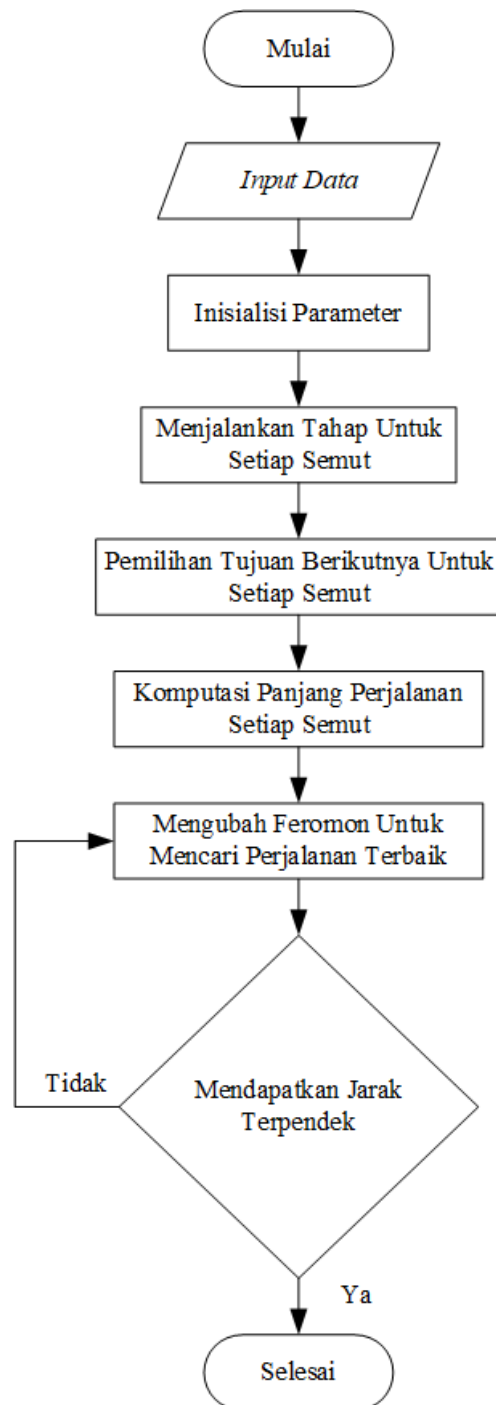
Pemilihan jalur evakuasi yang salah bisa menyebabkan korban jiwa berjatuh karena waktu evakuasi yang lama sehingga memungkinkan terjadinya aksi saling dorong, bertabrakan dan mungkin juga mereka bisa jatuh lalu terinjak-injak saat berebut keluar dari gedung. Maka, diperlukan pemilihan jalur evakuasi yang tepat dan dalam waktu yang singkat untuk menyelamatkan korban ke dalam zona aman atau keluar dari gedung. Dengan adanya jalur evakuasi yang telah terpilih, diharapkan mampu mengurangi angka korban jiwa yang berjatuh.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang jalur evakuasi yang efektif dengan cara mencari rute keluar terpendek dalam gedung, hal ini untuk mendapatkan waktu evakuasi yang lebih cepat, karena semakin cepat waktu yang dibutuhkan dalam proses evakuasi akan berpengaruh pada semakin banyaknya jiwa yang bisa diselamatkan. Penelitian ini akan dilakukan menggunakan metode Algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) dalam menentukan jalur terpendek. ACO merupakan teknik probabilitas untuk menyelesaikan permasalahan berdasarkan tingkah laku semut dalam sebuah koloni. Teknik ini dapat digunakan untuk menemukan solusi dari permasalahan kompleks untuk mendapatkan jalur optimal dalam grafik. Algoritma ini didasarkan pada graf yang akan dimulai dari sebuah *starting point*, yaitu titik awal, yang kemudian ada *node* yang diibaratkan titik-titik sebagai representasi dari daerah yang dilalui sampai menuju titik *finish* yang diinginkan. Dalam penelitian sebelumnya, algoritma ACO juga digunakan dalam penentuan rute terpendek pada pelabuhan Jordan. Parameter terbaik dalam penentuan rute terpendek pada metode ini berupa jumlah siklus, banyaknya semut, τ_{ij} , Q , α , β dan ρ (Wahyuningdyah, 2010). Algoritma ACO juga pernah digunakan sebagai penentuan jalur evakuasi terpendek pada industri plastik dengan menggunakan *Ant Colony Optimization* (Mufidah, 2021). Dalam penelitian ini metode ACO akan dirancang dengan menggunakan perangkat lunak numerik yang kemudian hasil dari rute yang dihasilkan akan dihitung kebutuhan waktunya keluar gedung menggunakan SFPE 5th edition 2016.

2. METODE

Penelitian ini akan dilakukan menggunakan metode Algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) dalam menentukan jalur terpendek. ACO merupakan teknik probabilitas untuk menyelesaikan permasalahan berdasarkan tingkah laku semut dalam sebuah koloni. Teknik ini dapat digunakan untuk menemukan solusi dari permasalahan kompleks untuk mendapatkan jalur optimal dalam grafik. Algoritma ini didasarkan pada graf yang akan dimulai

dari sebuah *starting point*, yaitu titik awal, yang kemudian ada *node* yang diibaratkan titik–titik sebagai representasi dari daerah yang dilalui sampai menuju titik finish yang diinginkan



Gambar 1. Algoritma *Ant Colony Optimization*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap pencarian rute terpendek untuk menuju *Assembly Point* diawali dengan menginisialisasi harga pada parameter-parameter yang akan digunakan, meliputi: intensitas jejak semut antar titik dan perubahannya (τ_{ij}), banyaknya titik (n) termasuk x dan y (koordinat) atau d_{ij} (jarak antar titik), penentuan titik awal dan titik tujuan, tetapan siklus semut (Q), tetapan pengendali intensitas jejak semut (α), tetapan pengendali visibilitas (β), visibilitas antar kota = $1/d_{ij}$ (η_{ij}), jumlah semut, dan jumlah siklus maksimum. Tahap selanjutnya adalah inisialisasi titik awal pada setiap semut. Sejumlah m semut ditempatkan pada titik awal yang ditentukan ketika inisialisasi τ_{ij} selesai dilakukan. Tahap selanjutnya dalam ACO adalah Transisi Status. Pada tahap ini disebut juga dengan tahap

pemilihan titik tujuan, sejumlah semut m yang berada pada titik m (titik awal) akan memilih jalur untuk menuju titik berikutnya yaitu titik j berdasarkan persamaan (1).

$$P_{rs}^k = \frac{[\tau_{ru}][\eta_{ru}]^\beta}{\sum_{v \in JK} [\tau_{ru}][\eta_{ru}]^\beta} \quad 0 \quad (1)$$

Pada tahapan selanjutnya adalah pembaruan feromon lokal yang digunakan semut untuk membangun sebuah solusi dengan menggunakan persamaan (2). Pembaruan feromon global pada semut, langkah ini dilakukan hanya pada lintasan jalur terbaik. Jumlah feromon τ_{rs} akan diubah sesuai persamaan (3) dan (4). Ketika semua proses sudah dilakukan maka akan didapatkan jarak terpendek untuk menuju titik tujuan.

$$\tau_{rs} = (1 - \rho) \cdot \tau_{rs} + \rho \cdot \Delta \tau_{rs} \quad (2)$$

$$\tau_{rs} = (1 - \alpha) \cdot \tau_{rs} + \alpha \cdot \Delta \tau_{rs} \quad (3)$$

$$\tau_{rs} = \frac{1}{L_{mc}} \quad (4)$$

Memilih rute terpendek menuju titik kumpul dapat membantu mempermudah proses evakuasi yang tengah dilakukan. Perhitungan jarak terpendek menuju titik kumpul saat terjadi kebakaran menggunakan metode *Ant colony optimization*. Proses perhitungan jarak dilakukan pada setiap persimpangan yang ditemui saat menuju titik kumpul. Penentuan titik koordinat dan skala yang akan dipakai pada *layout* gedung apartemen. Skala yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dalam satuan *pixels*. Penelitian ini dilakukan ruangan-ruangan pada apartemen 15 Lantai. Penentuan titik start dari masing-masing ruangan menggunakan titik perwakilan dari ruangan yang berdekatan menuju titik kumpul. Dalam menyelesaikan kasus rute terpendek dari masing-masing ruangan menggunakan metode ACO perlu ditentukan terlebih dahulu koordinat-koordinat yang menjadi kemungkinan jalur yang dilewati oleh semut. Untuk koordinat salah satu ruangan di lantai 15 yaitu ruangan H1533, dapat dilihat pada tabel 1 berikut :

Tabel 1. Koordinat Ruang H1533 Menuju Tangga 1 (Selatan)

Firman robbInisial	Nama Tempat	Kordinat	
		Latitude	Longitude
N1	H1533	2740	805
N2	Koridor Tengah	2670	805
N3	Persimpangan	2670	530
N4	Koridor Selatan	2770	530
N5	Tangga 1 (Selatan)	2770	560

Titik titik koordinat tersebut diambil dari *layout* gedung sehingga menghasilkan koordinat yang akurat sesuai dengan kondisi keadaan gedung apartemen sesungguhnya. Untuk perhitungan jarak antar titik dihitung menggunakan persamaan (5). Sementara untuk hasil perhitungan jarak dari antar masing-masing koordinat dapat dilihat pada tabel 2.

$$D(i,j) = \sqrt{((X(i) - X(j))^2) + ((Y(i) - Y(j))^2)}$$

$$D(i,j) = \sqrt{((2740 - 2670)^2) + ((805 - 805)^2)}$$

$$D(i,j) = \sqrt{((70)^2) + ((0)^2)}$$

$$D(i,j) = 70$$

Tabel 2. Jarak Kamar H1533 Menuju Tangga 1 (Selatan)

Jarak	N1	N2	N3	N4	N5
N1	0	70	283.77	276.63	246.83
N2	70	0	275	292.62	264.62
N3	283.77	275	0	100	104.40
N4	276.63	292.62	100	0	30
N5	246.83	264.62	104.40	30	0

Pada proses perhitungan rute evakuasi dari Kamar H1533 menuju Tangga 1 (Selatan), terdapat tiga karakteristik utama dari *Ant Colony Optimization* yaitu tahap transisi status (tahap pemilihan titik yang dituju).

Pada tahap ini karyawan yang berada pada ruangan r akan memilih untuk menuju ke tempat selanjutnya s. untuk melakukan perhitungan transisi terlebih dahulu dilakukan perhitungan *invers* jarak sesuai tabel 3.

Tabel 3. *Invers* Jarak Kamar H1533 Menuju Tangga 1 (Selatan)

Jarak	N1	N2	N3	N4	N5
N1	0	0.0013	0.0035	0.0036	0.0041
N2	0.0143	0	0.0036	0.0034	0.0038
N3	0.0035	0.0036	0	0.0100	0.0096
N4	0.0036	0.0034	0.0100	0	0.0333
N5	0.0041	0.0038	0.0096	0.0333	0

Langkah selanjutnya yaitu menetapkan feromon awal, pada penelitian ini digunakan feromon awal (τ_0) sebesar 0,0098. Penetapan ini berfungsi agar setiap ruas memiliki ketertarikan untuk dikunjungi oleh tiap-tiap semut (penghuni) Kemudian pemilihan titik yang akan dituju mempunyai nilai penetapan $\beta = 5$. Tahap selanjutnya yaitu melakukan perhitungan temporary yang digunakan untuk menentukan titik-titik yang akan dituju berdasarkan persamaan (6). temporary (r,s) = $((\tau_{rs})(\eta_{rs}) \beta)$.

Tabel 4. Nilai *Temporary* (10^{-13})

Jarak	N1	N2	N3	N4	N5
N1	0	0.0003	0.0533	0.0605	0.1070
N2	58.3090	0	0.0623	0.0457	0.0755
N3	0.0533	0.0623	0	9.8000	7.9006
N4	0.0605	0.0457	9.8000	0	4032.9218
N5	0.1070	0.0755	7.9006	4032.9218	0

Untuk memilih persamaan yang tepat sebagai acuan dalam pemilihan lokasi selanjutnya perlu dibangkitkan suatu bilangan *random* (q). Pada penelitian ini nilai q yang digunakan yaitu sebesar 9 sedangkan nilai Alpha sebesar 1. Hal ini menunjukkan arti bahwa semut saat melakukan proses pencarian jarak terpendek melakukan proses eksplorasi dengan probabilitas 90% dan proses eksplorasi 10%. Sehingga jalur terpendek yang dipilih yaitu jalur yang memiliki nilai feromon terkuat. Adapun rute yang terbentuk berdasarkan *temporary* dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Rute Penghuni Terbentuk

Deskripsi	Rute	Cost (Pixel)
P1	(1 2 3 4 5)	475.00
P2	(1 3 2 4 5)	881.39
P3	(1 4 2 3 5)	948.65
P4	(1 3 4 2 5)	941.01
P5	(1 4 3 2 5)	916.25

Setelah semua karyawan berpindah ke tempat tujuan, maka langkah selanjutnya yaitu melakukan pembaruan feromon lokal. Dalam memperbarui feromon lokal dibutuhkan suatu parameter ρ yang memiliki nilai antara 0 sampai 1. Pada penelitian ini nilai ρ ditetapkan dengan nilai sebesar 0,5. Untuk menghitung pembaruan feromon lokal $\Delta\tau_{1,2}$ sesuai persamaan (7). Hasil pembaharuan feromon dapat dilihat pada tabel 6.

$$\Delta\tau_{r,s} = \frac{1}{Lrs \times C} \quad (7)$$

Tabel 6. Hasil Pembaruan Feromon Lokal

Jarak	N1	N2	N3	N4	N5
-------	----	----	----	----	----

N1	0.5049	0.5078	0.5056	0.5056	0.5057
N2	0.5078	0.5049	0.5056	0.5056	0.5057
N3	0.5056	0.5056	0.5049	0.5069	0.5068
N4	0.5056	0.5056	0.5069	0.5049	0.5116
N5	0.5057	0.5057	0.5068	0.5116	0.5049

Setelah tujuan menuju titik kumpul yang telah dikunjungi mengalami pembaharuan feromon lokal, maka tahap selanjutnya yaitu melakukan pembaharuan feromon global. Rute yang dapat dilakukan pembaharuan feromon global hanyalah rute dengan hasil jarak terpendek saja. perhitungan pembaharuan feromon global yang menjadi nilai feromon akhir seperti pada persamaan (4) untuk yang belum mencapai terpendek menggunakan persamaan (3). Hasil keseluruhan pembaharuan feromon lokal dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pembaruan Feromon Global

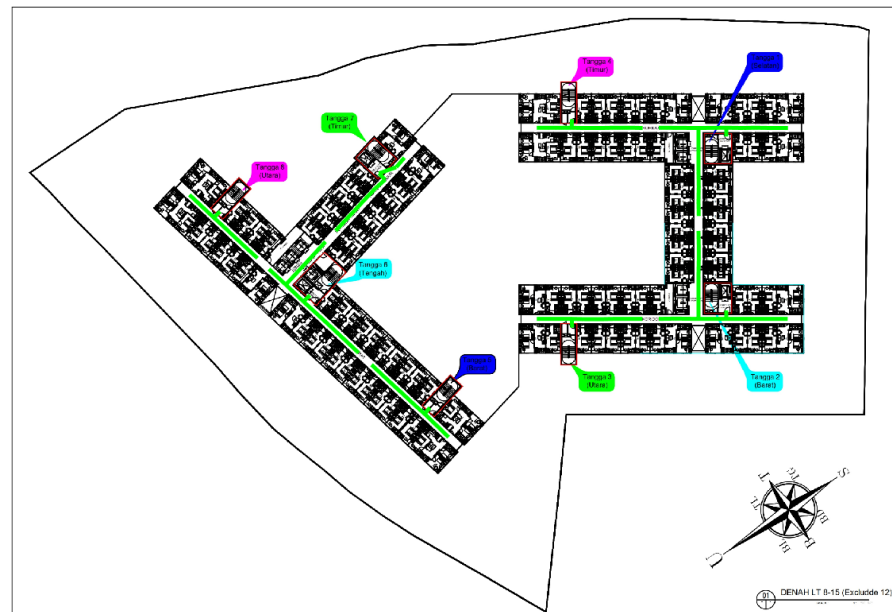
Jarak	N1	N2	N3	N4	N5
N1	0	0.0021	0.5056	0.5056	0.5057
N2	0.0021	0	0.5056	0.5056	0.5057
N3	0.5056	0.5056	0	0.5069	0.5068
N4	0.5056	0.5056	0.5069	0	0.5116
N5	0.5057	0.5057	0.5068	0.5116	0

Hasil penentuan parameter-parameter yang akan digunakan, meliputi: *number of iterations* yaitu 100 karena dengan perulangan tersebut didapatkan *cost* yang menunjukkan hasil paling optimal. *Number of ant* yang digunakan sebesar 10000 semut yang menjadi simbol sebagai jumlah penghuni pada keseluruhan gedung agar dicapai bermacam-macam kemungkinan, karena ketika memakai nilai sesuai orang yang berada pada tiap lantai tersebut jalur hasil pemilihan kurang bervariasi. Nilai Alpha pada penelitian ini digunakan nilai sebesar 1 serta Beta dengan nilai sebesar 5 dan *evaporation rate* sebesar 0.5.

Setelah semua tahap telah diselesaikan, maka dapat disimpulkan bahwa jarak terpendek menuju tangga 1 (Selatan) yang dilakukan dari Ruangan H1533 dengan menggunakan algoritma *Ant Colony Optimization* yaitu dengan membutuhkan *cost* sebesar Sedangkan jalur yang dilewati yaitu : H1533 → Koridor Tengah → Persimpangan Koridor Tengah dan Selatan → Koridor Selatan → menuju Tangga 1 (Selatan). Sedangkan untuk jalur yang lain sesuai tabel 8. Simulasi jalur evakuasi secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 8. Rute Hasil Simulasi pada Lantai 15

No	Tower	Nama Ruangan	Skema Jalur Keluar
1	H	H1544-H1548, H1562-H1568	H1544-H1548, H1562-H1568 → Koridor Selatan → Tangga 1 (Selatan)
2		H1549-H1561	H1549-H1561 → Koridor Timur → Tangga 4 (Timur)
3		H1532-H1543	H1532-H1543 → Koridor Tengah → Koridor Selatan → Tangga 1 (Selatan)
4		H1528-H1531	H1528-H1531 → Koridor Tengah → Koridor Barat → Tangga 2 (Barat)
5		H1501-H1507, H1523-H1527	H1501-H1507, H1523-H1527 → Koridor Barat → Tangga 2 (Barat)
6		H1508-H1522	H1508-H1522 → Koridor Utara → Tangga 3 (Utara)
7	T	T1501-T1507, T1531-T1536	T1501-T1507, T1531-T1536 → Koridor Barat → Tangga 5 (Barat)
8		T1508-T1514, T1526-T1530	T1508-T1514, T1526-T1530 → Koridor Barat → Tangga 6 (Tengah)
9		T1537 & T1552	T1537 & T1552 → Koridor Timur → Koridor Barat → Tangga 6 (Tengah)
10		T1538-T1551	T1538-T1551 → Koridor Timur → Tangga 7 (Timur)
11		T1515-T1525	T1515-T1525 → Koridor Utara → Tangga 8 (Utara)



Gambar 2. Rute Terpendek Hasil Simulasi pada Lantai 15

4. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian di atas, penentuan rute evakuasi terpendek dilakukan menggunakan metode *Ant Colony Optimization* untuk mendapatkan jarak terpendek dari nilai jarak/*cost* terkecil. Penggunaan *Colony Optimization* membantu penentuan jalur evakuasi terpendek sangat cepat dibandingkan metode konvensional. Dari hasil simulasi jalur terpendek untuk ruangan H1533 yaitu : H1533 → Koridor Tengah → Persimpangan Koridor Tengah dan Selatan → Koridor Selatan → menuju Tangga 1 (Selatan). Semakin tinggi nilai jarak/*cost* menunjukkan rute yang dilewati semakin jauh. Dalam penelitian ini terdapat beberapa saran untuk peningkatan hasil yang lebih optimal dengan cara penambahan jumlah iterasi yang lebih banyak serta melanjutkan perhitungan waktu evakuasi yang dibutuhkan untuk mencapai titik kumpul. Selain itu juga dapat menggunakan metode *heuristic* lainnya sebagai pembanding.

5. DAFTAR PUSTAKA

- A, F., Jondri, & Arifianto, A. (2015). Pemilihan Jalur Evakuasi Dalam Keadaan Darurat. *e-Proceeding of Engineering*, 2, 1339.
- Achmad, N. M. (2022, April 22). *Basement Apartemen di Setiabudi Kebakaran, Penghuni Sebut Alarm Tidak Menyala*. (D. Meiliana, Editor) Retrieved Agustus 30, 2022, from Kompas.com: <https://megapolitan.kompas.com/read/2022/04/24/12290341/basement-apartemen-di-setiabudi-kebakaran-penghuni-sebut-alarm-tidak?page=all>
- Campbell, R. (2013). *U.S. Structure Fires In Office Properties*. Quincy, US: National Fire Protection Association.
- CNN Indonesia. (2021, Desember 30). *Aktivitas Gempa di Indonesia Meningkat Sepanjang 2021*. Retrieved January 29, 2022, from CNN Indonesia: <https://www.cnnindonesia.com/teknologi/20211230134505-199-740553/aktivitas-gempa-di-indonesia-meningkat-sepanjang-2021>
- Durisman, Marwan, & Rusdiana, S. (2017). Designing Application Of Ant Colony System Algorithm For The Shortest Route Of Banda Aceh City And Aceh Besar Regency Tourism By Using Graphical User Interface Matlab. *Jurnal Natural*, 17.
- Hapsari, M. A. (2022, April 07). *Unit Apartemen di Lantai 12 Terbakar di Cengkareng*. (I. A. Arbi, Editor) Retrieved Agustus 31, 2022, from Kompas.com: <https://megapolitan.kompas.com/read/2022/04/07/19051551/unit-apartemen-di-lantai-12-terbakar-di-cengkareng>
- Hurley, M. J. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed.). Greenbelt: Springer.
- Mufidah, I. (2020). *Optimalisasi Jalur Evakuasi Menggunakan Metode Ant Colony Optimization Pada Perusahaan Manufaktur*. Surabaya: PPNS.
- Mutakhirroh, I., Indrato, & Taufiq Hidayat. (2007). Pencarian Jalur Terpendek Menggunakan Algoritma Semut. *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi 2007 (SNATI 2007)*. Yogyakarta.
- NFPA. (2021). *NFPA 101 2021 Life Safety Code*. Massachusetts: NFPA.

Wahyuningdyah, N., Hadi, M. S., & Yuliana, M. (2010). *Akses Informasi Pengiriman Barang Di Kantor Pos Jemur Sari*. Surabaya: PENS.