



Optimasi Rute Evakuasi Penduduk di Sekitar Gunung Merapi (Studi Kasus : Desa Kepuharjo, Yogyakarta) Saat Erupsi dengan Pendekatan Algoritma *Floyd-Warshall* dan *Fuzzy Logic* Metode Mamdani

Ahmadi ^{1*}, Indah Khoirun Nisa², Astriana Hardawati¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

*Correspondence author: ahmadi@uii.ac.id

ABSTRAK

Gunung Merapi yang terletak di Yogyakarta merupakan gunung berapi aktif yang sering menimbulkan risiko besar bagi masyarakat di sekitarnya. Saat terjadi erupsi, pemilihan jalur evakuasi yang aman dan efisien sangat penting, dengan mempertimbangkan banyak kendaraan, kapasitas jalan, dan banyak penduduk di wilayah tersebut. Penelitian ini membandingkan dua pendekatan untuk mengoptimalkan jalur evakuasi, yaitu algoritma *Floyd-Warshall* yang membantu menemukan rute tercepat antar lokasi, dan *fuzzy logic* metode Mamdani yang lebih fleksibel dalam menghadapi kondisi tidak pasti seperti lebar dan kondisi jalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma *Floyd-Warshall* memberikan waktu evakuasi yang sedikit lebih cepat, yaitu 1,29 jam, dibandingkan dengan *fuzzy logic* metode Mamdani yang memerlukan waktu 1,31 jam. Meskipun selisihnya kecil, *fuzzy logic* metode Mamdani mampu mempertimbangkan kondisi nyata yang dapat mempengaruhi perjalanan evakuasi.

© 2025 Kantor Jurnal dan Publikasi UPI

ABSTRACT

Mount Merapi, located in Yogyakarta, is an active volcano that often poses significant risks to nearby communities. During an eruption, choosing a safe and efficient evacuation route is crucial, taking into account the number of vehicles, road capacity, and the population density in the area. This study compares two approaches to optimize evacuation routes: the *Floyd-Warshall* algorithm, which helps identify the fastest route between locations, and the Mamdani fuzzy logic method, which is more flexible in dealing with uncertain conditions such as road width and quality. The results show that the *Floyd-Warshall* algorithm provides a slightly faster evacuation time of 1.29 hours, compared to the Mamdani fuzzy logic method, which requires 1.31 hours. Although the difference is small, the Mamdani fuzzy logic method is better at considering real-world conditions that can affect the evacuation journey.

© 2025 Kantor Jurnal dan Publikasi UPI

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima 27 Maret 2025

Direvisi 27 April 2025

Disetujui 29 April 2025

Tersedia online 2 Mei 2025

Dipublikasikan 2 Mei 2025

Kata Kunci:

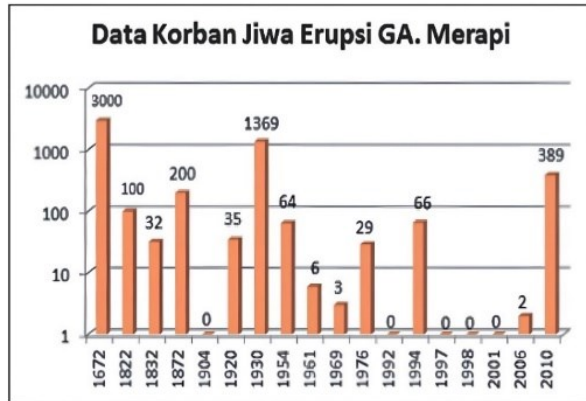
Algoritma *Floyd-Warshall*,
Fuzzy Logic,
Metode Mamdani,
Gunung Merapi.

Keywords:

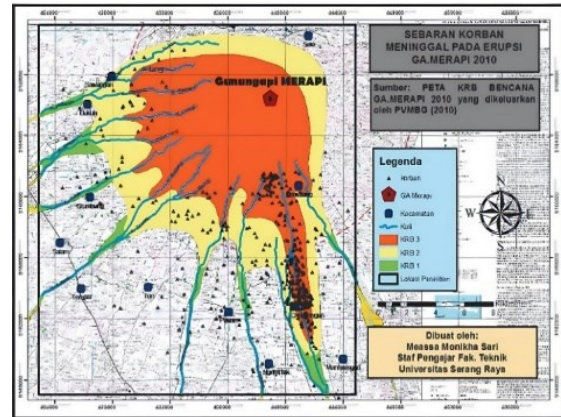
Floyd-Warshall Algorithm,
Fuzzy Logic,
Mamdani Method,
Merapi Mountain.

1. PENDAHULUAN

Letusan Gunung Merapi yang paling parah terjadi pada tahun 1930, kejadian tersebut menyebabkan sebanyak 1369 korban jiwa meninggal dunia. Erupsi di tahun 2006 menyebabkan 2 orang meninggal di bunker kaliadem (Sutaningsih, dkk) sedangkan tahun 2010 sebanyak 389 korban jiwa meninggal dunia. Data sebaran wilayah terdampak dan intensitas letusan dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2 berikut.



Gambar 1. Data Korban Erupsi Gunung Merapi (Sumber: Sutaningsih dkk, 2011).



Gambar 2. Distribusi Sebaran Korban Jiwa pada Peta KRB.

Berdasarkan peta KRB (Kejadian Resiko Bencana) pada Gambar 2, sebaran korban terbanyak terjadi di wilayah KRB III sejumlah 260 jiwa yang mencakup Desa Umbulharjo, Argomulyo, Kepuharjo, Wukirsari, dan Glagaharjo. Daerah tersebut merupakan daerah yang terdampak awan panas secara langsung, karena letaknya sekitar 5-10 km dari puncak gunung Merapi dan di sekitar aliran kali Gendol (Sari, 2021). Upaya penanganan harus dilakukan untuk meminimalkan korban jiwa saat peristiwa letusan terjadi yakni menentukan rute evakuasi yang aman dan efisien dengan memperhatikan jarak terpendek menuju titik kumpul yang aman. Rute tersebut perlu mempertimbangkan kapasitas jalan untuk menampung volume kendaraan dan jalan kaki dalam waktu singkat sehingga tidak terjadi kemacetan yang dapat memperlambat proses evakuasi.

Algoritma *Floyd-Warshall* adalah suatu algoritma untuk menentukan jalur terpendek di semua pasangan titik yang dapat diubah menjadi graf berbobot maupun berarah. Objek dalam algoritma ini terdiri dari kumpulan titik (V) dan jalur (E). Algoritma ini dapat menghitung semua kemungkinan rute dari berbagai lokasi menuju titik kumpul yang aman, efisien dengan memperhatikan waktu tempuh. Penelitian terkait algoritma *Floyd-Warshall* telah banyak diteliti, diantaranya untuk pencarian rute dan penyelamatan maritim dalam proses evakuasi korban yang jatuh ke laut di daerah pesisir (Ho et al., 2022). Sedangkan (Amoako, 2019) meneliti algoritma *Floyd-Warshall* untuk menentukan jarak perjalanan terpendek dan jalur dari stasiun pemadam kebakaran KNUST ke semua kota di wilayah Kumasi di Ghana. Penelitian lain terkait evakuasi bencana dengan menggunakan algoritma *Floyd-Warshall* juga telah dilakukan oleh (Jalai dan Noroozi, 2009), (Huang et al., 2014), (Akunal, 2016), (Toroslu, 2023).

Fuzzy logic merupakan salah satu alternatif penyelesaian untuk menangani suatu ketidakpastian atau situasi yang sulit untuk diprediksi. Salah satu metode yang digunakan dalam *fuzzy logic* adalah metode Mamdani. Dalam sistem evakuasi ini metode Mamdani mampu memberikan nilai dan keputusan yang efisien terhadap kondisi yang tidak tentu karena adanya derajat keanggotaan dengan mempertimbangkan beberapa parameter seperti panjang dan lebar jalan untuk menghasilkan waktu tempuh yang optimal dalam mencapai titik

kumpul yang aman. Penelitian terkait dengan *fuzzy logic* untuk evakuasi bencana dilakukan oleh (Yang et al., 2020), penelitian tersebut bertujuan untuk evakuasi gedung bagi pejalan kaki dengan *fuzzy logic* dengan memperhatikan jarak, lebar pintu, jumlah pemandu, dan kepadatan lokal yang digunakan untuk pengambilan keputusan. Selain itu (Zhou et al., 2016) melakukan pendekatan *fuzzy logic* dalam memodelkan perilaku evakuasi kerumunan dengan mempertimbangkan pengaruh pencarian jalan. Penelitian lain terkait evakuasi bencana dengan menggunakan *fuzzy logic* juga telah dilakukan oleh (Teodorovic, 1999), (Huang et al., 2014), (Pulugurta et al., 2014), (Jia et al., 2016), (Sharma et al., 2017), (Sahin et al., 2019), (Kumar et al., 2020), (Kafiev et al., 2021). Penelitian tersebut berfokus pada satu metode dan mempertimbangkan aspek jalan dalam menentukan rute optimal evakuasi.

Lebih lanjut, penelitian pada paper ini bertujuan untuk menentukan rute evakuasi tercepat dan paling optimal di sekitar Gunung Merapi dengan mempertimbangkan beberapa aspek, yakni volume kendaraan, kecepatan, kapasitas jalan, dan jumlah penduduk. Melalui penerapan algoritma *Floyd-Warshall* dan *fuzzy logic* metode Mamdani, penelitian ini menilai efektivitas kedua pendekatan dalam mendukung evakuasi bencana secara efisien dan aman.

2. METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode analisis jalur terpendek berbantuan algoritma *Floyd-Warshall* dan *fuzzy logic* metode Mamdani. Data penelitian diperoleh dari aplikasi seperti *Google Maps* untuk menentukan jarak dari satu titik ke titik yang lain, serta *Google Earth* untuk menentukan jalur lebar jalan. Berikut ini penjelasan lebih lanjut mengenai metode yang digunakan.

2.1 Algoritma Floyd Warshall

Algoritma ini digunakan untuk menentukan jalur terpendek dalam graf berbobot dengan membandingkan jalur yang mungkin diantara setiap pasangan simpul dalam graf.

Langkah-Langkah algoritma *Floyd Warshall* :

1. Bentuk graf berbobot sebagai matriks. Bobot setiap elemen meliputi :

$$\begin{aligned} w_{ij} &= 0, \text{ untuk } i = j \\ &= w(i, j), \text{ untuk } i \neq j \text{ dan } (i, j) \in E \\ &= \infty \text{ untuk } i \neq j \text{ dan } (i, j) \notin E \end{aligned}$$

dengan w_{ij} adalah bobot sisi terarah dari titik w_i ke w_j . Jika jalur dimulai dan diakhiri pada titik yang sama, maka nilainya adalah 0. Sebaliknya jika tidak ada sisi yang menghubungkan antara titik w_i ke w_j , maka nilai tersebut dianggap ∞ .

Berdasarkan uraian tersebut, didapatkan matriks $n \times n$ yang menunjukkan jarak atau waktu perjalanan $D = [d_{ij}]$, dengan d_{ij} merupakan jarak atau waktu perjalanan dari simpul i ke j .

2. Menjabarkan algoritma *Floyd Warshall*.

- i. $d_{ij}(k)$ adalah panjang jalur terpendek dari i ke j dengan semua titik antara pada jalur $\{1, 2, \dots, k\}$.
- ii. $d_{ij}(0) = w_{ij}$, tidak ada simpul yang menghubungkan keduanya.
- iii. $D(k)$ menjadi matriks $n \times n [d_{ij}(k)]$
- iv. Menentukan $d_{ij}(n)$ sebagai jarak atau waktu tempuh dari i ke j kemudian hitung $D(n)$.

- v. Hitung $D(k)$ untuk $k = 0, 1, \dots, n$.
3. Menentukan struktur jalur terpendek
 - i. Jalur terpendek tidak ada *cycle*.
 - ii. Untuk jalur terpendek dari titik i ke j dengan beberapa titik antara, pilih dari $\{1, 2, \dots, k\}$, dengan dua kemungkinan:
 - a. Jika k bukan merupakan titik pada jalur tersebut, maka jalur terpendek memiliki panjang d_{ij}^{k-1} .
 - b. Jika k adalah simpul pada jalur tersebut, maka jalur terpendek memiliki panjang $d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}$.
 - iii. Menentukan jalur terpendek dari titik i ke j yang melewati titik k .
 - iv. Jalur terpendek mencakup subjalur dari titik i ke k dan sub jalur dari titik k ke j .
 - v. Setiap subjalur hanya mengandung titik perantara dari $\{1, 2, \dots, k-1\}$ dan sebanyak mungkin memiliki nilai minimum, yang disebut d_{ik}^{k-1} dan d_{kj}^{k-1} sehingga jalur memiliki panjang $d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}$.
4. Lakukan iterasi, mulai dari iterasi ke-0 hingga iterasi ke- n :
 - i. Menentukan $D(0)$ (iterasi ke-0) = $[w_{ij}]$
 - ii. Menentukan $D(k)$, $d_{ij}^{(k)} = \min\{d_{ij}^{k-1}, d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}\}$ untuk $k = 1, \dots, n$, dengan n jumlah titik.
5. Hasil akhirnya adalah matriks untuk iterasi ke- n yang menunjukkan jalur terpendek untuk setiap titik dalam graf.

2.2 Fuzzy Logic

Suatu algoritma untuk menentukan jalur terpendek menggunakan konsep logika untuk mengatasi ketidakpastian dalam menentukan jalur terpendek. Penelitian ini terdapat dua variabel *input* yang digunakan yaitu jarak atau panjang jalan dan lebar jalan. Sementara untuk variabel *output* yang dihasilkan yakni waktu tempuh. Berikut merupakan langkah-langkah dari *fuzzy logic*:

1. *Fuzzifikasi*
Fuzzifikasi merupakan langkah awal untuk mengubah angka pasti menjadi nilai *fuzzy* yang dinyatakan dalam derajat keanggotaan satu atau lebih himpunan *fuzzy*. (misal “Sangat Panjang”, “Panjang”, “Normal”, “Pendek”, “Sangat Pendek” untuk jarak)
2. Aturan *Fuzzy*
 Aturan ini berbasis pada logika *IF-THEN*, untuk menentukan bagaimana variabel *input* diolah menjadi variabel *output*. Contoh penerapan Aturan *fuzzy*:
IF jarak “Pendek” **AND** lebar “Sempit” **THEN** waktu “Lambat”.
3. Inferensi
 Langkah ini untuk mengolah variabel *input* menjadi *output* yang mencakup kondisi serta penggabungan hasil dari aturan tersebut. Dengan kata lain, untuk menentukan bagaimana *input* diubah menjadi keputusan yang diinginkan. Pada penelitian ini metode yang digunakan yakni metode Mamdani. Metode ini mengevaluasi kondisi sesuai dengan fungsi keanggotaan yang telah ditetapkan dengan operator logika *AND*

atau *OR* dan penggabungan *output* menggunakan metode *MIN-MAX*.

4. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses mengubah *output* berupa himpunan *fuzzy* menjadi sebuah nilai numerik tunggal yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan. Salah satu metode yang paling umum digunakan adalah metode *Centroid*, yaitu metode yang menentukan nilai *output* sebagai pusat massa (*center of gravity*) dari area di bawah kurva fungsi keanggotaan *output fuzzy*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rute evakuasi yang paling efektif terhadap penduduk di Desa Kepuharjo, yang ditunjukkan pada Tabel 1. Terdapat sembilan titik kumpul yakni TK Citra Rini, Balai Desa Kopeng, Pertigaan Kopeng, Halaman Masjid Kopeng, Pertigaan RT 02, Depan Posko SKSB, Barat Jembatan Pagerjurang, dengan titik kumpul terakhir di Halaman Masjid Huntap Batur.

Tabel 1. Titik Kumpul di Desa Kepuharjo

Titik Evakuasi	Cakupan Area (Dusun)	Jaur Evakuasi
TK Citra Rini	Dusun Jambu	Jl. Kaliadem Raya, Jl. Kinahrejo- Cangkringan, Jl. Petung
Balai Desa Kopeng, Pertigaan Kopeng, Halaman Masjid Kopeng	Dusun Kopeng	Jl. Petung Merapi
Pertigaan RT 02	Dusun Batur	Jl. Petung Merapi
Depan Posko SKSB		Jl. Pagerjurang
Barat Jembatan Pagerjurang	Batur Huntap	Jl. Pagerjurang
Halaman Masjid Huntap Batur	Kopeng Batur	Jl. Pagerjurang

3. 1 Waktu Evakuasi

Waktu ini merupakan periode yang dimulai setelah peringatan bencana hingga kedatangan ancaman, seperti letusan Gunung Merapi. Biasanya, sistem peringatan dini memberikan waktu sekitar 10 hingga 20 menit untuk evakuasi. Warga harus mencapai area aman (titik kumpul) dalam waktu ini, yang durasinya dipengaruhi oleh kecepatan berjalan dan kondisi medan. Menurut penelitian yang dilakukan Fathianpour, A., dkk tahun 2024, rata-rata kecepatan berjalan sebesar 0,751 m/detik. Hal ini terjadi ketika pengungsi dengan kecepatan paling lambat mampu mencapai titik kumpul, sehingga pengungsi lainnya yang bergerak lebih cepat juga dipastikan dapat mencapai titik kumpul tersebut.

3.2 Kecepatan Jalan saat evakuasi

Kecepatan berjalan evakuasi dihitung berdasarkan formulasi berikut

$$V = \frac{C_0}{C_1} \times V_s$$

$$C_0 = \frac{W}{S} \text{ (dibulatkan ke bawah)}$$

$$C_1 = \frac{W}{S} \text{ (dibulatkan ke atas)}$$

Keterangan :

C_0 : Kapasitas dasar jalan (keadaan normal)

C_1 : Kapasitas actual jalan selama terjadi bencana

V : Kecepatan actual selama terjadi bencana (m/sec)

V_s : Kecepatan berjalan selama bencana oleh kelompok orang tua ($0,751 m/sec$)

W : Lebar jalan (m)

S : Kebutuhan ruang per orang ($0,625 m^2$)

Informasi mengenai kecepatan berjalan para pengungsi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kecepatan berjalan pengungsi

Lebar jalan (m)	Kapasitas Normal (C_0)	Kapasitas Aktual (C_1)	Kecepatan (m/detik)
2	3	4	0,563
5	8	8	0,751

3.3 Waktu Tempuh

Waktu tempuh adalah waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perjalanan dari satu kluster ke kluster lain atau dari kluster ke titik kumpul. Waktu tempuh disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Waktu Tempuh

C	Jalur	Waktu Tempuh	C	Jalur	Waktu Tempuh
1	1,3	152,0	41	D,28	80,0
2	2,3	440,0	42	D,29	120,0
3	2,8	720,0	43	27,28	160,0
4	3,4	216,0	44	28,30	160,0
5	3,6	208,0	45	29,33	40,0
6	4,5	224,0	46	29,30	120,0
7	5,6	120,0	47	30,32	80,0
8	5,12	120,0	48	31,32	40,0
9	6,7	320,0	49	31,34	80,0
10	6,11	120,0	50	32,33	120,0
11	7,8	80,0	51	32,35	40,0
12	7,10	80,0	52	E,33	40,0
13	8,9	80,0	53	E,35	120
14	9,10	80,0	54	E,43	192
15	10,15	400,0	55	34,35	120,0
16	A,14	40,0	56	36,37	40,0
17	A,15	120,0	57	37,38	120,0
18	11,12	120,0	58	38,42	80,0
19	11,14	120,0	59	39,40	40,0
20	12,13	120,0	60	39,44	80,0
21	13,14	120,0	61	F,40	40,0
22	B,13	440,0	62	F,45	40,0
23	B,19	240,0	63	40,41	120,0

24	14,16	272,0	64	41,42	40,0
25	15,16	160,0	65	41,47	80,0
26	16,17	280,0	66	42,43	120,0
27	17,C	40,0	67	43,48	127,0
28	17,22	44,0	68	44,45	40,0
29	18,19	40,0	69	44,46	80,0
30	18,21	40,0	70	45,47	160,0
31	19,20	40,0	71	47,48	240,0
32	20,21	32,0	72	48,G	640,0
33	20,24	64,0	73	G,H	400,0
34	21,22	64,0	74	H,49	280,0
35	22,23	64,0	75	49,I	480,0
36	23,24	120,0			
37	23,26	40,0			
38	24,25	40,0			
39	25,26	80,0			
40	D,25	40,0			

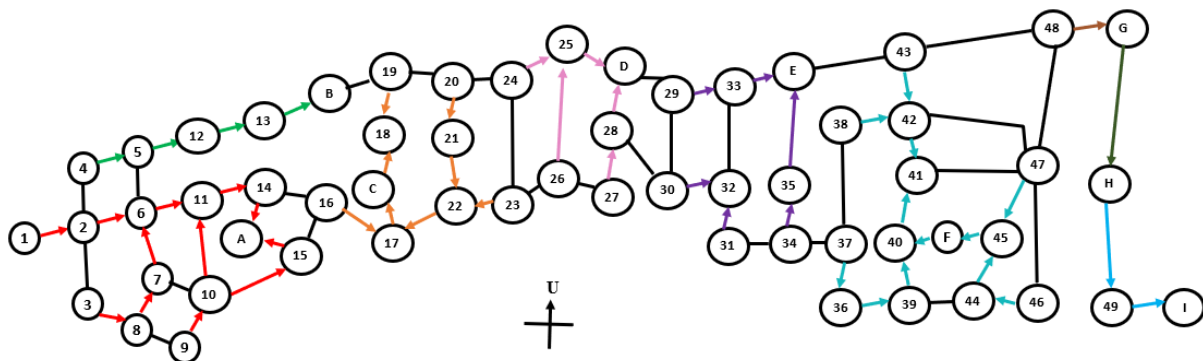
Berdasarkan Tabel 3, didapatkan rute evakuasi dengan waktu tempuh minimum dari setiap kluster ke semua titik kumpul di Desa Kepuharjo sebagai berikut.

Tabel 4. Rute evakuasi menuju titik kumpul

C	Titik Kumpul	Rute Evakuasi	Waktu Tempuh	Jarak (m)
1	A	1-3-6-11-14-A	10,67	1060
2	A	2-8-9-10-15-A	22	1750
3	A	2-3-6-11-14-A	15,46	1150
4	A	4-5-12-13-14-A	10,4	790
5	A	8-7-6-11-14-A	11	840
6	A	9-10-15-A	8,67	750
7	B	13-B	7,3	550
8	B	14-13-B	9,3	700
9	B	11-12-13-B	11,3	850
10	B	19-B	4	300
11	B	18-19-B	4,67	350
12	B	3-4-5-12-13-B	18,67	1270
13	B	1-3-4-5-12-13-B	21,20	1370
14	B	3-6-11-14-13-B	19,33	1260
15	C	17-C	0,67	50
16	C	16-17-C	5,33	400
17	C	15-16-17-C	8	600
18	C	18-C	0,67	50
19	C	19-18-C	1,3	100
20	C	22-17-C	1,4	105
21	C	20-21-18-C	1,9	140
22	C	20-19-18-C	2	150

23	C	23-22-17-C	2,46	185
24	D	25-D	0,67	50
25	D	24-25-D	1,3	100
26	D	20-24-25-D	2,4	180
27	D	23-24-25-D	3,33	200
28	D	23-26-25-D	2,67	200
29	D	26-25-D	2	150
30	D	28-D	1,3	50
31	D	27-28-D	4	300
32	D	26-27-28-D	5,3	340
33	D	29-D	2	150
34	D	30-29-D	4	300
35	D	30-28-D	4	300
36	E	33-E	0,67	50
37	E	29-33-E	2	150
38	E	30-29-33-E	4	300
39	E	31-32-33-E	3,33	250
40	E	32-33-E	2,67	200
41	E	34-35-E	3,33	250
42	E	43-E	3,2	240
43	F	40-F	0,67	50
44	F	39-40-F	1,3	100
45	F	36-39-40-F	2,67	200
46	F	37-36-39-40-F	3,33	250
47	F	38-42-41-40-F	5,3	400
48	F	43-42-41-40-F	6	450
49	F	42-41-40-F	4	300
50	F	41-40-F	3,33	250
51	F	45-F	0,67	50
52	F	44-45-F	2	150
53	F	46-44-45-F	3,33	250
54	F	47-45-F	4	300
55	G	48-G	10,67	800
56	G	43-48-G	12,8	960
57	G	47-48-G	14,67	1100
58	H	G-H	6,67	500
59	H	49-H	4,67	350
60	I	49-I	8	600

Apabila Tabel 4 dinyatakan dalam bentuk *graf* dengan rute evakuasi optimal dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Rute evakuasi optimal

Dengan kata lain, dengan menggunakan algoritma *Floyd-Warshall* didapatkan rute evakuasi optimal menuju titik pengungsian terakhir memerlukan waktu tempuh sebesar 1,29 jam.

3.4 Fuzzy Logic

Variabel *input* yang digunakan untuk menentukan waktu tempuh adalah jarak atau panjang jalan yang dinotasikan dengan x dan lebar jalan yang dinotasikan dengan ℓ . Berdasarkan kedua variabel *input* ini, variabel *output* yang dihasilkan adalah waktu, yang dinotasikan dengan t . Kombinasi dari panjang dan lebar jalan ini akan mempengaruhi nilai *output*, yaitu waktu yang diperlukan untuk menempuh suatu perjalanan sesuai dengan aturan-aturan *fuzzy* yang telah ditentukan. Berikut adalah langkah-langkah untuk menyelesaikan aplikasi *fuzzy logic* dalam menentukan waktu terpendek dalam proses evakuasi:

1. Identifikasi data penelitian

a. Variabel *input*

Data yang digunakan diambil dari gambar jalur evakuasi Desa Kepuharjo. Variabel *input* yang digunakan dalam kasus ini adalah jarak atau panjang jalan serta lebar jalan, yang keduanya dinyatakan dalam satuan panjang (meter). Himpunan yang terkait dengan variabel *input* dalam penelitian ini adalah :

1) Jarak atau panjang jalan

Dalam kasus ini, variabel *input* Jarak dibagi menjadi 5 himpunan *fuzzy* yang berbeda, yaitu:

1. Himpunan *fuzzy* x_A terletak pada posisi 0 – 160 m
2. Himpunan *fuzzy* x_B terletak pada posisi 160 – 320 m
3. Himpunan *fuzzy* x_C terletak pada posisi 320 – 480 m
4. Himpunan *fuzzy* x_D terletak pada posisi 480 – 640 m
5. Himpunan *fuzzy* x_E terletak pada posisi 640 – 800 m

2) Lebar Jalan

Pada kasus ini, variable *input* lebar jalan dibagi menjadi 5 himpunan *fuzzy*, yaitu:

1. Himpunan *fuzzy* ℓ_A terletak pada posisi 0 - 1 m
2. Himpunan *fuzzy* ℓ_B terletak pada posisi 1 – 2 m
3. Himpunan *fuzzy* ℓ_C terletak pada posisi 2 - 3 m
4. Himpunan *fuzzy* ℓ_D terletak pada posisi 3 – 4 m
5. Himpunan *fuzzy* ℓ_E terletak pada posisi 4 – 5 m

b. Variabel *output*

Pada kasus ini, variabel *output* waktu diukur dalam satuan menit.

Himpunan *fuzzy* yang diterapkan pada variabel *output* waktu dibagi menjadi 5, yaitu:

1. Himpunan *fuzzy* t_A terletak pada posisi 0 – 4 (Sangat Cepat)
2. Himpunan *fuzzy* t_B terletak pada posisi 4 – 8 (Cepat)
3. Himpunan *fuzzy* t_C terletak pada posisi 8 – 12 (Normal)
4. Himpunan *fuzzy* t_D terletak pada posisi 12 – 16 (Lama)
5. Himpunan *fuzzy* t_E terletak pada posisi 16 – 20 (Sangat Lama)

2. Menghitung himpunan *fuzzy* untuk variabel *input* dan *output*1) Variabel *input*

Variabel *input* jarak dan lebar jalan ditentukan dengan lima himpunan *fuzzy*. Karena tidak ada pedoman khusus untuk memilih fungsi keanggotaan dan membagi himpunan *fuzzy*, pembagian himpunan *fuzzy* pada variabel *input* dilakukan menggunakan metode Mamdani dan dianalisis menggunakan *software*.

Berikut adalah fungsi keanggotaan untuk variable *input* jarak:

$$\mu(SP) = \begin{cases} 0, x \geq 160 \\ \frac{160 - x}{160 - 0}, 0 \leq x < 160 \end{cases}$$

$$\mu(P) = \begin{cases} 0, x \geq 0 \text{ atau } x \leq 320 \\ \frac{x - 0}{160 - 0}, 0 \leq x < 160 \\ \frac{320 - x}{320 - 160}, 160 \leq x < 320 \end{cases}$$

$$\mu(N) = \begin{cases} 0, x \leq 160 \text{ atau } x \geq 480 \\ \frac{x - 160}{320 - 160}, 160 < x < 320 \\ \frac{480 - x}{480 - 320}, 320 \leq x < 480 \end{cases}$$

$$\mu(PJ) = \begin{cases} 0, x \leq 320 \text{ atau } x \geq 640 \\ \frac{x - 320}{480 - 320}, 320 < x < 480 \\ \frac{640 - x}{640 - 480}, 480 \leq x < 640 \end{cases}$$

$$\mu(SPJ) = \begin{cases} 0, x \geq 0 \text{ atau } x \leq 320 \\ \frac{x - 320}{480 - 320}, 0 < x < 160 \\ 1, 160 \leq x < 320 \end{cases}$$

Berikut adalah fungsi keanggotaan untuk variabel *input* lebar:

$$\mu(SS) = \begin{cases} 0, x \geq 1 \\ \frac{1 - x}{1 - 0}, 0 \leq x < 1 \end{cases}$$

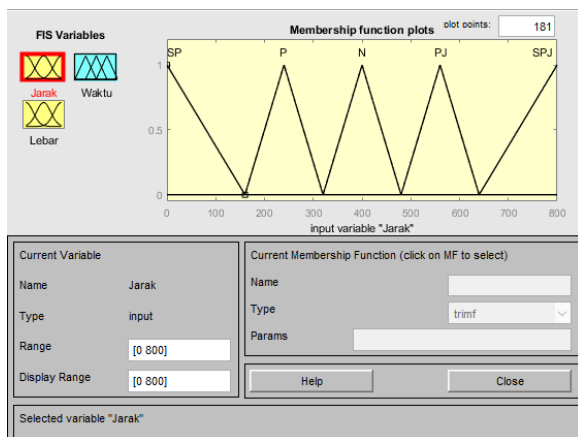
$$\mu(L) = \begin{cases} 0, x \geq 2 \text{ atau } x \leq 4 \\ \frac{x - 2}{3 - 2}, 2 < x < 3 \\ \frac{4 - x}{4 - 3}, 3 \leq x < 4 \end{cases}$$

$$\mu(S) = \begin{cases} 0, x \geq 0 \text{ atau } x \leq 2 \\ \frac{x-0}{1-0}, 0 < x < 1 \\ \frac{2-x}{2-1}, 1 \leq x < 2 \end{cases}$$

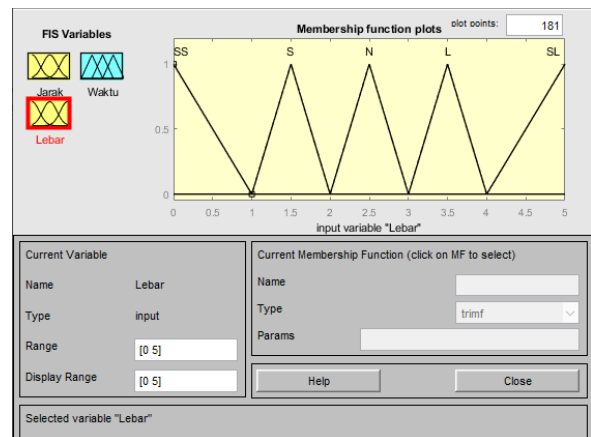
$$\mu(N) = \begin{cases} 0, x \geq 1 \text{ atau } x \leq 3 \\ \frac{x-0}{2-0}, 0 \leq x < 1 \\ \frac{3-x}{3-2}, 2 \leq x < 3 \end{cases}$$

$$\mu(SL) = \begin{cases} 0, x \geq 3 \text{ atau } x \leq 5 \\ \frac{x-3}{4-3}, 3 < x < 4 \\ 1, 4 \leq x < 5 \end{cases}$$

Gambar fungsi keanggotaan dari jarak dan lebar jalan ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



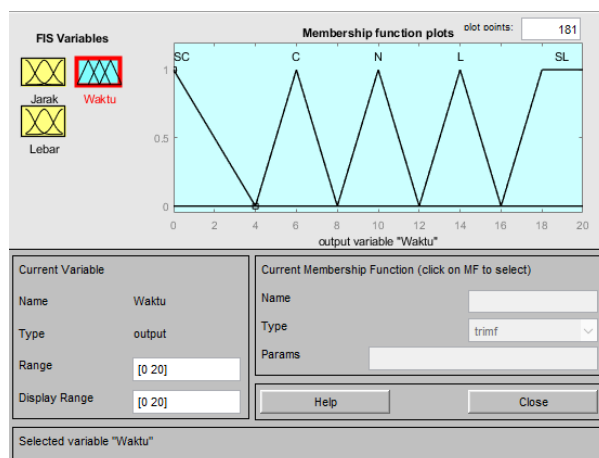
Gambar 4. Fungsi keanggotaan dari jarak titik



Gambar 5. Fungsi keanggotaan dari lebar jalan

2) Variabel output

Variabel *output* didefinisikan dengan lima himpunan *fuzzy* yakni SC (Sangat Cepat), C (Cepat), N (Normal), L (Lama), SL (Sangat Lama). Representasi himpunan *fuzzy* pada variabel *output* menggunakan fungsi keanggotaan segitiga untuk himpunan *fuzzy* C, N, dan L. Sedangkan, fungsi keanggotaan trapesium digunakan untuk himpunan *fuzzy* SL, dan fungsi keanggotaan linier diterapkan pada himpunan *fuzzy* SC, ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Fungsi keanggotaan dari waktu tempuh

3. Menentukan Aturan *Fuzzy*

Berdasarkan himpunan *fuzzy* yang telah ditentukan, akan disusun 25 aturan *fuzzy*, yaitu:

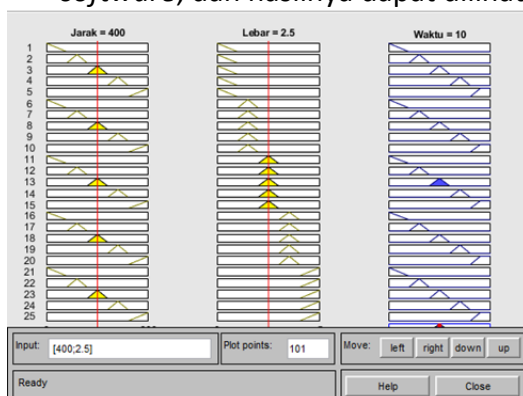
1. (Jarak is SP) and (Lebar is SS) then (Waktu is SC)
2. If (Jarak is P) and (Lebar is SS) then (Waktu is C)
3. If (Jarak is N) and (Lebar is SS) then (Waktu is N)
4. If (Jarak is PJ) and (Lebar is SS) then (Waktu is L)
5. If (Jarak is SPJ) and (Lebar is SS) then (Waktu is SL)
6. If (Jarak is SP) and (Lebar is S) then (Waktu is SC)
7. If (Jarak is P) and (Lebar is S) then (Waktu is C)
8. If (Jarak is N) and (Lebar is S) then (Waktu is N)
9. If (Jarak is PJ) and (Lebar is S) then (Waktu is L)
10. If (Jarak is SPJ) and (Lebar is S) then (Waktu is SL)
11. If (Jarak is SP) and (Lebar is N) then (Waktu is SC)
12. If (Jarak is P) and (Lebar is N) then (Waktu is C)
13. If (Jarak is N) and (Lebar is N) then (Waktu is N)
14. If (Jarak is PJ) and (Lebar is N) then (Waktu is L)
15. If (Jarak is SPJ) and (Lebar is N) then (Waktu is SL)
16. If (Jarak is SP) and (Lebar is L) then (Waktu is SC)
17. If (Jarak is P) and (Lebar is L) then (Waktu is C)
18. If (Jarak is N) and (Lebar is L) then (Waktu is N)
19. If (Jarak is PJ) and (Lebar is L) then (Waktu is L)
20. If (Jarak is SPJ) and (Lebar is L) then (Waktu is SL)
21. If (Jarak is SP) and (Lebar is SL) then (Waktu is SC)
22. If (Jarak is P) and (Lebar is SL) then (Waktu is C)
23. If (Jarak is N) and (Lebar is SL) then (Waktu is N)
24. If (Jarak is PJ) and (Lebar is SL) then (Waktu is L)
25. If (Jarak is SPJ) and (Lebar is SL) then (Waktu is SL)

4. Inferensi *fuzzy* dengan Metode Mamdani

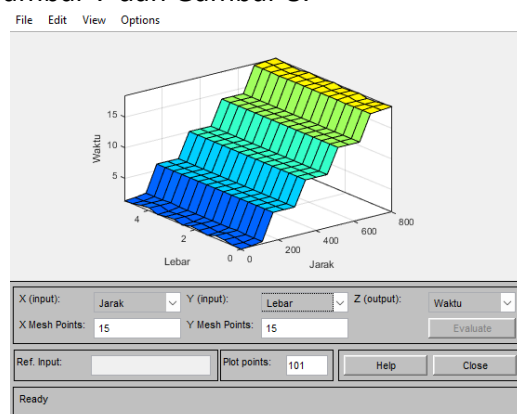
Proses untuk menilai *output* dari setiap aturan yang dihubungkan dengan aturan IF-THEN disebut inferensi *fuzzy*. Dalam penelitian ini, metode inferensi *fuzzy* yang digunakan adalah metode Mamdani. Metode ini, juga dikenal sebagai metode *MIN-MAX* (inferensi *min-max*), menggunakan fungsi implikasi *min* atau *AND* dan agregasi aturan *max* atau *OR*.

5. Melakukan *Defuzzifikasi*

Proses mengubah himpunan *fuzzy* menjadi himpunan yang tegas. Metode yang digunakan dalam proses ini adalah metode *Centroid* yang dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *software*, dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Hasil *Defuzzifikasi* Sistem *Fuzzy*



Gambar 8. *Surface Viewer*

Berikut merupakan hasil *fuzzy logic* pada kasus ini :

Nilai tingkat kecepatan menuju titik kumpul yang digunakan adalah sebagai berikut.

Sangat Cepat : 0 – 4 menit

Lambat : 12 – 16 menit

Cepat : 4 – 8 menit

Sangat Lambat: 16 – 20 menit

Normal : 8 – 12 menit

Tabel 5 berikut adalah tabel *output fuzzy* untuk setiap ruas jalan. *Output fuzzy* diperoleh berdasarkan parameter panjang dan lebar jalan.

Tabel 5. Output fuzzy

Jalur	Output (menit)	Jalur	Output (menit)	Jalur	Output (menit)	Jalur	Output (menit)
1 → 3	2,53	D → 25	2	12 → 13	2	39 → 40	0,67
2 → 3	7,33	D → 28	2,67	13 → 14	2	39 → 44	1,33
2 → 8	12	D → 29	2,67	B → 13	7,33	40 → 41	2
3 → 4	3,6	27 → 28	2	B → 19	4	41 → 42	0,67
3 → 6	3,47	28 → 30	1,33	14 → 16	4,53	41 → 47	1,33
4 → 5	2	29 → 30	1,33	15 → 16	2,67	42 → 43	2
5 → 6	3,73	29 → 33	0,67	16 → 17	4,67	43 → 48	2,13
15 → 12	2	30 → 32	1,33	C → 17	0,67	44 → 45	0,67
6 → 7	5,33	31 → 32	0,67	17 → 22	0,73	44 → 46	1,33
6 → 11	2	31 → 34	1,33	18 → 19	0,67	45 → 47	2,67
7 → 8	1,33	32 → 33	2	18 → 21	0,67	47 → 48	4
7 → 10	1,33	32 → 35	0,67	19 → 20	0,67	48 → G	10,67
8 → 9	1,33	E → 33	0,67	20 → 21	0,53	G → H	6,67
9 → 10	1,33	34 → 35	2	20 → 24	1,07	H → 49	4,67
10 → 15	6,67	E → 35	2	21 → 22	1,07	49 → I	8
A → 14	0,67	E → 43	3,2	22 → 23	1,07	F → 40	0,67
A → 15	2	36 → 37	0,67	23 → 24	2	F → 45	0,67
11 → 12	2	37 → 38	2	23 → 26	0,67		
11 → 14	2	38 → 42	1,33	24 → 25	0,67		

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, algoritma *Floyd-Warshall* mampu menghasilkan rute evakuasi dengan waktu tempuh lebih cepat, sebesar 1,29 jam. Sementara itu, *fuzzy logic* dengan metode Mamdani mampu menghasilkan waktu tempuh 1,31 jam, hal ini sedikit lebih lama. Perbedaan waktu dari kedua pendekatan tersebut terjadi karena kemampuan *fuzzy logic* metode Mamdani dalam menangani ketidakpastian kondisi sebenarnya.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Amoako, E. O. (2019). Application of floyd's algorithm for knust fire service. *Applied Mathematics*, 9(2), 49-58.
- Fathianpour, A., Evans, B., Babaeian Jelodar, M., & Wilkinson, S. (2024). Environmental factors in tsunami evacuation simulation: topography, traffic jam, human behaviour. *Natural Hazards*, 120, 12797–12815.
- Ho, W. C., Shen, J. H., Liu, C. P., & Chen, Y. W. (2022). Research on optimal model of maritime search and rescue route for rescue of multiple distress targets. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4), 460.
- Huang, C. J., Wang, Y. W., Chen, H. M., Tsai, H. W., Jian, J. J., Cheng, A. L., & Liao, J. J. (2014). Application of cellular automata and type-2 fuzzy logic to dynamic vehicle path planning. *Applied Soft Computing*, 19, 333-342.
- Jia, X., Morel, G., Martell-Flore, H., Hissel, F., & Batoz, J. L. (2016). Fuzzy logic based decision support for mass evacuations of cities prone to coastal or river floods. *Environmental modelling & software*, 85, 1-10.
- Kumar, B. K., & Reddy, E. S. (2020). Modified floyd warshall algorithm for cache management in information centric network. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 13(1), 146-155.
- Pulugurta, S., Madhu, E., & Kayitha, R. (2015). Fuzzy logic–based travel demand model to simulate public transport policies. *Journal of Urban Planning and Development*, 141(4), 04014044.
- Şahin, C., Rokne, J., & Alhajj, R. (2019). Human behavior modeling for simulating evacuation of buildings during emergencies. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 528, 121432.
- Sari, M. M. (2017). Studi analisa distribusi sebaran korban jiwa berdasarkan usia dan gender pada peta KRB erupsi Gunung Api Merapi 2010. *Jurnal Dialog Penanggulangan Bencana*, 8(1), 43-53.
- Sharma, S., Ogunlana, K., Scribner, D., & Grynovicki, J. (2018). Modeling human behavior during emergency evacuation using intelligent agents: A multi-agent simulation approach. *Information Systems Frontiers*, 20(4), 741-757.
- Teodorović, D. (1999). Fuzzy logic systems for transportation engineering: the state of the art. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(5), 337-364.
- Toroslu, I. H. (2023). The Floyd-Warshall all-pairs shortest paths algorithm for disconnected and very sparse graphs. *Software: Practice and Experience*, 53(6), 1287-1303.
- Yang, X., Yang, X., & Wang, Q. (2020). Pedestrian evacuation under guides in a multiple-exit room via the fuzzy logic method. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 83, 105138.
- Zhou, M., Dong, H., Wen, D., Yao, X., & Sun, X. (2016). Modeling of crowd evacuation with assailants via a fuzzy logic approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(9), 2395-2407.