

PENENTUAN JALUR EVAKUASI TSUNAMI BAGI PENGENDARA DI KOTA BENGKULU MENGUNAKAN ALGORITMA FUZZY DIJKSTRA

Nur Afandi¹, Siska Yosmar², Zulfia Memi Mayasari³

^{1,2,3}Jurusan Matematika, FMIPA, Universitas Bengkulu, Indonesia

Email: ¹nafandi@unib.ac.id

ABSTRACT

Bengkulu City is an area that is very vulnerable to the occurrence of a Tsunami disaster. Therefore, it is necessary to have a tsunami evacuation route that can be used when a disaster occurs. The purpose of this study is to determine a tsunami evacuation route that can be used for vehicle users so that they can reach the evacuation point in the shortest time. Determination of the evacuation route is done by forming a road graph, determining the weight of each road segment using fuzzy inference, and determining the shortest route using Dijkstra's Algorithm. The results have been obtained in this study are a tsunami evacuation route that can not only be used by vehicle users but can also be used by pedestrians.

Keywords: Dijkstra's algorithm, fuzzy inference, tsunami evacuation route, vehicle.

ABSTRAK

Kota Bengkulu merupakan daerah yang sangat rawan terhadap terjadinya bencana Tsunami. Oleh karena itu sangat diperlukan jalur evakuasi tsunami yang dapat digunakan ketika bencana terjadi. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan jalur evakuasi tsunami yang dapat digunakan bagi pengendara agar pengendara dapat mencapai titik kumpul dalam waktu yang sesingkatnya. Penentuan jalur evakuasi dilakukan dengan membentuk graf jalan, menentukan bobot pada setiap ruas jalan menggunakan fuzzy inferensia, dan menentukan rute terpendek menggunakan Algoritma Dijkstra. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini adalah sebuah jalur evakuasi tsunami yang tidak hanya dapat digunakan oleh pengendara tetapi juga dapat digunakan oleh pejalan kaki.

Kata kunci: Algoritma dijkstra, fuzzy inferensia, jalur evakuasi tsunami, pengendara.

Dikirim: 19 Desember 2021; Diterima: 26 Februari 2022; Dipublikasikan: 30 Maret 2022

Cara sitasi: Afandi, N., Yosmar, S., & Mayasari, Z. M. (2022). Penentuan jalur evakuasi tsunami bagi pengendara di kota bengkulu menggunakan algoritma fuzzy dijkstra. *Teorema: Teori dan Riset Matematika*, 7(1), 139-148. DOI: <http://dx.doi.org/10.25157/teorema.v7i1.6786>

PENDAHULUAN

Kota Bengkulu merupakan salah satu kota yang terletak di pesisir pantai dan berbatasan langsung dengan samudra hindia. Kota ini terletak di Provinsi Bengkulu yang wilayahnya berada dekat dengan pertemuan lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia. Oleh karena itu sangat tidak mengherankan jika intensitas terjadinya gempa bumi di daerah ini cukup tinggi. Afandi *et al.*, (2017) menyebutkan bahwa gempa bumi yang terjadi di sekitar wilayah Kota Bengkulu sebagian besar berpusat di lepas pantai, oleh karenanya Kota Bengkulu juga merupakan kota yang rawan terhadap terjadinya tsunami.

Bencana Tsunami yang menerjang Banda Aceh pada tahun 2004 dan Kota Palu pada tahun 2019 menjadi peringatan bagi semua pihak untuk berbenah dan selalu waspada serta memiliki kesiapsiagaan terhadap bencana tsunami yang bisa datang sewaktu-waktu. Salah satu bentuk kesiapsiagaan dalam menghadapi bencana ini adalah dengan membentuk jalur evakuasi tsunami yang dapat digunakan kapan saja saat bencana tsunami melanda.

Secara alami, jalur evakuasi dibuat sedemikian sehingga perjalanan yang ditempuh akan melewati rute dengan jarak terpendek. Tujuannya adalah agar perjalanan dapat ditempuh dalam waktu yang seminimal mungkin. Waktu tempuh yang singkat akan memberikan kesempatan kepada siapapun untuk dapat menyelamatkan diri ketika terjadi bencana tsunami. Namun informasi jarak saja tidaklah cukup untuk membentuk jalur evakuasi terbaik. Diperlukan beragam informasi lain seperti lebar jalan, tingkat kerusakan jalan, kapasitas jalan, tingkat kepadatan jalan dan lain-lain.

Informasi lain yang tidak kalah pentingnya adalah informasi mengenai bagaimana cara seorang berpindah dari suatu tempat menuju ke tempat berkumpul sementara. Sekelompok orang dapat saja menuju ke tempat berkumpul dengan cara yang berbeda-beda, misalnya dengan berjalan atau dengan menggunakan kendaraan roda dua atau roda empat.

Penelitian tentang penentuan jalur evakuasi tsunami telah dilakukan oleh (Madona & Irmansyah 2013) dengan menggunakan metode nearest Neighbor. Sementara Mayasari *et al.*, (2019) telah melakukan penelitian yang menghasilkan model jalur evakuasi horizontal dengan menggunakan aplikasi teori graf dan pendekatan riset operasi dengan Algoritma *Floyd Warshall*. Selain itu pendekatan algoritma fuzzy dijkstra juga digunakan untuk penentuan jalur evakuasi tsunami oleh Afandi & Mayasari (2021). Pendekatan algoritma ini juga dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan jalur terpendek lainnya seperti yang dilakukan oleh Ichsan *et al.*, (2012), Deng *et al.*, (2012), Mukherjee (2015), Nggufon *et al.*, (2019), dan Akram *et al.*, (2021)

Penelitian tentang penentuan jalur evakuasi di kota Bengkulu telah dilakukan setidaknya dalam penelitian Afandi & Mayasari (2021), Mayasari & Afandi (2021), Mayasari *et al.*, (2021), Mayasari *et al.*, (2019). Di dalam penelitian-penelitian tersebut, cara seseorang melakukan evakuasi diasumsikan sama yaitu dengan berjalan kaki. Padahal dalam kenyataannya mungkin saja setiap orang akan memilih cara evakuasi yang berbeda-beda satu dengan yang lainnya. Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian Afandi & Mayasari (2021), Mayasari & Afandi (2021), Mayasari *et al.*, (2021), Mayasari *et al.*, (2019). Dengan menggunakan teori yang dikemukakan oleh Deng *et al.*, (2014), pada penelitian ini dibuat jalur evakuasi yang mempertimbangkan cara masing-masing orang berpindah apakah dengan berjalan atau dengan menggunakan kendaraan. Informasi ini menjadi sangat penting karena ketika dalam satu ruas jalan terdapat beberapa cara orang untuk melakukan evakuasi maka kecepatan masing-masing orang dapat saja mempengaruhi kecepatan orang lainnya. Misalnya saat jumlah orang yang berjalan kaki cukup besar, maka akan meningkatkan kepadatan jalan. Akibatnya bukan tidak mungkin pengguna kendaraan justru akan mengalami hambatan dalam proses evakuasi sehingga waktu evakuasi menjadi lebih lama. Oleh karenanya, sangat diperlukan jalur evakuasi yang memungkinkan semua pengguna jalan tetap sampai ke titik berkumpul dalam waktu yang singkat meskipun dengan cara evakuasi yang berbeda-beda. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan jalur evakuasi yang dapat digunakan bagi pengendara sekaligus pejalan kaki.

METODE PENELITIAN

Objek yang digunakan dalam penelitian ini adalah data jalan dan data lokasi titik kumpul yang ada di kota Bengkulu. Data yang diperlukan antara lain adalah panjang dan lebar badan jalan, tingkat kepadatan, serta lokasi titik kumpul. Data ini diperoleh dari penelitian Afandi & Mayasari (2021) dan Mayasari & Afandi (2021)

Penentuan jalur evakuasi dilakukan dengan menggunakan Algoritma Fuzzy Dijkstra yang merupakan gabungan antara konsep fuzzy inferensia dan Algoritma Dijkstra. Fuzzy inferensia digunakan untuk menentukan bobot graf dan Algoritma Dijkstra digunakan untuk menentukan jalur terpendek. Penentuan jalur evakuasi untuk kendaraan dilakukan dalam beberapa tahap. Tahap pertama adalah membentuk graf berbobot. Pada tahap ini akan dibentuk sebuah graf berbobot yang mewakili peta jalan di Kecamatan Teluk Segara Kota Bengkulu yang dibuat dengan mengasumsikan persimpangan jalan sebagai simpul dan ruas jalan sebagai sisi. Bobot diperoleh dengan mengkombinasikan beberapa variabel yaitu panjang jalan, lebar jalan, tingkat kepadatan jalan untuk memperoleh tingkat kecepatan evakuasi sebagai variabel output dalam fuzzy inferensia. Tahap kedua adalah menentukan jalur evakuasi bagi pejalan kaki. Pada tahap ini akan ditentukan jalur evakuasi yang dapat digunakan bagi pejalan kaki. Penentuan rute akan ditentukan menggunakan Algoritma Dijkstra. Tahap ketiga adalah mengklasifikasikan ruas jalan apakah suatu ruas jalan dapat dilalui oleh pejalan kaki dan pengguna kendaraan secara bersamaan atau tidak. Variabel penentunya adalah kapasitas jalan dan jumlah kepadatan yang terjadi akibat adanya pejalan kaki. Tahap keempat adalah menentukan jalur evakuasi bagi pengguna kendaraan. Pada tahap ini ditentukan ruas jalan yang dapat digunakan bagi pengguna kendaraan saat bencana datang. Pada tahap ini beberapa ruas jalan yang tidak memungkinkan untuk digunakan secara bersamaan oleh pejalan kaki dan pengendara dihilangkan. Jalur yang dihilangkan ini dijadikan sebagai jalur yang hanya digunakan oleh pejalan kaki. Penentuan rute akan ditentukan berdasarkan Algoritma Dijkstra. Algoritma ini bekerja dengan memilih sisi yang memiliki bobot terkecil yang menghubungkan suatu simpul yang telah terpilih dengan simpul lainnya yang belum terpilih hingga mencapai titik kumpul.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mencapai titik aman yaitu titik berkumpul, sekelompok orang dapat saja melakukannya dengan cara yang berbeda-beda, misalnya dengan berjalan atau dengan menggunakan kendaraan roda dua atau roda empat. Pada penelitian ini dibuat jalur evakuasi yang dapat digunakan bagi pejalan kaki dan juga pengendara. Penentuan jalur evakuasi bagi kendaraan dilakukan dengan tidak mengabaikan adanya pengungsi yang berjalan kaki. Meskipun jalur evakuasi yang dibuat diperuntukkan bagi kendaraan, namun jalur evakuasi dibuat dengan tetap bertujuan agar semua orang dapat mencapai titik berkumpul dalam waktu yang sesingkatnya dengan atau tanpa kendaraan.

Jumlah pejalan kaki tentu akan sangat mempengaruhi kecepatan evakuasi bagi pengendara kendaraan bermotor. Di dalam situasi normal, sangatlah jelas bahwa kecepatan pejalan kaki jauh di bawah kecepatan pengendara kendaraan bermotor. Namun hal ini belum tentu berlaku dalam situasi dan kondisi tertentu. Contohnya pada saat jumlah pejalan kaki sangat besar dan memenuhi badan jalan, maka tentu saja kendaraan bermotor akan melaju dalam kecepatan yang sangat minim atau bahkan tidak bergerak sama sekali. Akibatnya pengguna kendaraan dapat saja terlambat mencapai titik berkumpul. Oleh karenanya, agar jalur evakuasi yang diperoleh lebih optimal, maka salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan membagi ruas jalan menjadi dua lajur, yaitu lajur bagi pejalan kaki dan lajur bagi pengendara. Dengan cara seperti ini pengguna jalur evakuasi yaitu pejalan kaki dan pengendara tidak mengganggu satu sama lain.

Sayangnya tidak semua badan jalan dapat dibagi menjadi dua lajur. Hal ini tentu saja sangat berhubungan dengan kapasitas jalan. Agar tujuan awal dapat tercapai yaitu semua orang dapat mencapai titik kumpul dalam waktu sesingkat mungkin maka sangat penting untuk membagi jalan sesuai dengan kapasitas dan kebutuhannya. Pembagian ini merupakan permasalahan yang cukup kompleks, karena banyak sekali variabel yang perlu dipertimbangkan misalnya, siapa yang menjadi prioritas pengguna jalan, berapa kecepatan evakuasi masing-masing kelompok, berapa luasan yang diperlukan agar masing-

masing kelompok dapat bergerak dengan baik, dan lain-lain. Oleh karena itu agar pembagian jalan dapat dilakukan, maka diperlukan asumsi. Untuk menyederhanakan kasus, dibentuklah asumsi sebagai berikut:

Asumsi 1: Pejalan kaki adalah prioritas utama pengguna jalan sebagai jalur evakuasi.

Asumsi 2: Masing-masing pejalan kaki memerlukan luasan 1 m^2 agar dapat berjalan dengan baik, dan

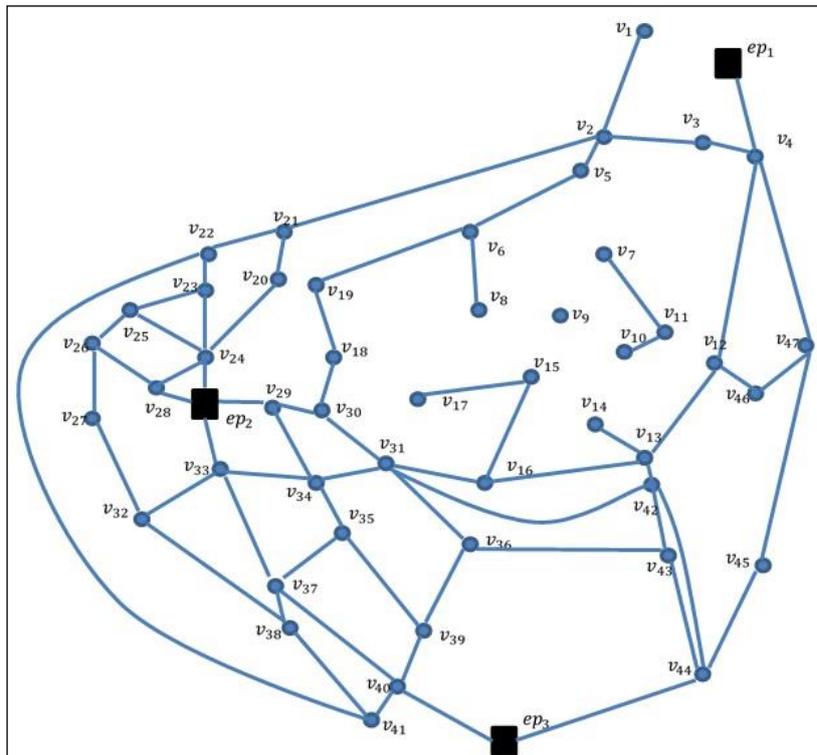
Asumsi 3: Kendaraan memerlukan jalan dengan lebar minimal $2,2 \text{ m}$ agar dapat berjalan dengan baik.

Dengan mempertimbangkan Asumsi 1, langkah awal yang dapat dilakukan dalam membuat jalur evakuasi bagi kendaraan adalah dengan terlebih dahulu menentukan jalur evakuasi bagi pejalan kaki. Berdasarkan jalur evakuasi yang diperoleh tersebut, langkah berikutnya adalah menentukan jalan mana saja yang hanya dapat digunakan oleh pejalan kaki dan jalan mana saja yang dapat digunakan pejalan kaki dan pengendara. Penentuannya dilakukan dengan: pertama mengurangi lebar jalan dengan $2,2 \text{ meter}$, kedua menghitung luas sisa badan jalan, ketiga menghitung kepadatan jalan yaitu dengan membagi jumlah penduduk dengan luas sisa badan jalan, dan Keempat Berdasarkan Asumsi 2, jika kepadatan kurang dari satu orang per satu meter persegi maka jalan dapat dibagi menjadi dua lajur jika sebaliknya maka jalan diperuntukkan hanya bagi pejalan kaki.

Jalur evakuasi bagi pejalan kaki telah diperoleh pada penelitian Mayasari & Afandi (2021). Jalur evakuasi ini diperoleh dengan mempertimbangkan panjang jalan, lebar jalan, dan estimasi kepadatan jalan saat bencana terjadi. Langkah selanjutnya adalah menentukan jalur evakuasi bagi pengguna kendaraan yang dapat dilakukan dengan menentukan graf jalan yang dapat dilalui oleh kendaraan, menentukan bobot untuk setiap ruas jalan, dan menentukan jalur evakuasi bagi pengendara.

a) Graf jalan yang dapat dilalui kendaraan

Dengan menggunakan data pada penelitian Mayasari & Afandi (2021), diperoleh data estimasi kepadatan penduduk pada setiap sisa badan jalan di kecamatan Teluk Segara Kota Bengkulu setelah lebar jalan dikurangi dengan $2,2 \text{ meter}$ yang diperlihatkan dalam Tabel 1.



Gambar 1. Graf yang digunakan untuk menentukan jalur evakuasi bagi pengendara

Selanjutnya ditentukan apakah badan jalan memenuhi kriteria yang telah ditetapkan. Penentuan tersebut dilakukan dengan melihat kepadatan penduduk di setiap ruas jalan. Berdasarkan Asumsi 2, Jika kepadatan kurang dari satu orang per meter persegi maka jalan dapat dibagi menjadi dua lajur dan jika kepadatan lebih dari 1 orang per meter persegi maka jalan tidak dapat dibagi menjadi

dua lajur. Selanjutnya ruas jalan yang tidak bisa dibagi mejadi dua lajur diperuntukkan hanya bagi pejalan kaki. Oleh karenanya ruas jalan ini dihilangkan atau tidak dipertimbangkan dalam menentukan jalur evakuasi bagi pengendara. Berdasarkan hal ini diperoleh graf jalan yang dapat dilalui kendaraan yang diperlihatkan dalam Gambar 1.

Tabel 1. Data estimasi kepadatan penduduk

Sisi	Nama Jalan	Kepadatan (orang/m ²)	Sisi	Nama Jalan	Kepadatan (orang/m ²)
$v_1 ep_1$	Eggano St.	5,2766	$v_{23} v_{24}$	Ahmad Yani St.	0,0085
$v_1 v_2$	Bencoolen St.	0,1013	$v_{23} v_{25}$	Panjaitan St.	0,8869
$v_2 v_3$	Ibnu Hajar St.	0,8396	$v_{24} ep_2$	Ahmad Yani St.	0,0863
$v_2 v_5$	TP Kasim Nasir St.	0,1329	$v_{24} v_{25}$	Pendakian St.	0,3968
$v_2 v_{21}$	Bencoolen St.	0,0770	$v_{25} v_{26}$	Panjaitan St.	0,4622
$v_3 v_4$	Nusirwan Zainul St.	0,2744	$v_{26} v_{27}$	Arraw St.	0,6408
$v_3 v_7$	Pratu Aidit St.	1,6129	$v_{26} v_{28}$	Pasar Ikan St.	0,8227
$v_4 ep_1$	Eggano St.	1,4434	$v_{27} v_{28}$	Kol Berlian St.	0,6675
$v_4 v_{12}$	Bali St.	0,3515	$v_{27} v_{32}$	Arraw St.	1,0461
$v_4 v_{47}$	Sumatera St.	0,1900	$v_{28} ep_2$	Prof Dr Hazairin St.	0,7256
$v_5 v_6$	TP Kasim Nasir St.	0,3470	$v_{29} ep_2$	Ahmad Yani St.	0,0667
$v_5 v_7$	Sentot Alibasyah St.	1,0368	$v_{29} v_{30}$	Ahmad Yani St.	0,3545
$v_6 v_8$	Letkol Iskandar St.	0,7143	$v_{29} v_{31}$	Veteran St.	0,0408
$v_6 v_{19}$	Letda Abu Hanifah	0,2146	$v_{30} v_{31}$	Ahmad Yani St.	0,6477
$v_7 v_9$	H. Moh Zahab St.	1,2500	$v_{31} v_{34}$	Veteran St.	0,1472
$v_7 v_{11}$	Sentot Alibasyah St.	0,3762	$v_{31} v_{36}$	Letkol Santoso St.	0,2672
$v_8 v_9$	Iskandar 11 St.	1,2788	$v_{31} v_{42}$	Ahmad Yani St.	0,4673
$v_8 v_{15}$	Letkol Iskandar St.	1,0897	$v_{32} v_{33}$	Belato St.	0,0553
$v_9 v_{10}$	Lettu Zulkifli St.	1,5422	$v_{32} v_{38}$	Pari St.	0,3093
$v_{10} v_{11}$	Lettu Zulkifli St.	0,5435	$v_{33} ep_2$	Prof Dr Hazairin St.	0,4301
$v_{10} v_{14}$	Lettu Zulkifli St.	1,2121	$v_{33} v_{34}$	Rejamat St.	0,9177
$v_{11} v_{12}$	Sentot Alibasyah St.	2,5827	$v_{33} v_{37}$	Prof Dr Hazairin St.	0,9926
$v_{12} v_{13}$	MT Haryono, St.	0,1813	$v_{34} v_{35}$	V Iskandar Baksir St.	0,1587
$v_{12} v_{46}$	Jawa St.	0,0624	$v_{35} v_{37}$	M Hasan 1 St.	0,5713
$v_{13} v_{14}$	Letkol Iskandar St.	0,6329	$v_{35} v_{39}$	V Iskandar Baksir St.	0,276
$v_{13} v_{16}$	Jendral Sudirman St	0,3119	$v_{36} v_{39}$	Letkol Santoso St.	0,3684
$v_{13} v_{42}$	Jendral Sudirman St	0,0833	$v_{36} v_{43}$	Cendrawasih St.	0,2283
$v_{14} v_{15}$	Letkol Iskandar St.	1,7083	$v_{37} v_{38}$	M Hasan St.	0,3650
$v_{15} v_{16}$	Kapten Syahrial St.	0,4658	$v_{37} v_{40}$	M Hasan St.	0,1385
$v_{15} v_{17}$	Salim Barubara St.	0,5321	$v_{38} v_{41}$	Kerapu St.	0,2209
$v_{16} v_{17}$	Ahmad Dahlan St.	1,5462	$v_{39} v_{40}$	Letkol Santoso St.	0,3063
$v_{16} v_{31}$	Ahmad Yani St.	0,1166	$v_{40} ep_3$	Soekarno Hatta St.	0,3303
$v_{17} v_{18}$	Ahmad Dahlan St.	1,1818	$v_{40} v_{41}$	Kerapu St.	0,1109
$v_{18} v_{19}$	Khadijah St.	0,8994	$v_{42} v_{43}$	Suprpto St.	0,0929
$v_{18} v_{30}$	Khadijah St.	0,2404	$v_{42} v_{44}$	Suprpto St.	0,1123
$v_{19} v_{20}$	Khadijah St.	1,0716	$v_{43} v_{44}$	Suprpto St.	0,1247
$v_{20} v_{21}$	Benteng St.	0,1569	$v_{44} ep_3$	Soekarno Hatta St.	0,1561
$v_{20} v_{24}$	Benteng St.	0,2377	$v_{44} v_{45}$	Basuki Rahmat St.	0,2731
$v_{21} v_{22}$	Bencoolen St.	0,0570	$v_{45} v_{46}$	Bangka St.	0,1878
$v_{22} v_{23}$	Ahmad Yani St.	0,0385	$v_{45} v_{47}$	Basuki Rahmat St.	2,1348
$v_{22} v_{41}$	Pariwisata St.	0,1424	$v_{46} v_{47}$	Jawa St.	0,1291

Berdasarkan Gambar 1, terlihat bahwa verteks v_7, v_9, v_{10} , dan v_{11} menjadi titik yang terisolasi. Titik-titik tersebut tidak dapat dihubungkan dengan titik-titik lainnya. Hal ini berarti bahwa jika pengungsi berada pada titik-titik tersebut, maka pengungsi tidak dapat mengevakuasi dirinya dengan menggunakan kendaraan. Oleh karena itu pengungsi harus berjalan kaki untuk mencapai titik kumpul.

b) Bobot graf melalui output fuzzy

Bobot graf pada setiap sisi ditentukan dengan mempertimbangkan variabel-variabel yang mempengaruhi kecepatan evakuasi pada setiap ruas jalan. Bobot ini ditentukan dengan menggunakan fuzzy inferensia. Variabel output yang diharapkan adalah tingkat kecepatan evakuasi. Sementara itu variabel input yang digunakan adalah panjang dan lebar jalan. Jumlah penduduk tidak lagi dijadikan sebagai variabel input karena jalur evakuasi keduanya telah dipisahkan. Fungsi keanggotaan untuk panjang jalan menggunakan fungsi yang disebutkan dalam penelitian Afandi & Mayasari (2021). Sementara fungsi keanggotaan untuk lebar jalan ditetapkan sebagai berikut.

$$\mu_W \text{ sempit } (x) = \begin{cases} 1, & x \leq 1 \\ \frac{4-x}{4-1}, & 1 < x < 4 \\ 0, & x \geq 4 \end{cases}$$

$$\mu_W \text{ sedang } (x) = \begin{cases} \frac{x-1}{4-1}, & 1 < x \leq 4 \\ \frac{7-x}{7-4}, & 4 < x < 7 \\ 0, & x \geq 7 \text{ atau } x \leq 1 \end{cases}$$

$$\mu_W \text{ lebar } (x) = \begin{cases} 1, & x \geq 7 \\ \frac{x-4}{7-4}, & 4 < x < 7 \\ 0, & x \leq 4 \end{cases}$$

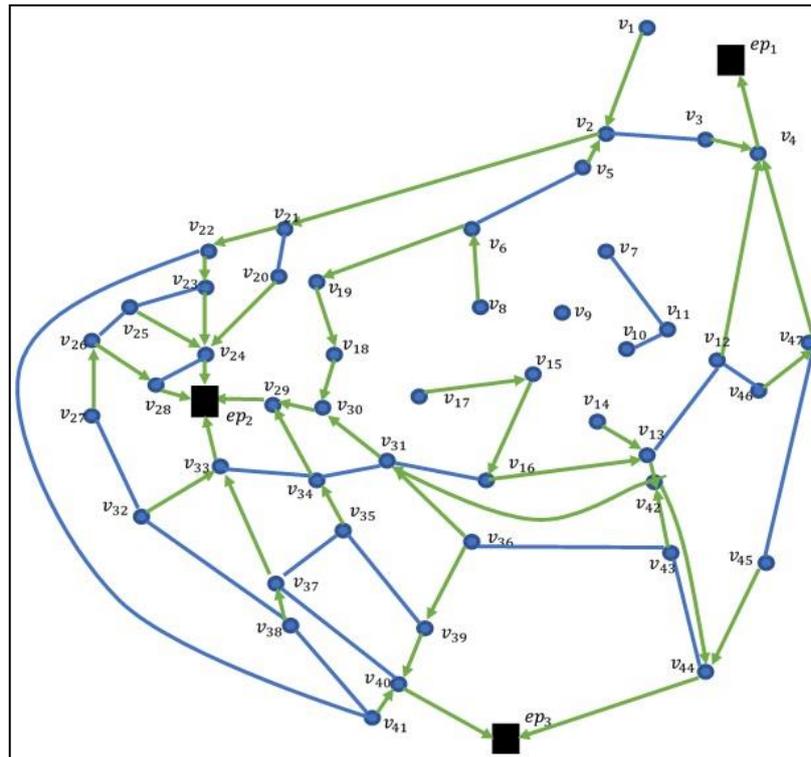
Selanjutnya, penentuan nilai variabel output yaitu tingkat kecepatan evakuasi dilakukan dengan menggunakan aturan yang sama yang digunakan pada penelitian Afandi & Mayasari (2021). Berikut ini pada Tabel 2 adalah data bobot graf yang berupa nilai variabel output yang diperoleh berdasarkan aturan tersebut.

Tabel 2. Output fuzzy berupa tingkat kecepatan evakuasi

Sisi	Output Fuzzy	Sisi	Output Fuzzy	Sisi	Output Fuzzy	Sisi	Output Fuzzy	Sisi	Output Fuzzy	Sisi	Output Fuzzy
v_1ep_1	0,48	v_7v_9	0,47	$v_{15}v_{16}$	0,35	$v_{23}v_{24}$	0,12	$v_{31}v_{34}$	0,25	$v_{37}v_{40}$	0,32
v_1v_2	0,26	v_7v_{11}	0,32	$v_{15}v_{17}$	0,34	$v_{23}v_{25}$	0,29	$v_{31}v_{36}$	0,16	$v_{38}v_{41}$	0,45
v_2v_3	0,50	v_8v_9	0,49	$v_{16}v_{17}$	0,50	$v_{24}ep_2$	0,12	$v_{31}v_{42}$	0,26	$v_{39}v_{40}$	0,20
v_2v_5	0,26	v_8v_{15}	0,31	$v_{16}v_{31}$	0,15	$v_{24}v_{25}$	0,32	$v_{32}v_{33}$	0,34	$v_{40}ep_3$	0,32
v_2v_{21}	0,50	v_9v_{10}	0,48	$v_{17}v_{18}$	0,49	$v_{25}v_{26}$	0,23	$v_{32}v_{38}$	0,37	$v_{40}v_{41}$	0,34
v_3v_4	0,20	$v_{10}v_{11}$	0,43	$v_{18}v_{19}$	0,27	$v_{26}v_{27}$	0,27	$v_{33}ep_2$	0,31	$v_{42}v_{43}$	0,28
v_3v_7	0,39	$v_{10}v_{14}$	0,48	$v_{18}v_{30}$	0,25	$v_{26}v_{28}$	0,31	$v_{33}v_{34}$	0,42	$v_{42}v_{44}$	0,16
v_4ep_1	0,51	$v_{11}v_{12}$	0,28	$v_{19}v_{20}$	0,23	$v_{27}v_{28}$	0,31	$v_{33}v_{37}$	0,26	$v_{43}v_{44}$	0,25
v_4v_{12}	0,31	$v_{12}v_{13}$	0,20	$v_{20}v_{21}$	0,28	$v_{27}v_{32}$	0,25	$v_{34}v_{35}$	0,26	$v_{44}ep_3$	0,16
v_4v_{47}	0,27	$v_{12}v_{46}$	0,16	$v_{20}v_{24}$	0,36	$v_{28}ep_2$	0,33	$v_{35}v_{37}$	0,21	$v_{44}v_{45}$	0,33
v_5v_6	0,35	$v_{13}v_{14}$	0,29	$v_{21}v_{22}$	0,24	$v_{29}ep_2$	0,19	$v_{35}v_{39}$	0,29	$v_{45}v_{46}$	0,21
v_5v_7	0,32	$v_{13}v_{16}$	0,24	$v_{22}v_{23}$	0,10	$v_{29}v_{30}$	0,14	$v_{36}v_{39}$	0,26	$v_{45}v_{47}$	0,50
v_6v_8	0,30	$v_{13}v_{42}$	0,10	$v_{22}v_{41}$	0,50	$v_{29}v_{31}$	0,12	$v_{36}v_{43}$	0,36	$v_{46}v_{47}$	0,31
v_6v_{19}	0,31	$v_{14}v_{15}$	0,30			$v_{30}v_{31}$	0,12	$v_{37}v_{38}$	0,25		

c) Jalur Evakuasi

Jalur evakuasi ditentukan dengan menetapkan jalur dengan jarak terpendek dari setiap ruas jalan menuju titik kumpul. Jarak yang dimaksud tidak merujuk pada jarak sebenarnya melainkan jarak yang diperoleh berdasarkan bobot yang diperlihatkan pada Tabel 2. Penentuannya dilakukan menggunakan Algoritma Dijkstra. Berdasarkan algoritma tersebut diperoleh jalur evakuasi bagi pengendara kendaraan yang diperlihatkan dalam Gambar 2.

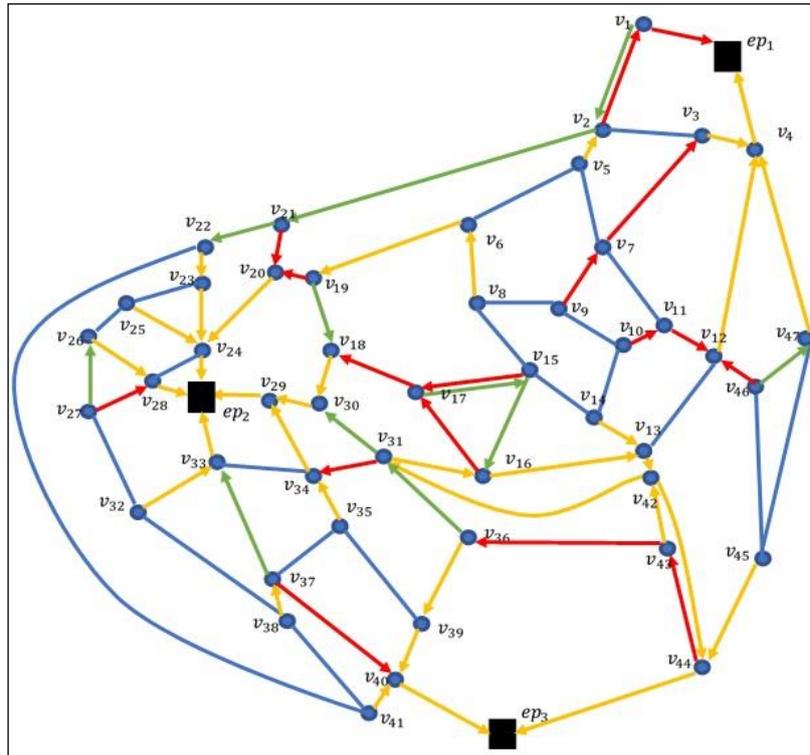


Gambar 2. Jalur evakuasi bagi kendaraan

Jalur evakuasi yang diperlihatkan pada Gambar 2 jika dikombinasikan dengan jalur evakuasi bagi pejalan kaki, maka menghasilkan peta jalur evakuasi yang diperlihatkan dalam Gambar 3. Peta ini selain dapat digunakan oleh pengendara juga dapat digunakan oleh pejalan kaki.

Jalur evakuasi yang ditunjukkan pada Gambar 3 dapat digunakan sebagai jalur evakuasi bagi pengendara dan pejalan kaki. Berdasarkan Gambar 3 tersebut, terdapat empat ruas jalan yang berbeda, yaitu ruas jalan berwarna hijau, merah, kuning, dan biru. Ruas jalan berwarna hijau adalah ruas jalan yang digunakan hanya untuk pengendara, ruas jalan berwarna merah adalah ruas jalan yang digunakan hanya untuk pejalan kaki, dan ruas jalan berwarna kuning adalah ruas jalan yang dapat dilalui oleh pengendara dan pejalan kaki. Sebagai contoh sisi v_6v_{19} merupakan sisi dengan warna kuning. Hal ini berarti bahwa ruas jalan yang diwakili oleh sisi ini dapat dilalui baik oleh pejalan kaki maupun oleh pengendara, yaitu dari v_6 menuju v_{19} . Selanjutnya, jika pengungsi (pengendara dan pejalan kaki) berada pada ruas jalan yang berwarna biru, maka pengungsi dapat memilih ke verteks (persimpangan jalan) yang terdekat atau ke verteks yang bersesuaian dengan caranya mengevakuasi diri. Contohnya pejalan kaki yang berada pada sisi v_8v_9 dapat memilih untuk menuju ke verteks v_8 atau v_9 dengan mempertimbangkan jaraknya terhadap verteks-verteks tersebut. Sementara pengendara yang berada pada sisi tersebut harus menuju ke v_8 . Pengendara tidak dapat menuju v_9 karena verteks ini hanya dapat dilewati dan diperuntukkan bagi pejalan kaki.

Pada Gambar 3, terdapat dua sisi yang berbeda jika dibandingkan dengan sisi lainnya. Sisi tersebut adalah sisi v_1v_2 dan $v_{15}v_{17}$ yang memiliki dua warna yang berbeda yaitu hijau dan merah. Sebetulnya sisi-sisi ini sama dengan sisi yang berwarna kuning yang dapat dilalui baik oleh pejalan kaki maupun oleh pengendara, namun dalam arah yang berbeda. Misalnya sisi v_1v_2 dapat dilewati oleh pengendara yang berasal dari v_1 menuju v_2 . Selain itu, sisi ini juga dapat dilalui oleh pejalan kaki dari arah v_2 menuju v_1 . Hal yang sama juga berlaku untuk sisi $v_{15}v_{17}$.



Gambar 3. Jalur evakuasi bagi pejalan kaki dan pengendara

Berdasarkan Gambar 3 diperoleh 11 rute jalur evakuasi bagi pengendara yang terdiri dari 3 rute menuju ep_1 , 11 rute menuju ep_2 , dan 5 rute menuju ep_3 . Secara rinci dapat dijabarkan sebagai berikut

- a) Jalur evakuasi menuju ep_1
 - $v_3 - v_4 - ep_1$
 - $v_{12} - v_4 - ep_1$
 - $v_{46} - v_{47} - v_4 - ep_1$
- b) Jalur evakuasi menuju ep_2
 - $v_1 - v_2 - v_{21} - v_{22} - v_{23} - v_{24} - ep_2$
 - $v_5 - v_2 - v_{21} - v_{22} - v_{23} - v_{24} - ep_2$
 - $v_8 - v_6 - v_{19} - v_{18} - v_{30} - v_{29} - ep_2$
 - $v_{20} - v_{24} - ep_2$
 - $v_{25} - v_{24} - ep_2$
 - $v_{27} - v_{26} - v_{28} - ep_2$
 - $v_{32} - v_{33} - ep_2$
 - $v_{35} - v_{34} - v_{29} - ep_2$
 - $v_{36} - v_{31} - v_{30} - v_{29} - ep_2$
 - $v_{38} - v_{37} - v_{33} - ep_2$
 - $v_{43} - v_{42} - v_{31} - v_{30} - v_{29} - ep_2$
- c) Jalur evakuasi menuju ep_3
 - $v_{14} - v_{13} - v_{42} - v_{44} - ep_3$
 - $v_{17} - v_{15} - v_{16} - v_{13} - v_{42} - v_{44} - ep_3$
 - $v_{36} - v_{39} - v_{40} - ep_3$
 - $v_{41} - v_{40} - ep_3$
 - $v_{45} - v_{44} - ep_3$

KESIMPULAN

Penelitian ini telah menghasilkan jalur evakuasi yang dapat digunakan bagi pengguna kendaraan. Jalur evakuasi yang diperoleh ini selain dapat digunakan oleh pengendara juga dapat digunakan oleh pejalan kaki sebagai objek yang menjadi prioritas dalam proses evakuasi.

REKOMENDASI

Peta jalur evakuasi yang diperoleh pada penelitian ini dapat dijadikan sebagai rujukan bagi penentuan jalur evakuasi tsunami di Kota Bengkulu. Agar jalur evakuasi menjadi lebih baik, maka perlu dilakukan penelitian lanjutan, misalnya membuat jalur evakuasi yang mempertimbangkan jarak antara jalan dengan bibir pantai atau variabel lainnya yang mempengaruhi proses evakuasi saat bencana datang.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Bengkulu yang telah memberikan pendanaan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, N., Swita, B., & Yosmar, S. (2017). Aplikasi fuzzy c-means clustering untuk mengelompokkan data gempa bumi di provinsi Bengkulu. *Eksakta*, 18(2), 129-136.
- Afandi, N., & Mayasari, Z. M. (2021). An evacuation route in Bengkulu city based on fuzzy dijkstra algorithm. *Journal of Physics: Conference Series* 1863, (1), 012007
- Akram, M., Habib, A., & Alcantud J. C. R. (2021). An optimization study based on dijkstra algorithm for a network with trapezoidal picture fuzzy numbers. *Neural Computing and Applications* 33, 1329–1342.
- Chen, Y., Shen, S., Chen, T., & Yang, R. (2014). Path optimization study for vehicles evacuation based on dijkstra algorithm. *Procedia Engineering*, 71, 159 – 165
- Deng, Y., Chen, Y., Zhang, Y., dan Mahadevan, S. (2012). Fuzzy dijkstra algorithm for shortest path problem under uncertain environment. *Applied Soft Computing*, 12(3), 1231-1237.
- Ichsan, M. H. H., Yudaningtyas, E., & Muslim, M. A. (2012). Solusi optimal pencarian jalur tercepat dengan algoritma hybrid fuzzy-dijkstra. *Jurnal EECCIS*, 6(2), 155-160.
- Madona, E. & Irmansyah, M. (2013). Aplikasi metode nearest neighbor pada penentuan jalur evakuasi terpendek untuk daerah rawan gempa dan tsunami. *Elektron*, 5(2), 39-46.
- Mayasari Z. M., Rafflesia, U., Astuti, M., & Fauzi, Y. (2019). Mathematical modeling approach of an evacuation model for tsunami risk reduction in Bengkulu. *Journal of Physics: Conference Series*, 1188 (1), 012094, 1-13.
- Mayasari Z. M., Astuti, M., Afandi, N., & Fauzi, Y. (2021). Vertical evacuation planning to reduce a risk of a tsunami disaster in Teluk Segara district, Bengkulu city. *Journal of Physics: Conference Series*, 1863 (1), 012010, 1-9.
- Mayasari Z. M., & Afandi, N. (2021). Optimasi jalur evakuasi bagi pejalan kaki menggunakan algoritma fuzzy dijkstra di kecamatan Teluk Segara. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, 15(3), 581–590.

Mukherjee, S. (2015). Fuzzy programming technique for solving the shortest path problem on networks under triangular and trapezoidal fuzzy environment. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 7(5), 576-594.

Nggufon, N., & Rochmad, M. (2019). Pencarian rute terbaik pemadam kebakaran kota semarang menggunakan algoritma dijkstra dengan logika fuzzy sebagai penentu bobot pada graf. *Unnes Journal of mathematics*, 8(1), 40-49.