

Optimasi Jalur Evakuasi Bencana dalam Mereduksi Dampak Erupsi Gunung Semeru Menggunakan Shortest Path dan Maximum Flow

Anggita Retno Kristanti^{1*}, Dina Pratiwi¹, Isnani Ayu Rahmawati¹, Akemat Rio Setiawan², Ahmad Habibi², Denis Eka Cahyani¹

^{1,1*}Prodi S1 Matematika, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5, Malang 65145, Indonesia

²Prodi S1 Geografi, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5, Malang 65145, Indonesia

E-mail: anggita.retno.2003126@students.um.ac.id

*Corresponding Author

ABSTRACT

Indonesia is located on Ring of Fire, making it susceptible to volcanic. One of volcanic disaster occurred at Mount Semeru. Eruption of Mount Semeru in 2021 resulted in 51 casualties, displacement of 10,400 people, and damage to 38 educational facilities. Therefore, there is a need for the optimization of evacuation routes an effort to reduce impact of Mount Semeru's eruptions. Objective of this research is to formulate a map of the fastest evacuation routes based on the shortest path and maximum flow in order to obtain an optimal evacuation route. Research using an explanatory sequential mixed method. Data collection involved literature studies and interviews with informants. Data analyzed using shortest path and maximum flow to determine the optimal evacuation route. The research results show that Pronojiwo and Candipuro district with 7 villages are the most affected areas of Mount Semeru eruption. The research results indicate Pronojiwo and Candipuro districts, comprising seven villages, are the areas most affected by Mount Semeru's eruptions. Based on analysis using shortest path and maximum flow, seven maps of optimal evacuation routes were obtained according to conditions of each village. There are 35 optimal eruption evacuation routes.

Keywords: eruption, shortest path, maximum flow, evacuation path

ABSTRAK

Indonesia terletak pada jalur Cincin Api sehingga rawan tertimpa bencana vulkanik. Salah satu bencana vulkanik yaitu terjadi di Gunung Semeru. Erupsi Gunung Semeru pada tahun 2021 menyebabkan 51 korban jiwa, 10.400 orang mengungsi, dan 38 fasilitas pendidikan rusak. Oleh karena itu, perlu adanya optimasi jalur evakuasi untuk mengurangi dampak erupsi Gunung Semeru. Tujuan riset ini adalah memformulasikan peta jalur evakuasi tercepat berdasarkan *shortest path* dan *maximum flow* untuk memperoleh jalur evakuasi yang optimal. Riset menggunakan *explanatory sequential mixed method*. Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur dan wawancara mendalam dengan pihak Destana, perangkat desa, dan BPBD setempat. Data yang digunakan dalam pembuatan jalur evakuasi berupa jumlah penduduk, letak posko, dan kendaraan evakuasi. Data dianalisis menggunakan *shortest path* dan *maximum flow* untuk memperoleh jalur evakuasi optimal. Hasil riset menunjukkan bahwa Kecamatan Pronojiwo dan Kecamatan Candipuro dengan 7 desa yang merupakan wilayah paling terdampak erupsi Gunung Semeru. Berdasarkan analisis menggunakan *shortest path* dan *maximum flow* diperoleh 7 peta jalur evakuasi optimal yang dibuat sesuai dengan kondisi masing-masing desa. Total dihasilkan 35 jalur evakuasi erupsi Gunung Semeru optimal yang mempertimbangkan jarak dan kepadatan jalur. Jalur evakuasi ini selanjutnya dapat digunakan oleh Destana dan BPBD Lumajang untuk disimulasikan agar dapat digunakan saat terjadi bencana.

Kata kunci: erupsi, shortest path, maximum flow, jalur evakuasi

Dikirim: Mei 2024; Diterima: Agustus 2024; Dipublikasikan: September 2024

Cara sitasi: Kristanti, A. R., Pratiwi, D., Rahmawati, I. A., Setiawan, A. R., Habibi, A., & Cahyani, D.E. (2024). Optimasi Jalur Evakuasi Bencana dalam Mereduksi Dampak Erupsi Gunung Semeru Menggunakan Shortest Path dan Maximum Flow. *Teorema: Teori dan Riset Matematika*, 9(2), 177-192. DOI: <http://dx.doi.org/10.25157/teorema.v9i2.14140>

PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng aktif yaitu Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik sehingga sangat rawan terhadap bencana geologis (Kurnio *et al.*, 2021). Terletak pada jalur Cincin Api Pasifik membuat Indonesia rawan terhadap bencana vulkanik dan tektonik (Sari & Setyaningsih, 2022). Berdasarkan data *National Geography* terdapat 127 Gunung Berapi di Indonesia dan berdasarkan laporan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), sepanjang tahun 2010–2020 terdapat 156 letusan gunung api di Indonesia dengan 14 letusan pada tahun 2020 yang meningkat dua kali lipat dibanding tahun 2019. Fenomena ini memberikan dampak negatif bagi makhluk hidup seperti rusaknya fasilitas umum dan jatuhnya korban jiwa. Faktanya, 10% dari penduduk Indonesia bermukim di daerah yang rentan mengalami erupsi gunung berapi. Hal ini diperparah dengan kenyataan bahwa 175.000 masyarakat Indonesia menjadi korban letusan gunung api dalam 100 tahun terakhir (Sudarsono *et al.*, 2019). Menjadi hal yang wajar jika Indonesia tercatat menduduki peringkat ke-2 dengan jumlah kematian tertinggi akibat bencana alam di Asia-Pasifik (Wahid, 2019).

Salah satu gunung aktif di Indonesia sekaligus gunung tertinggi di pulau Jawa adalah Gunung Semeru. Pada tahun 2021 Gunung Semeru mengalami erupsi yang mengakibatkan 51 korban jiwa, 10.400 orang mengungsi pada 410 titik pengungsian, dan 38 fasilitas pendidikan mengalami kerusakan (BNPB, 2021). Hal ini menggambarkan bahwa penanganan mitigasi bencana alam di Gunung Semeru kurang efisien. Gunung Semeru merupakan gunung aktif yang sewaktu-waktu bisa meletus (Nuriman *et al.*, 2022). Wilayah paling terdampak erupsi Gunung Semeru diantaranya Kecamatan Pronojiwo dan Kecamatan Candipuro (BPBD, 2021).

Pemilihan rute evakuasi menuju daerah aman dari erupsi Gunung Semeru harus memperhatikan jalur-jalur yang tersedia dan aman dari dampak erupsi misalnya lava dan lontaran batuan pijar. Proses evakuasi juga harus memperhatikan kepadatan warga yang melakukan mobilisasi agar jalur yang dilalui bisa optimal. Membawa atau mengarahkan orang ke daerah aman merupakan tantangan utama dalam mengelola evakuasi bencana (Zhang *et al.*, 2020). Meskipun masyarakat di sekitar Gunung Semeru mengetahui jalur evakuasi mandiri, namun pada kenyataannya masyarakat tidak memperhatikan kepadatan orang yang melalui jalur tersebut sehingga menimbulkan problematika besar dalam evakuasi bencana seperti kerumunan di beberapa titik sehingga terjadi peningkatan waktu bahkan biaya evakuasi karena kemacetan. Permasalahan tersebut dapat diselesaikan secara matematis menggunakan teori graf.

Teori graf merupakan salah satu cabang ilmu matematika yang penerapannya dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan kehidupan sehari-hari (Buhaerah *et al.*, 2022; Rhohman, 2017). Pada teori graf mempelajari banyak permasalahan salah satunya pencarian jalur evakuasi bencana alam. Teori graf telah banyak digunakan dalam pencarian jalur evakuasi bencana seperti jalur evakuasi gempa (Maulidina., 2019; Rumondor *et al.*, 2019), jalur evakuasi tsunami (Pratiwi *et al.*, 2020; Aji L.W., 2020), dan jalur evakuasi gunung meletus (Irawan *et al.*, 2023). Graf relevan digunakan untuk pencarian jalur evakuasi dengan merepresentasikan titik pada graf sebagai tempat awal evakuasi dilakukan dan posko, sedangkan garis pada graf merepresentasikan jarak yang ditempuh dari tempat awal evakuasi menuju posko. Pembuatan jalur evakuasi dapat diselesaikan menggunakan *shortest path* dan *maximum flow*. *Shortest path* merupakan rute yang dihasilkan dengan memperhatikan jarak terpendek. *Maximum flow problem* bermanfaat dalam mencari nilai aliran maksimum yang memiliki satu titik sumber (*source*) dan titik tujuan (*sink*) dalam menentukan jalur (Kumari & Namasudra, 2021).

Riset mengenai pencarian jalur evakuasi bencana menggunakan teori graf yang telah disebutkan hanya memfokuskan pada pencarian jarak terpendek saja. Informasi jarak saja tidaklah cukup untuk

membentuk jalur evakuasi terbaik. Diperlukan beragam informasi lain dalam menentukan jalur evakuasi seperti lebar jalan, tingkat kerusakan jalan, kapasitas jalan, tingkat kepadatan jalan dan lain-lain (Afandi *et al.*, 2022). Proses evakuasi juga harus memperhatikan kepadatan jalur yang melakukan mobilisasi agar jalur yang dilalui bisa optimal (Baeza *et al.*, 2017; Yossyafra *et al.*, 2019). Masalah kepadatan jalur evakuasi dapat diselesaikan dengan pendekatan *maximum flow* (Liu *et al.*, 2022). Oleh karena itu, *maximum flow* mampu memperbaiki optimalisasi jalur yang masih belum bisa diselesaikan hanya dengan *shortest path*.

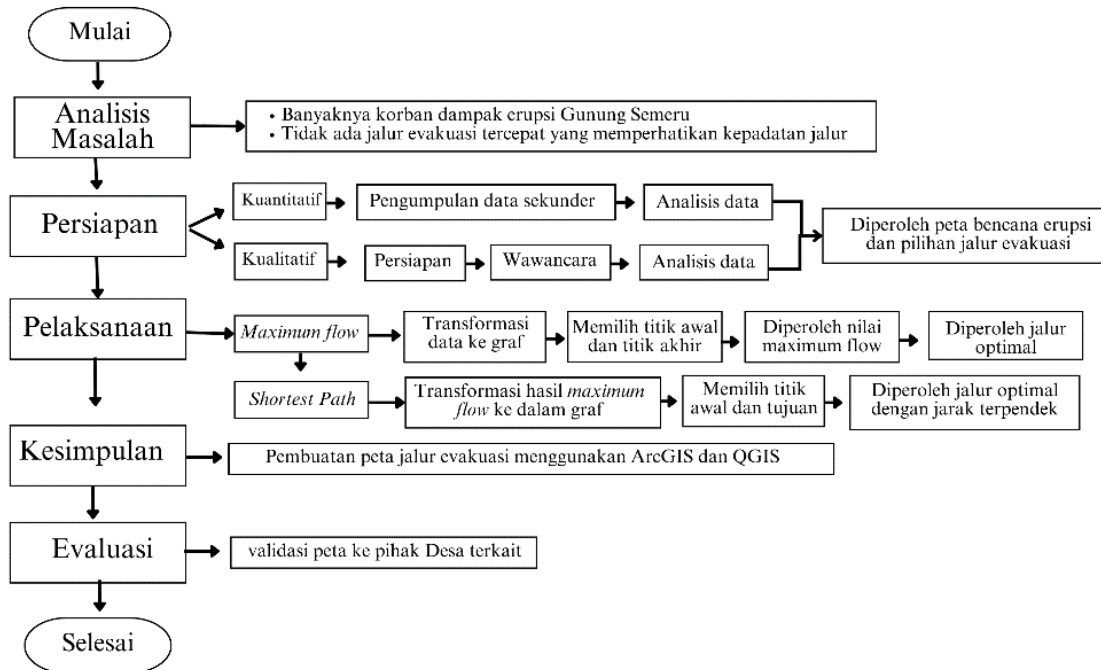
Berangkat dari permasalahan dalam menentukan jalur evakuasi bencana gunung meletus, penting dilakukan riset dalam menentukan jalur evakuasi yang tidak hanya dianalisis dengan menggunakan *shortest path* tetapi juga menggunakan *maximum flow* untuk memperoleh rute optimal dalam upaya mitigasi bencana Gunung Semeru. Hal ini dilakukan sebagai upaya untuk mengurangi dampak korban bencana Gunung Semeru terutama wilayah Kecamatan Pronojiwo dan Kecamatan Candipuro. Riset ini menghasilkan desain jalur dalam evakuasi erupsi Gunung Semeru yang diawali dengan eksplorasi daerah terdampak dan jalur evakuasi yang ada di daerah tersebut. Riset di lanjutkan dengan mengidentifikasi fenomena-fenomena khusus ketika erupsi terjadi. Hal ini menjadi dasar dalam menentukan rute dengan memperhatikan banyaknya orang yang melintasi.

Analisis rute menggunakan *maximum flow* dapat menghasilkan jalur evakuasi dengan memperhatikan kepadatan orang yang melewati jalur. Kemudian menggunakan *shortest path* dalam mencari jalur terpendek. Kombinasi ini memiliki akurasi tinggi karena didasari dengan karakteristik bencana dalam menentukan jalur tercepat. Jalur evakuasi ini diintegrasikan pada sistem GIS yang lebih representatif dalam membentuk peta jalur evakuasi. Kajian ini sangat penting dilakukan dalam mengurangi dampak bencana alam gunung meletus dengan memformulasikan jalur tercepat berakurasi tinggi. Mengingat bencana pada umumnya terjadi sangat cepat (Lujak & Giordani, 2018)

METODE PENELITIAN

Terdapat tiga tahapan riset, yaitu persiapan, pelaksanaan, dan evaluasi. Desain riset berupa riset *explanatory sequential mixed method*. *Explanatory sequential mixed method* adalah riset dengan menggunakan metode kombinasi yaitu menggabungkan pendekatan kualitatif dan kuantitatif atau sebaliknya (Indrawan & Jalilah, 2021). Pada tahap persiapan dilakukan pengumpulan data sekunder. Pengumpulan data menggunakan metode kuantitatif deskriptif dengan mengidentifikasi karakteristik wilayah terdampak erupsi Gunung Semeru. Kemudian dilakukan pengumpulan data menggunakan metode kualitatif yaitu wawancara dengan pemangku kebijakan, diantaranya BPBD Kabupaten Lumajang, Sekretaris Kecamatan Pronojiwo dan Candipuro serta kepala desa untuk memperoleh informasi terkait proses evakuasi dan jalur evakuasi. Teknik wawancara yang digunakan bersifat terstruktur dengan membuat data pertanyaan sebelum wawancara berlangsung agar diperoleh data yang sesuai untuk pembuatan peta jalur evakuasi. Melalui wawancara tersebut diperoleh data seperti peta desa, kondisi jalan, data penduduk desa, transportasi yang digunakan selama evakuasi berlangsung, dan posko. Data tersebut digunakan untuk mengidentifikasi jalur evakuasi menggunakan *shortest path* dan *maximum flow*. Pada tahap pelaksanaan dilakukan analisis data menggunakan metode kuantitatif dengan (1) menentukan titik awal dan akhir evakuasi; (2) transformasi data yang diperoleh dari hasil wawancara dengan mentransformasikan pemukiman warga dan posko evakuasi sebagai kumpulan titik dan jalur evakuasi sebagai garis dalam graf berbobot; (3) penyelesaian *maximum flow*; (4) penyelesaian *shortest path*. Selanjutnya digunakan bantuan aplikasi ArcGIS dan QGIS dalam pembuatan peta dengan mendigitasi jalur evakuasi hasil dari pemodelan *shortest path* dan *maximum flow*. Pada tahap evaluasi dilakukan validasi peta ke pihak desa dengan menyerahkan hasil peta jalur evakuasi

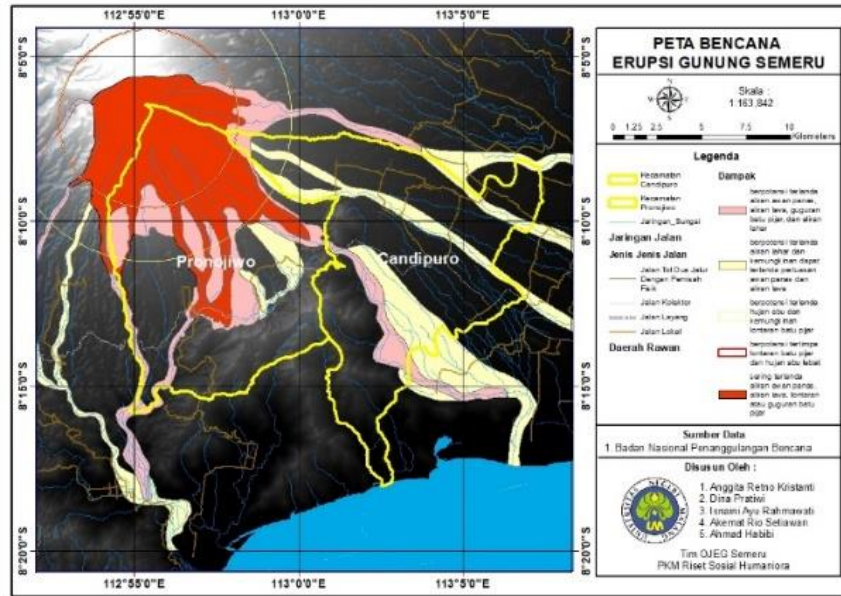
yang dibuat. Pada tahap ini dilakukan konsultasi terkait jalur-jalur yang dipilih apakah sesuai untuk evakuasi. Kriteria keberhasilan validasi mencakup kelancaran akses jalur, waktu tempuh terpendek, kapasitas jalan dalam menampung penduduk yang dievakuasi tanpa menimbulkan kemacetan, serta kondisi jalan yang memungkinkan kendaraan evakuasi dapat melintas. Jalur yang berhasil divalidasi adalah yang memenuhi semua kriteria tersebut.



Gambar 1. Flowchart Metode

HASIL DAN PEMBAHASAN

Erupsi Gunung Semeru berpotensi menimbulkan dampak di wilayah sekitar gunung. Melalui hasil pemodelan dengan menggunakan software ArcGis terkait penentuan daerah rawan terkena bencana gunung meletus di Gunung Semeru menghasilkan daerah-daerah yang berpotensi menjadi titik perhatian utama. Data-data yang digunakan dalam pembuatan peta daerah rawan potensi diambil dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana, Badan Informasi Geospasial, dan Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Analisis peta kerawanan letusan Gunung Semeru menghasilkan Kecamatan Candipuro dan Kecamatan Pronojiwo sebagai lokasi riset karena daerah tersebut merupakan daerah yang beresiko tinggi dibandingkan dengan daerah lain di Kabupaten Lumajang.



Gambar 2. Peta Bencana Erupsi Gunung Semeru

Di daerah kecamatan Pronojiwo dan Candipuro terdapat beberapa desa yang terdampak parah sehingga dibentuk desa tangguh bencana (Destana). Beberapa daerah di kecamatan Pronojiwo yang sudah dibentuk Destana diantaranya desa Oro-Oro Ombo, Supiturang, Sumberurip, dan Sidomulyo. Kecamatan Candipuro terdapat tiga desa yang sudah dibentuk Destana, yaitu desa Penanggal, Sumbermujur, dan Sumberwuluh. Tujuh desa di atas merupakan desa cakupan riset ini.

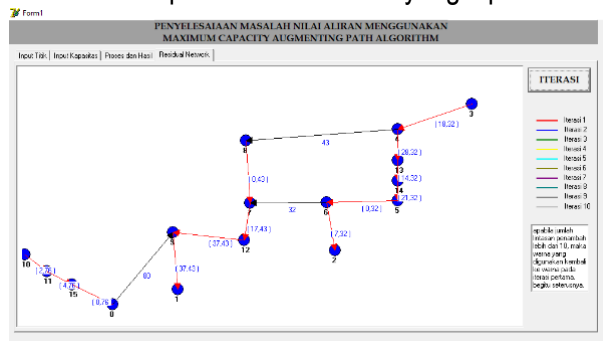
Berdasarkan hasil survei dan wawancara ke perangkat desa setempat, kondisi jalan desa bervariasi jenisnya diantaranya jalan rabat, aspal, dan nasional. Kondisi jalan di kecamatan Pronojiwo didominasi oleh jalan rabat. Hal ini dikarenakan tekstur tanah hitam yang lembek dan bergerak sehingga jalan aspal kurang cocok untuk kondisi tersebut. Kondisi jalan di Kecamatan Candipuro didominasi oleh jalan aspal namun kondisi jalan banyak yang mengalami kerusakan. Dalam menentukan jalur evakuasi harus memperhatikan beberapa faktor diantaranya daerah aman longsor, jalur-jalur yang sudah ada, kepadatan warga, daerah aman lontaran material vulkanik, kepadatan jalur, dan jarak tempuh evakuasi. Berdasarkan hasil analisis karakteristik wilayah terdampak, diperoleh jalan-jalan yang dijadikan jalur evakuasi.

Titik awal evakuasi korban berada pada simpangan jalan yang letaknya paling jauh dari titik akhir tujuan evakuasi (posko). Terdapat beberapa titik akhir tujuan evakuasi (posko) di beberapa desa yang digunakan sebagai lokasi riset. Berdasarkan hasil survei yang dilakukan di beberapa desa yang ada di kecamatan Candipuro dan Pronojiwo diperoleh hasil sebagai berikut.

Tabel 1. Data Hasil Survei

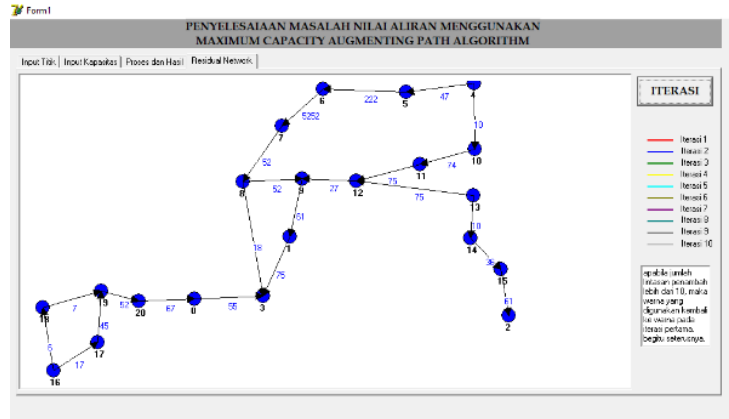
Nama Desa	Jumlah Penduduk	Letak Posko	Kendaraan Evakuasi
Penanggal	6.992 jiwa	Lapangan, Kantor Desa, dan SDN Penanggal 1	Sepeda motor, ambulance, dan mobil
Sumbermujur	7.204 jiwa	SDN 1 Sumbermujur	Truk warga, sepeda motor, dan pikap
Sumberwuluh	11.156 jiwa	Kantor Desa Sumberwuluh, SDN 1 Sumberwuluh, TKD Poncosumo, dan Masjid An-Nur	Ambulance desa, truk warga, pikap, dan sepeda motor
Sumberurip	4.187 jiwa	Masjid Baitul Muhtadin, SDN 2 Sumberurip dan Kantor Desa Sumberurip	Ambulance desa, dan sepeda motor
Oro-Oro Ombo	15.844 jiwa	Kantor desa, SDN 2 Oro-Oro Ombo, SDN 3 Oro-Oro Ombo, dan SMP 2 Pronojiwo	Sepeda motor
Sidomulyo	5.151 jiwa	Kantor Desa Sidomulyo	Sepeda motor
Supiturang	6.062 jiwa	SDN 4 Supiturang dan Masjid Nurul Hadid	Mobil, ambulance desa, dan Sepeda motor

Setelah data dalam pembuatan jalur evakuasi diperoleh, riset dilanjutkan dengan memformulasikan data menjadi kumpulan titik (titik awal dan titik akhir evakuasi) dan garis (jalur penghubung antar titik) dalam bentuk graf berbobot. Data tersebut dianalisis menggunakan *maximum flow* dan *shortest path* menggunakan bantuan program Delphi. Riset mengenai *maximum flow* dilakukan oleh Bhandari & Khadka (2020) menghasilkan pengembangan algoritma *pre-flow-push* yang efisien untuk memecahkan permasalahan perencanaan evakuasi dengan *maximum flow* dan batasan aliran non-konservasi yang memungkinkan untuk mengevakuasi pengungsi secara maksimal ke lokasi tujuan. Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan menggunakan *maximum flow* dapat mengevakuasi pengungsi secara maksimal ke wilayah aman dalam waktu tertentu. Riset mengenai *shortest path* dilakukan oleh Pratiwi *et al.* (2020) menghasilkan jalur terpendek evakuasi tsunami menggunakan algoritma dijkstra untuk penentuan rute terpendek evakuasi tsunami. Riset lain terkait *shortest path* dilakukan oleh Makatutu *et al.* (2022) menghasilkan jalur evakuasi tercepat tsunami tetapi tidak memperhatikan kepadatan jalur. Riset-riset yang telah dilakukan untuk menentukan jalur evakuasi hanya berfokus pada *maximum flow* atau *shortest path* saja. Pada riset ini menggunakan analisis *maximum flow* dan *shortest path* dalam menentukan jalur evakuasi untuk memperoleh jalur evakuasi yang optimal. Berikut merupakan hasil analisis yang diperoleh:



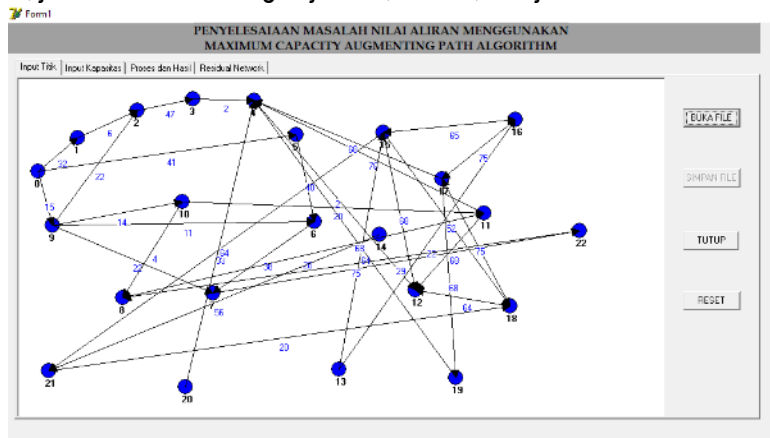
Gambar 3. Graf Desa Sumberurip

Gambar 3 merupakan graf Desa Sumberurip. Pada gambar tersebut terdapat 3 jalur optimal dengan 3 titik awal dan 3 titik akhir (posko). Posko evakuasi terdiri dari titik 0 sebagai Masjid Baitul Muhtadin, titik 1 sebagai SDN 2 Sumberurip, dan titik 2 sebagai Kantor Desa Sumberurip. Jalur evakuasi optimal diantaranya, jalur 10-11-15-0 dengan jarak 2,798 km, jalur 8-7-12-9-1 dengan jarak 2,615 km, dan jalur 3-4-13-14-5-6-2 dengan jarak 2,997 km.



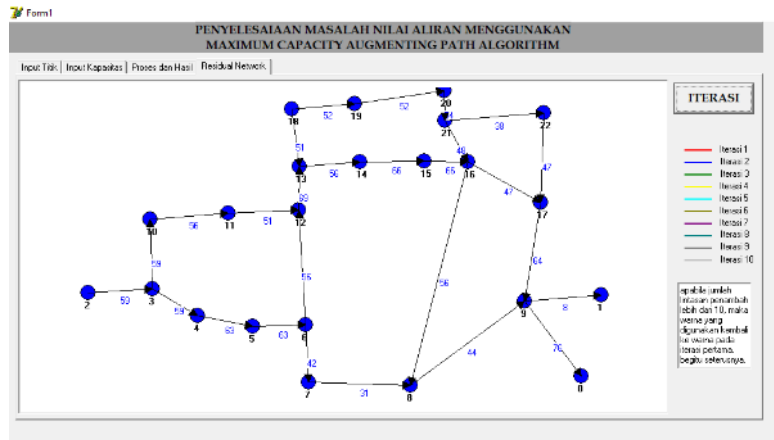
Gambar 4. Graf Desa Oro-Oro Ombo

Gambar 4 merupakan graf Desa Oro-Oro Ombo. Pada gambar tersebut terdapat 5 jalur optimal dengan 3 titik awal dan 4 titik akhir (posko). Posko evakuasi terdiri dari titik 0 sebagai SMP 2 Pronojiwo, titik 1 sebagai Kantor desa, titik 2 sebagai SDN 3 Oro-Oro Ombo, dan titik 3 sebagai SDN 2 Oro-Oro Ombo. Jalur evakuasi optimal diantaranya, jalur 4-5-6-7-8-3 dengan jarak 3,320 km, jalur 4-10-11-12-9-1 dengan jarak 2,293 km, jalur 13-12-9-1 dengan jarak 1,749 km, jalur 13-14-15-2 dengan jarak 1,499 km, dan jalur 16-17-19-20-0 dengan jarak 0,983 km.



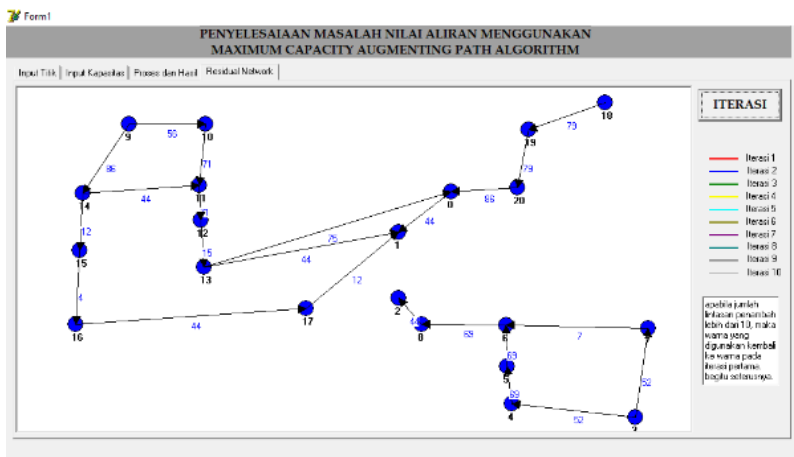
Gambar 5. Graf Desa Sidomulyo

Gambar 5 merupakan graf Desa Sidomulyo. Pada gambar tersebut terdapat 6 jalur optimal dengan 3 titik awal dan 1 titik akhir (posko). Posko evakuasi berada di titik 0 yaitu Kantor Desa Sidomulyo. Jalur evakuasi optimal diantaranya, jalur 0-1-2-3-4-12 dengan jarak 3,817 km, jalur 0-9-10-11-4-12 dengan jarak 3,873 km, jalur 0-5-6-7-22-8-11-4-12 dengan jarak 6,065 km, jalur 14-21-18-12 dengan jarak 2,335 km, jalur 13-15-18-12 dengan jarak 2,096 km, dan jalur 13-16-17-19-12 dengan jarak 2,032 km.



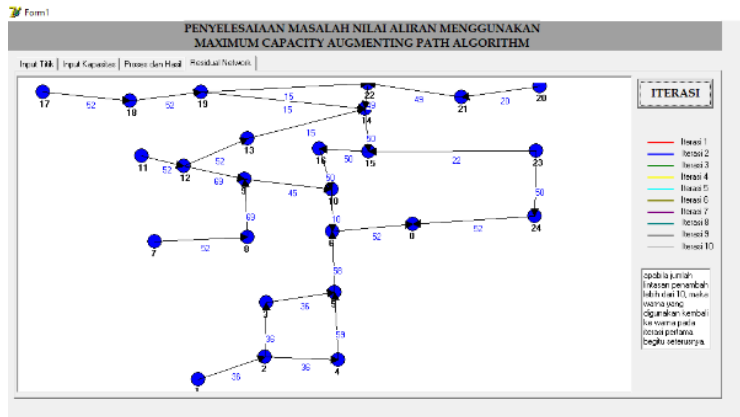
Gambar 6. Graf Desa Supiturang

Gambar 6 merupakan graf Desa Supiturang. Pada gambar tersebut terdapat 3 jalur optimal dengan 2 titik awal dan 2 titik akhir (posko). Posko evakuasi terdiri dari titik 0 sebagai Masjid Nurul Hadid dan titik 1 sebagai SDN 4 Supiturang. Jalur evakuasi optimal diantaranya, jalur 2-3-4-5-6-7-8-9-0 dengan jarak 5,733 km, jalur 2-3-10-11-12-13-14-15-16-17-9-1 dengan jarak 5,065 km, dan jalur 18-19-20-21-22-17-9-1 dengan jarak 3,548 km.



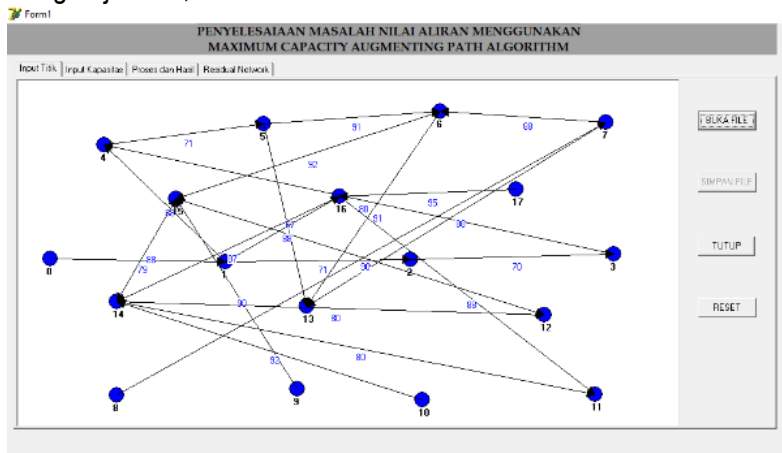
Gambar 7. Graf Desa Penanggal

Gambar 7 merupakan graf Desa Penanggal. Pada gambar tersebut terdapat 5 jalur optimal dengan 3 titik awal dan 3 titik akhir (posko). Posko evakuasi terdiri dari titik 0 sebagai lapangan, Titik 1 sebagai Kantor Desa Penanggal, dan Titik 2 sebagai SDN Penanggal 1. Jalur evakuasi optimal diantaranya, jalur 3-4-5-6-8-2 dengan jarak 3,252 km, jalur 3-7-6-8-2 dengan jarak 3,063 km, jalur 9-10-11-12-13-0 dengan jarak 2,712 km, jalur 9-14-15-16-17-1 dengan jarak 2,243 km, dan jalur 18-19-20-0 dengan jarak 1,852 km.



Gambar 8. Graf Desa Sumbermujur

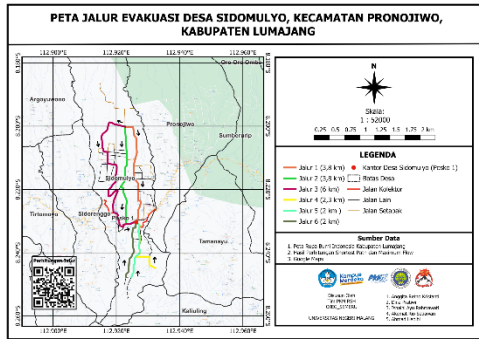
Gambar 8 merupakan graf Desa Sumbermujur. Pada gambar tersebut terdapat 7 jalur optimal dengan 7 titik awal dan 1 titik akhir (posko). Posko evakuasi berada di titik 0 yaitu SDN 1 Sumbermujur. Jalur evakuasi optimal diantaranya, jalur 1-2-3-5-6-0 dengan jarak 3,575 km, jalur 7-8-9-10-6-0 dengan jarak 3,945 km, jalur 11-12-13-14-15-16-10-6-0 dengan jarak 4,311 km, jalur 17-18-19-14-15-16-10-6-0 dengan jarak 4,951 km, jalur 20-21-22-14-15-16-10-6-0 dengan jarak 3,350 km, jalur 23-24-0 dengan jarak 1,275 km, dan jalur 11-12-9-10-6-0 dengan jarak 2,997 km.



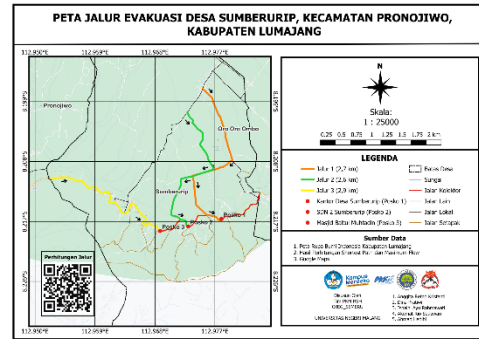
Gambar 9. Graf Desa Sumberwuluh

Gambar 9 merupakan graf Desa Sumberwuluh. Pada gambar tersebut terdapat 6 jalur optimal dengan 7 titik awal dan 4 titik akhir (posko). Posko evakuasi terdiri dari titik 0 sebagai TKD Poncosumo, titik 1 sebagai SDN 1 Sumberwuluh, titik 2 sebagai Masjid An-Nur, dan titik 3 sebagai Kantor Desa Sumberwuluh. Jalur evakuasi optimal diantaranya, jalur 4-5-0 dengan jarak 1,396 km, jalur 7-2 dengan jarak 0,975 km, jalur 19-9-10-2 dengan jarak 2,589 km, jalur 11-12-13-3 dengan jarak 1,514 km, jalur 8-18-14-15-3 dengan jarak 4,659 km, dan jalur 16-17-1 dengan jarak 1,627 km.

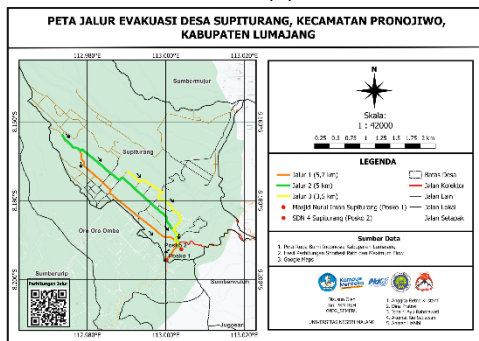
Riset dilanjutkan dengan pembuatan peta jalur evakuasi menggunakan aplikasi ArcGIS. Diperoleh 7 peta jalur evakuasi yang berbeda sesuai dengan kondisi geografis masing-masing desa. Terdapat 4 peta jalur evakuasi di Kecamatan Pronojiwo dan 3 peta jalur evakuasi di Kecamatan Candipuro. Total terdapat 36 jalur evakuasi erupsi Gunung Semeru yang optimal. Berikut merupakan gambar peta hasil jalur evakuasi di Kecamatan Pronojiwo dan Kecamatan Candipuro:



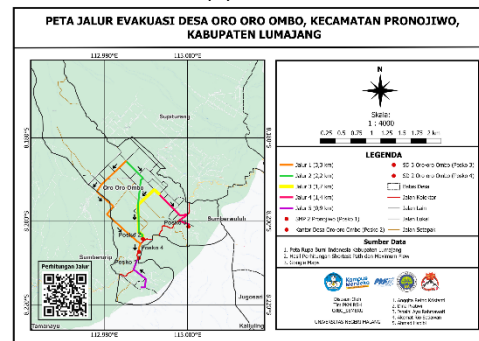
(a)



(b)



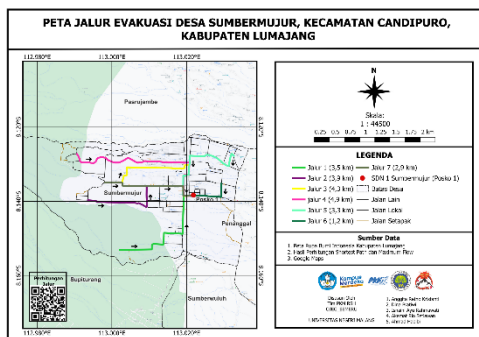
(c)



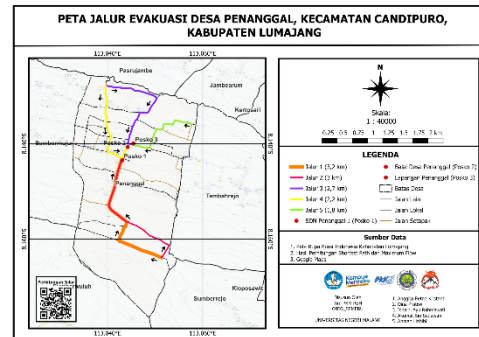
(d)

Gambar 10. Jalur Evakuasi Kecamatan Pronojiwo (a) Desa Sidomulyo (b) Desa Sumberurip (c) Desa Supiturang (d) Desa Oro-Oro Ombo

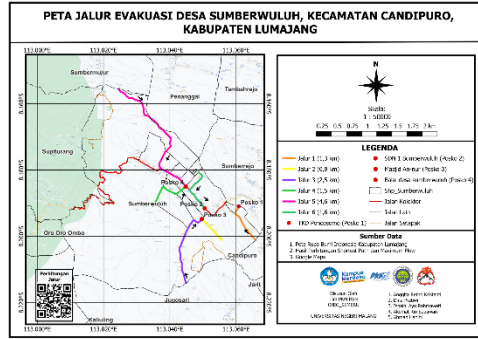
Di Kecamatan Pronojiwo terdapat 17 jalur evakuasi optimal yang terdiri dari 6 jalur optimal di desa Sidomulyo, 3 jalur optimal di desa Sumberurip, 3 jalur optimal di desa Supiturang, dan 5 jalur optimal di desa Oro-Oro Ombo.



(e)



(f)



(g)

Gambar 11. Jalur Evakuasi Kecamatan Candipuro (e) Desa Sumbermujur (f) Desa Penanggal (g) Desa Sumberwuluh

Di Kecamatan Candipuro terdapat 18 jalur evakuasi optimal yang terdiri dari 7 jalur optimal di desa Sumbermujur, 5 jalur optimal di desa Penanggal, dan 6 jalur optimal di desa Sumberwuluh. Setelah diperoleh jalur evakuasi berdasarkan hasil analisis *maximum flow* dan *shortest path* dilakukan validasi data ke pihak desa. Validasi data dilakukan untuk memastikan peta jalur evakuasi yang telah dibuat dapat digunakan dengan aman saat proses evakuasi berlangsung. Berikut merupakan tabel perbandingan jalur evakuasi yang dibuat dengan jalur yang sudah ada:

Tabel 1. Perbandingan Jalur Evakuasi

Aspek Perbandingan	Jalur yang Sudah Ada	Jalur yang Dibuat
Jumlah Jalur	7 jalur	35 jalur
Kepadatan Jalur (rata-rata)	1908 smp/KM	889 smp/KM
Jarak Tempuh (rata-rata)	2,8 Km	3 Km

Jalur yang dibuat menawarkan tambahan sebanyak 28 jalur yang memiliki kepadatan jalur rata-rata lebih rendah daripada jalur yang sudah ada dengan selisih sebesar 1019 smp/Km. Meskipun membutuhkan jarak tempuh rata-rata yang lebih jauh sebesar 0,2 Km tetapi jalur evakuasi yang dibuat dapat ditempuh dengan waktu yang lebih cepat karena tidak terjadi kepadatan pada jalur. Jalur yang dibuat sudah dipastikan memiliki infrastruktur yang baik, dapat dilewati kendaraan roda 2 ataupun roda 4. Selain itu, jalur yang dipilih tidak dekat dengan daerah aliran lahar Gunung Semeru. Jalur evakuasi yang dihasilkan telah tervalidasi oleh pihak desa yaitu pihak Destana. Pihak Destana dapat mensosialisasikan peta kepada warga setempat terkait penggunaan peta tersebut melalui simulasi. Simulasi dapat dilakukan oleh pihak Destana yang bekerja sama dengan pihak lain seperti BPBD sehingga jalur evakuasi yang dibuat dapat diintegrasikan dengan sistem manajemen bencana di Indonesia.

Beberapa tantangan implementasi jalur evakuasi diantaranya, ketidakpastian kondisi alam yang mengakibatkan kerusakan jalan akibat terkena material vulkanik atau jalan tertutup longsor, perubahan aliran lahar, dan faktor cuaca. Oleh karena itu, dalam pembuatan jalur evakuasi telah dipertimbangkan agar jalur-jalur yang rawan terkena longsor dan terkena material vulkanik tidak digunakan saat proses evakuasi. Selain itu, dibuat beberapa alternatif jalur evakuasi di masing-masing desa agar tidak terjadi kemacetan pada jalur.

KESIMPULAN

Hasil riset ini mengerucut pada beberapa kesimpulan berikut ini. (1) Masyarakat tidak memperhatikan terjadinya kepadatan di jalur evakuasi sehingga dapat menghambat proses evakuasi dan dapat meningkatkan jumlah korban jiwa; (2) Wilayah paling terdampak erupsi Gunung Semeru berada di Kecamatan Pronojiwo dan Kecamatan Candipuro, tepatnya di 7 desa dan belum memiliki jalur evakuasi yang optimal; (3) Jalur evakuasi optimal dapat dibuat dengan pendekatan matematika menghasilkan 35 jalur evakuasi yang terdiri dari 17 jalur di Kecamatan Pronojiwo dan 18 jalur di Kecamatan Candipuro; (4) Jalur evakuasi yang dibuat memiliki jarak tempuh rata-rata sebesar 3 Km dan kepadatan jalur rata-rata sebesar 889 smp/Km dimana tidak melebihi kapasitas jalan sehingga tidak menimbulkan kemacetan pada jalur evakuasi; (5) Peta yang dihasilkan telah diberikan dan didemonstrasikan kepada pihak Destana; (6) Diharapkan pemerintah daerah, BPBD, pihak Destana, dan pihak desa setempat dapat berkoordinasi lebih lanjut dalam mensosialisasikan kepada warga terkait penggunaan jalur evakuasi yang sudah di buat; (7) Diharapkan dengan pembuatan peta jalur evakuasi erupsi Gunung Semeru yang optimal dapat mereduksi korban dampak erupsi Gunung Semeru.

REKOMENDASI

Riset ini adalah langkah awal dalam upaya mereduksi korban dampak erupsi Gunung Semeru dengan memformulasikan peta jalur evakuasi tercepat menggunakan *shortest path* dan *maximum flow*. Riset mengenai pencarian jalur evakuasi erupsi Gunung Semeru dapat dikembangkan dengan menambahkan variabel lain seperti aksesibilitas jalan atau faktor cuaca. Riset juga dapat dikembangkan melalui pengintegrasian peta jalur evakuasi dengan teknologi yang sudah berkembang agar peta yang telah dibuat dapat digunakan secara *real time*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada (1) Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi; (2) Universitas Negeri Malang; (3) Dosen pendamping atas dukungan dalam pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, N., Yosmar, S., & Mayasari, Z. M. 2022. Penentuan Jalur Evakuasi Tsunami Bagi Pengendara di Kota Bengkulu Menggunakan Algoritma Dijkstra Fuzzy. *Teorema: Teori dan Riset Matematika*, 7(1), 139. <https://doi.org/10.25157/teorema.v7i1.6786>
- Aji, L. W. 2020. Identifikasi Jalur dan Tempat Evakuasi Tsunami Berdasarkan Fema P646 Pada Objek-Objek Wisata Pantai di Kabupaten Gunungkidul (Studi Kasus: Pantai Nguyahan, Ngobaran dan Ngrenehan). *INERSIA: INformasi dan Ekspose hasil Riset teknik Sipil dan Arsitektur*, 16(1), 24–37. <https://doi.org/10.21831/inersia.v16i1.31313>
- Baeza, D., Ihle, C. F., & Ortiz, J. M. 2017. A comparison between ACO and Dijkstra algorithms for optimal ore concentrate pipeline routing. *Journal of Cleaner Production*, 144, 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.084>
- Bhandari, P. P., & Khadka, S. R. 2020. Maximum Flow Evacuation Planning Problem with Non-Conservation Flow Constraint. *International Annals of Science*, 10(1), 25–32. <https://doi.org/10.21467/ias.10.1.25-32>

- BNPB. 2021. *Korban Meninggal Paska Erupsi Semeru Bertambah Menjadi 51 Jiwa*. BNPB. <https://bnpb.go.id/berita/korban-meninggal-paska-erupsi-semeru-bertambah-menjadi-51-jiwa>
- BPBD. 2021. *Update Situasi Penanganan Bencana Erupsi Gunung Semeru*. <https://bpbd.lumajangkab.go.id/?p=1096>
- Buhaerah, Busrah, Z., & Sanjaya, H. 2022. *Teori Graf dan Aplikasinya: Vol. 23 x 15.5 cm*. LSQ.
- Irawan, J., Nuryani, S., & Pandin, M, R,. Penentuan Jalur Evakuasi Terbaik Bencana Gunung Tangkuban Perahu Menggunakan Algoritma Dijkstra. *CICES(Cyberpreneurship Innovative and Creative Exact and Social Science)*, 9(2), 174-178. <https://doi.org/10.33050/cices.v9i2.2691>
- Indrawan, D., & Jalilah, S. R. 2021. Metode Kombinasi/Campuran Bentuk Integrasi Dalam Penelitian. *Jurnal Studi Guru dan Pembelajaran*, 4(3), 735–739. <https://doi.org/10.30605/jsgp.4.3.2021.1452>
- Kumari, S., & Namasudra, S. 2021. System reliability evaluation using budget constrained real d -MC search. *Computer Communications*, 171, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.02.004>
- Kurnio, H., Fekete, A., Naz, F., Norf, C., & Jüpner, R. 2021. Resilience learning and indigenous knowledge of earthquake risk in Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 62, 102423. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102423>
- Liu, Y. P., & Sidford, A. 2020. Faster energy maximization for faster maximum flow. *Proceedings of the 52nd Annual ACM SIGACT Symposium on Theory of Computing*, 803–814. <https://doi.org/10.1145/3357713.3384247>
- Lujak, M., & Giordani, S. 2018. Centrality measures for evacuation: Finding agile evacuation routes. *Future Generation Computer Systems*, 83, 401–412. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.05.014>
- Makatutu, J. S., Soleman, A., & Rasyid, M. 2022. Usulan Perancangan Jalur Evakuasi Menggunakan Algoritma Dijkstra. *i tabaos*, 2(1), 90–98. <https://doi.org/10.30598/i-tabaos.2022.2.1.90-98>
- Nuriman, N., Agustiniingsih, A., Mahmudi, K., Wardoyo, A. A., Wardani, R. P., & Barif, Z. A. 2022. Edukasi Pendidikan Mitigasi Erupsi Gunung Semeru pada Siswa Sekolah Dasar. *Jurnal Basicedu*, 6(6), 1–9. <https://doi.org/10.31004/basicedu.v6i6.4180>
- Pratiwi, A. F., Riyanto, S. D., Listyaningrum, R., & Aji, G. M. 2020. The Shortest Path Finder for Tsunami Evacuation Strategy using Dijkstra Algorithm. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 854(1), 1–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/854/1/012035>
- Rohman, F. 2017. Implementasi Graph Colouring Pada Pewarnaan Wilayah Kelurahan Di Kota Kediri. *Seminar Nasional Inovasi Teknologi*, 183–188.
- Rumondor, A. G., Sentinuwo, S. R., & Sambul, A. M. 2019. Perancangan Jalur Terpendek Evakuasi Bencana di Kawasan Boulevard Manado Menggunakan Algoritma Dijkstra. *E Jurnal Teknik Informatika*, 14, 261–268.
- Sari, D., & Setyaningsih, W. 2022. Kesiapsiagaan Masyarakat Dalam Menghadapi Bencana Gunung Merapi Pada Masa Pandemi Covid-19 di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang. *Edu Geography*, 10(1), 78–92. <https://doi.org/10.15294/edugeo.v10i1.56438>
- Sudarsono, B., Yuwono, B. D., & Ramadhan, F. 2019. Analisis Sebaran Aliran Lava Untuk Pembuatan Peta Mitigasi Bencana Gunung Slamet. *Elipsoida: Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 2(01), 28–35. <https://doi.org/10.14710/elipsoida.2019.5015>

- Wahid, A. B. 2019. *BNPB:20 Tahun Terakhir, Korban Bencana Indonesia Terbanyak Kedua Dunia*. Detik.com. <https://news.detik.com/berita/d-4647918/bnpb-20-tahun-terakhir-korban-bencana-indonesia-terbanyak-kedua-dunia>
- Yossyafra, Y., Fitri, N., & Sidhi, R. P. 2019. Faktor Waktu Kerja Dan Aktifitas Kawasan Sebagai Parameter Dalam Perhitungan Volume Ruas Jalan Evakuasi Tsunami di Kawasan Perkotaan. *ACE Conference*, 276–283.
- Zhang, Z., Herrera, N., Tuncer, E., Parr, S., Shapouri, M., & Wolshon, B. 2020. Effects of shadow evacuation on megaregion evacuations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102295>