Optimalisasi Jalur Evakuasi Erupsi Merapi Melalui Sistem Satu Arah dan Skema Berbagi Kendaraan

Arie Mukti Prabowo[1], Faizul Chasanah*,[1], Prima J. Romadhona[1], Dwiana Tufail[2]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia
Jalan Kaliurang KM 14,5, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55584, Indonesia
[2]Institute for Transport Studies, University of Leeds, United Kingdom
40 University Road, Woodhouse, LS2 9JT, Leeds, United Kingdom

*E-mail: faizul_chasanah@uii.ac.id

Diterima: 9 Januari 2026, direvisi: 5 Maret 2026, disetujui: 25 Mei 2026,
tersedia daring: 26 Juni 2026, diterbitkan: 30 Juni 2026

Abstrak

Kondisi darurat erupsi dapat menghasilkan permintaan perjalanan yang terkonsentrasi pada jalan evakuasi berkapasitas terbatas, terutama ketika rumah tangga melakukan evakuasi secara mandiri. Penelitian ini mengevaluasi kinerja jaringan jalan evakuasi Gunung Merapi dengan mengintegrasikan permintaan asal–tujuan lokal, data penduduk dan ketersediaan kendaraan, pengoperasian satu arah, serta skema berbagi kendaraan berbasis *mutual assistance*. Jaringan yang menghubungkan Dusun Kalitengah Lor, Kalitengah Kidul, dan Srunen menuju Barak Glagaharjo dimodelkan secara makroskopis menggunakan PTV Visum, sedangkan kapasitas, derajat kejenuhan, dan kecepatan dianalisis mengacu pada Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) 2023. Empat kondisi dibandingkan, yaitu lalu lintas normal, skenario darurat eksisting, pengoperasian satu arah, dan kombinasi satu arah dengan skema berbagi kendaraan. Skenario darurat menghasilkan derajat kejenuhan 0,897 dan kecepatan rata-rata 25 km/jam. Pengoperasian satu arah menurunkan derajat kejenuhan menjadi 0,448 dan meningkatkan kecepatan menjadi 36 km/jam. Strategi gabungan menurunkan volume dari 805 menjadi 704 SMP/jam, derajat kejenuhan menjadi 0,392, dan meningkatkan kecepatan menjadi 38 km/jam. Hasil menunjukkan bahwa sistem satu arah meningkatkan kapasitas efektif, sedangkan skema berbagi kendaraan mengurangi permintaan kendaraan melalui peningkatan okupansi.

Kata kunci: Derajat kejenuhan, erupsi Merapi, evakuasi bencana, skema berbagi kendaraan, PTV Visum.

Abstract

Optimization of Mount Merapi Evacuation Routes Using One-Way and Vehicle-Sharing Scheme: *A volcanic emergency can generate concentrated travel demand on evacuation roads with limited capacity, particularly when households evacuate independently. This study evaluates the performance of the Mount Merapi evacuation road network by integrating local origin–destination demand, population and vehicle-availability data, one-way traffic operation, and a mutual-assistance vehicle-sharing scheme. The road network connecting Kalitengah Lor, Kalitengah Kidul, and Srunen to the Glagaharjo shelter was modelled macroscopically using PTV Visum, while capacity, degree of saturation, and speed were assessed using the Indonesian Highway Capacity Guidelines 2023. Four conditions were compared: normal traffic, the existing emergency scenario, one-way operation, and one-way operation combined with mutual assistance. The emergency scenario produced a degree of saturation of 0.897 and an average speed of 25 km/h. One-way operation reduced the degree of saturation to 0.448 and increased speed to 36 km/h. The combined strategy reduced traffic volume from 805 to 704 passenger-car-units per hour, lowered the degree of saturation to 0.392, and increased speed to 38 km/h. The results indicate that one-way operation improves effective capacity, while mutual assistance complements it by reducing vehicle demand through higher vehicle occupancy.*

Keywords**:** *Degree of saturation, disaster evacuation, Merapi eruption, mutual assistance, PTV Visum.*

1. Pendahuluan

Evakuasi merupakan tindakan utama untuk mengurangi paparan penduduk dengan mengungsi ketika bahaya vulkanik meningkat dan keselamatan tidak lagi dapat dijamin di kawasan rawan bencana untuk mengurangi dampak bencana terhadap kehidupan manusia [1]. Namun, evakuasi harus dilakukan dengan persiapan yang matang agar tidak menimbulkan konsekuensi negatif [2]. Pengalaman erupsi Gunung Merapi, yang merupakan gunung paling aktif di Indonesia, pada tahun 2010 menempati peringkat ketiga dalam hal dampak letusan secara global [3][4]. Salah satu dampaknya yaitu mobilisasi penduduk dalam jumlah besar yang dapat menimbulkan kemacetan, keterlambatan, perubahan tujuan pengungsian, dan persoalan koordinasi antar pelaku. Letusan paroksismal dengan tinggi kolom abu mencapai 17 km dan sebaran material piroklastik hingga 16 km memicu mobilisasi penduduk secara tidak terkontrol [5]. Kondisi ini menegaskan bahwa efektivitas evakuasi tidak hanya ditentukan oleh keberadaan jalur dan barak penampungan, tetapi juga dipengaruhi secara signifikan oleh besarnya permintaan perjalanan,

http://dx.doi.org/10.25104/jptd.v28i1.3043
2579-8731/ 1410-8593 ©2026 Badan Kebijakan Transportasi, diterbitkan oleh Sekretariat Badan Kebijakan Transportasi.
Artikel ini *open access* dibawah lisensi CC BY-NC-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)
Jurnal Penelitian Transportasi Darat telah terakreditasi Sinta 2.

kapasitas jaringan, pengaturan arah lalu lintas, serta kemampuan masyarakat untuk berbagi sumber daya transportasi secara kolektif [6].

Pemodelan transportasi memberi kesempatan untuk menguji berbagai skenario darurat sebelum diterapkan langsung di lapangan. Matriks Asal-Tujuan (MAT) dapat merepresentasikan besarnya pergerakan antarzona secara spasial, sedangkan pembebanan jaringan menunjukkan ruas-ruas kritis yang berpotensi menjadi hambatan utama *(bottleneck)* aliran evakuasi. PTV Visum dapat membangun model transportasi yang memberikan wawasan untuk perencanaan strategis jangka panjang dan penggunaan operasional jangka pendek [7]. Selain itu, PTV Visum telah digunakan dalam analisis jaringan transportasi untuk mengolah jaringan, matriks perjalanan, kapasitas, volume, dan kecepatan serta membandingkan alternatif pengelolaan lalu lintas [8][9][10][11]. Dalam konteks kejadian tidak terduga, evaluasi jaringan juga perlu mempertimbangkan tingkat pelayanan ruas dan perubahan aksesibilitas ketika permintaan meningkat secara mendadak [12].

Kajian evakuasi Merapi sebelumnya telah mengkaji skenario evakuasi simultan dan bertahap melalui model berbasis agen yang menunjukkan bahwa evakuasi bertahap dapat mengurangi kepadatan lalu lintas pada pada periode puncak evakuasi darurat (*evacuation peak period*) [6]. Masih di lokasi yang sama, riset terdahulu juga menemukan bahwa Cangkringan merupakan salah satu wilayah terdampak langsung dari erupsi Gunung Merapi [13]. Di sisi lain, bantuan antarmasyarakat dengan skema berbagi kendaraan *(mutual assistance)* terbukti mampu meningkatkan peluang kelompok rentan mencapai zona aman melalui kolaborasi antara pemilik kendaraan dan penduduk tanpa sarana transportasi [14]. Namun, manfaat gotong royong tersebut belum banyak dikuantifikasi secara makroskopis ke dalam parameter kinerja jaringan jalan seperti derajat kejenuhan maupun waktu tempuh evakuasi.

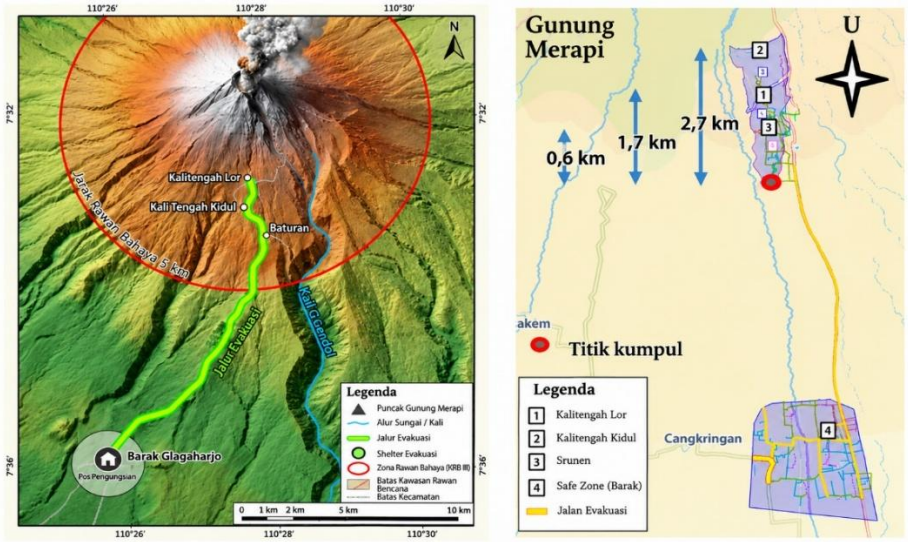
Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengintegrasikan tiga komponen, yaitu permintaan perjalanan berbasis asal-tujuan, peningkatan kapasitas jalan melalui sistem satu arah, dan pengurangan permintaan kendaraan melalui skema berbagi kendaraan. Kontribusi penelitian ini terletak pada formulasi rekayasa lalu lintas yang memisahkan pengaruh kedua strategi, yaitu strategi satu arah bekerja pada sisi optimalisasi kapasitas jalan *(supply-side),* sedangkan skema berbagi kendaraan bekerja pada sisi pengurangan volume kendaraan melalui peningkatan okupansi *(demand-side).* Penelitian bertujuan mengevaluasi perubahan kinerja jalan pada kondisi normal dan darurat, mengukur efektivitas sistem satu arah, serta menilai tambahan manfaat skema berbagi kendaraan terhadap volume, derajat kejenuhan, kecepatan, dan estimasi waktu perjalanan menuju barak.

2. Metodologi

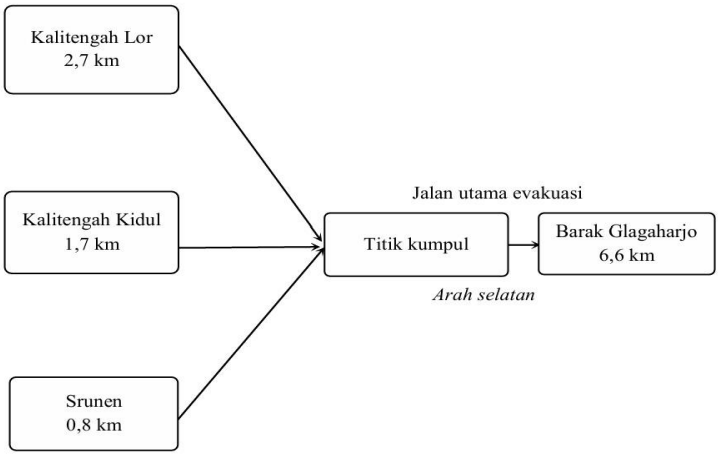
2.1. Metode Pengumpulan Data

Penelitian dilakukan pada Kawasan Rawan Bencana (KRB) III Gunung Merapi di Desa Glagaharjo, Kecamatan Cangkringan, Kabupaten Sleman, Yogyakarta, yang meliputi Dusun Kalitengah Lor, Kalitengah Kidul, dan Srunen. Perjalanan evakuasi dari setiap dusun diarahkan menuju titik kumpul dan selanjutnya menggunakan jalan utama sepanjang 6,6 km menuju Barak Glagaharjo. Jalan yang dianalisis merupakan jalan perdesaan tipe 2/2-TT dengan lebar sekitar 4 m dan lebar bahu sekitar 1 m. Lokasi penelitian dan skema jaringan jalan evakuasi secara kartografis dan skematis disajikan berturut-turut pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Data primer diperoleh melalui pengukuran geometrik jalan di lapangan serta wawancara semi-terstruktur dengan pemangku kepentingan (BPBD Kabupaten Sleman dan Perangkat Desa Glagaharjo) serta masyarakat lokal. Data sekunder meliputi peta jaringan jalan evakuasi dari *OpenStreetMap,* data kependudukan tahun 2025 yang diproyeksikan dari data historis tahun 2019 dengan laju pertumbuhan penduduk Kabupaten Sleman sebesar 1,13% per tahun [15], serta matriks distribusi perjalanan regional dari Dinas Perhubungan DIY [16]. Karakteristik zona asal evakuasi disajikan pada Tabel 1. Berdasarkan perhitungan matriks perjalanan kondisi normal dengan membandingkan data matriks distribusi perjalanan Kabupaten Sleman [16], penelitian ini menggunakan proporsi 73% perjalanan tetap berada di wilayah Cangkringan dan 27% bergerak keluar wilayah. Pada skenario darurat, seluruh perjalanan diasumsikan menuju barak melalui jalur evakuasi.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Desa Glagaharjo (Dusun Kalitengah Lor, Kalitengah Kidul, Srunen).



Gambar 2. Skema jaringan jalan dari zona asal menuju Barak Glagaharjo.

Tabel 1. Karakteristik demografis dan geometrik zona asal evakuasi [15].

Parameter Analisis	Kalitengah Kidul	Kalitengah Lor	Srunen
Jumlah Penduduk 2025 (orang)	366	596	494
Jumlah Penduduk Rentan (orang)	114	192	115
Jarak ke Titik Kumpul (km)	1,7	2,7	0,8
Lebar Efektif Jalur (m) / Tipe	4,0 / 2/2-TT	4,0 / 2/2-TT	4,0 / 2/2-TT

2.2. Pengolahan Data

Pengolahan data spasial dan pembebanan lalu lintas makroskopis dilakukan menggunakan software PTV Visum. Jaringan jalan evakuasi dibangun berdasarkan elemen zona (*zones*), simpul (*nodes*), ruas jalan (*links*), konektor (*connectors*), dan matriks permintaan perjalanan (*demand matrices*). Klasifikasi jenis kendaraan dan volume kepemilikan kendaraan pribadi diproyeksikan hingga tahun 2025 dengan mengacu pada rata-rata pertumbuhan kendaraan Kabupaten Sleman sebesar 7,14% per tahun [17]. Pengonversian kendaraan ke dalam Satuan Mobil Penumpang (SMP) mengacu pada Tabel 3-9 Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) 2023 [18] untuk jalan luar kota tipe 2/2-TT dengan alinemen gunung dan lebar jalur lalu lintas kurang dari 6 m. Untuk menjamin keterbandingan antar-skenario, digunakan satu set EMP tetap berdasarkan rentang arus acuan 900–1.349 kendaraan/jam, yaitu sepeda motor (SM) = 0,70; mobil penumpang (MP) = 1,00; kendaraan sedang (KS) = 2,50; dan bus besar (BB) = 2,50. Dalam perhitungan ini, truk warga diasumsikan termasuk KS dan bus bantuan pemerintah diasumsikan BB. [18]. Berdasarkan rekonstruksi jumlah kendaraan pada Tabel 5 maka untuk kondisi Normal = (260 x 0,70) + (40 x 1,00) + (8 x 2,50) = 242 SMP/jam; Darurat dan Alternatif 1 = (800 x 0,70) + (140 x 1,00) + (40

x 2,50) + (2 x 2,50) = 805 SMP/jam; Alternatif 2 = (720 x 0,70) + (100 x 1,00) + (40 x 2,50) = 704 SMP/jam.

Kondisi darurat dibentuk sebagai skenario evakuasi dini ketika seluruh penduduk bergerak ke arah selatan menuju barak (*safe zone*). Pemodelan dalam penelitian ini merupakan *scenario-based emergency evacuation*, bukan rekonstruksi pergerakan kendaraan dari satu kejadian erupsi aktual. Skema berbagi kendaraan *(mutual assistance)* dimodelkan secara matematis sebagai fungsi redistribusi kapasitas tempat duduk kendaraan antardusun. Penduduk usia produktif yang memiliki kendaraan bermotor (sepeda motor, mobil, atau truk) diwajibkan untuk mengangkut kelompok penduduk rentan (lansia, balita, difabel, dan ibu hamil). Asumsi kapasitas angkut riil kendaraan dalam kondisi darurat ditetapkan sebesar, 2 orang per sepeda motor, 5 orang per mobil penumpang (pendekatan mobil kecil), dan 2 orang per truk (sisa kapasitas truk dipertahankan untuk mengevakuasi hewan ternak warga). Bak belakang truk dialokasikan khusus untuk evakuasi hewan ternak warga (dengan kapasitas rata-rata 4–6 ekor ternak besar per unit). Pemetaan kendaraan pribadi dan kebutuhan penumpang masyarakat rentan dapat dilihat pada Tabel 2. Skema berbagi kendaraan dimodelkan melalui optimalisasi kapasitas angkut kendaraan yang tersedia pada ketiga dusun. Berdasarkan Tabel 2, kapasitas angkut secara keseluruhan lebih besar daripada jumlah penduduk, meskipun terdapat perbedaan kecukupan kapasitas antarwilayah. Oleh karena itu, skenario ini mengasumsikan adanya koordinasi pemanfaatan kendaraan antardusun untuk mendukung proses evakuasi, khususnya bagi kelompok penduduk rentan. Model redistribusi ini menurunkan matriks perjalanan berbasis orang menjadi volume kendaraan yang jauh lebih rendah sebelum dimasukkan ke dalam model jaringan jalan. Skenario operasional dijelaskan pada Tabel 3.

Tabel 2. Pemetaan kendaraan pribadi dan simulasi skema berbagi kendaraan.

No.	Dusun	Populasi Penduduk 2025			Kendaraan Pribadi 2025			
		Masyarakat Muda (orang)	Masyarakat Rentan (orang)	Total Populasi (orang)	Motor	Mobil	Truk	Total Kapasitas Angkut (orang)
1	Kalitengah Kidul	252	114	366	290	53	13	871
2	Kalitengah lor	404	192	596	179	13	21	465
3	Srunen	379	115	494	135	39	11	487
		Total		1456				1823

Catatan: Kapasitas angkut = (jumlah motor x 2 orang) + (jumlah mobil x 5) + (jumlah truk x 2)

Tabel 3. Desain skenario pemodelan jalur evakuasi.

Skenario Operasional	Sistem Aliran	Deskripsi Permintaan dan Sarana Transportasi
Normal (Harian)	Dua Arah	Distribusi perjalanan normal harian (73% perjalanan lokal Cangkringan melintasi rute evakuasi, 27% bergerak keluar tidak melintasi rute evakuasi)
Darurat Eksisting	Dua Arah	100% penduduk evakuasi secara mandiri ke arah selatan menuju barak; ditambah bantuan bus pemerintah
Alternatif 1 (satu arah)	Satu Arah	Permintaan sama dengan darurat eksisting
Alternatif 2 (satu arah dan skema berbagi kendaraan)	Satu Arah	Sistem satu arah dikombinasikan dengan skema berbagi kendaraan untuk optimalisasi okupansi

2.3. Analisis Data

Analisis kinerja geometrik dan kapasitas jalan evakuasi dilakukan dengan formulasi matematis berbasis Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) 2023 [18]. Persamaan (1) digunakan untuk menghitung nilai kapasitas efektif jalan (C, dalam SMP/jam).

$$C = C_0 \times FC_L \times FC_{PA} \times FC_{HS} \quad (1)$$

di mana C_0 adalah kapasitas dasar jalan (3.700 SMP/jam untuk jalan tipe 2/2-TT di wilayah pegunungan), FC_L adalah faktor koreksi lebar lajur (0,58 untuk lebar jalan 4 m hasil interpolasi), FC_{PA} adalah faktor koreksi pemisahan arah lalu lintas (0,88 untuk pemisahan 70%-30% pada kondisi normal), serta FC_{HS} adalah faktor koreksi kapasitas akibat hambatan samping dan lebar bahu (0,95 berdasarkan

hambatan samping rendah dengan lebar bahu efektif 1 meter). Pada kondisi normal dan darurat bencana, kendaraan akan menuju arah selatan barak pengungsian dengan tetap mempertahankan sistem lalu lintas 2 arah sehingga kapasitasnya terhitung per arah. Sedangkan skenario alternatif 1 dan 2, seluruh lebar efektif jalan difungsikan sepenuhnya untuk arus evakuasi ke arah selatan sehingga kapasitas total 2 arah.

Derajat kejenuhan (Dj) dihitung sebagai rasio volume lalu lintas (q) terhadap kapasitas efektif (C), yakni Dj = q/C. Kecepatan tempuh rata-rata mobil penumpang (V_{MP}, km/jam) dihitung dari hubungan non-linear antara kecepatan arus bebas (V_0) dengan derajat kejenuhan (Dj) menggunakan kurva karakteristik PKJI 2023 untuk jalan 2/2-TT pegunungan. Persamaan (2) digunakan untuk menentukan nilai kecepatan arus bebas aktual (VB_{MP}).

$$VB_{MP} = (VBD_{MP} + VBL_{MP}) \times FVB_{HS} \times FVB_{KJF} \quad (2)$$

di mana VBD_{MP} adalah kecepatan arus bebas dasar mobil penumpang (55 km/jam untuk jalan pegunungan), VBL_{MP} adalah faktor koreksi lebar jalan (-7 km/jam untuk Lebar Jalan Efektif 4 meter), FVB_{HS} adalah faktor koreksi hambatan samping (0,97), dan FVB_{KFJ} adalah faktor koreksi kelas fungsi jalan (0,88 untuk jalan lokal perdesaan). Berdasarkan parameter input tersebut, diperoleh kecepatan arus bebas lapangan sebesar 40,97 km/jam.

Estimasi sederhana waktu perjalanan menuju barak (T, menit) dihitung berdasarkan panjang jalan utama (L = 6,6 km). Persamaan (3) digunakan untuk menghitung kecepatan rata-rata kendaraan.

$$T = 60 \times \frac{L}{V_{MP}} \quad (3)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Validasi dan Indikator Kerja

Validasi keandalan model makroskopis dilakukan menggunakan statistik *Geoffrey E. Havers* (GEH) dengan membandingkan volume lalu lintas hasil simulasi ($q_{simulated}$) dan observasi survei lapangan ($q_{observed}$). Data observasi skenario darurat dan sistem satu arah dengan berbagi kendaraan diasumsikan bahwa 100% kendaraan bergerak ke arah Selatan menuju barak pengungsian (*one-way*). Penelitian sebelumnya [14] telah mengkonfirmasi melalui survey dan *Forum Group Discussion (FGD)* kepada warga lokal dan perangkat desa terkait rencana evakuasi erupsi Merapi. Warga menyatakan akan mematuhi instruksi pemerintah untuk segera evakuasi sesuai scenario yang tertuang dalam dokumen kontijensi mitigasi erupsi Merapi. Model dinyatakan valid dan dapat diterima secara ilmiah jika nilai GEH dari seluruh titik pengamatan bernilai kurang dari 5,0 [19].

Hasil kalkulasi GEH pada jalan utama evakuasi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kalkulasi GEH pada jalan utama evakuasi.

Skenario Operasional	GEH
Normal Arah Utara	2,141
Normal Arah Selatan	1,198
Darurat Arah Selatan	0,638
Satu Arah *(one-way)*	0,638
Kombinasi satu arah dan skema berbagi kendaraan	0,638

Hasil perhitungan GEH pada Tabel 4 menunjukkan nilai yang berada di bawah ambang batas 5,0. Namun, karena skenario darurat dan alternatif penanganan merupakan kondisi hipotetis yang dikembangkan berdasarkan asumsi evakuasi, hasil tersebut perlu diinterpretasikan secara terbatas. Nilai GEH yang disajikan belum dapat digunakan sebagai bukti validasi empiris masing-masing skenario tanpa ketersediaan data observasi yang sesuai. Oleh karena itu, hasil pemodelan digunakan terutama untuk membandingkan kinerja relatif antaralternatif penanganan berdasarkan asumsi yang ditetapkan.

3.2. Kinerja Kondisi Normal dan Darurat

Pada kondisi lalu lintas normal, volume lalu lintas pada jalan utama evakuasi arah selatan hanya berkisar 242 SMP/jam dengan kapasitas efektif sebesar 897,5 SMP/jam per arah. Nilai derajat kejenuhan (Dj) yang diperoleh adalah sebesar 0,270, yang menunjukkan tingkat pelayanan jalan yang sangat stabil (tingkat pelayanan B) dengan kecepatan kendaraan mobil penumpang rata-rata mencapai 42 km/jam. Tabulasi rinci jumlah kendaraan dan komposisi lalu lintas untuk seluruh skenario disajikan pada Tabel 5.

Ketika kondisi darurat letusan Gunung Merapi diaktifkan, terjadi penumpukan lalu lintas secara masif akibat seluruh penduduk bergerak secara mandiri menjauhi puncak Merapi (100% pergerakan menuju arah selatan). Volume lalu lintas jalan utama evakuasi melonjak tajam mencapai 805 SMP/jam. Akibat kapasitas jalan dua arah yang terbatas (kapasitas arah selatan tetap 897,5 SMP/jam), derajat kejenuhan jalan utama meroket hingga 0,897 (melampaui batas kejenuhan aman 0,85). Kondisi ini menyebabkan kemacetan parah di sepanjang jalur evakuasi, dengan kecepatan rata-rata kendaraan mobil penumpang turun drastis hingga 25 km/jam, dan meningkatkan risiko kegagalan sistem evakuasi.

Tabel 5. Tabulasi jumlah kendaraan dan komposisi lalu lintas tiap skenario (dalam Unit/jam dan SMP/jam).

Skenario Operasional	Sepeda Motor (Unit)	Mobil Penumpang (Unit)	Truk (Unit)	Bus Bantuan (Unit)	Total Volume (SMP/jam)
Normal (Harian)	260	40	8	0	242
Darurat Eksisting	800	140	40	2	805
Alternatif 1 (satu arah)	800	140	40	2	805
Alternatif 2 (satu arah dan skema berbagi kendaraan)	720	100	40	0	704

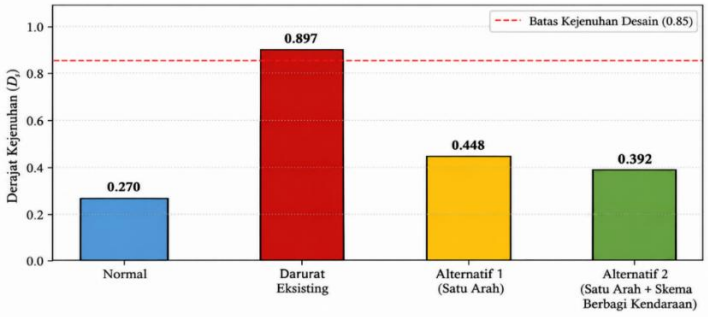
3.3. Efektivitas Operasi Satu Arah *(One-Way)*

Pada skenario alternatif 1, seluruh lebar efektif jalan evakuasi sebesar 4 meter dialokasikan untuk pergerakan kendaraan menuju arah selatan. Berdasarkan parameter kapasitas yang digunakan dalam pemodelan, kapasitas operasional skenario satu arah dinyatakan sebesar 1.795 SMP/jam, dibandingkan dengan kapasitas per arah sebesar 897,5 SMP/jam pada kondisi sebelumnya. Dengan volume lalu lintas yang tetap sebesar 805 SMP/jam, derajat kejenuhan yang dihasilkan dalam skenario ini adalah 0,448, dengan kecepatan rata-rata 36 km/jam. Hasil tersebut menunjukkan potensi peningkatan kinerja lalu lintas melalui pengaturan satu arah berdasarkan asumsi kapasitas yang diterapkan dalam model.

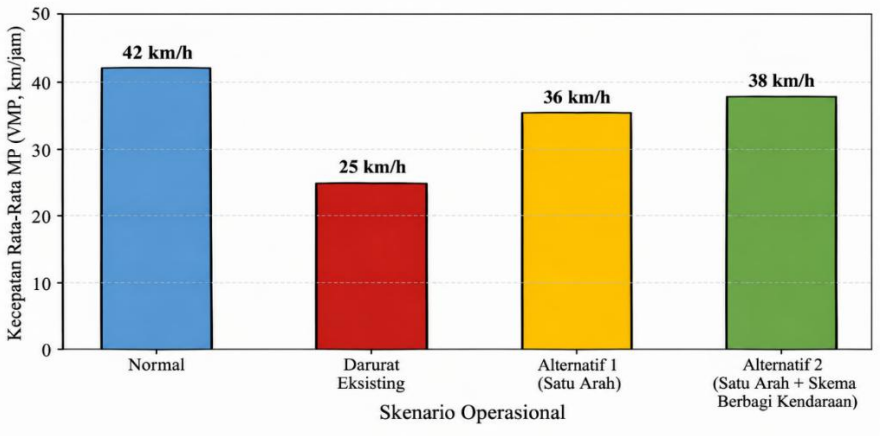
3.4. Kontribusi Skema Berbagi Kendaraan *(Mutual Assistance)*

Pada skenario alternatif 2, sistem pengoperasian satu arah dikombinasikan dengan integrasi sosial berupa skema berbagi kendaraan *(mutual assistance)*. Berdasarkan analisis redistribusi kendaraan, pemanfaatan tempat duduk yang optimal dari kendaraan pribadi masyarakat mampu memobilisasi seluruh penduduk rentan tanpa memerlukan armada bus bantuan tambahan dari pemerintah. Skema ini berhasil mereduksi volume kendaraan yang memasuki jalan utama sebesar 12,5%, dari 805 menjadi 704 SMP/jam. Penurunan volume ini berimplikasi langsung pada penurunan derajat kejenuhan (Dj) jalan utama menjadi 0,392 (penurunan total 56,3% dari kondisi darurat eksisting) dan meningkatkan kecepatan rata-rata kendaraan mobil penumpang menjadi 38 km/jam.

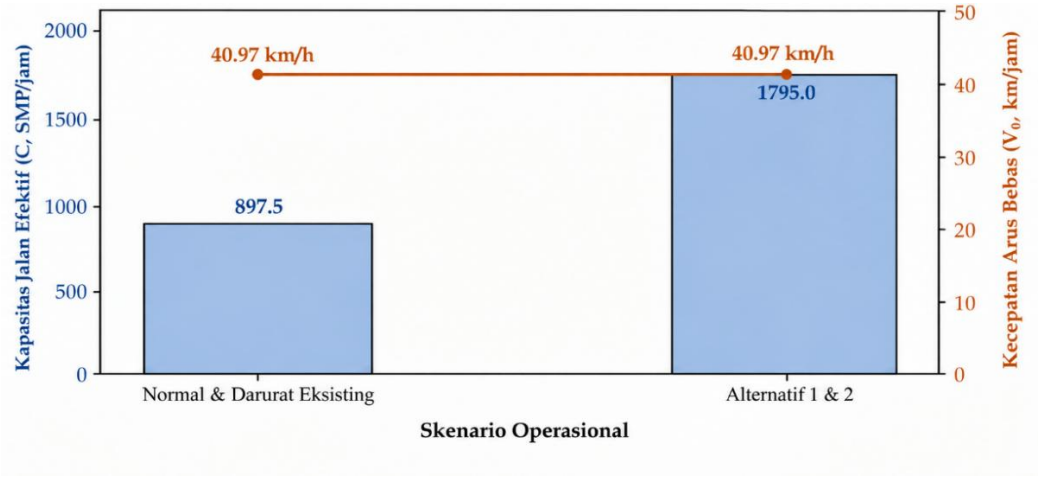
Grafik perbandingan analitis mengenai derajat kejenuhan (Dj), kecepatan rata-rata kendaraan (V_{MP}), serta perbandingan kapasitas efektif dan kecepatan arus bebas untuk keempat skenario operasional yang diuji disajikan secara beruntun pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.



Gambar 3. Derajat kejenuhan pada empat skenario operasional jalan utama evakuasi.



Gambar 4. Kecepatan rata-rata MP pada empat skenario operasional.



Gambar 5. Grafik kurva karakteristik kapasitas jalan efektif (C) dan kecepatan arus bebas dasar (V_0)

Analisis terperinci mengenai kinerja operasional masing-masing rute jalan dari dusun asal menuju titik kumpul serta jalan utama evakuasi untuk seluruh skenario disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi Derajat Kejenuhan (Dj) ruas jalan jaringan evakuasi.

Segmen Ruas Jalan	Kondisi Normal	Darurat Eksisting	Alternatif 1 (Satu Arah)	Alternatif 2 (Satu Arah + Skema Berbagi Kendaraan)
Jaringan Penghubung Kalitengah Kidul	0,305	0,242	0,121	0,121
Jaringan Penghubung Kalitengah Lor	0,175	0,370	0,185	0,185
Jaringan Penghubung Srunen	0,206	0,248	0,124	0,124
Jalan Utama Evakuasi (Arah Selatan)	0,270	0,897	0,448	0,392
Kondisi Aliran Arus Lalu Lintas	Lancar dan stabil	Jenuh dan macet	Sangat lancar	Sangat stabil dan aman

Lebih jauh lagi, estimasi waktu perjalanan sederhana (T) pada segmen utama sepanjang 6,6 km menunjukkan efisiensi waktu tempuh yang krusial bagi keselamatan pengungsi. Data kecepatan dan estimasi waktu tempuh dirangkum dalam Tabel 7. Hasil estimasi Tabel 7 menunjukkan bahwa reduksi waktu tempuh di jalan utama evakuasi dapat dipangkas sebesar 4,8 menit pada Alternatif 1 dan 5,4 menit pada Alternatif 2 dibandingkan dengan skenario darurat eksisting. Dalam situasi kritis kebencanaan, setiap detik pengurangan waktu tempuh sangat berharga untuk meminimalkan risiko jatuhnya korban jiwa.

Tabel 7. Perbandingan kecepatan dan estimasi waktu tempuh evakuasi.

Skenario Operasional	Kecepatan, V_{MP} (km/jam)	Waktu Tempuh, T (menit)	Reduksi Waktu Tempuh (%)
Normal (Acuan)	42	9,4	Acuan
Darurat Eksisting	25	15,8	Acuan Darurat
Alternatif 1 (satu arah)	36	11,0	Turun 30,6%
Alternatif 2 (satu arah dan skema berbagi kendaraan)	38	10,4	Turun 34,2%

Penerapan praktis dari skema gotong royong ini memerlukan koordinasi pra-bencana yang matang pada tingkat lokal. Pemerintah Desa Glagaharjo bersama BPBD Sleman perlu melakukan inventarisasi dan pemutakhiran data kepemilikan kendaraan secara berkala, menetapkan pasangan bantuan evakuasi pada level RT/dusun untuk menghindari kemacetan dan perjalanan kosong, serta melakukan latihan (simulasi evakuasi mandiri) secara rutin agar masyarakat memahami peran masing-masing ketika status kebencanaan meningkat menjadi Siaga (Level III) [20].

4. Kesimpulan

Peningkatan volume lalu lintas pada kondisi darurat evakuasi mandiri (805 SMP/jam) menyebabkan segmen utama jalan evakuasi Desa Glagaharjo berada dalam kondisi kritis yang sangat jenuh, ditandai dengan derajat kejenuhan (Dj) sebesar 0,897 (melebihi batas aman 0,85) dan penurunan kecepatan kendaraan hingga 25 km/jam. Berdasarkan skenario pemodelan, penerapan manajemen lalu lintas satu arah (one-way) menunjukkan potensi peningkatan kapasitas operasional jalan dari 897,5 menjadi 1.795 SMP/jam sesuai dengan asumsi kapasitas yang digunakan dalam penelitian. Meskipun volume tetap tinggi, derajat kejenuhan jalan utama berhasil dipangkas sebesar 50,1% menjadi 0,448, dan kecepatan rata-rata meningkat menjadi 36 km/jam. Integrasi skema berbagi kendaraan *(mutual assistance)* memberikan manfaat tambahan berupa efisiensi *demand-side*, mereduksi volume kendaraan di jalan utama menjadi 704 SMP/jam, memotong derajat kejenuhan hingga mencapai tingkat sangat stabil (0,392), dan memangkas estimasi waktu perjalanan di jalan utama sebesar 34,2% (menjadi 10,4 menit). Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya [14] yang menyatakan bahwa mutual assistance strategi dalam simulasi proses evakuasi erupsi memberikan implikasi performa yang efektif dan terbaik. Penelitian ini berhasil menguantifikasi dan memisahkan secara jelas efektivitas rekayasa pasokan jalan *(supply-side/one-way)* dan penekanan permintaan kendaraan *(demand-side/vehicle sharing)* dalam pemodelan makroskopis terpadu. Riset ini dapat memberikan kontribusi teoritis dan praktis berupa kerangka pemodelan evakuasi bencana vulkanik berbasis partisipasi dan modal sosial masyarakat lokal yang dapat direplikasi di kawasan rawan bencana gunungapi lainnya.

Temuan penelitian ini merupakan hasil evaluasi berbasis skenario pemodelan makroskopis dengan menggunakan parameter dan asumsi yang telah ditetapkan. Oleh karena itu, hasil perbandingan antaralternatif menggambarkan potensi perbaikan kinerja jaringan jalan dalam kondisi yang dimodelkan dan belum sepenuhnya merepresentasikan dinamika evakuasi aktual, seperti variasi waktu keberangkatan, perilaku pengemudi, dan kendala operasional redistribusi kendaraan.

Berdasarkan kesimpulan tersebut, penerapan Skenario Alternatif 2, yaitu sistem satu arah yang terintegrasi dengan skema berbagi kendaraan, perlu didukung oleh langkah-langkah implementatif dan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan efektivitas sistem evakuasi. Dalam hal ini, Kementerian Perhubungan dan BPBD Kabupaten Sleman direkomendasikan untuk mempertimbangkan integrasi skenario tersebut ke dalam pembaruan Dokumen Rencana Kontingensi Bencana Erupsi Gunung Merapi. Selain itu, Pemerintah Desa Glagaharjo disarankan melakukan pemutakhiran data kepemilikan kendaraan warga secara berkala dan menyusun pasangan bantuan evakuasi pada tingkat RT/RW sebelum terjadi bencana. Penelitian lanjutan juga diharapkan dapat memodelkan evakuasi ternak secara terpisah serta mengintegrasikan variasi waktu keberangkatan pengungsian *(evacuation clearance time)* menggunakan pemodelan mikroskopis untuk memperoleh gambaran dinamika lalu lintas yang lebih presisi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia atas dukungan fasilitas akademik selama penelitian ini berlangsung. Penulis juga menyampaikan apresiasi yang tinggi kepada Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Sleman dan jajaran Pemerintah Desa Glagaharjo yang telah memberikan izin, membagikan dokumen kontingensi, serta memfasilitasi survei dan wawancara di lapangan.

Deklarasi

Kontribusi Penulis

Arie Mukti Prabowo: Pengumpulan Data, Pemodelan dan Analisis, serta Laporan, **Faizul Chasanah**: Supervisi, Validasi, Penulisan Artikel, dan Pendanaan. **Prima J. Romadhona**: Penulisan Artikel. **Dwiana Tufail:** Penulisan Artikel. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir artikel.

Pernyatan Pendanaan

Penelitian ini tidak menerima pendanaan khusus dari lembaga pendanaan di sektor publik, komersial, maupun nirlaba.

Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang diketahui yang dapat dianggap memengaruhi penelitian yang dilaporkan dalam artikel ini.

Penggunaan Kecerdasan Artifisial atau Teknologi Berbantuan Kecerdasan Artifisial

Dalam proses penyusunan karya ini, penulis menggunakan AI untuk memperjalas lokasi penelitian pada Gambar 1. Setelah menggunakan alat/layanan tersebut, penulis meninjau dan menyunting kembali konten yang dihasilkan sesuai kebutuhan serta bertanggung jawab penuh atas seluruh isi publikasi ini.

Daftar Pustaka

[1] J.-B. Sheu, “Mass evacuation planning for disasters management: A household evacuation route choice behavior analysis,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 186, 2024, doi: 10.1016/j.tre.2024.103544.
[2] D. S. Adi W, K. Kusumastuti, and I. Andini, “Kelayakan sistem evakuasi kawasan rawan bencana letusan Gunung Merapi di Kabupaten Sleman,” *Arsitektura J. Ilm. Arsit. dan Lingkung. Binaan*, vol. 14, no. 1, 2016, doi: 10.20961/arst.v14i1.9206.
[3] D. Guha-Sapir, F. Vos, R. Below, and S. Ponserre, “Annual Disaster Statistical Review 2011: The Numbers and Trends,” Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Brussels, Belgium, 2012. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/2078.1/132628
[4] M. Refiyanni and C. S. Silvia, “Analisis nilai kondisi jalan dan kemantapan jalan sebagai jalur evakuasi,” *J. Tek. Sipil dan Teknol. Konstr.*, vol. 6, no. 2, pp. 41–51, 2020, doi: 10.35308/jts-utu.v6i2.2746.
[5] Surono *et al.*, “The 2010 explosive eruption of Java’s Merapi volcano—A ‘100-year’ event,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 241–242, pp. 121–135, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.06.018.
[6] J. Jumadi, S. J. Carver, and D. J. Quincey, “An agent-based evaluation of varying evacuation scenarios in Merapi: Simultaneous and staged,” *Geosciences*, vol. 9, no. 7, 2019, doi: 10.3390/geosciences9070317.
[7] P. T. V Group, “PTV Visum: Macroscopic transportation planning software,” Oct. 19, 2026, *PTV Group*. [Online]. Available: https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-visum
[8] P. Heyken Soares, L. Ahmed, Y. Mao, and C. L. Mumford, “Public transport network optimisation in PTV Visum using selection hyper-heuristics,” *Public Transp.*, vol. 13, no. 1, pp. 163–196, 2021, doi: 10.1007/s12469-020-00249-7.
[9] G. A. U. Yunus, H. Herman, and A. Maulana, “Pemodelan transportasi pada Jalan Trans Bangka menggunakan aplikasi PTV Visum,” *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 4, no. 3, pp. 83–94, 2018, doi: 10.26760/rekaracana.v4i3.83.
[10] P. J. Romadhona and S. Artistika, “Pengaruh penutupan perlintasan sebidang kereta api di jalan h.o.s. Cokroaminoto, yogyakarta,” *J. Rekayasa Sipil*, vol. 16, no. 2, p. 119, Jul. 2020, doi: 10.25077/jrs.16.2.119-131.2020.
[11] M. Shatanawi, A. Alatawneh, and F. Mészáros, “Implications of static and dynamic road pricing strategies in the era of autonomous and shared autonomous vehicles using simulation-based dynamic traffic assignment: The case of Budapest,” *Res. Transp. Econ.*, vol. 95, 2022, doi: 10.1016/j.retrec.2022.101231.
[12] M. R. F. Amrozi and R. P. Isheka, “Optimizing the functional performance of road network using vulnerability assessment to cope with unforeseen road incidents,” *J. Civ. Eng. Forum*, vol. 8, no. 1, pp. 67–80, 2022, doi: 10.22146/jcef.3598.
[13] A. M. Tanjung, “Efektivitas dan risiko bencana pada jalur evakuasi di kawasan rawan bencana Gunung Merapi,” Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia, 2020.
[14] F. Chasanah and H. Sakakibara, “Implication of mutual assistance evacuation model to reduce the volcanic risk for vulnerable society: Insight from Mount Merapi, Indonesia,” *Sustainability*, vol. 14, no. 13, 2022, doi: 10.3390/su14138110.
[15] B. P. S. K. Sleman, “Jumlah penduduk dan laju pertumbuhan penduduk menurut kecamatan di Kabupaten Sleman,” Badan Pusat Statistik Kabupaten Sleman, Sleman, Indonesia, 2022.
[16] D. P. P. D. I. Yogyakarta, “Matriks asal tujuan distribusi perjalanan Kabupaten Sleman,” Dinas Perhubungan Daerah Istimewa Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia, 2019.
[17] K. N. R. I. D. Yogyakarta, “Jumlah kendaraan bermotor menurut kabupaten/kota dan jenis kendaraan di Sleman,” Kepolisian Daerah Istimewa Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia, 2024.
[18] D. J. B. Marga, “Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia,” Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, Indonesia, 2023.

[Online]. Available: https://binamarga.pu.go.id/index.php/nspk/detail/09pbm2023-pedoman-kapasitas-jalan-indonesia-
[19] G. E. Havers, “Road traffic validation and statistical indicators of model fit,” *Traffic Eng. Control*, vol. 12, pp. 142–151, 1970.
[20] B. N. P. Bencana, “Rencana Kontinjensi Erupsi Merapi,” Badan Nasional Penanggulangan Bencana, Jakarta, Indonesia, 2024.