

Pemodelan Rute Evakuasi Saat Bencana Erupsi Gunung Dempo Kota Pagar Alam

Nurdila Ivana¹, Hardiansyah², Lindung Zalbuin Mase³, Rena Misliniyati⁴, Khairul Amri⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Bengkulu
Jl. WR. Supratman, Kandang Limun, Muara Bangkahulu, Bengkulu, 38371, Indonesia
G1b021011.nurdila@mhs.unib.ac.id

Abstrak

Gunung dempo yang terletak di Kota Pagar Alam memiliki potensi erupsi yang dapat membahayakan masyarakat di sekitarnya, sehingga dibutuhkan perencanaan jalur evakuasi yang efektif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja jaringan jalan dalam mendukung proses evakuasi bencana erupsi Gunung Dempo. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan *four-steps model* berdasarkan data geometri jalan, survei arus lalu lintas pada jam puncak, kuesioner dari masyarakat dan pengunjung pariwisata, serta pemodelan eksisting dan simulasi beberapa skenario saat evakuasi. Dari pemodelan eksisting akan dilanjutkan dengan beberapa skenario yaitu Skenario 1 saat evakuasi tanpa perubahan geometri jalan, Skenario 2 dengan pelebaran jalan, dan Skenario 3 yang dikembangkan dari Skenario 2 dengan mempertimbangkan penambahan jalan baru sebagai alternatif. Hasil kuesioner menunjukkan bahwa mayoritas masyarakat memilih menggunakan sepeda motor dibandingkan mobil sebagai alat transportasi saat evakuasi, yang mengindikasikan penggunaannya yang cepat dan fleksibel. Hasil analisis menggambarkan bahwa penyebaran arus lalu lintas pada pemodelan eksisting sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Penelitian ini menunjukkan bahwa hasil Skenario 1 dengan kondisi eksisting sekarang yang menggunakan volume evakuasi memperlihatkan bahwa pelayanan jalan sudah tidak memadai. Oleh karena itu, pada Skenario 2 dan Skenario 3 mempertimbangkan adanya pelebaran jalan dan penambahan jalur aman baru dalam mendukung proses evakuasi. Dari hasil analisis terlihat bahwa adanya pelebaran jalan dan penambahan jalan baru relatif lebih mampu mengakomodir peningkatan volume arus lalu lintas saat evakuasi.

Kata kunci: Erupsi, Evakuasi, Kinerja Jaringan Jalan, Pemodelan, Model Empat Langkah

Abstract

Mount Dempo, located in Pagar Alam City, has the potential to erupt, which could endanger the surrounding community, so effective evacuation route planning is needed. This study aims to analyze the performance of the road network in supporting the evacuation process in the event of an eruption of Mount Dempo. The analysis used a four-step model based on road geometry data, peak hour traffic flow surveys, questionnaires from the community and tourists, and existing modeling and simulation of several evacuation scenarios. Several scenarios will follow the existing modeling: Scenario 1 during evacuation without changes to road geometry, Scenario 2 with road widening, and Scenario 3 developed from Scenario 2 by considering the addition of a new road as an alternative. The results of the questionnaire show that most people choose to use motorcycles rather than cars as a means of transportation during evacuation, indicating their speed and flexibility. The analysis results illustrate that traffic flow distribution in the existing model corresponds to the actual conditions in the field. This study shows that the results of Scenario 1, which uses the current conditions and evacuation volume, indicate that road services are inadequate. Therefore, Scenarios 2 and 3 consider road widening and adding new safe lanes to support the evacuation process. The analysis shows that road widening and the addition of new roads are relatively more capable of accommodating the increase in traffic volume during evacuation.

Keywords: Eruption, Evacuation, Road Network Performance, Modeling, Four-Steps Model

I. PENDAHULUAN

Indonesia terletak diantara Benua Australia dan Benua Asia, serta dihimpit oleh Samudera Hindia dan Samudera Pasifik [1]. Sebagai negara kepulauan

membuat Indonesia memiliki tingkat kerawanan bencana yang tinggi, salah satunya adalah bencana erupsi gunung [2]. Indonesia juga merupakan negara yang terletak di pertemuan antara tiga lempeng tektonik yang membuat Indonesia

memiliki banyak gunung berapi yang masih aktif [3]. Terdapat 127 gunung api aktif yang berada di Indonesia selama 24 jam setiap harinya yang dipantau oleh Badan Geologi melalui Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) [4].

Salah satu gunung api aktif yang ada di Indonesia adalah Gunung Dempo. Secara geografis, Gunung Dempo berada pada koordinat $4,03^{\circ}$ LS, $103,13^{\circ}$ BT dan secara administratif terletak di Kabupaten Lahat, Empat Lawang, Kota Pagar Alam, Sumatera Selatan. Gunung Dempo memiliki sejarah erupsi yang tercatat sejak tahun 1818 dan memiliki interval erupsi sekitar 1 sampai 32 tahun. Berdasarkan hasil pengamatan secara langsung dan instrumental, dinyatakan bahwa kondisi vulkanik Gunung Dempo berada pada tingkat II yang artinya waspada [5]. Gunung Dempo merupakan salah satu gunung api aktif yang belakangan ini menunjukkan aktivitas vulkanik. Gunung ini memiliki ketinggian sebesar 3.173 meter dari permukaan laut. Gunung Dempo juga termasuk dalam bagian salah satu dari 40 gunung yang membentuk Pegunungan Bukit Barisan yang ada di Pulau Sumatera [6].

Studi sebelumnya telah dilakukan dengan menggunakan metode *network analysis* dalam Sistem Informasi Geografis (SIG). Studi tersebut bertujuan untuk menganalisis rute evakuasi terbaik di Kota Pagar Alam. Pemodelan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *find best facility* dan *find closest facility*. Pemodelan tersebut mampu menganalisis rute tercepat dan terjangkau berdasarkan ketersediaan jaringan jalan serta kedekatan dengan lokasi evakuasi. Hasil dari analisis tersebut menunjukkan bahwa beberapa wilayah memiliki rute evakuasi yang lebih optimal dibandingkan rute lainnya [7]. Penelitian lainnya yang telah dilakukan juga menggunakan metode *network analysis* yang berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). Studi ini bertujuan untuk melakukan pemetaan jalur evakuasi tsunami di Kota Manado. Penelitian ini menghasilkan jalur tercepat menuju titik evakuasi tsunami di Kota Manado [8].

Studi ini berbeda dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Studi ini akan menganalisis lebih lanjut mengenai kinerja jaringan jalan yang terletak di Kota Pagar Alam sebagai rute jalur evakuasi bencana erupsi Gunung Dempo. Studi ini dilakukan pada jaringan jalan dalam radius ± 20 km dari pusat kawah yang termasuk ke dalam kawasan Ring 1 sampai Ring 4. Penelitian ini dilakukan pada beberapa jalan utama yang merupakan jalur evakuasi erupsi Gunung Dempo yang telah ditentukan oleh BPBD Kota Pagar Alam. Studi ini akan menganalisis tingkat pelayanan jalan untuk evakuasi berdasarkan data geometri jalan, kondisi

hambatan samping, dan arus lalu lintas pada kondisi eksisting. Studi ini juga menggunakan data kuesioner masyarakat setempat dan pengunjung pariwisata Gunung Dempo.

Studi ini juga menggunakan pendekatan matriks yang didukung oleh data hasil survei lalu lintas. Data tersebut kemudian diolah dengan pendekatan *four-steps model*. Hasil dari analisis ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang efektif dan strategis dalam perencanaan dan pengelolaan jaringan jalan untuk evakuasi bencana erupsi di kawasan Gunung Dempo Kota Pagar Alam.

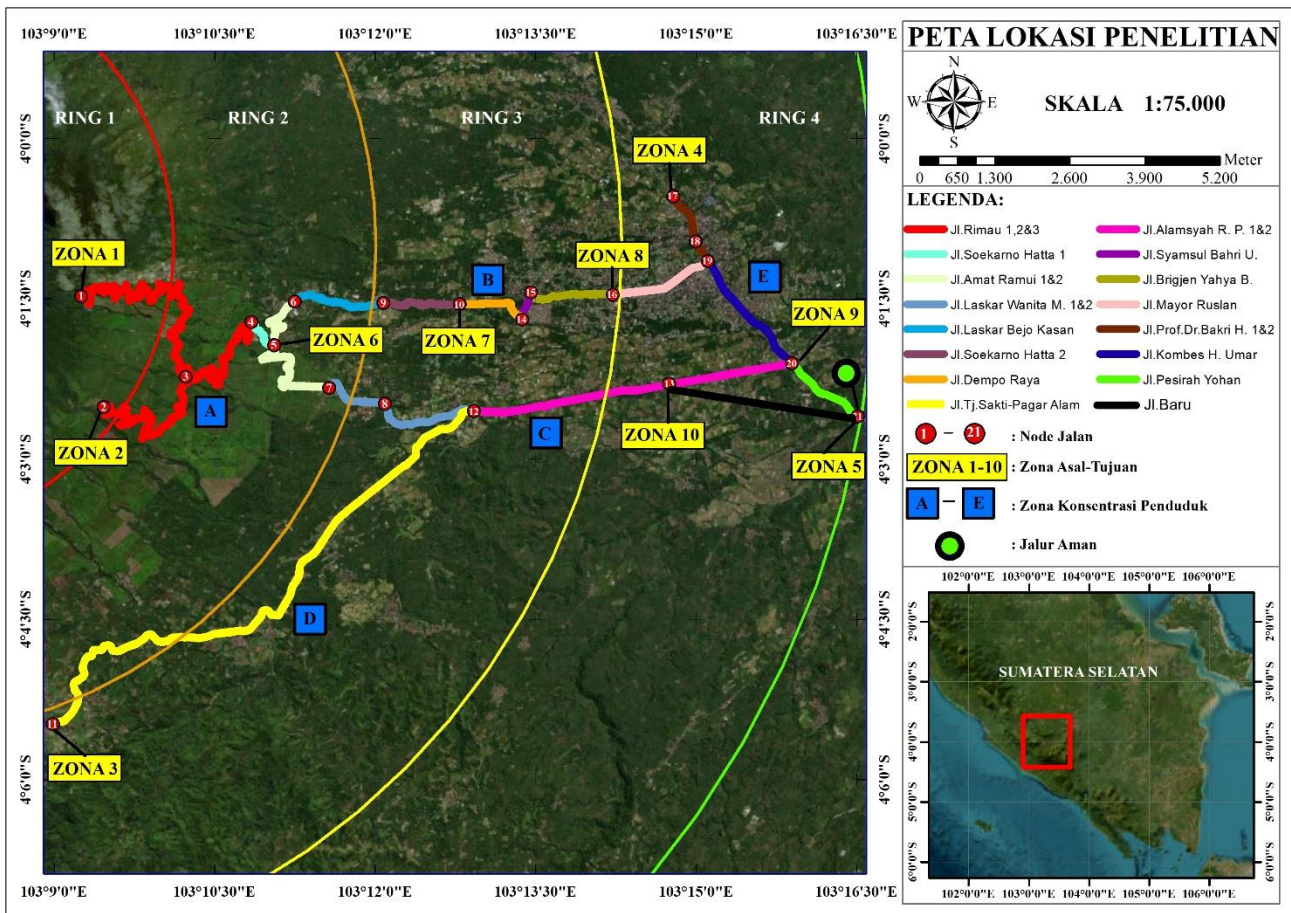
II. METODE PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada jaringan jalan di kawasan Gunung Dempo yang berada di Kota Pagar Alam, Provinsi Sumatera Selatan. Penelitian ini menggunakan peta jaringan jalan sebagai dasar utama pemodelan eksisting dan dilanjutkan dengan Skenario 1 saat evakuasi, Skenario 2 dengan modifikasi geometri, dan Skenario 3 dengan penambahan jalan baru. Penelitian ini berlangsung selama beberapa hari, delapan hari untuk membagikan kuesioner masyarakat setempat yang dimulai dari tanggal 15 Februari 2025 sampai tanggal 22 Februari 2025. Kemudian satu hari untuk survei volume arus lalu lintas eksisting dan membagikan kuesioner pengunjung pariwisata yaitu tanggal 5 April 2025. Survei arus lalu lintas tersebut terjadi saat kunjungan pariwisata puncak di kawasan Gunung Dempo.

Penelitian ini hanya mencakup ruas jalan utama yang sering dilewati oleh masyarakat saja. Ruas jalan tersebut termasuk ke dalam rute evakuasi yang telah ditetapkan oleh BPBD Kota Pagar Alam [9]. Jaringan jalan yang termasuk dalam penelitian ini berada sekitar $\pm 0 - 20$ km dari pusat kawah Gunung Dempo. Selain itu, penelitian ini juga menggunakan data kuesioner masyarakat setempat dan pengunjung pariwisata Gunung Dempo.

Studi ini menganalisis sebanyak 21 ruas jalan, yaitu Jalan Rimau 1 (pariwisata), Jalan Rimau 2 (jalur pendakian), Jalan Rimau 3, Jalan Soekarno Hatta 1, Jalan Amat Ramui 1 (portal masuk pariwisata), Jalan Amat Ramui 2 (portal masuk pariwisata), Jalan Laskar Wanita Mentarjo 1, Jalan Laskar Wanita Mentarjo 2, Jalan Laskar Bejo Kasan, Jalan Soekarno Hatta 2, Jalan Dempo Raya, Jalan Tj. Sakti – Pagar Alam, Jalan Alamsyah Ratu Prawiranegara 1, Jalan Alamsyah Ratu Prawiranegara 2, Jalan Syamsul Bahri Umar, Jalan Brigjen Yahya Bahar, Jalan Mayor Ruslan, Jalan Prof. Bakri Hamid 1, Jalan Prof. Bakri Hamid 2, Jalan Kombes H. Umar, dan Jalan Pesirah Yohan (jalur aman). Peta lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

B. Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer dan data sekunder. Data primer dalam penelitian ini terdiri dari arus lalu lintas kendaraan pada jam puncak, geometri jalan, dan hasil kuesioner. Survei arus lalu lintas harian dilaksanakan dalam rentang waktu selama 6 jam yang merepresentasikan arus jam puncak kondisi harian. Adapun waktu survei tersebut yaitu pada pagi hari pukul 06.30 - 08.30 WIB, siang hari pukul 12.00 - 14.00 WIB, dan sore hari pukul 16.00 - 18.00 WIB. Sementara itu, data sekunder terdiri dari peta jaringan jalan, jumlah penduduk, dan data Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kota Pagar Alam.

C. Metode Analisis Data

Indikator utama yang dianalisis dalam penelitian ini adalah kapasitas ruas jalan, volume lalu lintas, dan derajat kejenuhan yang berdasarkan pada Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia atau PKJI [10]. Selain itu, penelitian ini juga akan menganalisis validasi volume arus lalu lintas hasil survei di lapangan dengan hasil pemodelan pada kondisi eksisting.

1) *Kapasitas Ruas Jalan*: Kapasitas ruas jalan merupakan nilai total kapasitas kendaraan yang melewati suatu ruas jalan pada kondisi tertentu.

Rumus yang digunakan dalam perhitungan kapasitas ruas jalan adalah sebagai berikut.

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

Keterangan:

C = kapasitas jalan (SMP/jam)

C_0 = kapasitas dasar (SMP/jam)

FC_{LJ} = faktor penyesuaian kapasitas terkait lebar lajur atau jalur lalu lintas

FC_{PA} = faktor penyesuaian kapasitas terkait pemisah arah

FC_{HS} = faktor penyesuaian hambatan samping

FC_{UK} = faktor penyesuaian kapasitas terkait ukuran kota

2) *Volume Lalu Lintas*: Volume lalu lintas merupakan total kendaraan yang melewati suatu ruas jalan. Analisis volume lalu lintas dilakukan dengan mengkonversi satuan (SMP/jam) dengan hasil survei di lapangan (kend/jam) yang menggunakan faktor emp setiap jenis kendaraan seperti pada rumus berikut.

$$Q = [(emp_{MP} \times MP) + (emp_{KS} \times KS) + (emp_{SM} \times SM)] \quad (2)$$

Keterangan:

Q = jumlah arus atau volume kendaraan (SMP/jam)

emp = ekuivalensi mobil penumpang

MP = mobil penumpang
KB = kendaraan sedang
SM = sepeda motor

3) *Derajat Kejenuhan*: Derajat kejenuhan merupakan perbandingan antara nilai volume arus lalu lintas dengan nilai kapasitas ruas jalan. Nilai derajat kejenuhan dapat menentukan tingkat pelayanan jalan, yang terbagi ke dalam enam tingkatan dari A hingga F. Tingkat A ($DS \leq 0,20$), dimana kondisi arus lalu lintas normal dengan volume rendah dan kecepatan tinggi. Tingkat B ($0,21 \leq DS < 0,44$), dimana kondisi arus lalu lintas masih normal, namun kecepatan mulai dibatasi. Tingkat C ($0,45 \leq DS < 0,74$), dimana kondisi arus lalu lintas masih stabil dengan kecepatan dan gerak kendaraan yang mulai terbatas. Tingkat D ($0,75 \leq DS < 0,84$), dimana kondisi arus lalu lintas mendekati tidak stabil, namun masih dapat dikendalikan. Tingkat E ($0,85 \leq DS < 1,00$), dimana kondisi arus lalu lintas mendekati kapasitas dan tidak stabil. Tingkat F ($DS > 1,00$), dimana kondisi arus lalu lintas macet dan tundaan yang besar [11]. Perhitungan derajat kejenuhan dapat dilihat pada rumus berikut.

$$D_j = \frac{Q}{C} \quad (3)$$

Keterangan:

D_j = derajat kejenuhan
Q = arus total lalu lintas (SMP/jam)
C = kapasitas (SMP/jam)

4) *Validasi Model Eksisting*: Validasi model eksisting pada studi ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan antara data volume arus lalu lintas hasil survei di lapangan dengan hasil pemodelan. Metode yang digunakan pada validasi model eksisting ini adalah metode regresi linier sederhana. Tingkat keakuratan antara hasil survei di lapangan dengan pemodelan dapat dihitung dengan perhitungan koefisien determinasi (R^2), untuk mengetahui kemampuan model dalam menggambarkan variasi data dari survei lapangan. Metode ini merujuk pada teori regresi linier sederhana yang dijelaskan dalam referensi [12]. Berikut ini merupakan rumus yang digunakan dalam validasi model eksisting.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4)$$

Keterangan:

R^2 = koefisien determinasi
y_i = nilai aktual atau nilai observasi ke-*i* (hasil survei di lapangan)
 \hat{y}_i = nilai prediksi atau hasil dari model simulasi ke-*i* (hasil dari pemodelan)

\bar{y}_i = rata-rata dari seluruh nilai aktual *y_i*
 \sum = jumlah total

D. Sampel dan Populasi Penelitian

Terdapat 23 kelurahan di Kota Pagar Alam yang dijadikan sebagai objek penelitian. Jumlah 23 kelurahan tersebut adalah kelurahan yang berada di kawasan Ring 1 hingga Ring 4 dan berada sekitar $\pm 0 - 20$ km dari pusat kawah. Metode yang digunakan dalam pemilihan responden adalah metode *nonprobability sampling* dengan jenis *incidental*, metode ini merupakan pemilihan responden berdasarkan pertemuan kebetulan yang memenuhi syarat sebagai responden [13]. Total populasi dari 23 kelurahan tersebut hanya diambil sebesar 1% saja, karena jumlahnya sudah lebih dari sepuluh ribu penduduk yaitu sebesar 112.779 penduduk ([14], [15], [16]).

Penentuan jumlah sampel dalam penelitian ini merujuk pada pendekatan praktis dengan mempertimbangkan populasi, semakin tinggi populasi maka persentase sampel akan semakin kecil. Pendekatan ini sering digunakan dalam analisis sosial dan disesuaikan dengan prinsip dari Yount [17]. Oleh karena itu, jumlah responden masyarakat yang diambil pada penelitian ini adalah sebanyak 1.128 responden. Selain itu, penelitian ini juga menggunakan data responden pengunjung pariwisata sebanyak 144 responden. Jumlah responden tersebut diambil dari 1% jumlah pengunjung pariwisata yaitu sebesar 14.400 pengunjung.

E. Four-Steps Model

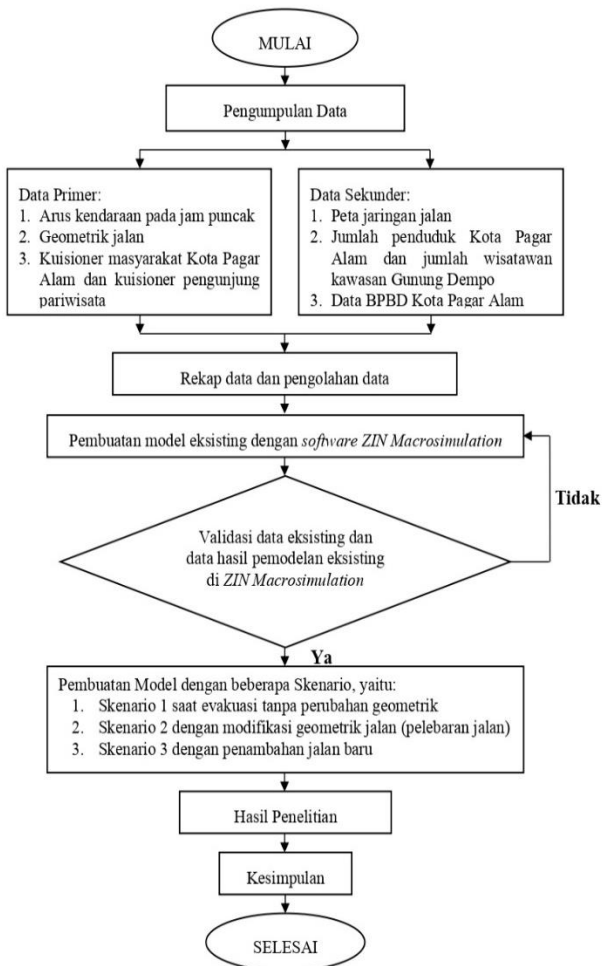
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Four-Steps Model* yang merupakan metode empat tahap. Model tersebut terdiri dari *Trip Generation* yang memperkirakan jumlah suatu perjalanan yang terjadi dalam suatu zona, *Trip Distribution* yang menentukan pola pergerakan perjalanan di setiap zona, *Mode Choice* yang menganalisis pemilihan kendaraan transportasi yang akan digunakan para pengunjung dan *Trip Assignment* yang menentukan rute yang akan dipilih dalam jaringan jalan [18]. Pendekatan ini akan diaplikasikan dalam perangkat lunak *ZIN Macrosimulation* yang dapat mengoptimalkan analisis tingkat pelayanan jalan dengan efektif, baik dalam mengevaluasi kondisi eksisting maupun dalam melakukan pemodelan saat evakuasi [19].

Metode *four-step model* adalah metode yang telah terbukti efisien dalam menganalisis kerentanan jaringan jalan pada pemodelan evakuasi bencana erupsi. Metode ini telah diterapkan pada penelitian sebelumnya dalam studi kasus erupsi Gunung Merapi di Yogyakarta ([20], [21]). Pendekatan serupa juga diterapkan dalam perencanaan model transportasi di Kota Mandalay,

Myanmar yang bertujuan untuk memperkirakan dan mengatasi lalu lintas di masa mendatang [22]. Selain itu, pendekatan ini juga diterapkan dalam menganalisis lalu lintas di kampus Universitas Islam Makassar [23]. Hasil analisis pada beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode ini dapat memberikan hasil model transportasi yang mendekati kondisi nyata di lapangan. Metode tersebut juga akan diterapkan dalam studi ini untuk memodelkan rute evakuasi saat terjadi erupsi Gunung Dempo di Kota Pagar Alam.

F. Diagram Alir Penelitian

Tahapan yang diterapkan dalam studi ini disajikan dalam bentuk diagram alir yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Survei Arus Lalu Lintas Jam Puncak

Survei arus lalu lintas dilakukan pada kondisi harian saat jam puncak. Survei ini dilakukan pada 21 ruas jalan yang terdampak jika terjadi erupsi Gunung Dempo dalam skala besar. Ruas jalan dalam studi ini berada pada radius ± 0 – 20 km dari pusat kawah. Data survei arus lalu lintas pada jam puncak ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data arus lalu lintas jam puncak

Nama Jalan	Jam Puncak	Arus Lalu Lintas (skr/jam)
Jl.Rimau 1	13.30-13.45	1120,0
Jl.Rimau 2	12.45-13.00	70,1
Jl.Rimau 3	13.45-14.00	1125,6
Jl.Soekarno Hatta 1	13.45-14.00	1182,0
Jl.Amat Ramui 1	13.45-14.00	919,7
Jl.Amat Ramui 2	13.45-14.00	1143,2
Jl.Laskar Wanita M. 1	16.45-17.00	961,9
Jl.Laskar Wanita M. 2	16.45-17.00	966,0
Jl.Laskar Bejo Kasan	12.15-12.30	1010,3
Jl.Soekarno Hatta 2	12.30-12.45	1020,9
Jl.Dempo Raya	12.30-12.45	1255,0
Jl.Tj. Sakti-Pagar Alam	12.30-12.45	1061,1
Jl.Alamsyah Ratu P. 1	12.15-12.30	1233,4
Jl.Alamsyah Ratu P. 2	12.00-12.15	1331,7
Jl.Syamsul Bahri U.	12.30-12.45	983,6
Jl.Brigjen Yahya B.	12.15-12.30	1017,9
Jl.Mayor Ruslan	12.00-12.15	1243,2
Jl.Prof. Dr. Bakri H. 1	12.00-12.15	1524,3
Jl.Prof. Dr. Bakri H. 2	12.45-13.00	1727,5
Jl.Kombes H. Umar	12.30-12.45	1276,8
Jl.Pesirah Yohan	12.15-12.30	1556,6

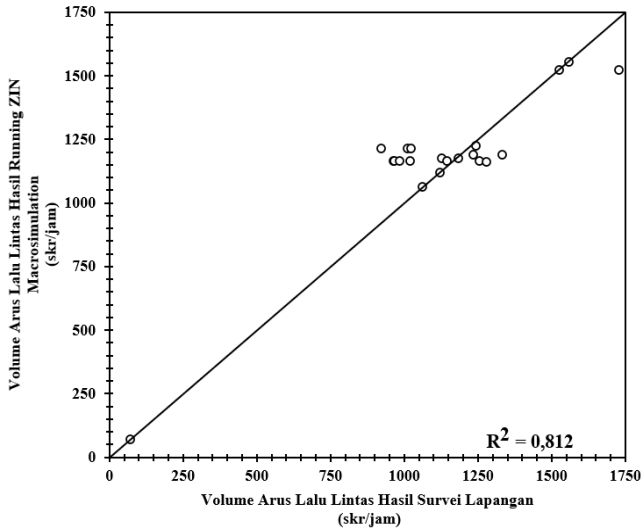
B. Pemilihan Moda Evakuasi

Sebelum melakukan pemodelan evakuasi, survei kuesioner dilakukan untuk mendapatkan informasi pemilihan moda kendaraan yang akan diterapkan pada saat evakuasi. Studi ini melibatkan 1.272 responden yang terdiri dari 55% laki-laki dan 45% perempuan. Rentang usia responden adalah 1 hingga 20 tahun (6%), usia 21 hingga 40 tahun (44%), usia 41 hingga 60 tahun (49%), dan usia lebih dari 60 tahun (1%). Pendidikan terbanyak adalah jenjang SMA (44%) dan S1 (26%), selain itu jenjang SD (13%) dan SMP (17%). Mayoritas pekerjaan adalah wirausaha (38%) dan petani (33%), serta pelajar sebanyak (13%), ibu rumah tangga (7%), dan PNS (9%). Sebagian besar responden memilih motor (72%) dan mobil (28%) sebagai moda evakuasi. Terkait lama waktu yang dibutuhkan selama evakuasi, responden Zona A dan D membutuhkan 11 hingga 30 menit, Zona B membutuhkan 11 hingga ≥ 31 menit, Zona C membutuhkan 1 hingga 30 menit, dan Zona E membutuhkan 1 hingga 20 menit.

Semua masyarakat akan menuju Zona 5 yang dinyatakan sebagai zona aman atau jalur aman jika terjadi erupsi Gunung Dempo dalam skala besar. Hal ini didasarkan oleh hasil wawancara dengan BPBD Kota Pagar Alam yang menyatakan bahwa Zona 5 sudah termasuk ke dalam Kecamatan Dempo Tengah yang dianggap aman dari bahaya erupsi. Hal ini disebabkan oleh jaraknya yang sudah jauh dari kawasan Gunung Dempo.

C. Perbandingan Volume Arus Lalu Lintas antara Hasil Pemodelan dan Survei Lapangan pada Kondisi Eksisting

Perbandingan volume arus lintas pada kondisi eksisting hasil pemodelan dan survei lapangan didapatkan dengan melakukan validasi model melalui pendekatan regresi linier sederhana. Validasi model tersebut dilakukan dengan membandingkan antara data hasil volume arus lalu lintas di lapangan dengan pemodelan pada kondisi eksisting. Grafik hasil regresi linier sederhana volume arus lalu lintas kondisi eksisting ditampilkan pada Gambar 3.

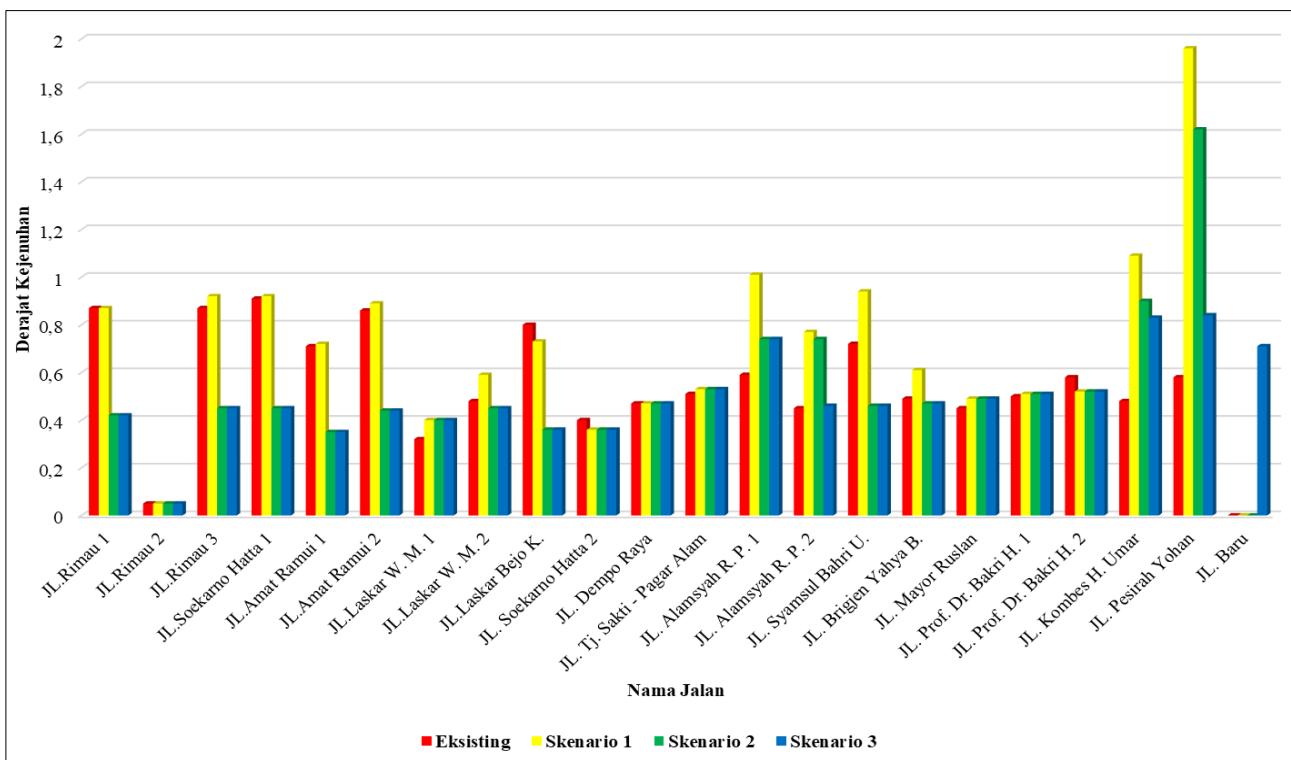


Gambar 3. Grafik regresi linier sederhana volume arus lalu lintas kondisi eksisting

Gambar 3. menunjukkan hasil validasi model eksisting dalam studi ini. Dari hasil perhitungan regresi linier yang telah dilakukan, didapatkan hasil koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,812. Hasil tersebut menunjukkan bahwa 81,2% volume arus lalu lintas yang tersebar di seluruh ruas jalan pada kondisi eksisting di lapangan dan di pemodelan adalah valid karena nilai $R^2 \geq 0,75$. Hal ini menggambarkan bahwa pada kondisi eksisting, penyebaran arus lalu lintas hasil pemodelan sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Oleh karena itu, model ini dapat digunakan untuk skenario saat evakuasi bencana erupsi Gunung Dempo.

D. Analisis Hasil Kinerja Jaringan Jalan

Analisis kinerja jaringan jalan dalam studi ini menghasilkan perbandingan nilai derajat kejenuhan di setiap ruas jalan pada setiap skenario. Kinerja suatu ruas jalan masih tergolong baik jika memiliki nilai derajat kejenuhan kurang dari 0,84 atau setara dengan tingkat pelayanan A hingga D. Sementara itu, dikatakan buruk jika nilai derajat kejenuhan lebih dari 0,84 atau memiliki tingkat pelayanan E atau F. Grafik perbandingan nilai derajat kejenuhan pada setiap ruas jalan untuk kondisi eksisting dan semua skenario disajikan dalam Gambar 4. Penyajian ini menggambarkan perbedaan tingkat kinerja ruas jalan pada setiap ruas jalan yang diteliti.



Gambar 4. Grafik perbandingan nilai derajat kejenuhan pada Pemodelan Eksisting, Skenario 1, Skenario 2, dan Skenario 3

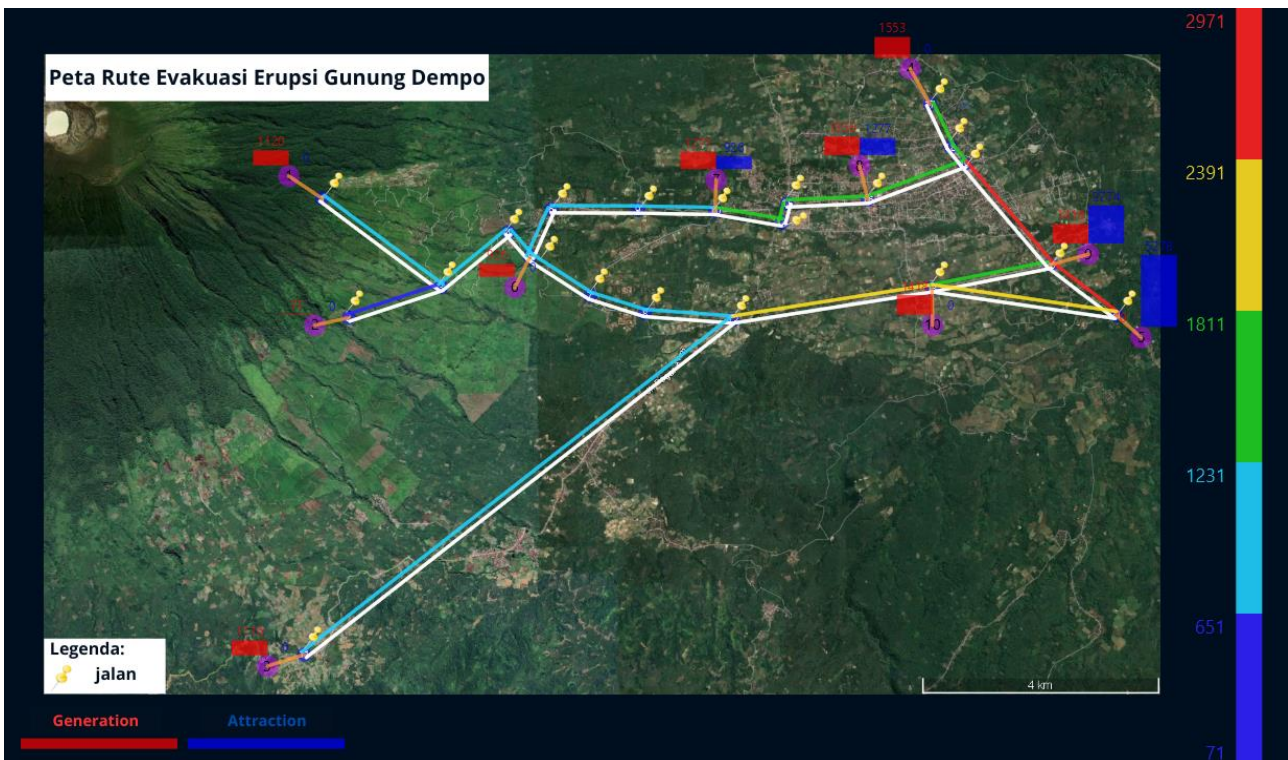
Berdasarkan hasil survei di lapangan, nilai derajat kejenuhan pada kondisi harian memiliki variasi antara 0,05 hingga 0,91. Hal ini mengindikasikan bahwa beberapa ruas jalan di sekitar kawasan pariwisata Gunung Dempo mengalami tingkat pelayanan yang rendah. Beberapa ruas jalan tersebut adalah Jalan Rimau 1, Jalan Rimau 3, Jalan Soekarno Hatta 1, Jalan Amat Ramui 1, Jalan Amat Ramui 2, dan Jalan Laskar Bejo Kasan.

Pada Skenario 1, saat terjadi evakuasi tanpa perubahan geometri jalan, nilai derajat kejenuhan pada sebagian besar ruas jalan seperti Jalan Alamsyah Ratu Prawiranegara 1, Jalan Kombes H. Umar, dan Jalan Pesirah Yohan mengalami peningkatan signifikan hingga mencapai lebih dari 1. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat pelayanan jalan sudah masuk kategori F atau tingkat paling rendah. Oleh karena itu, untuk menangani hal ini dibutuhkan skenario modifikasi geometri jalan dengan pelebaran di beberapa ruas jalan yang memiliki derajat kejenuhan yang tinggi. Beberapa jalan yang memiliki derajat kejenuhan lebih dari 0,84 adalah Jalan Rimau 1, Jalan Rimau 3, Jalan Soekarno Hatta 1, Jalan Amat Ramui 2, Jalan Alamsyah Ratu Prawiranegara 1, Jalan Syamsul Bahri Umar, Jalan Kombes H. Umar, dan Jalan Pesirah Yohan.

Pada Skenario 2, yaitu modifikasi geometri jalan dengan melakukan pelebaran di beberapa ruas jalan. Modifikasi geometri jalan tersebut meliputi 13 ruas jalan yang dilebarkan yaitu Jalan Rimau 1, Jalan

Rimau 3, Jalan Soekarno Hatta 1, Jalan Amat Ramui 1, Jalan Amat Ramui 2, Jalan Laskar Wanita Mentarjo 2, Jalan Laskar Bejo Kasan, Jalan Alamsyah Ratu Prawiranegara 1, Jalan Alamsyah Ratu Prawiranegara 2, Jalan Syamsul Bahri Umar, Jalan Brigjen Yahya Bahar, Jalan Kombes H. Umar, dan Jalan Pesirah Yohan. Skenario tersebut mampu menurunkan derajat kejenuhan pada hampir seluruh ruas jalan. Namun, pada Jalan Pesirah Yohan yang merupakan jalur aman evakuasi masih memiliki derajat kejenuhan lebih dari 1. Oleh karena itu, modifikasi geometri jalan ini belum mampu menurunkan derajat kejenuhan seluruh ruas jalan, sehingga diperlukan skenario lanjutan yaitu penambahan jalan baru sebagai alternatif menuju lokasi aman.

Pada Skenario 3, pengembangan dari Skenario 2 yaitu dengan penambahan jalan baru sebagai alternatif menuju lokasi aman. Hasil skenario ini menunjukkan bahwa nilai derajat kejenuhan mengalami penurunan yang signifikan. Semua ruas jalan termasuk jalur aman yaitu Jalan Pesirah Yohan yang sebelumnya memiliki derajat kejenuhan tinggi mengalami penurunan hingga 0,84. Hal ini membuktikan bahwa kombinasi antara skenario modifikasi geometri jalan dan skenario penambahan jalan baru tersebut, mampu menurunkan nilai derajat kejenuhan secara signifikan pada seluruh ruas jalan. Nilai derajat kejenuhan tersebut bervariasi dari 0,05 hingga 0,84. Hal ini membuat kinerja jalan meningkat, sehingga dapat digunakan sebagai rute evakuasi erupsi Gunung Dempo.



Gambar 5. Hasil pemodelan volume arus lalu lintas pada jaringan jalan rute evakuasi erupsi Gunung Dempo

Hasil pemodelan jaringan jalan rute evakuasi tersebut, menunjukkan bahwa adanya perbedaan kondisi arus lalu lintas di setiap ruas jalan yang terlihat pada Gambar 5. Pemodelan jaringan jalan ini disimulasikan berdasarkan pendekatan *four-steps model*. Peta hasil analisis ini terbagi dalam 10 zona asal-tujuan, memiliki total node sebanyak 21 node yang menghubungkan setiap ruas jalan, serta memiliki satu titik lokasi aman yang terletak di Zona 5. Pemodelan evakuasi ini menggambarkan bahwa pada saat proses evakuasi hanya terjadi satu arah, yaitu semua ruas jalan mengarah ke lokasi aman yaitu Zona 5. Oleh karena itu, warna putih pada pemodelan menunjukkan bahwa tidak ada pergerakan yang mengarah ke zona bahaya yang mendekati gunung.

Warna pada setiap ruas jalan menunjukkan perbedaan kondisi arus lalu lintas pada saat pemodelan evakuasi. Ruas jalan yang berwarna merah seperti Jalan Kombes H. Umar dan Jalan Pesirah Yohan menunjukkan kondisi arus lalu lintas yang sudah cukup padat. Ruas jalan yang berwarna kuning seperti Jalan Alamsyah Ratu Prawiranegara 1 dan Jalan Baru menunjukkan kondisi arus lalu lintas yang tergolong sedang. Ruas jalan yang berwarna hijau seperti Jalan Dempo Raya, Jalan Syamsul Bahri Umar, Jalan Brigjen Yahya Bahar, Jalan Mayor Ruslan, dan Jalan Alamsyah Ratu Prawiranegara 2 menunjukkan kondisi arus lalu lintas yang tergolong masih lancar namun mendekati sedang. Ruas jalan yang berwarna biru muda seperti Jalan Rimau 1, Jalan Rimau 3, Jalan Soekarno Hatta 1, Jalan Amat Ramui 1, Jalan Amat Ramui 2, Jalan Laskar Bejo Kasan, Jalan Soekarno Hatta 2, Jalan Laskar Wanita Mentarjo 1, Jalan Laskar Wanita Mentarjo 2, dan Jalan Tj. Sakti – Pagar Alam menunjukkan kondisi arus lalu lintas yang lancar. Ruas jalan yang berwarna biru tua yaitu Jalan Rimau 2 menunjukkan kondisi arus lalu lintas yang tergolong sangat lancar.

Hasil analisis kinerja jaringan jalan pada studi ini menunjukkan adanya peningkatan derajat kejenuhan di beberapa ruas jalan, khususnya pada ruas jalan utama menuju titik evakuasi atau jalur aman. Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa pentingnya mempertimbangkan beban lalu lintas dan kapasitas jalan dalam perencanaan jalur evakuasi. Hal ini menjadikan adanya perbedaan dengan penelitian sebelumnya oleh Ariansa et al. [7] dan Adilang et al. [8], yang lebih menekankan pada penentuan rute tercepat untuk proses evakuasi tanpa mengkaji lebih dalam mengenai kinerja ruas jalan. Oleh karena itu, penelitian ini menghasilkan temuan tambahan dalam analisis evakuasi bencana, yaitu dengan pendekatan analisis kinerja jaringan jalan untuk menentukan kemampuan ruas jalan

dalam proses evakuasi bencana erupsi Gunung Dempo.

KESIMPULAN

Penelitian ini memberikan penemuan baru dengan memodelkan jaringan jalan rute evakuasi erupsi Gunung Dempo melalui pendekatan *four-steps model*. Analisis kinerja jaringan jalan rute evakuasi erupsi Gunung Dempo pada studi ini belum pernah dikaji dalam studi sebelumnya. Pemodelan eksisting menghasilkan tingkat validasi yang menunjukkan bahwa 81,2% penyebaran arus lalu lintas pada kondisi eksisting di lapangan dan di pemodelan adalah sama.

Hasil Skenario 1, saat evakuasi tanpa perubahan geometri menunjukkan peningkatan arus lalu lintas di semua ruas jalan, yang membuat nilai derajat kejenuhan juga meningkat. Pada Skenario 2, dengan perubahan geometri menunjukkan adanya penurunan nilai derajat kejenuhan di sebagian besar ruas jalan, sedangkan pada jalur aman belum signifikan. Pada Skenario 3, dengan penambahan jalan baru terbukti signifikan menurunkan nilai derajat kejenuhan di semua ruas jalan, termasuk pada Jalan Kombes H. Umar dan Jalan Pesirah Yohan, yang sebelumnya memiliki nilai derajat kejenuhan tertinggi. Penelitian ini menunjukkan bahwa adanya pelebaran jalan saja belum mampu menurunkan kepadatan arus lalu lintas. Oleh karena itu, dibutuhkan strategi penambahan jalan baru sebagai jalur evakuasi menuju zona aman untuk mengoptimalkan proses evakuasi.

Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan memperluas cakupan jaringan jalan yang ada di kawasan Gunung Dempo dengan menganalisis seluruh jaringan jalan, termasuk jalan kecil atau lokal dan tidak hanya jalan utama saja. Selain itu, dapat juga dengan mengembangkan metode *Multi-Metode (MMS)* dan *Agent Base Modelling (ABM)* untuk mengoptimalkan sistem lalu lintas selama proses evakuasi. Metode ini dapat meningkatkan efisiensi selama evakuasi dengan memaksimalkan hubungan antara agen dalam simulasi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan sistem ini dapat meningkatkan efisiensi pergerakan agen saat terjadi bencana ([24], [25]).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Program Studi Teknik Sipil Universitas Bengkulu. Terima kasih juga kepada Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kota Pagar Alam dan rekan-rekan mahasiswa yang telah membantu selama penelitian. Semoga hasil

penelitian ini dapat bermanfaat bagi masyarakat, praktisi dan akademisi.

REFERENSI

- [1] Y. Aprihatin, D. Hermon, E. Barlian, I. Dewata, and I. Umar, "Policy Direction for AHP-Based Community Nutrition Management Post Eruption of Dempo Volcano, Pagar Alam City - Indonesia," *International Journal of Management and Humanities*, vol. 4, no. 9, pp. 6–10, May 2020, doi: 10.35940/ijmh.H0829.054920.
- [2] A. Purba, S. H. Sumantri, A. Kurniadi, and D. R. K. Putra, "Analisis Kapasitas Masyarakat Terdampak Erupsi Gunung Semeru," *PENDIPA Journal of Science Education*, vol. 6, no. 2, pp. 599–608, Jun. 2022, doi: 10.33369/pendipa.6.2.599-608.
- [3] S. H. N. Hafida, "Perubahan Kesiapan Masyarakat dalam Menghadapi Bencana Erupsi Gunung Berapi," *JUPIIS: Jurnal Pendidikan Ilmu-Ilmu Sosial*, vol. 11, no. 2, pp. 396-407, Dec. 2019, doi: 10.24114/jupiis.v11i2.13955.
- [4] (2021) Miliki 127 gunung api aktif, jadikan Indonesia laboratorium gunung api dunia. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/med-ia-center/arsip-berita/miliki-127-gunung-api-aktif-jadikan-indonesia-laboratorium-gunung-api-dunia>
- [5] (2024) Aktivitas Terkini Gunungapi Dempo, Sumatera Selatan Tanggal 5 Desember 2024. [Online]. Available: <https://vsi.esdm.go.id/press-release/aktivitas-terkini-gunungapi-demosumateraselatan-tanggal-5-desember-2024>
- [6] Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), *Kajian Risiko Bencana Nasional Provinsi Sumatera Selatan 2022–2026*, Kedeputan Bidang Sistem dan Strategi, Direktorat Pemetaan dan Evaluasi Risiko Bencana, 2021.
- [7] Ariansa, F. Dhiniati, and L. E. Diansari, "Pemetaan Jalur Evakuasi Gunung Merapi Dempo Kota Pagar Alam Menggunakan Aplikasi Sistem Informasi Geografis," *Jurnal Ilmiah Bering's*, vol. 7, no. 2, pp. 55–61, Oct. 2020, doi: 10.36050/berings.v7i02.283.
- [8] D. C. Adilang, A. E. Tunga, and F. Warouw, "Pemetaan Jalur Evakuasi Tsunami Dengan Metode Network Analyst Berbasis SIG Di Kota Manado," *Jurnal Spasial*, vol. 9, no. 1, p. 2022, doi: 10.35793/sp.v9i1.41902.
- [9] Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kota Pagar Alam, *Kajian Risiko Bencana Kota Pagar Alam*, Pagar Alam: BPBD Kota Pagar Alam, 2024.
- [10] Direktorat Jenderal Bina Marga, *Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI)*, Jakarta, 2023.
- [11] Transportation Research Board, *Highway Capacity Manual: Special Report 209*, 2nd ed., Washington, D.C.: National Research Council, 1985.
- [12] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*, 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
- [13] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta, 2020.
- [14] (2025) Jumlah penduduk menurut kelurahan dan jenis kelamin di Kecamatan Pagar Alam Utara. [Online]. Available: <https://pagaralamkota.bps.go.id/id/statistics--table/2/NzYjMg%3D%3D/jumlah-penduduk-menurut-kelurahan-dan-jenis-kelamin-di-kecamatan-pagar-alam-utara.html>
- [15] (2025) Jumlah penduduk menurut kelurahan dan jenis kelamin di Kecamatan Dempo Utara. [Online]. Available: <https://pagaralamkota.bps.go.id/id/statistics-table/2/NzAjMg=/jumlah-penduduk-menurut-kelurahan-dan-jenis-kelamin-di-kecamatan-dempo-utara.html>
- [16] (2025) Jumlah penduduk menurut kelurahan dan jenis kelamin di Kecamatan Pagar Alam Selatan. [Online]. Available: <https://pagaralamkota.bps.go.id/id/statistics-table/2/NzMjMg=/jumlah-penduduk-menurut-kelurahan-dan-jenis-kelamin-dikecamatan-pagar-alam-selatan.html>
- [17] W. R. Yount, *Research Design and Statistical Analysis in Christian Ministry*, 5th ed. New Orleans, LA: NOBTS, 1999.
- [18] R. M. Supit, S. Y. R. Rompis, and L. I. R. Lefrandt, "Model Pemilihan Moda Transportasi Online di Kota Manado," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 7, no. 1, pp. 35–48, Jan. 2019.
- [19] M. I. Ramli, S. A. Adisasmita, M. Pasra, and H. Yatmar, "Pengaplikasian Program ZIN untuk Perencanaan Manajemen Sistem Jaringan Jalan di Kota Makassar", *Jurnal Tepat (Teknologi Terapan untuk Pengabdian Masyarakat)*, vol. 3, no. 2, pp. 26–34, 2020, doi: 10.25042/jurnal_tepat.v3i2.131.
- [20] Hardiansyah, S. Priyanto, I. Muthohar, and L. B. Suparma, "Identifying road network vulnerability during disaster, a case study of road network evacuation in Mount Merapi eruption," *Songklanakarinn J. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 4, pp. 769–776, 2019, doi: 10.14456/sjst-psu.2019.98.
- [21] Hardiansyah, I. Muthohar, C. Balijepali, and S. Priyanto, "Analysing vulnerability of road network and guiding evacuees to sheltered areas: Case study of Mt Merapi, Central Java, Indonesia," *Case Stud Transp Policy*, vol. 8, no. 4, pp. 1329–1340, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.cstp.2020.09.004.
- [22] W. Yee Lwin, B. Yoon, and S. Lee, "Exercising The Traditional Four-Step Transportation Model Using Simplified Transport Network of Mandalay City in Myanmar," *Journal of the Society of Disaster Information*, vol. 20, no. Society of Disaster Information All rights reserved, pp. 257–269, Jun. 2024, doi: 10.15683/kosdi.2024.6.30.257.
- [23] A. Alifuddin, M. R. Kasim, and M. Maruddin, "Pemodelan empat tahapan dalam analisis dampak lalu lintas Kampus Universitas Islam Makassar," *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil dan Perencanaan*, vol. 7, no. 1, pp. 1-12, March 2024, doi: 10.24815/jarsp.v7i1.32267.
- [24] B. M. Sopha, A. I. Triasari, and L. Cheah, "Sustainable Humanitarian Operations: Multi-Method Simulation For Large-Scale Evacuation," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 13, Jul. 2021, doi: 10.3390/su13137488.

- [25] Hardiansyah, W. Fitriani, A. F. Edriani, R. Hardiansyah, R. Lestyanti, and L. Z. Mase, "Implementation of Agent Based Modelling to Observe the Evacuating Behavior at Faculty of Engineering Building, University of Bengkulu, Indonesia," *Journal of the Civil Engineering Forum*, pp. 179–192, May 2022, doi: 10.22146/jcef.3589.