

BAB I

PENDAHULUAN

4.1.Latar Belakang

Bencana merupakan suatu peristiwa yang terjadi secara tiba-tiba dan tidak terduga yang menyebabkan kerusakan atau kehancuran (Srivastava, 2010) pada masyarakat maupun suatu wilayah secara keseluruhan. Peristiwa ini juga mengakibatkan kerugian harta benda, gangguan ekonomi, dampak sosial dan psikologis jangka panjang, serta hilangnya nyawa manusia. Oleh karena itu, manajemen bencana sangat penting untuk meminimalkan dampak buruk yang ditimbulkan serta menjamin keselamatan masyarakat yang terdampak (M. F. N. Maghfiroh & Hanaoka, 2018a, 2018b). Dalam beberapa tahun terakhir, faktor-faktor seperti pemanasan global, degradasi lingkungan, dan meningkatnya urbanisasi telah membuat semakin banyak masyarakat terpapar ancaman bencana alam (Ghazali et al., 2018; X. Li et al., 2022). Menurut Yulianto et al. (2021), jumlah kejadian bencana menunjukkan peningkatan yang konsisten dari tahun 2016 hingga 2019, yang mengindikasikan tren serupa pada tahun-tahun berikutnya. Mengingat sifat bencana alam yang tidak dapat diprediksi dan berdampak luas, diperlukan respons yang cepat dan terkoordinasi, termasuk upaya logistik dari berbagai pihak terkait (Chandes & Paché, 2010). Upaya yang dilakukan dalam operasi bantuan darurat tersebut dikenal sebagai logistik kemanusiaan (Campos et al., 2012). Logistik kemanusiaan mencakup perencanaan strategis, pelaksanaan, dan pengendalian aliran bantuan secara efektif dan efisien. Selain itu, logistik kemanusiaan juga meliputi pengelolaan penyimpanan bantuan kemanusiaan dan aliran informasi yang tepat guna mengurangi penderitaan korban bencana (Ertem et al., 2010; Falagara Sigala et al., 2020).

Salah satu aspek penting dalam logistik kemanusiaan adalah fase tanggap darurat, khususnya dalam kegiatan evakuasi. Evakuasi merupakan proses memindahkan masyarakat dari lokasi yang tidak aman ke lokasi yang lebih aman, dengan tujuan melindungi kehidupan, meminimalkan korban jiwa, dan mengurangi potensi kerugian (Kasereka et al., 2018; Ministry of Public Safety & Solicitor General, 2009). Proses evakuasi mencakup berbagai tahapan seperti identifikasi wilayah

terdampak, penilaian tingkat bahaya, penyampaian informasi kepada masyarakat mengenai situasi yang terjadi, serta pemberian instruksi yang jelas mengenai tindakan yang harus dilakukan (Y. Wang et al., 2021). Selanjutnya, petugas maupun relawan membantu masyarakat meninggalkan wilayah terdampak dengan menyediakan tempat pengungsian atau pusat evakuasi (UNESCO, 2020). Kemampuan untuk memindahkan populasi dalam jumlah besar secara cepat dan efisien sering kali menjadi faktor penentu antara hidup dan mati. Bencana seperti badai, gempa bumi, banjir, dan letusan gunung api sering memerlukan evakuasi massal yang menghadirkan tantangan tersendiri bagi infrastruktur transportasi dan logistik. Salah satu tantangan utama dalam evakuasi massal adalah keterbatasan infrastruktur transportasi yang tersedia. Hal ini mencakup koordinasi berbagai moda transportasi seperti kendaraan pribadi, transportasi umum, dan layanan darurat. Tujuan utama evakuasi adalah meminimalkan korban jiwa, mencegah kemacetan, serta memastikan para pengungsi dapat mencapai lokasi aman dengan membawa kebutuhan pokok yang diperlukan. Jalur evakuasi dirancang untuk digunakan pada kondisi darurat atau situasi berbahaya, seperti bencana alam, guna memfasilitasi perpindahan masyarakat secara aman dan cepat dari suatu lokasi atau bangunan tertentu (Abdullah & Fithra, 2021).). Dalam pelaksanaannya, upaya evakuasi dapat melibatkan penggunaan armada tertentu, seperti kendaraan listrik (Electric Vehicles/EV), mengingat sektor transportasi saat ini mengalami perubahan signifikan akibat kebutuhan global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengatasi perubahan iklim. Menurut (Kucukoglu et al., 2021), teknologi EV dikembangkan untuk menurunkan biaya operasional sekaligus memenuhi target lingkungan. Meskipun fokus utama kampanye adopsi EV adalah mengurangi dampak lingkungan, semakin banyak pihak yang menyadari potensi kontribusinya dalam respons bencana dan prosedur evakuasi (J. Zhang & Zhang, 2022).

Tren penggunaan moda transportasi yang lebih ramah lingkungan semakin terlihat di Indonesia, di mana pemerintah dan sektor swasta memberikan perhatian yang lebih besar terhadap pengembangannya (Liperda et al., 2024; M. F. Maghfiroh et al., 2021). Di antara berbagai alternatif yang tersedia, kendaraan listrik telah menjadi pengganti yang praktis dan ramah lingkungan bagi kendaraan berbahan bakar fosil. Dorongan menuju penggunaan kendaraan listrik merupakan bagian dari

strategi yang lebih luas untuk mewujudkan mobilitas perkotaan berkelanjutan, meningkatkan kualitas udara, dan mengurangi ketergantungan terhadap impor minyak. Selain itu, komitmen terhadap transportasi berkelanjutan tercermin dalam Kebijakan Energi Nasional (KEN) dan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), yang menargetkan bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 serta pengurangan emisi karbon secara signifikan pada tahun 2030 (Dewan Energi Nasional, 2019; Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014 Tentang Kebijakan Energi Nasional, 2014; Peraturan Presiden RI, 2017). Dalam konteks ini, pemerintah telah menerapkan berbagai insentif, seperti pembebasan pajak dan dukungan finansial, untuk mendorong penggunaan kendaraan listrik. Selain itu, pembangunan infrastruktur kendaraan listrik, termasuk stasiun pengisian daya (Charging Station/CS), juga berkembang dengan pesat. Kendaraan listrik semakin populer secara global karena memberikan manfaat lingkungan dan efisiensi biaya, khususnya dalam hal biaya energi yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar konvensional (Shahjalal et al., 2022). Mengingat tingginya kerentanan Indonesia terhadap bencana alam seperti gempa bumi, tsunami, dan letusan gunung api, diperlukan sistem evakuasi yang tangguh dan efektif untuk melindungi masyarakat. Kendaraan listrik dengan teknologi dan kemampuan yang dimiliki dapat diintegrasikan ke dalam operasi tanggap bencana untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses evakuasi. Oleh karena itu, penggunaan kendaraan listrik memiliki potensi besar untuk menjadi moda transportasi masa depan. Integrasi kendaraan listrik dalam perencanaan evakuasi dapat meningkatkan efisiensi respons bencana sekaligus mengurangi emisi karbon melalui penerapan praktik manajemen bencana yang berkelanjutan. Pendekatan ini sejalan dengan upaya global menuju solusi yang ramah lingkungan dan menunjukkan komitmen Indonesia terhadap keberlanjutan serta kesiapsiagaan bencana.

Penelitian oleh Asghari & Mirzapour Al-e-hashem (2021) menunjukkan bahwa skenario penyelamatan darurat memiliki beberapa karakteristik khusus. Karakteristik tersebut meliputi: (i) atribut tugas yang kompleks, di mana tugas penyelamatan memiliki berbagai atribut seperti waktu pelaksanaan, tingkat urgensi, dan tingkat kepentingan. Dalam kondisi ini, aspek urgensi dan kepentingan harus menjadi perhatian utama dalam perencanaan dan pelaksanaan tugas; (ii)

keterbatasan peluang pengisian daya. Berbeda dengan skenario EVRP pada umumnya yang memungkinkan kendaraan melakukan pengisian daya selama operasi berlangsung, operasi penyelamatan biasanya tidak memiliki stasiun pengisian daya atau waktu yang cukup untuk melakukan pengisian daya selama pelaksanaan tugas. Dalam situasi tersebut, ketersediaan, lokasi, dan jenis pengisi daya (misalnya pengisi daya cepat atau lambat) menjadi faktor yang sangat penting. Keterbatasan ini memaksa kendaraan penyelamat yang memiliki kapasitas baterai terbatas untuk memilih tugas yang akan dijalankan serta mengoptimalkan urutan pelaksanaannya dalam waktu operasional yang terbatas; dan (iii) konsumsi energi dapat diperlakukan sebagai kendala, bukan sebagai tujuan optimasi. Karakteristik-karakteristik tersebut digunakan dalam permasalahan Vehicle Routing Problem with Energy Constraint (VRPEC), yaitu permasalahan perutean kendaraan listrik tanpa adanya opsi pengisian ulang selama proses operasional berlangsung (Asghari & Mirzapour Al-e-hashem, 2021).

Tantangan-tantangan tersebut memerlukan perencanaan dan optimasi yang matang untuk memastikan keberhasilan operasi penyelamatan darurat. Mengingat keterbatasan jarak tempuh kendaraan listrik, diperlukan pengisian ulang energi selama proses pengangkutan pengungsi dari titik kumpul menuju lokasi pengungsian. Keseimbangan konsumsi energi setiap kendaraan menjadi sangat penting, terutama dalam kondisi keterbatasan sumber daya. Akibat terbatasnya jumlah stasiun pengisian daya di sepanjang rute, kendaraan listrik dapat mengalami keterlambatan yang tidak hanya disebabkan oleh sedikitnya jumlah stasiun yang tersedia, tetapi juga oleh pemilihan jenis pengisi daya yang kurang tepat. Tantangan ini dimodelkan dalam Electric Truck Location Routing Problem with Pickup, Transport, and Recharging (ETLRP-PTR). ETLRP-PTR merupakan kombinasi antara Location Routing Problem (LRP) dan Electric Vehicle Routing Problem (EVRP) yang diperluas dengan mempertimbangkan proses penjemputan pengungsi, pengangkutan menuju lokasi yang lebih aman, serta kemungkinan pengisian ulang energi kendaraan. Dibandingkan EVRP tradisional, ETLRP-PTR memasukkan keputusan mengenai lokasi stasiun pengisian daya dan pemilihan jenis pengisi daya, sehingga menghasilkan strategi pengisian daya yang lebih realistis dan fleksibel dalam permasalahan perutean. Jika model EVRP pada

umumnya mengasumsikan kendaraan harus melakukan pengisian daya penuh pada setiap pemberhentian yang mengakibatkan waktu tunggu yang lama, maka ETLRP-PTR memperkenalkan konsep pengisian daya parsial berdasarkan waktu pengisian yang diperlukan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan kendaraan listrik, khususnya truk listrik, dalam proses evakuasi korban bencana alam di Indonesia. Analisis difokuskan pada Kabupaten Lumajang, Jawa Timur, yang terdampak erupsi Gunung Semeru. Secara geografis, Gunung Semeru merupakan gunung api aktif yang terletak di Provinsi Jawa Timur dengan ketinggian 3.676 meter di atas permukaan laut. Erupsi yang terjadi pada tahun 2021–2022 menimbulkan berbagai dampak signifikan, seperti korban jiwa, orang hilang, pengungsian penduduk, serta kerusakan bangunan dan infrastruktur fisik lainnya (Bachri et al., 2024). Meskipun jumlah korban jiwa akibat letusan gunung api relatif lebih rendah dibandingkan jenis bencana lainnya, sebagian besar masyarakat tetap tinggal di kawasan gunung api karena faktor budaya dan kepercayaan yang telah mengakar.

Tujuan utama penelitian ini meliputi penentuan lokasi dan jenis stasiun pengisian daya, serta pengambilan keputusan rute dengan tetap menjamin keadilan dalam penjadwalan evakuasi ketika terjadi erupsi Gunung Semeru. Untuk mencapai tujuan tersebut, dikembangkan model matematis proses evakuasi melalui penerapan berbagai skenario “what-if” menggunakan truk listrik dan menggambarkan kemungkinan kejadian di masa mendatang pada Kawasan Rawan Bencana Gunung Semeru. Fokus penelitian secara khusus diarahkan pada penentuan lokasi dan jenis stasiun pengisian daya untuk mendukung operasi evakuasi menggunakan truk listrik serta pemindahan kelompok masyarakat rentan yang tersebar di berbagai lokasi. Informasi penting yang diperoleh dari dokumen rencana kontinjensi Kawasan Rawan Bencana Gunung Semeru, seperti jumlah korban rentan, titik kumpul, dan lokasi pengungsian, menjadi sumber data yang berharga dalam penelitian ini. Analisis lanjutan dilakukan dengan membandingkan hasil ETLRP-PTR pada berbagai skenario ketersediaan pengisian daya, mulai dari pengisian parsial hingga pengisian penuh. Perbandingan skenario ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang bermanfaat untuk penerapan di masa depan dalam

respons dan manajemen bencana. Selain itu, penting pula untuk merumuskan kebijakan dan strategi yang mendukung implementasi truk listrik dalam proses evakuasi, seperti penyusunan rencana dan prosedur evakuasi yang secara khusus dirancang untuk penggunaan truk Listrik.

Metrik efisiensi, efektivitas, dan keadilan diintegrasikan dalam penelitian ini untuk mengukur kinerja sistem secara kuantitatif pada kondisi bencana (Liu et al., 2021). Menurut Beamon and Balcik (2008), bantuan kemanusiaan seharusnya mempertimbangkan distribusi bantuan yang adil kepada seluruh penerima manfaat. Meskipun konsep “keadilan” telah banyak dibahas dalam logistik kemanusiaan, sebagian besar penelitian berfokus pada distribusi bantuan. Konsep tersebut kemudian diadopsi dalam proses penyelamatan dan evakuasi. Penelitian oleh Ozgun et al (2018) menekankan pentingnya penyelamatan yang cepat bagi lokasi permintaan yang berada dalam cakupan waktu tempuh tertentu. Demikian pula, Beraldi and Bruni (2009) dan Zhang and Jiang (2014),) menggunakan jarak tempuh sebagai kriteria untuk mewujudkan penyelamatan yang cepat dalam operasi bantuan dan pengiriman layanan medis darurat. Penelitian lainnya menyatakan bahwa keadilan dapat dicapai melalui berbagai kriteria seperti waktu kedatangan maksimum (Tofighi et al., 2016), skor aksesibilitas terburuk (Noyan et al., 2016) atau biaya deprivasi minimum akibat keterbatasan akses terhadap kebutuhan (Khodaei et al., 2022). Dalam penelitian ini, konsep keadilan juga diterapkan pada proses evakuasi. Untuk mencegah keterlambatan yang signifikan pada kelompok pengungsi tertentu, dikembangkan model berbasis keadilan dengan meminimalkan perbedaan waktu penyelesaian evakuasi, sehingga distribusi layanan evakuasi dapat dilakukan secara lebih merata dan adil.

4.2.Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan kebutuhan penelitian, maka rumusan masalah dalam studi ini adalah:

- a. Bagaimana menentukan lokasi dan jenis stasiun pengisian daya yang optimal untuk mendukung operasi evakuasi massal menggunakan truk listrik pada kawasan rawan bencana erupsi Gunung Semeru?

- b. Bagaimana merancang rute evakuasi yang efektif dan efisien menggunakan truk listrik dengan mempertimbangkan keterbatasan kapasitas baterai, kebutuhan pengisian daya, serta karakteristik jaringan transportasi pada wilayah terdampak bencana?
- c. Bagaimana menerapkan konsep keadilan (*fairness*) dalam proses evakuasi sehingga perbedaan waktu penyelesaian evakuasi antar kelompok pengungsi dapat diminimalkan?

4.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Menentukan lokasi dan jenis stasiun pengisian daya yang optimal untuk mendukung pelaksanaan evakuasi massal menggunakan truk listrik di kawasan rawan bencana erupsi Gunung Semeru.
- b. Merancang model matematis berbasis Electric Truck Location Routing Problem with Pickup, Transport, and Recharging (ETLRP-PTR) untuk menghasilkan rute evakuasi yang efektif dan efisien dengan mempertimbangkan kebutuhan pengisian daya kendaraan listrik.
- c. Menganalisis penerapan konsep keadilan (*fairness*) dalam proses evakuasi dengan meminimalkan kesenjangan waktu penyelesaian evakuasi antar kelompok pengungsi guna meningkatkan pemerataan pelayanan evakuasi.

4.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan sejumlah manfaat, baik secara teoretis maupun praktis, sebagai berikut:

- a. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang logistik kemanusiaan, khususnya terkait penerapan kendaraan listrik dalam proses evakuasi bencana.
- b. Menghasilkan model pengambilan keputusan untuk penentuan lokasi stasiun pengisian daya, pemilihan jenis pengisi daya, dan perencanaan rute evakuasi menggunakan truk listrik pada kondisi darurat.

- c. Menjadi bahan pertimbangan bagi pemerintah dan pemangku kepentingan dalam menyusun strategi dan kebijakan evakuasi bencana yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan.
- d. Mendukung pengembangan sistem transportasi ramah lingkungan melalui pemanfaatan truk listrik sebagai alternatif kendaraan evakuasi yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan emisi karbon.
- e. Memberikan rekomendasi perencanaan infrastruktur pengisian daya di kawasan rawan bencana guna meningkatkan kesiapsiagaan dan kapasitas respons terhadap kejadian bencana di masa mendatang.

4.5. Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus, batasan masalah ditetapkan sebagai berikut:

- d. Penelitian difokuskan pada skenario evakuasi bencana erupsi Gunung Semeru di Kabupaten Lumajang berdasarkan data kawasan rawan bencana, titik kumpul, dan lokasi pengungsian yang tersedia.
- e. Jenis kendaraan yang digunakan dalam penelitian dibatasi pada truk listrik (Electric Truck/ET) sebagai sarana transportasi untuk proses evakuasi masyarakat terdampak bencana.
- f. Model yang dikembangkan hanya mempertimbangkan lokasi stasiun pengisian daya, jenis pengisi daya, perencanaan rute evakuasi, dan kebutuhan pengisian energi kendaraan, tanpa mempertimbangkan kerusakan infrastruktur jalan, kondisi lalu lintas dinamis, maupun gangguan operasional lainnya selama bencana.
- g. Analisis dilakukan dengan asumsi seluruh data input, seperti jumlah pengungsi, kapasitas kendaraan, kapasitas stasiun pengisian daya, jarak tempuh, dan kebutuhan energi kendaraan, telah diketahui dan bersifat deterministik.

4.6. Sistematika Penulisan

Laporan penelitian ini disusun dalam lima bab agar pembahasan dapat tersaji secara sistematis dan mudah dipahami. Bab I Pendahuluan berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan

masalah, serta sistematika penulisan laporan. Bab II Tinjauan Pustaka menguraikan teori-teori yang mendukung penelitian serta penelitian terdahulu yang relevan sebagai landasan pengembangan model. Bab III Metodologi Penelitian menjelaskan tahapan penelitian yang meliputi identifikasi masalah, pengumpulan dan pengolahan data, pengembangan model matematis Electric Truck Location Routing Problem with Pickup, Transport, and Recharging (ETLRP-PTR), penentuan parameter penelitian, penyusunan skenario pengujian, serta metode penyelesaian dan analisis hasil. Bab IV Hasil dan Pembahasan menyajikan hasil implementasi model ETLRP-PTR pada kasus evakuasi bencana erupsi Gunung Semeru di Kabupaten Lumajang. Pada bab ini dibahas hasil penentuan lokasi dan jenis stasiun pengisian daya, rute evakuasi yang dihasilkan, analisis kebutuhan pengisian energi kendaraan, perbandingan skenario pengisian daya penuh dan parsial, serta evaluasi kinerja sistem berdasarkan aspek efisiensi, efektivitas, dan keadilan. Bab V Kesimpulan dan Saran berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, serta saran untuk pengembangan model, penerapan kendaraan listrik dalam evakuasi bencana, dan penelitian selanjutnya..

