

PEMODELAN DAN SIMULASI ESTIMASI KEBUTUHAN BIAYA LOGISTIK UNTUK EVAKUASI BENCANA SESAR LEMBANG DI KECAMATAN LEMBANG

*MODELING AND SIMULATION OF ESTIMATION OF LOGISTICS COST NEEDS FOR
LEMBANG FAULT DISASTER EVACUATION IN LEMBANG DISTRICT*

Eva Natalie Sitompul¹, Stanislaus Didi Katon Prakoso², Muhammad Imam Hutomo³, Faisal Adie
Nugraha⁴, Septian Glenn Alexander Godjang⁵

Email: evanataliesvh@gmail.com

Universitas Logistik dan Bisnis Internasional, Jl. Sariasih No.54, Bandung, 4015, Indonesia

ABSTRAK

Indonesia sangat rentan terhadap bahaya gempa bumi karena keberadaan sistem patahan aktif di berbagai wilayah. Salah satu patahan aktif signifikan yang berpotensi menghasilkan gempa bumi berkekuatan besar adalah Sesar Lembang, yang membentang di wilayah Bandung utara dan sekitarnya. Kecamatan Lembang, sebagai daerah padat penduduk dan tujuan wisata utama, menghadapi risiko tinggi dampak seismik yang dipicu oleh pergerakan Sesar Lembang. Tantangan kritis dalam penanggulangan bencana di wilayah ini adalah belum adanya kerangka kerja yang mapan untuk memperkirakan kebutuhan dana logistik yang terukur untuk operasi evakuasi. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan mensimulasikan estimasi kebutuhan biaya bantuan selama periode tanggap darurat tujuh hari menggunakan AnyLogic. Metodologi penelitian meliputi tinjauan pustaka, survei lapangan yang dilakukan di Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kecamatan Bandung Barat, dan pemodelan sistem berbasis pendekatan rantai pasok dan dinamika sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kebutuhan biaya logistik dan evakuasi melebihi anggaran penanggulangan bencana yang dialokasikan secara rutin. Model yang dikembangkan berhasil merepresentasikan estimasi kebutuhan pendanaan yang lebih realistis. Temuan studi ini diharapkan dapat menjadi referensi berharga bagi pemerintah daerah dalam memperkuat kesiapsiagaan bencana berbasis kecukupan pendanaan untuk Sesar Lembang.

Kata kunci: Logistik kemanusiaan, Biaya logistik, Sesar Lembang, AnyLogic.

ABSTRACT

Indonesia is highly vulnerable to earthquakes due to active fault systems, including the Lembang Fault in northern Bandung. This fault poses significant risk to densely populated and tourism areas, where disaster preparedness remains limited, particularly in estimating logistical funding needs for evacuation. This study aims to model and simulate logistics and evacuation cost requirements during a seven-day emergency response period using AnyLogic. The methodology includes literature review, field surveys at the Regional Disaster Management Agency (BPBD), and system modeling based on supply chain and system dynamics approaches. Simulation results indicate that required logistics and evacuation costs exceed existing disaster management budgets. The proposed model provides a more realistic cost estimation to support improved disaster preparedness and funding planning.

Keywords: Humanitarian logistics, Logistics cost, Lembang Fault, AnyLogic.

1. PENDAHULUAN

Indonesia secara luas dikenal sebagai salah satu negara

yang paling rawan bencana di dunia karena kondisi geologisnya yang kompleks dan posisi geografisnya di sepanjang Cincin Api Pasifik (Prakoso et al., 2022). Wilayah ini ditandai oleh pertemuan beberapa lempeng



tektonik utama, termasuk lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik, yang secara terus-menerus menghasilkan aktivitas seismik (Zabarinskaya et al., 2021). Gempa bumi, letusan gunung berapi, tsunami, tanah longsor, dan banjir terjadi dengan frekuensi dan magnitudo yang tinggi, seringkali mengakibatkan kerugian yang signifikan bagi manusia, ekonomi, dan infrastruktur. Di antara semua bahaya ini, gempa bumi merupakan salah satu ancaman paling merusak karena kejadiannya yang tiba-tiba, sulit diprediksi, dan dampak berantai yang berdampak pada infrastruktur penting, sistem transportasi, dan keselamatan penduduk (Li, 2023).

Dalam beberapa dekade terakhir, tren urbanisasi yang meningkat di zona seismik berisiko tinggi telah memperburuk kerentanan bencana di Indonesia. Pertumbuhan penduduk yang pesat dan meluasnya kegiatan ekonomi di wilayah perkotaan dan pinggiran kota telah mendorong perkembangan permukiman, fasilitas pariwisata, dan jaringan transportasi di lokasi-lokasi yang terpapar bahaya geologis. Fenomena ini khususnya terlihat di Provinsi Jawa Barat, yang memiliki populasi padat dan berfungsi sebagai koridor ekonomi dan pariwisata yang strategis (Salim & Faoziyah, 2022). Akibatnya, risiko bencana di wilayah ini tidak hanya dipengaruhi oleh intensitas bahaya alam tetapi juga oleh tingkat paparan dan kerentanan sosial masyarakat yang tinggal di wilayah rawan bahaya.

Salah satu sumber gempa bumi yang krusial di Jawa Barat adalah Sesar Lembang, yaitu sesar geser aktif yang membentang di wilayah Bandung bagian utara (Fauziah et al., 2023). Studi geologi telah mengidentifikasi patahan ini sebagai patahan yang mampu menghasilkan gempa bumi sedang hingga kuat yang dapat mengganggu sistem perkotaan secara signifikan (Hussain et al., 2023). Sesar ini melewati atau dekat wilayah yang padat penduduk, termasuk Kecamatan Lembang, Kecamatan Bandung, dan wilayah perkotaan di sekitarnya (Kinasih et al., 2023). Kepentingan strategis Lembang sebagai destinasi wisata, pusat pertanian, dan kawasan permukiman semakin memperkuat potensi dampak sosial-ekonomi dari sebuah peristiwa seismik besar. Objek wisata, hotel, restoran, dan infrastruktur pendukungnya memusatkan banyak orang di area terbatas, sehingga menciptakan tantangan evakuasi yang kompleks jika terjadi bencana.

Risiko yang terkait dengan gempa bumi berbasis patahan seperti yang dihasilkan oleh Sesar Lembang tidak hanya terkait dengan guncangan tanah tetapi juga dengan bahaya sekunder. Bahaya-bahaya ini meliputi tanah longsor, runtuhnya bangunan, gangguan jaringan jalan, kebakaran, dan potensi kegagalan jalur vital seperti listrik, pasokan air, dan telekomunikasi. Efek berantai seperti ini seringkali mempersulit operasi

tanggap darurat dan secara signifikan meningkatkan urgensi evakuasi dan manajemen logistik yang terkoordinasi dengan baik. Dalam banyak kasus, kecepatan dan efisiensi operasi logistik menentukan perbedaan antara respons bencana yang terkelola dan krisis kemanusiaan berskala besar (Fredin, 2022).

Logistik kemanusiaan memainkan peran sentral dalam pengurangan risiko bencana dan kerangka kerja tanggap darurat di seluruh dunia (Negi, 2022). Ini mencakup perencanaan, implementasi, dan pengendalian aliran dan penyimpanan barang, jasa, dan informasi terkait yang efisien dari titik asal hingga titik konsumsi dengan tujuan untuk meringankan penderitaan populasi rentan (Martin & Kotzab, 2024). Berbeda dengan logistik komersial, logistik kemanusiaan harus beroperasi dalam lingkungan yang sangat tidak pasti, kritis waktu, dan terbatas sumber daya. Ketidakpastian peristiwa bencana membutuhkan sistem logistik yang fleksibel, tangguh, dan adaptif yang mampu merespons permintaan yang berubah dengan cepat.

Dalam konteks Indonesia, manajemen logistik bencana menghadapi sejumlah tantangan struktural dan operasional (Indra Kristian, 2022). Hal ini mencakup keterbatasan pendanaan, koordinasi yang terfragmentasi antar pemangku kepentingan, infrastruktur transportasi yang tidak memadai di beberapa wilayah, dan terbatasnya ketersediaan data *real-time* yang andal. Pemerintah daerah seringkali mengandalkan alokasi anggaran rutin untuk penanggulangan bencana yang utamanya dirancang untuk keadaan darurat skala kecil hingga menengah. Namun, kejadian seismik berdampak tinggi, seperti yang berpotensi ditimbulkan oleh Sesar Lembang, membutuhkan sumber daya keuangan yang jauh lebih besar dan perencanaan logistik yang lebih canggih daripada yang saat ini tersedia dalam anggaran bencana rutin.

Masalah yang sering terjadi dalam kesiapsiagaan bencana adalah tidak adanya estimasi biaya logistik (Lindell, 2024). Perencanaan anggaran seringkali didasarkan pada rata-rata historis bencana yang lebih kecil, yang mungkin tidak mencerminkan kebutuhan sumber daya aktual untuk kejadian berskala besar. Kesenjangan ini menimbulkan risiko kekurangan dana untuk operasi darurat, yang mengakibatkan keterlambatan penyaluran bantuan, serta peningkatan mortalitas dan morbiditas di antara populasi terdampak. Akibatnya, pemerintah daerah menghadapi kesulitan dalam merancang rencana kontinjensi yang realistis dan berkelanjutan secara finansial.

Dalam beberapa tahun terakhir, pemodelan dan simulasi telah muncul sebagai alat yang ampuh untuk mendukung pengambilan keputusan dalam manajemen bencana. Melalui penggunaan model komputasi, para

perencana dapat mengevaluasi berbagai skenario bencana, menilai kinerja sistem logistik, dan memperkirakan kebutuhan sumber daya dalam berbagai kondisi. Platform pemodelan rantai pasok, seperti AnyLogic, memungkinkan studi interaksi dinamis antara pergerakan penduduk, ketersediaan sumber daya, kapasitas transportasi, dan kendala keuangan dari waktu ke waktu (Liu et al., 2024).

Integrasi perangkat-perangkat ini menawarkan kerangka kerja yang komprehensif untuk memahami sistem logistik kemanusiaan dalam konteks bencana. Dengan menggabungkan pemodelan jaringan spasial dengan simulasi sistem dinamis, para pembuat kebijakan dapat menguji jaringan penyaluran bantuan sebelum bencana yang sebenarnya terjadi. Pendekatan proaktif ini semakin diakui sebagai praktik terbaik dalam manajemen risiko bencana, karena meningkatkan kesiapsiagaan, mengurangi ketidakpastian, dan mendukung pembuatan kebijakan berbasis bukti.

Meskipun tersedianya perangkat canggih tersebut, penerapannya dalam perencanaan bencana tingkat lokal di Indonesia masih terbatas. Banyak lembaga penanggulangan bencana daerah masih mengandalkan perhitungan manual, peta statis, dan pengambilan keputusan berbasis pengalaman. Meskipun pendekatan-pendekatan ini mungkin memadai untuk kejadian-kejadian yang berulang dan berskala kecil, pendekatan-pendekatan ini belum memadai untuk mengatasi kompleksitas dan skala bencana gempa bumi berbasis patahan di wilayah-wilayah padat penduduk. Oleh karena itu, terdapat kebutuhan mendesak akan studi-studi yang menunjukkan penerapan praktis dan spesifik konteks dari teknologi pemodelan dan simulasi dalam perencanaan logistik kemanusiaan.

Kecamatan Lembang merupakan studi kasus yang sangat relevan untuk penelitian semacam ini. Kecamatan ini memiliki beberapa karakteristik yang meningkatkan risiko, termasuk kepadatan penduduk yang tinggi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, ketergantungan yang kuat pada pariwisata, topografi yang kompleks, dan kedekatan dengan zona Sesar Lembang (Handayani et al., 2023). Potensi gangguan jaringan jalan akibat tanah longsor dan keruntuhan struktur semakin mempersulit perencanaan evakuasi dan penyaluran bantuan. Dalam konteks ini, pemahaman tentang dimensi spasial dan finansial logistik evakuasi sangat penting untuk meningkatkan kesiapsiagaan bencana.

Table 1. Data Jumlah Penduduk Kabupaten Bandung Barat (2023)

Kecamatan	Jumlah Penduduk
-----------	-----------------

1	Rongga	62.969
2	Gununghalu	81.759
3	Sindangkerta	76.637
4	Cililin	99.396
5	Cihampelas	141.519
6	Cipongkor	104.915
7	Batujajar	113.617
8	Saguling	35.634
9	Cipatat	145.548
10	Padalarang	187.710
11	Ngamprah	183.294
12	Parongpong	116.680
13	Lembang	203.232
14	Cisarua	82.300
15	Cikalongwetan	133.081
16	Cipeundeuy	91.345
Bandung Barat		1.859.636

(Sumber: Badan Pusat Statistik, 2023)

Lebih lanjut, dimensi finansial logistik kemanusiaan masih kurang dieksplorasi dalam banyak studi kebencanaan. Meskipun perhatian signifikan telah diberikan pada optimalisasi rute, lokasi tempat berlindung, dan manajemen inventaris, lebih sedikit studi yang berfokus secara eksplisit pada pemodelan dan simulasi kebutuhan biaya. Estimasi biaya sangat penting untuk menjembatani kesenjangan antara perencanaan teknis dan implementasi kebijakan, karena keterbatasan anggaran seringkali menentukan kelayakan strategi yang diusulkan. Dengan memberikan estimasi biaya logistik dan evakuasi yang realistis, para peneliti dapat membantu pemerintah daerah dalam menyelaraskan rencana kesiapsiagaan bencana dengan sumber daya keuangan yang tersedia. Mengingat tantangan-tantangan ini, studi ini mengusulkan pendekatan pemodelan dan simulasi yang komprehensif untuk memperkirakan kebutuhan biaya logistik dan evakuasi untuk potensi bencana gempa bumi yang dipicu oleh aktivitas di sepanjang Sesar Lembang.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji logistik evakuasi bencana gempa bumi dengan fokus yang beragam, mulai dari optimasi rute evakuasi, penentuan lokasi tempat penampungan, hingga analisis kapasitas jaringan transportasi (Wu & Chen, 2023). Sebagian studi menekankan aspek spasial dan operasional, seperti minimisasi waktu tempuh dan pengurangan kemacetan (Zhang & Cui, 2021), sementara penelitian lainnya berfokus pada manajemen persediaan bantuan dan koordinasi distribusi (Sakiani et al., 2020). Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut belum secara eksplisit memodelkan dan mensimulasikan

kebutuhan biaya logistik evakuasi secara terintegrasi dengan dinamika populasi terdampak dan sumber pendanaan di tingkat lokal. Estimasi biaya umumnya disajikan secara statis atau sebagai keluaran tambahan, bukan sebagai variabel utama dalam sistem dinamis. Selain itu, konteks lokal berbasis patahan aktif, seperti Sesar Lembang, masih relatif jarang dikaji dengan pendekatan simulasi finansial yang mempertimbangkan keterbatasan anggaran daerah. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah keilmuan dengan mengembangkan model simulasi yang secara khusus berfokus pada estimasi kebutuhan biaya logistik evakuasi berbasis skenario pendanaan lokal, sehingga melengkapi studi-studi sebelumnya yang lebih menitikberatkan pada aspek teknis distribusi.

Dengan memanfaatkan AnyLogic, penelitian ini bertujuan untuk membangun representasi digital sistem logistik evakuasi di Kecamatan Lembang. Representasi ini memungkinkan simulasi penyaluran sumber daya dan pemanfaatan anggaran selama periode tanggap darurat yang telah ditentukan.

Kebaruan studi ini terletak pada fokus gabungannya pada pemodelan logistik spasial dan simulasi finansial dalam konteks risiko gempa bumi berbasis patahan lokal. Alih-alih hanya mengandalkan data tingkat nasional atau provinsi, penelitian ini menekankan realitas operasional lokal, seperti kapasitas jalan, ketersediaan tempat berlindung, dan keterbatasan sumber daya kelembagaan. Pendekatan lokal ini memastikan bahwa hasilnya dapat langsung diterapkan pada kebutuhan lembaga penanggulangan bencana regional.

Lebih lanjut, studi ini berkontribusi pada pengembangan pengetahuan yang lebih luas di bidang logistik kemanusiaan dengan menunjukkan bagaimana perangkat simulasi canggih dapat diterapkan dalam konteks negara berkembang, di mana ketersediaan data dan kapasitas kelembagaan mungkin terbatas. Temuan ini diharapkan dapat memberikan wawasan tidak hanya bagi Kecamatan Lembang, tetapi juga bagi wilayah lain dengan karakteristik geologis dan sosial-ekonomi yang serupa.

Pada akhirnya, kesiapsiagaan bencana yang efektif membutuhkan integrasi pengetahuan ilmiah, perangkat teknologi, koordinasi kelembagaan, dan perencanaan keuangan. Dengan menyediakan model logistik evakuasi dan kebutuhan biaya yang terstruktur dan berbasis bukti, studi ini berupaya mendukung praktik manajemen bencana yang lebih tangguh dan adaptif. Hasil studi ini diharapkan dapat membantu para pembuat kebijakan, perencana tanggap darurat, dan organisasi kemanusiaan dalam meningkatkan kesiapsiagaan, mengurangi waktu respons, dan

meminimalkan kerugian manusia dan ekonomi akibat gempa bumi yang diakibatkan oleh Sesar Lembang.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan desain penelitian kuantitatif dengan pendekatan berbasis simulasi untuk menganalisis kebutuhan biaya logistik evakuasi akibat potensi aktivitas seismik di sepanjang Sesar Lembang. Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan terstruktur, diawali dengan tinjauan pustaka komprehensif untuk mengidentifikasi landasan teori terkait logistik kemanusiaan, evakuasi bencana, dan pemodelan biaya. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan dan wawancara semi-terstruktur dengan para pemangku kepentingan di Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Bandung Barat, yang dilengkapi dengan data sekunder berupa statistik demografi resmi, data jaringan jalan, kapasitas Tempat Evakuasi Akhir (TEA), serta dokumen perencanaan kontinjensi bencana. Selanjutnya, perangkat lunak AnyLogic digunakan untuk mengembangkan model simulasi dinamika sistem yang menangkap interaksi antara jumlah penduduk terpapar, kebutuhan logistik harian, tingkat hunian tempat penampungan, serta pemanfaatan anggaran selama periode tanggap darurat tujuh hari.

Analisis skenario dalam penelitian ini difokuskan pada variasi parameter kebijakan pendanaan, dengan dua variabel kunci yang dimanipulasi, yaitu besaran dana *refund* dan besaran dana Desa Tangguh Bencana. Dana *refund* didefinisikan sebagai dana tambahan bersifat *reimbursable* yang tidak termasuk dalam anggaran rutin penanggulangan bencana, namun dapat dimanfaatkan sementara ketika terjadi keadaan darurat besar. Dana ini merepresentasikan sumber pendanaan cadangan yang dapat digunakan untuk menutup kekurangan biaya evakuasi, dan pada tahap selanjutnya dapat diklaim, dipulihkan, atau direstitusi melalui mekanisme pendanaan formal, seperti dana tidak terduga atau dukungan dari pemerintah pusat dan provinsi. Selain itu, variabel Desa Tangguh Bencana diperlakukan sebagai bentuk sumber daya berbasis komunitas yang dihimpun secara sukarela dari masyarakat, mencakup kontribusi sumber daya manusia, material, peralatan, dan barang kebutuhan dasar lainnya. Untuk keperluan pemodelan dan simulasi, seluruh kontribusi tersebut dikonversi ke dalam nilai moneter (rupiah) berdasarkan asumsi harga satuan yang berlaku, sehingga dapat diperlakukan secara ekuivalen sebagai input finansial dalam sistem. Dalam model simulasi, dana *refund* dan sumber daya Desa Tangguh Bencana digunakan sebagai variabel input pendanaan yang nilainya divariasikan untuk mengamati sensitivitas sistem terhadap tambahan sumber dana, khususnya dalam menutup defisit biaya logistik evakuasi dan menilai kecukupan struktur

pendanaan.

Kedua variabel tersebut dipilih karena merepresentasikan mekanisme pendanaan tambahan yang realistis dan dapat diaktifkan dalam konteks operasional BPBD ketika anggaran rutin tidak mencukupi untuk menangani bencana berskala besar. Sementara itu, parameter lainnya, termasuk jumlah penduduk terpapar, kapasitas TEA, kebutuhan logistik harian (makanan, minuman, dan transportasi), durasi simulasi tujuh hari, serta struktur jaringan logistik, ditetapkan tetap (*fixed*) untuk menjaga konsistensi skenario dan memungkinkan analisis sensitivitas sistem terhadap perubahan pendanaan. Dengan demikian, tujuan analisis skenario bukan untuk memodifikasi karakteristik bencana atau sistem logistik secara keseluruhan, melainkan untuk menguji sejauh mana variasi sumber dana tambahan mampu menutup defisit biaya evakuasi dan meningkatkan kecukupan pendanaan sistem.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil olahan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa tekanan evakuasi di Kecamatan Lembang bukan sekadar cerminan jumlah penduduk secara keseluruhan, melainkan hasil pembobotan risiko spasial yang diterapkan pada data demografi. Setelah menerapkan koefisien paparan dan pembobotan kerentanan, model olahan menunjukkan adanya konsentrasi segmen penduduk berisiko tinggi yang tidak proporsional di beberapa kecamatan. Secara ilmiah, fenomena ini terjadi karena kepadatan penduduk berinteraksi secara nonlinier dengan intensitas bahaya seismik, sehingga menghasilkan peningkatan permintaan evakuasi di zona-zona yang tumpang tindih antara paparan sosial dan risiko geologis. Keluaran olahan ini menegaskan bahwa data demografis mentah saja tidak cukup untuk menjelaskan kompleksitas evakuasi, dan menekankan pentingnya pemodelan populasi yang disesuaikan dengan risiko untuk perencanaan logistik bencana.

Table 2. Data Potensi Populasi Terpapar Bencana

Kecamatan	Jumlah Penduduk Terpapar		
	Low	Medium	High
Batujajar	8,831	73,018	9,321
Cihampelas	28,446	83,050	6,538
Cikalong Wetan	47,572	63,733	1,008
Cililin	31,137	53,071	1,501
Cipatat	29,196	95,987	2,342
Cipeundeuy	57,933	21,473	110
Cipongkor	35,646	46,640	624
Cisarua	2,488	10,391	58,507
Gununghalu	33,568	39,063	451
Lembang	-	29,218	155,968
Ngamprah	3,773	113,462	45,061
Padalarang	6,513	121,283	38,349
Parompong	219	23,803	80,371
Rongga	23,189	30,740	287
Saguling	10,015	18,888	570
Sindangkerta	23,166	41,939	375
Total	341,692	865,759	401,383

(Sumber: Data BPBD Kabupaten Bandung Barat 2024)

Profil paparan bencana yang ditunjukkan pada Tabel 2 memberikan struktur risiko yang berbeda dengan mengkategorikan populasi ke dalam tingkat kerentanan rendah, sedang, dan tinggi. Secara ilmiah, stratifikasi ini mencerminkan interaksi antara kedekatan bahaya, pola penggunaan lahan, dan kerentanan fisik permukiman. Kecamatan seperti Lembang, Padalarang, dan Ngamprah menunjukkan proporsi populasi paparan sedang hingga tinggi yang jauh lebih tinggi, yang menjelaskan mengapa permintaan evakuasi tidak hanya bergantung pada jumlah populasi total tetapi juga intensitas bahaya spasial. Pola ini mendukung teori paparan risiko diferensial, yang menyatakan bahwa dampak bencana terkonsentrasi di zona-zona di mana risiko geologis tumpang tindih dengan aktivitas manusia yang padat. Akibatnya, perencanaan logistik evakuasi harus memprioritaskan wilayah dengan intensitas paparan tinggi daripada hanya mengandalkan jumlah populasi total.

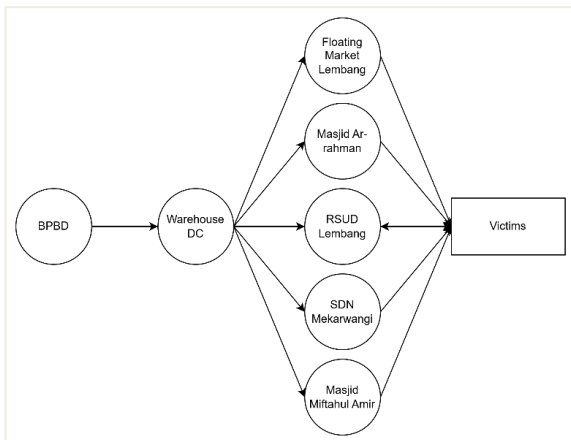
Table 3. Data Tempat Evakuasi Akhir (TEA) dan Daya Tampung

Nama TEA	Total Daya Tampung (Jiwa)	Perkiraan Jumlah Penduduk Terpapar
<i>Floating Market</i> Lembang	173.026	156.480

Masjid Ar-Rahman	34.978	34.825
RSUD Lembang	21.524	21.100
SDN Mekarwangi	7.546	6.490
Masjid Miftahul Amir	12.171	12.055

Sumber: (Kamila & Ekasari, 2022)

Tabel 3 menyajikan data Tempat Evakuasi Akhir (TEA) beserta total daya tampung dan perkiraan jumlah penduduk terpapar yang dilayani oleh masing-masing lokasi evakuasi di Kecamatan Lembang. Data menunjukkan bahwa *Floating Market* Lembang memiliki kapasitas terbesar, yaitu 173.026 jiwa, dengan estimasi jumlah penduduk terpapar sebanyak 156.480 jiwa, sehingga menjadi lokasi utama penampungan. Masjid Ar-Rahman dan Masjid Miftahul Amir memiliki kapasitas yang relatif seimbang dengan jumlah penduduk terpapar, menunjukkan tingkat pemanfaatan yang tinggi. RSUD Lembang dan SDN Mekarwangi berperan sebagai fasilitas pendukung dengan kapasitas lebih kecil, terutama untuk pelayanan kesehatan dan kebutuhan khusus. Secara keseluruhan, tabel ini menunjukkan bahwa kapasitas TEA secara umum dirancang mendekati jumlah penduduk terdampak untuk meminimalkan kelebihan beban.



Gambar 1. Struktur Model Supply Chain

Gambar 1 menggambarkan jaringan distribusi bantuan bencana sederhana yang akan digunakan sebagai dasar dari pemilihan variable uji untuk disimulasikan menggunakan AnyLogic. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen inti: Kantor Bupati Kecamatan Bandung Barat, yang berfungsi sebagai unit komando dan kendali pusat untuk distribusi bantuan; Gudang Pusat Distribusi (*Warehouse Distribution Center*), yang berfungsi sebagai fasilitas penyimpanan utama untuk semua jenis pasokan kemanusiaan; dan beberapa tempat penampungan. Tempat penampungan 1 (*Floating Market* Lembang), 2 (Masjid Ar-Rahman), 4 (SD

Mekarwangi), dan 5 (Masjid Miftahul Amir) beroperasi sebagai fasilitas akomodasi sementara bagi penduduk terdampak bencana dan bertindak sebagai titik distribusi barang-barang bantuan, sementara Tempat Penampungan 3 secara khusus ditunjuk sebagai fasilitas medis (rumah sakit) untuk menyediakan layanan kesehatan darurat. Individu terdampak bencana dianggap sebagai penerima manfaat langsung dari bantuan yang diberikan.

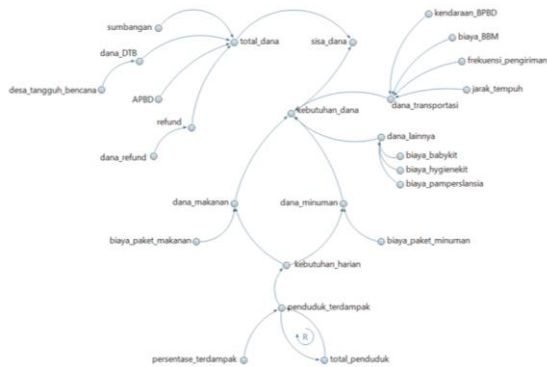
Table 4. Parameterisasi

Nama	Tipe	Nilai	Satuan	Persamaan
sumbangan	Parameter	25000000	Rupiah	
desa_tanggung_bencana	Parameter	0	Rupiah	
APBD	Parameter	63423542	Rupiah	
dana_refund	Parameter	0	Rupiah	
kendaraan_BPBD	Parameter	7	Unit	
biaya_BBM	Parameter	10000	Rupiah	
frekuensi_pengiriman	Parameter	2	Trip	
jarak_tempuh	Parameter	132.1	Km	
biaya_paket_makanan	Parameter	225000	Rupiah	
biaya_paket_minuman	Parameter	26000	Rupiah	
biaya_babykit	Parameter	472500	Rupiah	
biaya_hygienekit	Parameter	760400	Rupiah	
biaya_pamperslansia	Parameter	52000	Rupiah	
persentase_terdampak	Parameter	77.52	Persen	
dama_DTB	Dynamic Variable		Rupiah	tab_DTB (desa_tanggung_bencana)
refund	Dynamic Variable		Rupiah	biaya_refund (dana_refund)
sisa_dana	Dynamic Variable		Rupiah	total_dana - kebutuhan_dana
kebutuhan_dana	Dynamic Variable		Rupiah	dana_makanan + dana_minuman + dana_lainnya + dana_transportasi
dama_transportasi	Dynamic Variable		Rupiah	(tab_kendaraanBPBD (kendaraan_BPBD)) * biaya_BBM * frekuensi_pengiriman * jarak_tempuh
dama_lainnya	Dynamic Variable		Rupiah	biaya_babykit + biaya_hygienekit + biaya_pamperslansia
kebutuhan_harian	Dynamic Variable		Paket	total_penduduk / 4
alur_pendanaan	Flow		Rupiah	delay(pulseTrain(7, 1, 1, 8), 0.0000000001) * (APBD + dana_DTB + sumbangan + refund)
kebutuhan_makanan	Flow		Rupiah	delay(pulseTrain(1, 1, 6, 7), 0.0000000001) * (kebutuhan_harian + biaya_paket_makanan)
kebutuhan_minuman	Flow		Rupiah	delay(pulseTrain(1, 1, 6, 7), 0.0000000001) * (kebutuhan_harian + biaya_paket_minuman)
penduduk_terdampak	Flow		Rupiah	delay(pulseTrain(7, 1, 1, 8), 0.0000000001) * (persentase_terdampak * total_penduduk)
total_dana	Stock	0	Rupiah	alur_pendanaan
dama_makanan	Stock	0	Rupiah	kebutuhan_makanan
dama_minuman	Stock	0	Rupiah	kebutuhan_minuman
total_penduduk_terdampak	Stock	0	Rupiah	penduduk_terdampak

Tabel 4 menunjukkan data parameterisasi setiap variabel. Tabel ini terdiri dari rincian tipe, nilai, satuan, dan persamaan tiap variabel yang digunakan untuk membentuk *Stock flow Diagram* (SFD) dan *Causal Loop Diagram* (CLD). Proses verifikasi dan validasi model akan dilakukan pada *Stock Flow Diagram* (SFD) yang dikembangkan dalam AnyLogic.

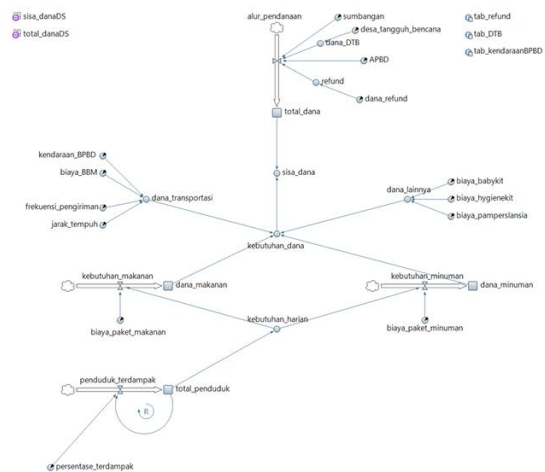
Model dapat dikatakan terverifikasi jika seluruh rumusan matematika dan hubungan antar variabel telah berjalan tanpa kesalahan, yang ditunjukkan oleh proses simulasi yang dapat dijalankan secara konsisten hingga hari ke-7 tanpa eror, serta penggunaan variabel yang konsisten dari segi penamaan dan struktur. Validasi model dilakukan melalui penilaian kesesuaian perilaku model dengan kondisi nyata, khususnya pada aliran pendanaan logistik evakuasi. Struktur pendanaan dalam

model mencerminkan praktik aktual, dimulai dari penerimaan anggaran rutin (APBD), penambahan sumbangan, hingga aktivasi dana *refund* untuk menutup defisit pendanaan, sebagaimana dikonfirmasi melalui wawancara dan data pendukung. Meskipun beberapa asumsi digunakan untuk melengkapi nilai variabel yang sulit diukur secara langsung, secara keseluruhan model mampu merepresentasikan dinamika pendanaan logistik evakuasi secara realistis.



Gambar 2. Causal Loop Diagram (CLD)

Gambar 2 menunjukkan hubungan antar variabel dalam sistem ini, bahwa total dana dipengaruhi secara positif oleh sumbangan, sumber daya dari Desa Tangguh Bencana, APBD, dan dana *refund*, sehingga peningkatan pada salah satu sumber dana tersebut akan meningkatkan total dana yang tersedia. Besarnya sisa dana ditentukan oleh selisih antara total dana dan kebutuhan dana, sehingga semakin besar kebutuhan dana, semakin kecil sisa dana yang tersisa. Kebutuhan dana sendiri meningkat seiring dengan bertambahnya biaya makanan, minuman, transportasi, dan kebutuhan lainnya. Selain itu, kebutuhan harian dipengaruhi secara positif oleh jumlah penduduk terdampak, di mana kenaikan persentase penduduk terdampak akan meningkatkan kebutuhan harian dan secara langsung memperbesar kebutuhan dana untuk makanan dan minuman. Sistem ini juga menunjukkan adanya *loop* penguatan, di mana peningkatan jumlah total penduduk akan mendorong peningkatan jumlah penduduk terdampak, sehingga memperbesar tekanan terhadap kebutuhan logistik dan pendanaan.



Gambar 3. Stock Flow Diagram (SFD)

Dalam SFD pada Gambar 3, terdapat 4 *flow* atau aliran utama yang masing-masing memiliki 4 *output*. Adapun *flow* dalam SFD ini adalah alur pendanaan, kebutuhan makanan, kebutuhan minuman, serta penduduk terdampak.

Berdasarkan CLD dan SFD, dibuatlah model skenario simulasi yang dijalankan (*running*) satu per satu hingga tiap skenario berhasil berjalan selama 7 hari tanpa adanya eror. Adapun skenario yang digunakan, dapat dirincikan sebagai berikut:

1. Kondisi eksisting atau skenario 0 menggambarkan kondisi awal berdasarkan situasi yang terjadi di lapangan. Parameter yang digunakan adalah variabel *refund* dan sumber daya Desa Tangguh Bencana yang masing-masing berada di angka Rp0.
2. Skenario 1 merupakan perubahan dari skenario awal dengan peningkatan dana *refund* dan sumber daya dari Desa Tangguh Bencana. Kedua variabel parameter tersebut bertambah menjadi Rp2.000.000.000 dan Rp1.000.000.
3. Skenario 2 dikondisikan mengalami peningkatan pada variabel parameter *refund* sebesar Rp3.500.000.000 dan pada variabel parameter sebesar Rp2.500.000.
4. Skenario 3 bertambah menjadi Rp4.460.733.000 untuk variabel *refund* dan Rp4.500.000 untuk variabel Desa Tangguh Bencana.
5. Skenario 4 merupakan skenario terakhir, dengan adanya penambahan variabel *refund* sebesar Rp4.460.733.000 dan variabel Desa Tangguh Bencana sebesar Rp6.500.000.

Hasil simulasi multi-skenario menunjukkan pola perilaku yang berbeda di berbagai intensitas bencana. Secara ilmiah, hal ini terjadi karena kinerja sistem diatur oleh dinamika nonlinier, di mana peningkatan kecil populasi terdampak atau permintaan logistik menghasilkan dampak yang sangat besar secara tidak proporsional terhadap stabilitas sistem ketika ambang

batas kapasitas operasional terlampaui. Tabel 3 merangkum hasil simulasi untuk setiap skenario.

Table 5. Perbandingan Hasil Simulasi untuk Setiap Skenario AnyLogic

	Kebutuhan Dana Tetap	Total Dana	Sisa Dana
Eksisting	Rp4.555.656.693	Rp1.588.423.542	-Rp2.967.233.151
Skenario 1	Rp4.555.656.693	Rp2.589.423.542	-Rp1.966.233.151
Skenario 2	Rp4.555.656.693	Rp3.590.923.542	-Rp964.733.151
Skenario 3	Rp4.555.656.693	Rp4.553.656.792	-Rp1.999.901
Skenario 4	Rp4.555.656.693	Rp4.555.656.693	-Rp99

Analisis menunjukkan bahwa total estimasi biaya evakuasi untuk potensi gempa Sesar Lembang mencapai Rp4.555.656.693, melebihi kapasitas anggaran penanggulangan bencana daerah rutin pada kondisi dasar. Hasil ini menyoroti ketidakcukupan struktural pendanaan bencana konvensional untuk mendukung operasi evakuasi skala besar tanpa adanya mekanisme pendanaan tambahan.

Simulasi berbasis skenario menunjukkan bahwa penerapan alokasi pengembalian dana dan akumulasi dana Desa Tangguh Bencana secara bertahap mengurangi defisit pendanaan. Skenario 1 hingga 3 menunjukkan peningkatan kelayakan finansial secara bertahap seiring dengan peningkatan tingkat pendanaan, meskipun masih belum mencukupi untuk memenuhi kebutuhan operasional sepenuhnya.

Skenario 4 mencapai keseimbangan keuangan yang optimal, dengan total dana yang tersedia hampir sama dengan perkiraan biaya evakuasi, sehingga menyisakan saldo sekitar -Rp99. Temuan ini menegaskan Skenario 4 sebagai konfigurasi yang paling efisien secara finansial, sementara kondisi dasar menunjukkan tingkat kerentanan keuangan tertinggi. Hasil ini menekankan peran penting mekanisme pembiayaan tambahan dan terstruktur dalam memperkuat kesiapsiagaan evakuasi bencana untuk skenario gempa Sesar Lembang.

4. KESIMPULAN

Studi ini secara definitif memvalidasi peran pemodelan dan simulasi terintegrasi, dengan memanfaatkan AnyLogic, sebagai alat strategis untuk merumuskan respons bencana yang efisien dan berkelanjutan secara finansial terhadap potensi gempa Sesar Lembang. Simulasi awal menunjukkan bahwa kebutuhan biaya logistik dan evakuasi sebesar Rp4.555.656.693 melebihi anggaran rutin, namun analisis skenario berhasil mengidentifikasi Skenario 4 sebagai konfigurasi

finansial yang paling optimal. Skenario ini, dengan mengintegrasikan alokasi dana tambahan yang terstruktur, mencapai keseimbangan finansial yang hampir sempurna, hanya menyisakan saldo residual sekitar -Rp99. Secara operasional, model ini memvisualisasikan sistem distribusi terpusat yang mengintegrasikan faktor-faktor. Temuan kunci lainnya adalah perlunya perencanaan berdasarkan profil populasi yang disesuaikan dengan risiko (tinggi, sedang, rendah) untuk mengatasi tekanan evakuasi terkonsentrasi di zona interaksi berisiko tinggi, seperti Lembang, sekaligus mengatasi ketidakseimbangan sistemik dalam pemanfaatan tempat penampungan. Dengan demikian, studi ini memberikan cetak biru berbasis bukti bagi pemerintah daerah untuk memperkuat kesiapsiagaan melalui perencanaan keuangan dan logistik yang terukur dan adaptif.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik. (2023). *Jumlah Penduduk Kabupaten Bandung Barat Berdasarkan Luas Wilayah Tahun 2023*. (<https://bandungbaratkab.bps.go.id/id/statistics-table/1/MjI0IzE=/jumlah-penduduk-kabupaten-bandung-barat-berdasarkan-luas-wilayah-tahun-2023.html>), diakses 5 September 2024.
- Fauziah, J. R., Adensya, T., Sukmawati, S., Cahyani, D. H., Farid, M. N., Rosyid, K., & Pangastuti, E. I. (2023). Tinjauan Bentang Lahan pada Sesar Lembang dan Implikasinya terhadap Aktivitas Masyarakat. *MAJALAH PEMBELAJARAN GEOGRAFI*, 6(1), 148. <https://doi.org/10.19184/pgeo.v6i1.36358>
- Fredin, K. A. (2022). Emergency Management of Supply Chains. *Canadian Journal of Emergency Management*. <https://doi.org/10.25071/3rfayw81>
- Handayani, A. P., Prasetyaningrum, A. A., Kliceck, T., & Aswin Rahadi, R. (2023). Building Resilience through Sustainable Tourism: A Case Study of Lembang and Greater Bandung Area. *International Journal of Scientific and Management Research*, 06(11), 42–54. <https://doi.org/10.37502/IJSMR.2023.61103>
- Hussain, E., Gunawan, E., Hanifa, N. R., & Zahro, Q. (2023). The seismic hazard from the Lembang Fault, Indonesia, derived from InSAR and GNSS data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(10), 3185–3197.



<https://doi.org/10.5194/nhess-23-3185-2023>

- Indra Kristian. (2022). Decision Making In Disaster Management Operations: Challenges and Opportunities. *Jurnal Manajemen Publik Dan Kebijakan Publik (JMPKP)*, 4(2), 82–91. <https://doi.org/10.36085/jmpkp.v4i2.4687>
- Kamila, F., & Ekasari, A. M. (2022). Penetapan Jalur Evakuasi Berdasarkan Multi-Risiko Bencana di Kecamatan Lembang. *Bandung Conference Series: Urban & Regional Planning*, 2(2), 408–416. <https://doi.org/10.29313/bcsurp.v2i2.3454>
- Kinasih, F. A., Miladan, N., & Kusumastuti, K. (2023). Kajian risiko bencana gempa bumi akibat aktivitas Sesar Lembang di Kabupaten Bandung Barat. *Region : Jurnal Pembangunan Wilayah Dan Perencanaan Partisipatif*, 18(2), 357. <https://doi.org/10.20961/region.v18i2.57232>
- Li, L. (2023). The hazard of earthquake and solution directions. In *Advances in Civil Engineering and Environmental Engineering, Volume 1* (pp. 339–344). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003349563-48>
- Lindell, M. K. (2024). Planning for flood evacuation: analysis, modeling and management. In *Research Handbook on Flood Risk Management* (pp. 226–238). Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781839102981.00025>
- Liu, L., Liu, S., & Gong, X. (2024). Integrating AnyLogic Simulation in Emergency Evacuation Management for Enhanced Security. *Journal of Electronic Research and Application*, 8(3), 213–220. <https://doi.org/10.26689/jera.v8i3.7242>
- Martin, S., & Kotzab, H. (2024). *Conceptualizing Humanitarian Logistics and Supply Chain Management* (pp. 56–68). https://doi.org/10.1007/978-3-031-56826-8_5
- Negi, S. (2022). Humanitarian logistics challenges in disaster relief operations: A humanitarian organisations' perspective. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 16. <https://doi.org/10.4102/jtscm.v16i0.691>
- Prakoso, S. G., Wijaya, A. A., & Putra, F. A. Al. (2022). Indonesia's Disaster Resilience Against Volcanic Eruption: Lessons from Yogyakarta. *KnE Social*

Sciences. <https://doi.org/10.18502/kss.v7i5.10544>

- Sakiani, R., Seifi, A., & Khorshiddoust, R. R. (2020). Inventory routing and dynamic redistribution of relief goods in post-disaster operations. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106219. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106219>
- Salim, W., & Faoziyah, U. (2022). The Effect of Transport Infrastructure on Land-use Change: The Case of Toll Road and High-Speed Railway Development in West Java. *Journal of Regional and City Planning*, 33(1), 48–65. <https://doi.org/10.5614/jpwk.2022.33.1.3>
- Wu, Y., & Chen, S. (2023). Resilience modeling and pre-hazard mitigation planning of transportation network to support post-earthquake emergency medical response. *Reliability Engineering & System Safety*, 230, 108918. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108918>
- Zabarinskaya, L. P., Sergeyeva, N. A., Rashidov, V. A., Nisilevich, M. V., & Krylova, T. A. (2021). *Structure and Dynamics of the Lithosphere for the Eurasia-Pacific Transition Zone* (pp. 411–428). https://doi.org/10.1007/978-3-030-63571-8_24
- Zhang, L., & Cui, N. (2021). Humanitarian logistics and emergency relief management: hot perspectives and its optimization approach. *E3S Web of Conferences*, 245, 03036. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124503036>