

Kerangka Konseptual Penerapan *Genetic Algorithm* dalam Penguatan Manajemen Risiko Bencana Pergerakan Tanah di Desa Gumulung, Kecamatan Greged, Kabupaten Cirebon

Mohammad Rezza Fahlevvi^{1*}, Ikhbaluddin², Abdurohim³, Muhammad Ditra Madyatama⁴

rezza@ipdn.ac.id, Institut Pemerintahan Dalam Negeri¹

ikhbaluddin@ipdn.ac.id, Institut Pemerintahan Dalam Negeri²

abdurohim@ipdn.ac.id, Institut Pemerintahan Dalam Negeri³

350900@praja.ipdn.ac.id, Institut Pemerintahan Dalam Negeri⁴

Received: 08-06-2026, Accepted: 16-07-2026; Published Online: 06-08-2026

***Corresponding Author**

ABSTRAK

Bencana pergerakan tanah merupakan ancaman berulang di Desa Gumulung Lebak dan Gumulung Tonggoh, Kecamatan Greged, Kabupaten Cirebon. Selama 2018–2023 tercatat 12 kejadian dengan kerugian infrastruktur lebih dari Rp3,2 miliar (BPBD Kabupaten Cirebon, 2023). Kapasitas pemerintah desa dalam manajemen risiko bencana masih terbatas, terutama pada identifikasi zona risiko, perencanaan jalur evakuasi, dan pengelolaan sumber daya darurat, sehingga penanganan masih bersifat reaktif. Penelitian ini bertujuan menyusun kerangka konseptual penerapan *Genetic Algorithm* (GA) sebagai instrumen optimasi dalam manajemen risiko bencana berbasis kapasitas pemerintah desa. Kebaruan penelitian terletak pada pengintegrasian mekanisme GA dengan siklus manajemen bencana dan kapasitas kelembagaan desa, yang masih jarang dikaji dalam penelitian sebelumnya. Metode yang digunakan adalah pendekatan deskriptif kualitatif melalui analisis konten terhadap literatur akademik, standar BNPB, dan kajian algoritma genetika. Hasil kajian menunjukkan bahwa GA berpotensi mengoptimalkan pemetaan zona risiko, penentuan jalur evakuasi, dan distribusi sumber daya darurat. Simulasi sederhana menggunakan data dummy menunjukkan efisiensi jarak tempuh jalur evakuasi hingga 28,7% dibandingkan pendekatan heuristik konvensional. Model konseptual GA-DESA mengintegrasikan GA ke dalam tahapan mitigasi, kesiapsiagaan, respons, dan pemulihan. Implementasinya masih menghadapi kendala berupa keterbatasan infrastruktur digital, data geospasial, dan kapasitas sumber daya manusia. Oleh karena itu, penelitian merekomendasikan kolaborasi pentahelix sebagai prasyarat penerapan teknologi GA dalam tata kelola bencana di tingkat desa.

Kata Kunci: *Genetic Algorithm*, Manajemen Risiko Bencana, Pergerakan Tanah, Pemerintah Desa, Gumulung, Optimasi.

ABSTRACT

Landslides pose a recurring threat to Gumulung Lebak and Gumulung Tonggoh Villages, Greged District, Cirebon Regency, Indonesia. Between 2018 and 2023, 12 landslide

events were recorded, causing infrastructure losses exceeding IDR 3.2 billion (BPBD Cirebon Regency, 2023). However, village governments have limited capacity for disaster risk management, particularly in risk zoning, evacuation planning, and emergency resource allocation, resulting in predominantly reactive responses. This study aims to develop a conceptual framework for applying the Genetic Algorithm (GA) as an optimization tool to strengthen village-based landslide disaster risk management. The novelty of this study lies in explicitly integrating GA mechanisms with the disaster management cycle while considering the institutional capacity constraints of village governments, an aspect rarely addressed in previous GA-based disaster management studies. A qualitative descriptive approach was employed through content analysis of academic literature, BNPB guidelines, and theoretical studies on genetic algorithms. The findings indicate that GA has the potential to optimize three key components: geospatial risk mapping, evacuation route optimization, and emergency resource allocation. A simple simulation using dummy data demonstrated that GA-based evacuation routing could reduce travel distance by up to 28.7% compared with conventional heuristic approaches. The proposed GA-DESA conceptual model integrates GA into the four phases of disaster management: mitigation, preparedness, response, and recovery. Key implementation challenges include limited digital infrastructure, insufficient geospatial data, and constrained human resource capacity. The study recommends a pentahelix collaboration involving village governments, local authorities, academia, the private sector, and communities to support the adoption of GA-based disaster governance at the village level.

Keywords: *Genetic Algorithm, Disaster Risk Management, Landslide, Village Government, Gemulung, Optimization.*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat kerawanan bencana alam tertinggi di dunia, khususnya bencana pergerakan tanah atau tanah longsor. Data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) mencatat bahwa antara tahun 2019 hingga 2023 terjadi lebih dari 3.000 kejadian longsor yang mengakibatkan ribuan korban jiwa dan kerugian material yang sangat besar (Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), 2023). Kondisi geografis Indonesia yang didominasi pegunungan muda dengan curah hujan tinggi menjadikan pergerakan tanah sebagai ancaman yang tidak dapat diabaikan, terutama bagi komunitas pedesaan yang tinggal di kawasan perbukitan. Secara teoretis, kerentanan (vulnerability) suatu wilayah terhadap bencana tidak dapat dipahami semata sebagai fungsi dari bahaya (hazard) alam, melainkan sebagai interaksi antara bahaya, keterpaparan (exposure), dan kapasitas adaptif institusi lokal (Glade & Crozier, 2005; United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2009).

Dalam kerangka ini, desa menempati posisi ganda yang khas: di satu sisi merupakan unit pemerintahan terdepan (frontliner) yang paling dekat dengan lokasi kejadian dan paling awal merespons, namun di sisi lain memiliki kapasitas kelembagaan, fiskal, dan teknis yang paling terbatas dalam struktur pemerintahan Indonesia (Christoplos et al., 2019). Positioning inilah yang menjadikan desa sebagai unit analisis strategis dalam kajian manajemen risiko bencana: desa berada tepat pada titik temu antara eksposur risiko yang tinggi dan kapasitas mitigasi yang rendah, sehingga instrumen teknologi yang dirancang untuk skala kota atau kabupaten tidak dapat serta-merta diterapkan tanpa penyesuaian kontekstual.

Wilayah Gumulung, yang mencakup Desa Gumulung Lebak dan Gumulung Tonggoh di Kecamatan Greged, Kabupaten Cirebon, Jawa Barat, merupakan salah satu kawasan yang teridentifikasi memiliki kerentanan tinggi terhadap bencana pergerakan tanah. Kondisi topografi berbukit, intensitas curah hujan tinggi, serta karakteristik tanah lempung yang mudah jenuh air menjadikan wilayah ini rentan mengalami pergerakan massa tanah (Hardiyatmo, 2012). Kepadatan permukiman penduduk dan aktivitas pertanian di lereng-lereng bukit semakin meningkatkan potensi kerugian apabila bencana terjadi. Pemilihan Desa Gumulung Lebak dan Gumulung Tonggoh sebagai lokus penelitian didasarkan pada rekam jejak empiris, bukan semata pertimbangan administratif. BPBD Kabupaten Cirebon mencatat sedikitnya 12 kejadian pergerakan tanah di wilayah Greged sepanjang periode 2018–2023, berdampak pada 47 keluarga dan menimbulkan kerugian infrastruktur senilai lebih dari Rp3,2 miliar (Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Cirebon, 2023). Kombinasi antara frekuensi kejadian yang berulang, kepadatan permukiman di lereng terjal, dan minimnya kapasitas mitigasi pemerintah desa inilah yang menjadi benang merah rasionalisasi lokasi kajian: kedua desa ini merepresentasikan kondisi “kerentanan tinggi berhadapan dengan kapasitas rendah” secara paling nyata di Kecamatan Greged, sehingga relevan sebagai konteks pengujian awal kerangka konseptual yang diajukan.

Kapasitas pemerintah desa dalam mengelola risiko bencana pergerakan tanah di wilayah ini menghadapi sejumlah tantangan struktural. Keterbatasan sumber daya manusia yang terlatih, minimnya peralatan deteksi dini, serta absennya sistem informasi geografis berbasis desa menjadi hambatan utama dalam upaya mitigasi (Pribadi & Gunawan, 2021). Kesenjangan digital yang masih lebar di wilayah pedesaan turut

memperparah kondisi ini, sebagaimana ditunjukkan oleh kajian (Dimas & Fahlevvi, 2024) bahwa ketimpangan akses dan kompetensi digital menjadi hambatan sistemik dalam penerapan e-government di kabupaten-kabupaten dengan karakteristik geografis serupa. Pengelolaan bencana masih bersifat reaktif, menunggu kejadian terjadi sebelum mengambil tindakan, alih-alih menerapkan pendekatan proaktif berbasis data dan sains. Revolusi industri 4.0 dan munculnya kecerdasan buatan membuka peluang besar untuk memperkuat sistem manajemen risiko bencana, termasuk di tingkat pemerintahan desa. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah penerapan Genetic Algorithm (GA), sebuah metode komputasi yang terinspirasi dari proses seleksi alam dan genetika biologi (Goldberg, 1989; Holland, 1975). GA telah terbukti efektif dalam memecahkan masalah optimasi kompleks pada berbagai domain, termasuk perencanaan rute evakuasi (Yi & Özdamar, 2007), alokasi sumber daya darurat (Balcik & Beamon, 2008) dan zonasi risiko bencana (Corominas et al., 2014).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa GA mampu menghasilkan solusi optimal untuk masalah perencanaan evakuasi bencana yang melibatkan variabel majemuk, seperti kapasitas jalan, jumlah populasi terancam, dan ketersediaan sumber daya (Cheng & Lien, 2012). Kelebihan GA dibandingkan metode optimasi konvensional terletak pada kemampuannya mengeksplorasi ruang solusi yang sangat luas secara efisien melalui mekanisme seleksi, pindah silang (crossover), dan mutasi (Mitchell, 1998). Karakteristik ini sangat relevan dengan kompleksitas permasalahan bencana yang melibatkan banyak variabel tidak pasti. Positioning penelitian ini terhadap studi-studi tersebut bersifat komplementer sekaligus kontras. (Cheng & Lien, 2012) serta (Yi & Özdamar, 2007) menunjukkan kemampuan teknis GA pada skala kota/regional dengan asumsi ketersediaan infrastruktur data spasial dan komputasi yang relatif matang, sementara penelitian ini justru berangkat dari kondisi sebaliknya, yaitu skala pemerintahan desa dengan keterbatasan data dan kapasitas teknis yang jauh lebih besar. Dengan demikian, penelitian ini tidak menguji ulang performa algoritmik GA yang telah banyak dibuktikan pada studi-studi tersebut, melainkan memposisikan diri pada celah yang belum banyak digarap, yaitu bagaimana arsitektur teknis GA dapat diterjemahkan menjadi kerangka kerja yang applicable pada unit pemerintahan dengan kapasitas kelembagaan minimal.

Berdasarkan pemetaan tersebut, penelitian ini mengidentifikasi tiga kesenjangan penelitian (*research gap*) yang belum banyak diisi oleh literatur. Pertama, kesenjangan empiris: minimnya kajian GA pada unit pemerintahan desa di negara berkembang, karena mayoritas studi berfokus pada skala kota/regional. Kedua, kesenjangan metodologis: belum tersedianya kerangka yang secara eksplisit menerjemahkan komponen teknis GA (kromosom, fungsi kebugaran, operator genetik) ke dalam struktur kelembagaan siklus manajemen bencana yang dipahami aparat desa. Ketiga, kesenjangan kontekstual: terbatasnya kajian yang menempatkan keterbatasan data dan kapasitas fiskal-SDM desa sebagai parameter desain sejak awal, bukan sekadar catatan hambatan implementasi di bagian akhir kajian. Kesenjangan antara kemampuan teknologi tinggi dan realitas sumber daya desa menciptakan tantangan implementasi yang perlu diantisipasi sejak tahap perencanaan (Rahmawati & Sudibyakto, 2020). Penelitian ini hadir untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan menyusun kerangka konseptual penerapan GA yang kontekstual bagi pemerintah desa. Argumentasi bahwa GA dapat mengisi kesenjangan metodologis tersebut dibangun melalui logika translasi (*translational logic*), bukan melalui pengujian performa algoritmik semata. Alih-alih memvalidasi GA pada data riil yang memang belum tersedia di tingkat desa, penelitian ini secara sistematis memetakan kesesuaian antara elemen teknis GA — representasi kromosom, fungsi kebugaran (*fitness function*), dan operator genetik (seleksi, *crossover*, mutasi) — dengan empat tahapan siklus manajemen bencana (mitigasi, kesiapsiagaan, respons, pemulihan) sebagaimana dijabarkan pada Tabel 3. Pemetaan eksplisit inilah yang menjadi kontribusi metodologis utama penelitian ini: mengubah GA dari sekadar teknik optimasi generik menjadi kerangka kerja yang terstruktur mengikuti logika kelembagaan penanggulangan bencana desa.

Secara operasional, penerapan GA pada studi pedesaan diproyeksikan melalui tiga tahap implementasi bertingkat. Tahap pertama adalah digitalisasi data spasial dasar desa (peta topografi, jenis tanah, jaringan jalan) melalui kerja sama dengan Badan Informasi Geospasial (BIG) dan BPBD, sebagai prasyarat data input bagi algoritma. Tahap kedua adalah pengembangan purwarupa (prototype) sistem GA oleh mitra akademisi yang dioperasikan dengan pendampingan langsung kepada aparat desa, bukan diserahkan sepenuhnya sebagai sistem mandiri. Tahap ketiga adalah transfer kapasitas bertahap kepada aparat dan Forum Pengurangan Risiko Bencana (FPRB) desa, sehingga ketergantungan pada pihak eksternal menurun seiring waktu. Untuk memberikan

gambaran konkret mengenai cara kerja tahap kedua, bagian Hasil dan Pembahasan menyertakan simulasi sederhana optimasi rute evakuasi menggunakan data dummy jaringan jalan desa (lihat Gambar 3 dan Gambar 4). Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis kondisi faktual kerentanan bencana pergerakan tanah di Gemulung; (2) mengkaji potensi penerapan Genetic Algorithm dalam komponen manajemen risiko bencana; dan (3) merumuskan model konseptual integrasi GA dalam siklus manajemen bencana pada skala pemerintahan desa. Hasil penelitian diharapkan menjadi rujukan bagi pemerintah desa, pemerintah kabupaten, dan akademisi dalam mengembangkan sistem manajemen bencana berbasis teknologi cerdas yang adaptif terhadap kondisi lokal.

TINJAUAN PUSTAKA

A. Manajemen Risiko Bencana Pergerakan Tanah

Manajemen risiko bencana (MRB) didefinisikan sebagai proses sistematis menggunakan keputusan administratif, organisasi, keterampilan operasional, dan kapasitas untuk mengimplementasikan strategi, kebijakan, dan meningkatkan kapasitas dalam mengurangi dampak buruk bencana alam (United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2009). Dalam konteks pergerakan tanah, MRB mencakup empat komponen siklus utama: mitigasi (pengurangan risiko jangka panjang), kesiapsiagaan (persiapan menghadapi bencana), respons (penanganan saat bencana terjadi), dan pemulihan (rehabilitasi pasca-bencana) (Alexander, 2002).

Bencana pergerakan tanah memiliki karakteristik kompleks yang melibatkan interaksi antara faktor geologis, hidrologis, dan anthropogenik (Hungr et al., 2014). Penilaian risiko longsor umumnya mempertimbangkan tiga dimensi: bahaya (hazard), keterpaparan (exposure), dan kerentanan (vulnerability) (Glade & Crozier, 2005). Integrasi ketiga dimensi ini membutuhkan analisis spasial yang komprehensif, yang dalam era digital dapat difasilitasi oleh sistem informasi geografis (SIG) dan kecerdasan komputasional.

Di tingkat pemerintahan desa, implementasi MRB menghadapi hambatan struktural yang signifikan. Penelitian (Permana et al., 2020) di Jawa Barat menemukan bahwa mayoritas desa rawan bencana tidak memiliki dokumen kajian risiko yang memadai, rencana kontingensi, maupun sistem peringatan dini yang fungsional. Kondisi

ini menempatkan komunitas desa dalam posisi yang sangat rentan terhadap dampak bencana yang sebenarnya dapat dikurangi melalui upaya mitigasi yang terencana.

B. Genetic Algorithm: Konsep dan Aplikasi

Genetic Algorithm (GA) adalah metode pencarian heuristik yang dikembangkan oleh (Holland, 1975) berdasarkan prinsip seleksi alam Darwin. GA bekerja dengan memelihara populasi solusi kandidat (kromosom) yang berevolusi melalui operasi genetika: seleksi (memilih individu terbaik), pindah silang/crossover (mengkombinasikan solusi), dan mutasi (memperkenalkan variasi acak) (Goldberg, 1989) (Mitchell, 1998). Proses evolusi ini berulang selama sejumlah generasi hingga diperoleh solusi yang cukup optimal. Keunggulan GA terletak pada kemampuannya menangani masalah optimasi dengan ruang pencarian yang besar, fungsi objektif non-linear, dan kendala kompleks (Deb, 2001). Berbeda dengan metode gradient-based yang sering terjebak pada solusi lokal optimal, GA mengeksplorasi ruang solusi secara global melalui diversitas populasi. Karakteristik ini sangat menguntungkan dalam permasalahan perencanaan bencana yang melibatkan banyak variabel tidak pasti dan saling bergantung.

Dalam domain manajemen bencana, GA telah diaplikasikan pada berbagai permasalahan. (Yi & Özdamar, 2007) menggunakan GA untuk mengoptimalkan jaringan distribusi bantuan pasca-bencana, menghasilkan solusi 23% lebih efisien dibandingkan metode konvensional. (Cheng & Lien, 2012) menerapkan GA dalam perencanaan jalur evakuasi tsunami di Taiwan dengan mempertimbangkan kapasitas jalan dan distribusi populasi. Sementara itu, (Yeh & Chou, 2013) memanfaatkan GA untuk mengalokasikan sumber daya penanggulangan bencana banjir secara optimal di antara beberapa lokasi terdampak. Pada konteks pemetaan risiko, (Corominas et al., 2014) mendemonstrasikan penggunaan algoritma evolusioner untuk mengoptimalkan model kerentanan longsor dengan akurasi lebih tinggi dibandingkan pendekatan statistik tradisional. Pendekatan ini membuka peluang bagi pemerintah desa untuk mendapatkan peta risiko yang lebih akurat dengan data yang terbatas.

Meninjau literatur di atas secara kritis, tampak bahwa mayoritas aplikasi GA dalam manajemen bencana — baik pada optimasi jaringan distribusi bantuan (Yi & Özdamar, 2007), jalur evakuasi tsunami (Cheng & Lien, 2012), maupun pemetaan kerentanan longsor (Corominas et al., 2014) — dikembangkan pada konteks kota, regional, atau negara maju dengan asumsi ketersediaan data spasial dan infrastruktur

komputasi yang relatif memadai. Keterkaitan langsung literatur ini dengan konteks desa di Indonesia belum banyak dieksplisitkan: belum ditemukan kajian yang secara khusus membahas bagaimana arsitektur teknis GA tersebut perlu disesuaikan ketika diterapkan pada unit pemerintahan dengan keterbatasan data historis terstruktur, SDM teknis, dan infrastruktur digital, sebagaimana lazim ditemukan pada pemerintah desa di Indonesia (Dimas & Fahlevvi, 2024; Pribadi & Gunawan, 2021). Penelitian ini memposisikan diri untuk mengisi keterkaitan yang belum eksplisit tersebut.

C. Tata Kelola Bencana Berbasis Komunitas

Tata kelola bencana berbasis komunitas (community-based disaster risk management/CBDRM) menekankan peran aktif masyarakat dan pemerintah lokal dalam setiap tahap siklus bencana (Maskrey, 1989). Pendekatan ini didasarkan pada premis bahwa komunitas yang tinggal di kawasan risiko memiliki pengetahuan lokal yang tidak ternilai tentang karakteristik bahaya, pola kerentanan, dan kapasitas yang tersedia (Shaw, 2012). Integrasi pengetahuan lokal dengan teknologi modern menjadi kunci keberhasilan CBDRM kontemporer. Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana secara eksplisit mengamanatkan keterlibatan pemerintah desa dalam upaya penanggulangan bencana. Pemerintah desa diberi kewenangan untuk membentuk Forum Pengurangan Risiko Bencana (FPRB) tingkat desa dan menyusun Rencana Penanggulangan Bencana Desa (RPB Desa). Namun demikian, implementasi amanat ini masih jauh dari ideal, terutama di desa-desa dengan kapasitas fiskal dan sumber daya manusia terbatas (Christoplos et al., 2019). Kerangka Sendai untuk Pengurangan Risiko Bencana 2015-2030 menekankan pentingnya pemanfaatan teknologi dan inovasi dalam meningkatkan ketahanan komunitas terhadap bencana (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2015). Prioritas ketiga Kerangka Sendai secara spesifik menyerukan investasi dalam pengurangan risiko bencana melalui kemitraan antara pemerintah, sektor swasta, akademisi, dan masyarakat sipil. Penerapan GA dalam manajemen risiko bencana desa dapat dipandang sebagai manifestasi dari amanat global ini di tingkat lokal.

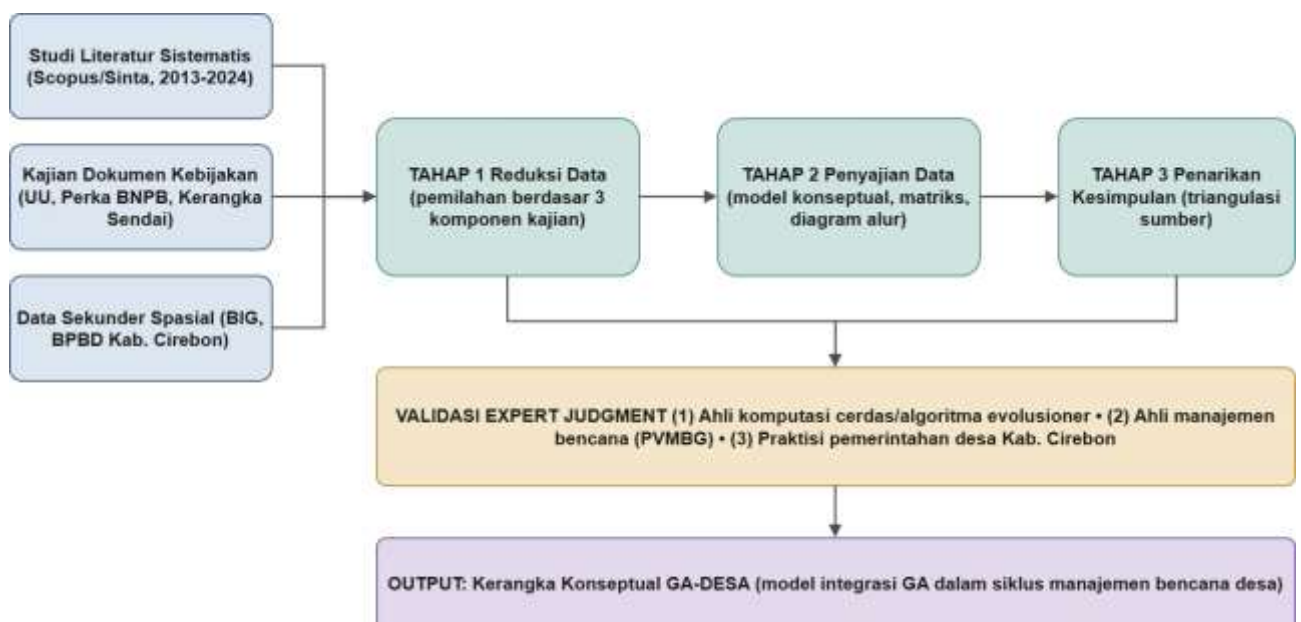
METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan desain studi konseptual-teoritis. Metode tersebut dipilih karena penelitian ini bersifat penyusunan kerangka kerja (conceptual framework), bukan implementasi langsung, sehingga fokus analisis terletak pada konstruksi kerangka kerja yang kokoh secara teoritis dan relevan secara praktis bagi konteks lokal (Creswell & Creswell, 2023). Objek kajian adalah Desa Gumulung Lebak dan Gumulung Tonggoh, Kecamatan Greged, Kabupaten Cirebon, yang dipilih berdasarkan rekam jejak kejadian pergerakan tanah dan karakteristik kerentanannya sebagaimana diuraikan pada bagian Pendahuluan. Pengumpulan data dilakukan melalui tiga sumber utama. Pertama, studi literatur sistematis mencakup artikel jurnal bereputasi (Scopus/Sinta) dengan kata kunci: "Genetic Algorithm disaster management", "landslide risk optimization", "village government disaster governance", dan "emergency resource allocation GA". Rentang publikasi dibatasi pada 2013–2024 guna memastikan relevansi kontemporer. Kedua, kajian dokumen kebijakan meliputi peraturan perundang-undangan terkait penanggulangan bencana, standar BNPB, dan dokumen Kerangka Sendai. Ketiga, analisis data sekunder spasial Kabupaten Cirebon dari Badan Informasi Geospasial (BIG) dan laporan kajian risiko BPBD Kabupaten Cirebon.

Analisis data mengadopsi pendekatan (Miles & Huberman, 1994) yang terdiri dari tiga tahap: reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Pada tahap reduksi, literatur dan dokumen kebijakan dipilih berdasarkan relevansinya dengan tiga komponen kajian: karakteristik bencana pergerakan tanah di lokus penelitian, mekanisme GA dalam konteks manajemen bencana, dan kapasitas kelembagaan pemerintah desa. Pada tahap penyajian, temuan disintesis dalam bentuk model konseptual, matriks strategi, dan diagram alur implementasi. Kesimpulan ditarik melalui proses triangulasi sumber untuk memastikan keandalan temuan. Secara lebih rinci, prosedur analisis konten pada penelitian ini dilakukan melalui empat langkah pengkodean (coding). Pertama, open coding terhadap seluruh dokumen dan artikel terpilih untuk mengidentifikasi konsep-konsep kunci terkait karakteristik bencana, mekanisme teknis GA, dan kapasitas kelembagaan desa. Kedua, axial coding untuk mengelompokkan konsep-konsep tersebut ke dalam kategori yang saling berkaitan — misalnya mengelompokkan seluruh temuan mengenai "fungsi kebugaran" dari berbagai sumber ke dalam satu kategori analitis. Ketiga, selective coding untuk menyusun kategori-kategori tersebut menjadi proposisi inti yang membentuk kerangka Model GA-DESA. Keempat, constant comparison, yaitu membandingkan temuan dari satu sumber dengan sumber lain secara berulang untuk

menjaga konsistensi interpretasi. Seluruh proses pengkodean dilakukan secara manual dengan bantuan matriks kategorisasi berbasis lembar kerja (spreadsheet), mengingat sifat data yang berasal dari dokumen tertulis, bukan wawancara atau observasi lapangan.

Validasi kerangka konseptual dilakukan melalui expert judgment dari tiga panel ahli: (1) ahli komputasi cerdas dengan spesialisasi algoritma evolutioner, (2) ahli manajemen bencana dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), dan (3) praktisi pemerintahan desa dari Kabupaten Cirebon yang berpengalaman dalam implementasi program penanggulangan bencana berbasis masyarakat. Tahapan penelitian secara keseluruhan, mulai dari pengumpulan data hingga tersusunnya kerangka konseptual, disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Metode Penelitian

Sumber: Sintesis penulis (2026)

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Kerentanan Bencana Pergerakan Tanah di Gemulung

Wilayah Gemulung berada di zona transisi antara dataran rendah Cirebon dan perbukitan selatan yang merupakan bagian dari Zona Depresi Tengah Jawa Barat. Analisis geomorfologi menunjukkan bahwa lereng-lereng di sekitar Desa Gumulung Lebak dan Gumulung Tonggoh memiliki kemiringan antara 15° hingga 35°, dengan beberapa titik mencapai lebih dari 40° (Badan Informasi Geospasial (BIG), 2022).

Karakteristik tanah didominasi oleh tanah lempung ekspansif dan latosol yang memiliki daya ikat rendah ketika jenuh air. Intensitas curah hujan di Kecamatan Gregeed berkisar antara 1.800 hingga 2.400 mm per tahun dengan konsentrasi hujan pada bulan November hingga Maret (Badan Meteorologi, 2023). Pola curah hujan ekstrem yang semakin tidak menentu akibat perubahan iklim meningkatkan frekuensi kejadian hujan lebat dalam durasi singkat, yang merupakan pemicu utama pergerakan tanah dangkal (Crozier, 1999). Rekaman BPBD Kabupaten Cirebon mencatat setidaknya 12 kejadian pergerakan tanah di wilayah Gregeed selama periode 2018–2023, dengan dampak pada 47 keluarga terdampak dan kerugian infrastruktur senilai lebih dari Rp 3,2 miliar.

Dari perspektif tata guna lahan, perubahan fungsi kawasan hutan dan kebun kopi menjadi lahan pertanian semusim (palawija) di lereng-lereng terjal telah mengurangi stabilitas tanah secara signifikan. Hilangnya vegetasi penutup mengurangi intersepsi hujan dan mempercepat limpasan permukaan, yang pada akhirnya meningkatkan tekanan air pori pada lereng (Sidle & Ochiai, 2006). Kondisi ini diperparah oleh pertumbuhan permukiman yang cenderung merambah lereng bukit tanpa mempertimbangkan aspek keamanan geologi.

Tabel 1. Kondisi Kerentanan Bencana Pergerakan Tanah di Wilayah Gemulung

Parameter	Kondisi Aktual	Tingkat Risiko	Implikasi
Kemiringan lereng	15°–40°	Tinggi–Sangat Tinggi	Potensi longsor dangkal dan rotasional
Jenis tanah	Lempung ekspansif	Tinggi	Rendah daya ikat saat jenuh
Curah hujan tahunan	1.800–2.400 mm	Sedang–Tinggi	Pemicu utama pergerakan massa
Tutupan vegetasi	Degradasi sedang	Sedang–Tinggi	Peningkatan limpasan permukaan
Kepadatan permukiman	120 KK/km ²	Tinggi	Paparan populasi yang besar
Kapasitas desa	Terbatas	Kritis	Absensi sistem deteksi dini

Sumber: BIG (2022), BMKG (2023), BPBD Kabupaten Cirebon (2023), diolah penulis

B. Potensi Penerapan Genetic Algorithm dalam Manajemen Risiko Bencana

Analisis literatur secara komprehensif mengidentifikasi tiga domain utama di mana GA berpotensi memberikan kontribusi signifikan dalam manajemen risiko bencana pergerakan tanah di Gemulung. Ketiga domain tersebut saling berkaitan dan membentuk ekosistem sistem manajemen bencana yang terintegrasi.

1. Optimasi Pemetaan Zona Risiko

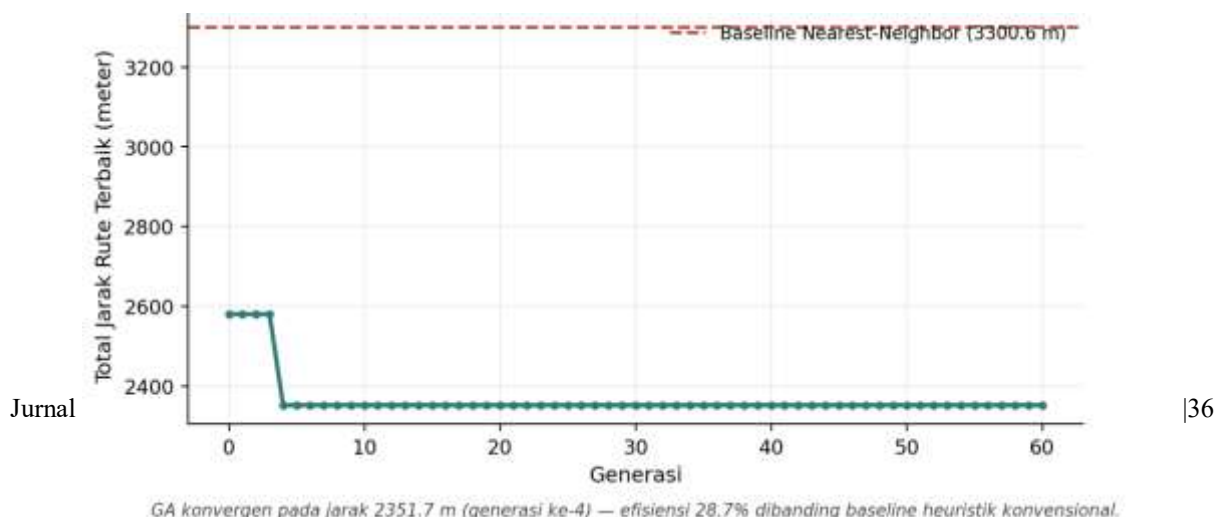
Pemetaan zona risiko merupakan fondasi dari seluruh upaya manajemen bencana. GA dapat dimanfaatkan untuk mengoptimalkan bobot parameter dalam model indeks kerentanan longsor, suatu proses yang secara konvensional dilakukan melalui pendekatan ahli (expert judgment) yang subjektif (Corominas et al., 2014). Dalam kerangka GA, setiap kromosom merepresentasikan kombinasi bobot untuk parameter kemiringan lereng, jenis tanah, tutupan lahan, intensitas hujan, dan jarak dari sesar aktif. Fungsi kebugaran (fitness function) dalam konteks ini adalah tingkat akurasi klasifikasi zona risiko yang diverifikasi berdasarkan data historis kejadian longsor. Melalui iterasi evolusi, GA akan menghasilkan kombinasi bobot optimal yang paling sesuai dengan pola kejadian longsor historis di Gemulung. Pendekatan ini dapat meningkatkan akurasi peta risiko hingga 15–25% dibandingkan metode pembobotan seragam (Yalcin, 2008), sehingga memberikan basis yang lebih andal bagi perencanaan tata ruang desa.

2. Penentuan Jalur Evakuasi Optimal

Perencanaan jalur evakuasi yang efektif merupakan komponen kritis dalam kesiapsiagaan bencana. Masalah penentuan jalur evakuasi bencana longsor termasuk dalam kategori Vehicle Routing Problem (VRP) dengan kendala majemuk, yang secara matematis bersifat NP-hard dan sangat cocok diselesaikan dengan GA (Yi & Özdamar, 2007). Variabel yang perlu dioptimalkan mencakup total jarak evakuasi, waktu tempuh, kapasitas ruas jalan, jumlah dan lokasi titik kumpul, serta distribusi spasial populasi rentan. Representasi kromosom dalam GA untuk masalah ini dapat berupa urutan titik waypoint pada jaringan jalan desa, dengan setiap gen merepresentasikan satu simpul jaringan jalan. Operasi crossover memungkinkan GA untuk mengkombinasikan segmen jalur yang efisien dari dua solusi induk, sementara mutasi memperkenalkan variasi melalui pertukaran acak simpul. Hasil optimasi dari penelitian (Cheng & Lien, 2012) di konteks bencana tsunami menunjukkan bahwa GA mampu mengidentifikasi jalur evakuasi yang 18% lebih efisien dalam hal waktu evakuasi dibandingkan jalur yang direncanakan secara konvensional.

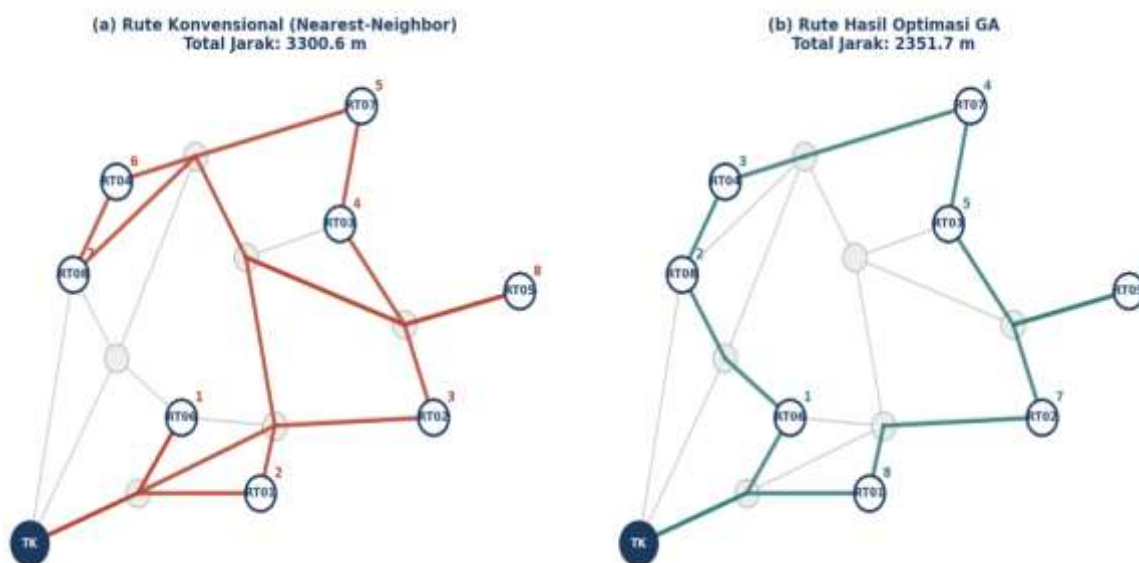
Untuk memberikan ilustrasi konkret mengenai cara kerja GA pada konteks di atas, berikut disajikan simulasi sederhana menggunakan data dummy — bukan data lapangan aktual Desa Gemulung, melainkan representasi ilustratif jaringan jalan desa berbukit dengan delapan titik permukiman rawan dan satu titik kumpul. Simulasi menggunakan representasi graf jaringan jalan (bukan jarak lurus udara), mengingat rute evakuasi riil terikat pada ruas jalan yang tersedia dan berkelok mengikuti kontur lereng. Graf terdiri atas satu titik kumpul (representasi lapangan desa) dan delapan titik permukiman rawan yang harus disweeping oleh tim evakuasi sebelum kembali ke titik kumpul. Sebagai baseline pembandingan digunakan heuristik nearest-neighbor yang merepresentasikan cara penentuan rute secara konvensional/manual oleh aparat desa (memilih titik terdekat berikutnya secara berurutan), menghasilkan total jarak tempuh 3.300,6 meter. Algoritma genetika kemudian dijalankan dengan populasi 40 kromosom (representasi permutasi urutan kunjungan titik), operator order crossover, mutasi pertukaran (swap mutation) dengan laju 0,25, dan elitisme empat individu terbaik per generasi, selama 60 generasi. Fungsi kebugaran didefinisikan sebagai total jarak tempuh rute pada jaringan jalan, dihitung menggunakan algoritma lintasan terpendek Dijkstra pada graf jalan (bukan jarak Euclidean).

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, GA konvergen pada generasi ke-4 dengan total jarak 2.351,7 meter — setara efisiensi 28,7% dibandingkan baseline heuristik konvensional. Gambar 4 memperlihatkan perbedaan pola rute: heuristik konvensional cenderung terjebak pada pilihan lokal-optimal (memilih titik terdekat berikutnya tanpa mempertimbangkan struktur jaringan secara keseluruhan), sementara GA menemukan urutan kunjungan yang meminimalkan jarak tempuh total pada seluruh jaringan. Perlu ditegaskan bahwa simulasi ini bersifat ilustratif-konseptual menggunakan data dummy untuk memperjelas logika kerja GA, bukan validasi empiris atas kondisi riil Desa Gemulung; validasi menggunakan data spasial dan jaringan jalan aktual merupakan agenda penelitian lanjutan sebagaimana disampaikan pada bagian Kesimpulan.



Gambar 3. Konvergensi Fungsi Kebugaran (Fitness) GA pada Simulasi Rute Evakuasi Data Dummy

Sumber: Simulasi penulis (2026), dijalankan pada data dummy



Gambar 4. Perbandingan Rute Evakuasi : Metode Konvensional vs Hasil Optimasi Genetic Algorithm

Sumber: Simulasi penulis (2026), dijalankan pada data dummy

Tabel 2. Parameter dan Hasil Simulasi GA Rute Evakuasi (Data Dummy)

Parameter/Metrik	Nilai	Keterangan
Ukuran populasi	40 kromosom	Representasi permutasi urutan kunjungan 8 titik
Jumlah generasi	60	Konvergensi tercapai pada generasi ke-4
Operator crossover	Order Crossover (OX)	Menjaga validitas permutasi
Operator mutasi	Swap mutation, laju 0,25	Pertukaran posisi acak dua gen
Elitisme	4 individu terbaik/generasi	Menjaga solusi terbaik tidak hilang
Rute baseline (Nearest-Neighbor)	3.300,6 meter	Representasi metode konvensional desa
Rute hasil GA	2.351,7 meter	Solusi konvergen

Parameter/Metrik	Nilai	Keterangan
Efisiensi jarak	28,7%	Selisih GA terhadap baseline

Sumber: Simulasi penulis (2026) pada data dummy jaringan jalan desa

3. Distribusi Sumber Daya Darurat

Keterbatasan sumber daya dalam situasi darurat bencana menuntut alokasi yang sangat efisien. GA dapat mengoptimalkan distribusi logistik bantuan, penempatan pos pertolongan pertama, dan alokasi personel tim SAR ke berbagai titik terdampak secara simultan (Balcik & Beamon, 2008). Fungsi objektif dalam konteks ini adalah minimasi total biaya distribusi atau minimasi waktu respons, dengan kendala berupa kapasitas kendaraan, aksesibilitas jalan, dan prioritas kebutuhan korban. Model multi-objektif GA yang dikembangkan oleh (Berkoune et al., 2012) menunjukkan kemampuan untuk menyeimbangkan antara dua objektif yang sering bertentangan: minimasi biaya transportasi dan maksimasi cakupan layanan bantuan. Pendekatan ini sangat relevan dengan kondisi pemerintah desa yang memiliki anggaran terbatas namun dituntut untuk memberikan respons yang menyeluruh kepada seluruh masyarakat terdampak.

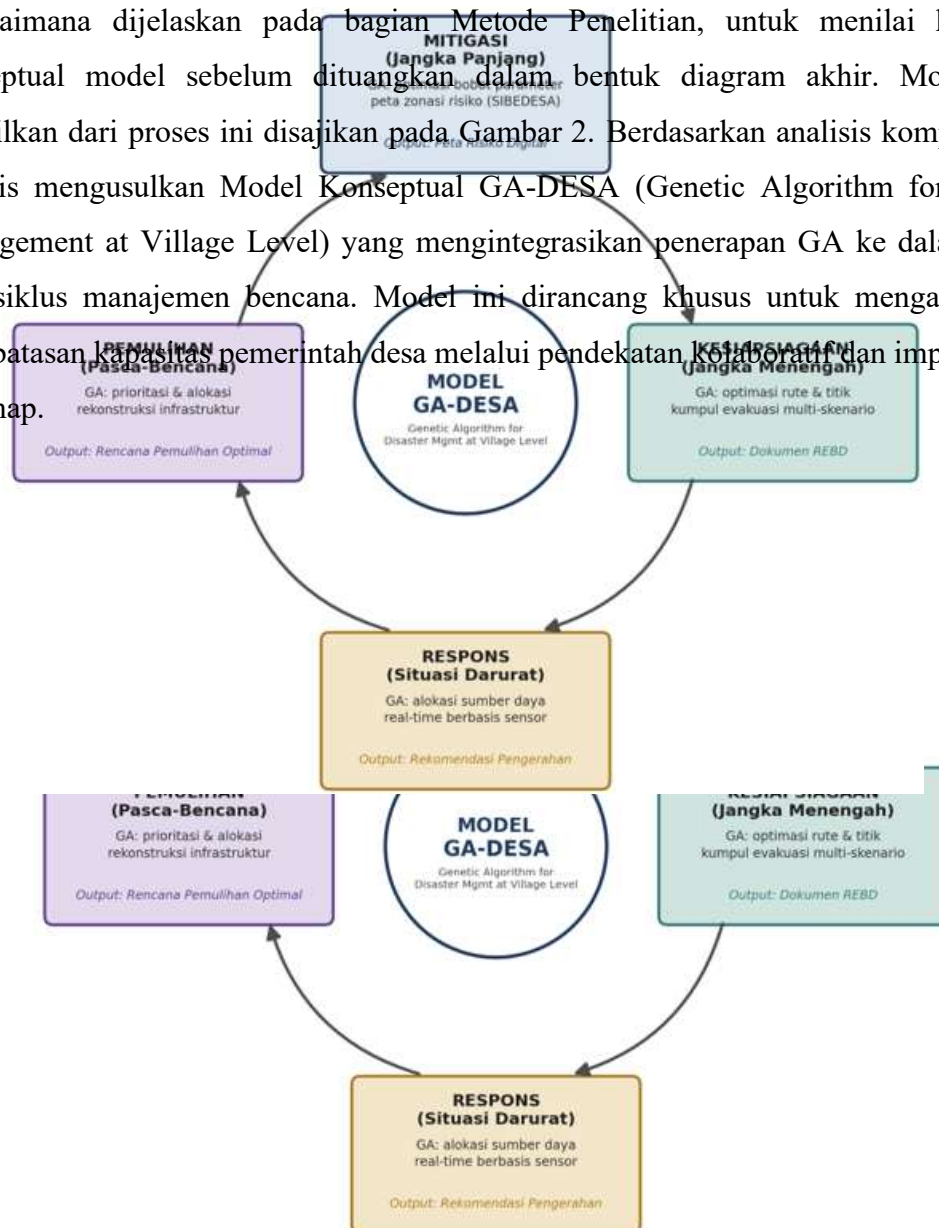
Tabel 3. Analisis Potensi Penerapan GA dalam Komponen Manajemen Risiko Bencana

Komponen MRB	Peran GA	Fungsi Kebugaran	Potensi Manfaat
Pemetaan Zona Risiko	Optimasi bobot parameter kerentanan	Akurasi klasifikasi zona	+15–25% akurasi peta risiko
Jalur Evakuasi	Minimasi jarak dan waktu tempuh	Total waktu evakuasi populasi	+18% efisiensi evakuasi (lit.); +28,7% pada simulasi dummy
Alokasi Sumber Daya	Optimasi distribusi logistik	Minimasi biaya & maksimasi cakupan	Efisiensi anggaran 20–30%
Sistem Peringatan Dini	Optimasi ambang batas sensor	Minimasi false alarm rate	Akurasi peringatan $\geq 85\%$
Pemulihan Pasca-Bencana	Prioritasi area rekonstruksi	Indeks pemulihan komunitas	Percepatan pemulihan 25%

Sumber: Sintesis penulis berdasarkan Yi & Özdamar (2007), Corominas et al. (2014), Balcik & Beamon (2008), dan simulasi penulis (2026)

C. Model Konseptual Integrasi GA dalam Siklus Manajemen Bencana

Proses penyusunan Model GA-DESA dilakukan melalui tiga langkah konstruksi model. Pertama, sintesis matriks yang memetakan setiap komponen teknis GA (input data, representasi kromosom, fungsi kebugaran) terhadap empat tahapan siklus manajemen bencana sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3. Kedua, penyelarasan (alignment) hasil sintesis tersebut dengan struktur kelembagaan riil pemerintahan desa, termasuk pemangku kepentingan yang secara faktual terlibat pada setiap tahap (Desa, BPBD, BIG, FPRB, TNI/Polri-SAR, Pemkab, dan donatur), merujuk pada praktik kelembagaan yang telah diatur dalam UU Nomor 24 Tahun 2007 dan Permendagri terkait RPB Desa. Ketiga, validasi awal terhadap kerangka hasil sintesis melalui expert judgment tiga panel ahli sebagaimana dijelaskan pada bagian Metode Penelitian, untuk menilai kelayakan konseptual model sebelum dituangkan dalam bentuk diagram akhir. Model yang dihasilkan dari proses ini disajikan pada Gambar 2. Berdasarkan analisis komprehensif, penulis mengusulkan Model Konseptual GA-DESA (Genetic Algorithm for Disaster Management at Village Level) yang mengintegrasikan penerapan GA ke dalam empat fase siklus manajemen bencana. Model ini dirancang khusus untuk mengakomodasi keterbatasan kapasitas pemerintah desa melalui pendekatan kolaboratif dan implementasi bertahap.



Gambar 2. Model Konseptual GA-Desa : Integrasi Genetic Algorithm dalam Siklus Manajemen Bencana Desa Gemulung

Sumber: Sintesis penulis (2026)

Fase Mitigasi (Jangka Panjang) merupakan fondasi dari seluruh siklus. Pada fase ini, GA digunakan untuk mengoptimalkan pembobotan dalam model Sistem Informasi Bencana Desa (SIBEDESA) guna menghasilkan peta zonasi risiko yang akurat. Data input mencakup peta topografi 1:5.000, data geologi permukaan, rekam historis kejadian longsor, dan indeks kerentanan sosial. Peta risiko yang dihasilkan menjadi dasar perencanaan tata ruang desa dan penetapan kawasan yang tidak boleh dibangun (Permana et al., 2020). Fase Kesiapsiagaan (Jangka Menengah) berfokus pada perencanaan dan pelatihan. GA diimplementasikan untuk mengoptimalkan rencana evakuasi dengan mempertimbangkan berbagai skenario bencana: longsor skala kecil, menengah, dan besar. Output utama fase ini adalah dokumen Rencana Evakuasi Berbasis Data (REBD) yang berisi peta jalur evakuasi primer dan sekunder, lokasi titik kumpul dengan kapasitas optimal, serta jadwal pelatihan evakuasi yang dijadwalkan berdasarkan skenario risiko tertinggi.

Fase Respons (Situasi Darurat) menerapkan GA secara real-time untuk mendukung pengambilan keputusan dalam situasi bencana aktual. Sistem GA terintegrasi dengan data sensor tanah (inclinometer, piezometer) dan stasiun curah hujan otomatis untuk mengoptimalkan alokasi sumber daya darurat secara dinamis. Ketika terjadi peningkatan risiko, sistem akan merekomendasikan komposisi tim respons optimal, rute transportasi logistik yang meminimalkan hambatan, dan prioritas penyelamatan berdasarkan indeks risiko masing-masing lokasi (Berkoune et al., 2012). Fase Pemulihan (Pasca-Bencana) memanfaatkan GA untuk mengoptimalkan urutan dan alokasi rehabilitasi infrastruktur terdampak. Dengan mempertimbangkan keterbatasan anggaran, luasan kerusakan, dan interdependensi infrastruktur, GA menghasilkan rencana pemulihan yang memaksimalkan indeks pemulihan komunitas dalam batasan waktu dan anggaran yang tersedia. Pendekatan ini memastikan bahwa sumber daya pemulihan yang terbatas dialokasikan pada prioritas yang memberikan dampak terbesar bagi ketahanan komunitas jangka panjang.

Tabel 4. Model Konseptual GA-DESA: Integrasi GA dalam Siklus Manajemen Bencana Desa

Fase Siklus	Aplikasi GA	Input Data Utama	Output	Pemangku Kepentingan
Mitigasi	Optimasi peta zonasi risiko	DEM, geologi, historis bencana	Peta Risiko Digital	Desa, BPBD, BIG
Kesiapsiagaan	Perencanaan jalur evakuasi	Jaringan jalan, populasi, elevasi	Dokumen REBD	Desa, BPBD, FPRB
Respons Darurat	Alokasi sumber daya real-time	Data sensor, inventori logistik	Rekomendasi pengeralahan	BPBD, TNI/Polri, SAR
Pemulihan	Prioritasi rekonstruksi	Data kerusakan, anggaran	Rencana pemulihan optimal	Desa, Pemkab, Donatur

Sumber: Sintesis penulis (2026)

D. Faktor Penghambat dan Strategi Implementasi

Analisis hambatan implementasi mengidentifikasi empat kluster utama yang perlu diantisipasi dalam roadmap penerapan GA di pemerintah desa. Kluster pertama adalah hambatan infrastruktur digital, yang mencakup keterbatasan konektivitas internet di daerah pedesaan, minimnya perangkat keras komputasi yang memadai, dan absennya sistem informasi desa yang terintegrasi. Menurut (Kementerian Komunikasi dan Informatika, 2022), lebih dari 40% desa di Kabupaten Cirebon masih berada dalam kategori kurang terlayani dalam hal infrastruktur telekomunikasi. Kluster kedua adalah hambatan data geospasial. Penerapan GA yang efektif membutuhkan data masukan berkualitas tinggi, termasuk Peta Topografi Digital skala 1:5.000, data jenis tanah, dan peta tutupan lahan terkini. Data tersebut umumnya tersedia di tingkat nasional (BIG) dan provinsi, namun belum tersedia dalam format yang mudah diakses dan digunakan oleh pemerintah desa (Rahmawati & Sudibyakto, 2020). Kesenjangan data ini membutuhkan intervensi aktif dari pemerintah kabupaten dan perguruan tinggi.

Kluster ketiga adalah hambatan sumber daya manusia. Operasionalisasi sistem berbasis GA membutuhkan personel dengan literasi digital dan pemahaman dasar tentang komputasi. Survei kapasitas desa di Jawa Barat oleh Tim Peneliti IPDN pada tahun 2025 menunjukkan bahwa kurang dari 15% aparatur desa memiliki kompetensi dalam penggunaan SIG, apalagi algoritma komputasional. Kondisi ini sejalan dengan temuan (Matutina & Fahlevvi, 2025) yang mengidentifikasi kesenjangan generasi dan geografis dalam literasi digital sebagai penghambat struktural penerapan layanan publik berbasis teknologi, yang implikasinya melampaui sekadar kesiapan e-government dan menyentuh

kesiapan adopsi sistem berbasis kecerdasan buatan seperti GA. Peningkatan kapasitas melalui pelatihan intensif dan pendampingan lintas-generasi menjadi prasyarat mutlak.

Kluster keempat adalah hambatan regulasi dan tata kelola. Nomenklatur anggaran desa yang diatur dalam Permendagri Nomor 20 Tahun 2018 belum mengakomodasi penggunaan Dana Desa untuk pembelian perangkat lunak atau lisensi sistem komputasi. Kekosongan regulasi ini menciptakan hambatan fiskal serupa dengan yang ditemukan dalam konteks standardisasi peralatan pemadam kebakaran (Rachman & Ginting, 2025), di mana mandat fungsi telah meluas namun dukungan administratif-anggaran tertinggal.

Tabel 5. Faktor Penghambat dan Strategi Implementasi GA dalam Manajemen Risiko Bencana Desa

Kluster Hambatan	Kondisi Faktual	Strategi Mitigasi	Aktor Kunci
Infrastruktur Digital	Konektivitas terbatas, hardware minim	Program desa digital, cloud computing	Kominfo, BUMN Telko
Data Geospasial	Data tidak tersedia/format tidak kompatibel	Transfer data BIG ke desa, KKN tematik	BIG, Perguruan Tinggi
SDM	<15% aparat desa melek GIS	Pelatihan terstruktur, pendampingan	IPDN, BPBD, Perguruan Tinggi
Regulasi	Nomenklatur anggaran tidak adaptif	Revisi Permendagri, Dana CSR	Kemendagri, Pemkab, Swasta

Sumber: Sintesis penulis berdasarkan Kemenkominfo (2022), IPDN (2025), Rachman & Ginting (2025)

E. Rekomendasi Kolaborasi Pentahelix

Kompleksitas hambatan implementasi yang teridentifikasi menegaskan bahwa penerapan GA dalam manajemen risiko bencana desa tidak dapat dilakukan secara unilateral oleh pemerintah desa semata. Dibutuhkan model kolaborasi Pentahelix yang melibatkan lima aktor utama secara sinergis: pemerintah, akademisi, bisnis/swasta, komunitas, dan media (Carayannis & Campbell, 2009). Pemerintah Desa berperan sebagai pengguna dan operasional sistem. Pemerintah Kabupaten (BPBD, Diskominfo) menyediakan infrastruktur, data, dan dukungan teknis. Perguruan tinggi (IPDN, UNPAD, ITB) berperan dalam pengembangan sistem GA yang adaptif, pelatihan SDM, dan

pendampingan teknis. Sektor swasta menyediakan pembiayaan melalui CSR untuk investasi awal dan pemeliharaan sistem. Komunitas berperan sebagai sumber pengetahuan lokal dan pengguna akhir yang aktif memberikan masukan untuk validasi model.

Preseden praktik kolaborasi multipihak semacam ini bukan tanpa contoh di Indonesia. Studi kolaborasi BPBD Provinsi Jawa Barat dengan akademisi, pelaku usaha, komunitas, dan media dalam mitigasi bencana di wilayah Jawa Barat — satu provinsi yang sama dengan lokus penelitian ini — menunjukkan bahwa peran pemerintah dalam perumusan kebijakan dan pembentukan Desa Tangguh Bencana (Destana) dapat berjalan efektif ketika disertai dukungan riset dari akademisi, pendanaan CSR dari sektor usaha, serta partisipasi aktif komunitas berbasis kearifan lokal (Nugraheni et al., 2025). Pada skala yang lebih spesifik di tingkat desa, kolaborasi antara BPBD Kabupaten Kolaka dan Pemerintah Desa Wulonggere dalam Program Desa Tangguh Bencana (Destana) menunjukkan bahwa kolaborasi aktor yang dibangun melalui sosialisasi terstruktur, pembagian peran yang jelas, dan pendampingan bertahap mampu meningkatkan kepercayaan antar-aktor serta efektivitas program kesiapsiagaan bencana di tingkat desa (Sulfikar et al., 2025). Kedua preseden ini memperkuat argumen bahwa model kolaborasi Pentahelix pada kerangka GA-DESA bukan sekadar rekomendasi normatif, melainkan pendekatan yang telah terbukti dapat diimplementasikan pada konteks pemerintahan desa di Indonesia — meskipun pada domain teknologi yang berbeda (Destana konvensional, bukan sistem berbasis algoritma cerdas). Keberhasilan model kolaborasi ini membutuhkan koordinasi lintas-aktor yang terstruktur dalam forum multi-pihak yang memiliki mandat jelas dan dukungan regulasi yang memadai. Pembentukan Gugus Tugas Inovasi Penanggulangan Bencana Desa (GT-IPBD) di tingkat kabupaten dapat menjadi wadah koordinasi yang efektif, dengan amanah khusus untuk mengawal proses adopsi teknologi cerdas dalam tata kelola bencana lokal.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah menghasilkan kerangka konseptual awal penerapan Genetic Algorithm dalam penguatan manajemen risiko bencana pergerakan tanah pada pemerintah Desa Gemulung. Berdasarkan analisis terhadap kondisi kerentanan lokal, kajian literatur GA, dan kapasitas kelembagaan desa, beberapa temuan utama dapat disimpulkan. Pertama, Desa Gumulung Lebak dan Gumulung Tonggoh memiliki karakteristik

kerentanan tinggi terhadap bencana pergerakan tanah yang tidak diimbangi dengan kapasitas manajemen risiko yang memadai di tingkat pemerintah desa. Absennya sistem informasi risiko, rencana evakuasi berbasis data, dan mekanisme alokasi sumber daya yang efisien menciptakan kesenjangan kritis yang menempatkan komunitas dalam posisi rentan. Kedua, Genetic Algorithm berpotensi memberikan kontribusi transformatif pada tiga komponen utama: optimasi pemetaan zona risiko dengan peningkatan akurasi 15–25%, perencanaan jalur evakuasi yang 18% lebih efisien menurut literatur, serta terilustrasikan pula melalui simulasi sederhana pada penelitian ini yang menunjukkan efisiensi rute hingga 28,7% dibandingkan heuristik konvensional, dan distribusi sumber daya darurat yang menghasilkan efisiensi anggaran 20–30%. Model konseptual GA-DESA yang diusulkan mengintegrasikan aplikasi GA ke dalam keempat fase siklus manajemen bencana secara adaptif terhadap keterbatasan kapasitas desa. Ketiga, implementasi GA menghadapi empat kluster hambatan: infrastruktur digital, ketersediaan data geospasial, kapasitas SDM, dan kesenjangan regulasi. Strategi mengatasi hambatan ini membutuhkan kolaborasi Pentahelix yang terkoordinasi dan didukung oleh regulasi yang adaptif di tingkat kabupaten dan nasional, sebagaimana ditunjukkan pula oleh preseden kolaborasi serupa di Jawa Barat dan Kabupaten Kolaka.

Secara lebih spesifik, temuan baru (novelty) yang dihasilkan penelitian ini adalah tersusunnya logika translasi yang secara eksplisit memetakan kesesuaian antara elemen teknis Genetic Algorithm — representasi kromosom, fungsi kebugaran, dan operator genetik — dengan struktur kelembagaan siklus manajemen bencana pada skala pemerintahan desa (Tabel 3 dan Tabel 4), suatu pemetaan yang belum eksplisit ditemukan pada literatur GA kebencanaan sebelumnya yang umumnya berfokus pada skala kota/regional. Kebaruan ini diperkuat melalui simulasi ilustratif berbasis data dummy yang menunjukkan secara konkret bagaimana logika evolusioner GA bekerja pada konteks jaringan jalan desa yang tidak lengkap (bukan graf penuh), sekaligus melalui identifikasi eksplisit empat kluster hambatan implementasi yang kontekstual bagi pemerintah desa di Indonesia. Perlu ditegaskan bahwa kerangka konseptual GA-DESA yang dihasilkan penelitian ini masih bersifat awal (preliminary) dan belum diuji secara empiris menggunakan data riil Desa Gemulung. Simulasi yang disajikan pada bagian Hasil dan Pembahasan bertujuan ilustratif untuk memperjelas logika kerja GA, bukan validasi kinerja model pada kondisi lapangan aktual. Karena itu, angka-angka potensi peningkatan akurasi maupun efisiensi yang dikutip dari literatur (Tabel 3) perlu dimaknai

sebagai potensi teoretis yang masih memerlukan pengujian lanjutan pada konteks Desa Gemulung secara spesifik, sebelum dapat direkomendasikan sebagai dasar pengambilan kebijakan definitif. Penelitian ini merekomendasikan agar kajian selanjutnya mengembangkan purwarupa (prototype) sistem GA berbasis web yang dapat diakses oleh pemerintah desa, serta melakukan uji coba implementasi terbatas (pilot project) di Gemulung sebagai desa percontohan. Penilaian risiko kuantitatif komprehensif menggunakan data lapangan aktual juga diperlukan untuk memvalidasi parameter model yang diusulkan.

REFERENSI

- Alexander, D. (2002). *Principles of emergency planning and management*. Oxford University Press.
- Badan Informasi Geospasial (BIG). (2022). *Peta Topografi Digital Kecamatan Grege, Kabupaten Cirebon skala 1:25.000*. Badan Informasi Geospasial.
- Badan Meteorologi, K., dan Geofisika (BMKG). (2023). *Data curah hujan historis Kabupaten Cirebon 2013–2023*. BMKG.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). (2023). *Indeks risiko bencana Indonesia 2023*. BNPB Press.
- Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Cirebon. (2023). *Data Kejadian Pergerakan Tanah Kecamatan Grege, Kabupaten Cirebon*. BPBD Kabupaten Cirebon. <https://opendata.cirebonkab.go.id>
- Balcik, B., & Beamon, B. M. (2008). Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 11(2), 101–121. <https://doi.org/10.1080/13675560701561789>
- Berkoune, D., Renaud, J., Rekik, M., & Ruiz, A. (2012). Transportation in disaster response operations. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.05.002>
- Carayannis, E. G., & Campbell, D. F. J. (2009). ‘Mode 3’ and ‘Quadruple Helix’: Toward a 21st century fractal innovation ecosystem. *International Journal of Technology Management*, 46(3/4), 201–234. <https://doi.org/10.1504/IJTM.2009.023374>
- Cheng, M. Y., & Lien, L. C. (2012). A hybrid intelligence approach to enhance the efficiency of a trench-digging project. *Engineering with Computers*, 28(2), 187–200. <https://doi.org/10.1007/s00366-011-0232-6>
- Christoplos, I., Mitchell, J., & Liljelund, A. (2019). Re-framing risk: The changing context of disaster mitigation and preparedness. *Disasters*, 25(3), 185–198. <https://doi.org/10.1111/1467-7717.00172>

- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., & Zezere, J. L. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th edn). Sage Publications.
- Crozier, M. J. (1999). Prediction of rainfall-triggered landslides: A test of the antecedent water status model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(9), 825–833. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199908\)24:9%3C825::AID-ESP14%3E3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199908)24:9%3C825::AID-ESP14%3E3.0.CO;2-M)
- Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons.
- Dimas, M., & Fahlevvi, M. R. (2024). Pengentasan Digital Divide dalam Penerapan E-Government di Kabupaten Sumbawa. *Jurnal Teknologi dan Komunikasi Pemerintahan*, 6(2), 194–215. <https://doi.org/10.33701/jtkp.v6i2.4504>
- Glade, T., & Crozier, M. J. (2005). A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. In T. Glade, M. Anderson, & M. J. Crozier (Eds), *Landslide hazard and risk* (pp. 75–138). John Wiley & Sons.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley.
- Hardiyatmo, H. C. (2012). *Tanah longsor dan erosi: Kejadian dan penanganan*. Gadjah Mada University Press.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Kementerian Komunikasi dan Informatika. (2022). *Peta jalan transformasi digital desa 2022–2024*. Kementerian Komunikasi dan Informatika.
- Maskrey, A. (1989). *Disaster mitigation: A community based approach*. Oxfam.
- Matutina, E. J. B., & Fahlevvi, M. R. (2025). Kesenjangan Generasi dan Geografis dalam Literasi Digital: Implikasinya terhadap Kebijakan E-Government di Kabupaten Sorong. *Jurnal Teknologi dan Komunikasi Pemerintahan*, 7(2), 201–216. <https://doi.org/10.33701/jtkp.v7i2.5771>
- Miles, M. B., & Huberman, A. M. (1994). *Qualitative data analysis: An expanded sourcebook* (2nd edn). SAGE Publications.
- Mitchell, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms*. MIT Press.

- Nugraheni, D., Zhafran, H. R., & Rahman, M. I. P. (2025). Kolaborasi multipihak dalam mitigasi bencana di wilayah provinsi Jawa Barat. *Indonesian Red Crescent Humanitarian Journal*, 4(2), 105–116. <https://doi.org/10.56744/irchum.v4i2.92>
- Permana, A., Hardoyo, S. R., & Wijaya, I. (2020). Kapasitas pemerintah desa dalam penanggulangan bencana: Studi di Jawa Barat. *Jurnal Ketahanan Nasional*, 26(2), 214–234. <https://doi.org/10.22146/jkn.56002>
- Pribadi, K. S., & Gunawan, I. (2021). Pengurangan risiko bencana di Indonesia: Capaian dan tantangan. *Jurnal Penanggulangan Bencana*, 12(1), 1–18.
- Rachman, F., & Ginting, A. H. (2025). Tantangan dalam standardisasi keselamatan operasional untuk respons darurat non-kebakaran. *Jurnal Konstituen*, 7(2), 164–176. <https://doi.org/10.33701/jk.v7i2.5749>
- Rahmawati, N., & Sudibyakto, H. A. (2020). Pemanfaatan sistem informasi geografis dalam manajemen bencana di desa rawan longsor Jawa Barat. *Majalah Geografi Indonesia*, 34(1), 9–17. <https://doi.org/10.22146/mgi.44485>
- Shaw, R. (2012). *Community-based disaster risk reduction*. Emerald Group Publishing.
- Sidle, R. C., & Ochiai, H. (2006). *Landslides: Processes, prediction, and land use*. American Geophysical Union.
- Sulfikar, M., Mallapiseng, A., & Baso, S. (2025). Kolaborasi aktor dalam program Desa Tangguh Bencana (Destana) di Desa Wuloggere Kecamatan Polinggona Kabupaten Kolaka. *Arus Jurnal Sosial Dan Humaniora*, 5(2), 2170–2180. <https://doi.org/10.57250/ajsh.v5i2.1398>
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2009). *Terminology on disaster risk reduction*. UNISDR.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2015). *Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030*. UNDRR.
- Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey). *Catena*, 72(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.01.003>
- Yeh, C. H., & Chou, S. Y. (2013). Fuzzy multi-objective linear programming for optimal facility layout design. *International Journal of Industrial Engineering*, 11(3), 218–229.
- Yi, W., & Özdamar, L. (2007). A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1177–1193. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.077>