



Pemanfaatan *Generative Artificial Intelligence (GenAI)* untuk Prediksi dan Analisis Bencana Alam

Arief Wibowo¹, Asep Surahmat²

¹Program Studi Doktor Ilmu Komputer, Universitas Budi Luhur

²Program Studi Sistem Informasi, Universitas Utpadaka Swastika
arief.wibowo@budiluhur.ac.id

Abstract

Disaster prediction and analysis are crucial components in mitigating the impacts of natural hazards such as floods, earthquakes, and landslides. Conventional systems often rely on deterministic models and limited historical data, which restrict their accuracy and adaptability to dynamic environmental changes. The emergence of Generative Artificial Intelligence (*GenAI*), particularly models based on deep learning and generative architectures such as Generative Adversarial Networks (GANs) and Diffusion Models, introduces new opportunities for synthetic data generation and predictive simulation. This study aims to explore the implementation of *GenAI* in disaster prediction and analysis by reviewing recent literature and practical applications in Indonesia. The proposed framework integrates multimodal data—including meteorological, seismic, and remote sensing data—into generative models to simulate disaster scenarios and improve early warning systems. The results indicate that *GenAI* can enhance data diversity, reduce bias in model training, and support real-time decision-making in disaster management. The study concludes that *GenAI* has strong potential to revolutionize disaster analytics and strengthen climate resilience through adaptive, data-driven insights. Thus, the output of this research is conceptual and focuses on designing a framework, while empirical testing forms the basis for further research development.

Keywords: generative artificial intelligence, disaster prediction, disaster analysis, early warning system

Abstrak

Prediksi dan analisis bencana merupakan komponen penting dalam upaya mitigasi dampak bencana alam seperti banjir, gempa bumi, dan longsor. Sistem konvensional umumnya masih bergantung pada model deterministik dan data historis yang terbatas, sehingga memiliki keterbatasan dalam akurasi serta adaptasi terhadap perubahan lingkungan yang dinamis. Kemunculan *Generative Artificial Intelligence (GenAI)*, khususnya model berbasis *deep learning* seperti *Generative Adversarial Networks (GANs)* dan *Diffusion Models*, membuka peluang baru dalam menghasilkan data sintetis dan melakukan simulasi prediktif. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan *GenAI* dalam prediksi dan analisis bencana melalui kajian literatur dan implementasi praktis di Indonesia. Kerangka kerja yang diusulkan mengintegrasikan berbagai jenis data multimodal—termasuk data meteorologi, seismik, dan penginderaan jauh—ke dalam model generatif untuk mensimulasikan skenario bencana serta memperkuat sistem peringatan dini. Hasil kajian menunjukkan bahwa *GenAI* mampu meningkatkan keragaman data, mengurangi bias pada proses pelatihan model, serta mendukung pengambilan keputusan secara *real-time* dalam manajemen bencana. Kesimpulan penelitian ini menegaskan bahwa *GenAI* memiliki potensi besar dalam merevolusi analitik kebencanaan dan memperkuat ketahanan iklim melalui wawasan yang adaptif dan berbasis data. Dengan demikian luaran penelitian ini bersifat konseptual dan berfokus pada perancangan kerangka kerja, sementara pengujian empiris menjadi dasar pengembangan untuk penelitian lanjutan.

Kata kunci: kecerdasan buatan generatif, prediksi bencana, analisis kebencanaan, sistem peringatan dini

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat risiko bencana alam tertinggi di dunia karena secara geografis terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik [1]. Selain itu, kondisi topografi yang kompleks serta iklim tropis dengan curah hujan tinggi menjadikan wilayah ini sangat rentan terhadap berbagai jenis bencana alam, seperti gempa bumi, tsunami, banjir, tanah longsor, dan letusan gunung berapi. Berdasarkan data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana

(BNPB), pada tahun 2023 tercatat lebih dari 3.000 kejadian bencana di seluruh Indonesia, dengan dampak signifikan terhadap korban jiwa, kerusakan infrastruktur, dan kerugian ekonomi [2]. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mitigasi dan prediksi bencana di Indonesia masih memerlukan peningkatan yang signifikan, khususnya dalam aspek ketepatan waktu, akurasi, dan integrasi data. Sistem prediksi bencana yang banyak digunakan saat ini umumnya masih berbasis pada model deterministik dan pendekatan statistik konvensional [3]. Meskipun metode

ini telah berkontribusi besar dalam tahap awal mitigasi bencana, kemampuannya masih terbatas dalam menangani fenomena alam yang bersifat kompleks, non-linear, dan memiliki variabilitas tinggi. Misalnya, model prediksi banjir masih sangat tergantung pada data curah hujan dan elevasi, sedangkan kejadian aktual dipengaruhi pula oleh tata guna lahan, perubahan iklim, dan kondisi drainase yang dinamis [4]. Ketergantungan pada data historis dan keterbatasan sumber data observasi di beberapa wilayah juga menyebabkan model prediksi kurang adaptif terhadap kondisi aktual di lapangan.

Perkembangan teknologi kecerdasan buatan memberikan peluang baru untuk meningkatkan kualitas prediksi dan analisis bencana. Dalam dekade terakhir, *Machine Learning (ML)* dan *Deep Learning (DL)* telah banyak diterapkan untuk mengidentifikasi pola data yang kompleks dan menghasilkan model prediktif yang lebih akurat [5]. Namun, pendekatan ini masih memerlukan jumlah data yang besar dan seimbang untuk menghasilkan model yang andal. Dalam konteks ini, munculnya *GenAI* menjadi solusi potensial karena memiliki kemampuan untuk menciptakan data baru yang menyerupai distribusi data asli [6]. *GenAI* mencakup berbagai model seperti *GANs*, *Variational Autoencoders (VAEs)*, dan *Diffusion Models*, yang dapat digunakan untuk menghasilkan data sintesis, memperkaya dataset pelatihan, dan mensimulasikan skenario bencana [7]. Dalam bidang kebencanaan, model generatif telah digunakan untuk memperkirakan curah hujan ekstrem, menganalisis pola awan dari citra satelit, serta merekonstruksi data seismik di wilayah dengan keterbatasan sensor [8]. Melalui kemampuannya dalam mempelajari distribusi data secara mendalam, *GenAI* dapat membantu sistem peringatan dini menghasilkan simulasi prediksi yang lebih realistis dan kontekstual.

Beberapa penelitian terbaru menunjukkan hasil positif penggunaan *GenAI* dalam meningkatkan akurasi model prediksi kebencanaan [9]. Dengan mengembangkan sistem prediksi banjir berbasis *generative model* yang mampu meningkatkan ketepatan waktu deteksi dini sebesar 18% dibandingkan model konvensional. Integrasi data multimodal (meteorologi, topografi, dan citra penginderaan jauh) ke dalam model generatif mampu meningkatkan performa sistem peringatan dini secara signifikan [10]. Di Indonesia, ditekankan bahwa penerapan *GenAI* dapat membantu memperluas variasi data bencana dan meningkatkan akurasi sistem prediksi berbasis citra satelit, terutama di daerah yang memiliki keterbatasan data lapangan [11]. Berdasarkan tinjauan literatur dan kondisi empiris tersebut, dapat disimpulkan bahwa pengembangan sistem prediksi dan analisis bencana berbasis *GenAI* menjadi sangat relevan bagi konteks Indonesia yang memiliki risiko kebencanaan tinggi dan tantangan keterbatasan data. Penerapan teknologi ini tidak hanya berpotensi memperbaiki kualitas analisis spasial dan

temporal, tetapi juga memperkuat sistem peringatan dini berbasis data *real-time*. Dengan demikian, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji potensi dan implementasi *GenAI* dalam sistem prediksi dan analisis bencana alam di Indonesia. Tujuan utama penelitian ini adalah: (1) menganalisis prinsip kerja dan keunggulan *GenAI* dalam konteks kebencanaan, (2) mengidentifikasi model generatif yang sesuai untuk berbagai jenis bencana, dan (3) merancang kerangka integrasi data multimodal untuk mendukung sistem peringatan dini.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif berbasis kajian literatur dan analisis konseptual. Pendekatan ini dipilih karena fokus penelitian tidak hanya pada penerapan teknis algoritma, tetapi juga pada pemetaan potensi, struktur sistem, dan arah pengembangan teknologi *GenAI* untuk kebencanaan di Indonesia. Penelitian ini menekankan pada eksplorasi konsep dan analisis sistematis terhadap berbagai model generatif yang relevan dengan konteks kebencanaan, serta menilai kelayakannya untuk diintegrasikan ke dalam sistem prediksi bencana.

Secara garis besar, metode penelitian ini terdiri dari empat tahap utama, yaitu:

1. studi literatur dan pengumpulan data sekunder,
2. analisis model generatif dan karakteristik data,
3. perancangan kerangka sistem prediksi bencana berbasis *GenAI*, dan
4. evaluasi potensi implementasi serta tantangan penerapan di Indonesia.

Keempat tahap tersebut saling terhubung secara logis dan membentuk alur penelitian yang sistematis dari identifikasi masalah hingga rekomendasi solusi.

2.1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data Sekunder

Tahap pertama dimulai dengan pengumpulan informasi dan data sekunder melalui kajian pustaka dari berbagai sumber ilmiah yang relevan. Literatur yang dikaji mencakup jurnal internasional, prosiding seminar, laporan penelitian, dokumen kebijakan pemerintah, serta buku-buku yang berkaitan dengan penerapan kecerdasan buatan dalam kebencanaan. Fokus utama kajian adalah untuk memahami bagaimana teknologi *machine learning*, *deep learning*, dan khususnya *GenAI* telah diterapkan dalam berbagai kasus prediksi bencana seperti banjir, tanah longsor, dan gempa bumi.

Selain itu, pada tahap ini dilakukan pula pengumpulan data sekunder dari lembaga resmi seperti BMKG, BNPB, dan LAPAN, yang menyediakan data meteorologi, seismik, hidrologi, serta citra satelit wilayah Indonesia. Data tersebut digunakan sebagai referensi dalam memahami karakteristik data kebencanaan yang akan menjadi dasar pengembangan model konseptual sistem prediksi. Proses pengumpulan

dilakukan dengan prinsip keterlacakan sumber, relevansi ilmiah, serta validitas isi agar seluruh informasi yang digunakan memiliki nilai akademik yang dapat dipertanggungjawabkan.

2.2. Analisis Model Generatif dan Karakteristik Data

Tahap kedua difokuskan pada analisis mendalam terhadap berbagai model generatif yang dapat digunakan untuk memproses dan menghasilkan data kebencanaan. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan tiga aspek utama, yaitu kemampuan model dalam menghasilkan data sintetis yang realistis, kestabilan proses pelatihan, dan kesesuaian model terhadap karakteristik data bencana yang bersifat spasial dan temporal.

Model *GANs* dianalisis karena kemampuannya menghasilkan data baru berdasarkan distribusi data asli. Model ini sangat berguna untuk memperluas dataset curah hujan, topografi, dan citra satelit, yang seringkali terbatas pada wilayah tertentu. Selanjutnya, *Variational Autoencoders (VAEs)* dievaluasi karena kemampuannya merekonstruksi data yang hilang atau rusak akibat gangguan sinyal sensor atau citra awan tebal. Sementara itu, *Diffusion Models* dikaji karena mampu menghasilkan simulasi data lingkungan yang dinamis dan realistis dengan tingkat kesalahan yang relatif rendah.

Analisis ini juga mencakup perbandingan keunggulan dan keterbatasan masing-masing model. Misalnya, *GANs* unggul dalam kualitas data hasil sintesis, tetapi memerlukan stabilitas pelatihan yang tinggi; *VAE* efisien untuk rekonstruksi data, namun menghasilkan variasi yang kurang tajam; sedangkan *Diffusion Model* menawarkan hasil yang halus dan adaptif, meskipun membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama. Dari hasil analisis ini, diperoleh gambaran mengenai model generatif yang paling sesuai untuk diterapkan dalam konteks prediksi dan analisis kebencanaan di Indonesia.

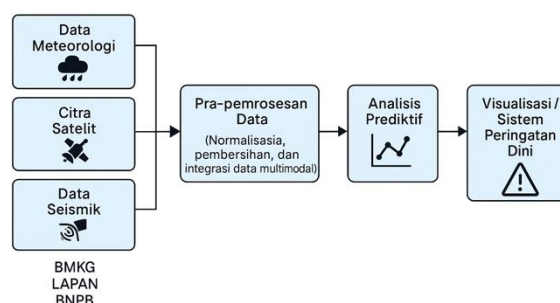
2.3. Perancangan Kerangka Sistem Prediksi Bencana Berbasis *GenAI*

Tahap ketiga merupakan inti dari penelitian ini, yaitu perancangan kerangka sistem konseptual prediksi bencana berbasis *GenAI*. Kerangka ini dibangun berdasarkan prinsip integrasi data multimodal dan pembelajaran adaptif (*adaptive data-driven system*). Sistem dirancang agar mampu menggabungkan berbagai jenis data, seperti data meteorologi, hidrologi, seismik, dan citra satelit, ke dalam satu lingkungan pemrosesan yang terpadu.

Proses kerja sistem dimulai dari akuisisi data, di mana berbagai sumber data diperoleh secara berkala dari sensor darat, satelit, dan stasiun cuaca. Data tersebut kemudian masuk ke tahap pra-pemrosesan, yang meliputi pembersihan data dari noise, normalisasi, transformasi format, serta pengisian nilai data yang

hilang menggunakan *autoencoder*. Setelah data siap, sistem beralih ke tahap pemodelan generatif, di mana model *GANs* digunakan untuk menghasilkan data sintetis, *VAE* digunakan untuk merekonstruksi data yang tidak lengkap, dan *Diffusion Model* digunakan untuk mensimulasikan skenario bencana secara virtual.

Hasil dari model generatif kemudian diproses oleh modul analisis prediktif, yang menggunakan model *Convolutional Neural Network (CNN)* atau *Recurrent Neural Network (RNN)* untuk mendeteksi pola temporal dan spasial yang mengindikasikan potensi bencana. Tahap terakhir adalah visualisasi dan sistem peringatan dini, di mana hasil prediksi divisualisasikan dalam bentuk peta interaktif berbasis *Geographic Information System (GIS)*. Sistem ini memungkinkan lembaga terkait untuk memantau perubahan kondisi lingkungan secara *real-time* dan mengambil keputusan mitigasi yang cepat dan tepat. Model yang diusulkan untuk generatif untuk kebencanaan terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Arsitektur Model Generatif AI untuk Bencana

Kerangka sistem yang diusulkan terlihat pada Gambar 1. Secara konseptual, sistem prediksi bencana berbasis *GenAI* ini dirancang untuk mengintegrasikan berbagai sumber data kebencanaan dari lembaga nasional seperti BMKG, LAPAN, dan BNPB, yang mencakup data meteorologi, citra satelit, serta data seismik. Seluruh data tersebut melalui proses pra-pemrosesan meliputi normalisasi, pembersihan, dan integrasi data multimodal untuk memastikan konsistensi dan kualitas informasi yang akan digunakan oleh model.

Selanjutnya, data yang telah diproses dimasukkan ke dalam model generatif yang terdiri dari *GANs*, *Variational Autoencoders (VAEs)*, dan *Diffusion Models* guna menghasilkan data sintetis atau merekonstruksi data yang hilang. Hasil dari tahap ini diteruskan ke modul analisis prediktif, yang memanfaatkan algoritma *Convolutional Neural Network (CNN)* atau *Recurrent Neural Network (RNN)* untuk mendeteksi pola spasial-temporal yang mengindikasikan potensi bencana. Akhirnya, hasil analisis divisualisasikan melalui sistem peringatan dini berbasis GIS, sehingga lembaga terkait dapat memantau kondisi lingkungan secara *real-time* dan mengambil langkah mitigasi yang cepat dan tepat.

Melalui kerangka sistem pada Gambar 1, alur integrasi antara data lingkungan, model generatif, dan analisis prediktif dapat dipahami secara sistematis.

Desain ini menegaskan bahwa penerapan *GenAI* tidak berdiri sendiri, tetapi merupakan bagian dari ekosistem data kebencanaan yang bersifat adaptif dan berkesinambungan. Pendekatan ini memungkinkan sistem untuk terus memperbarui pola prediksi seiring masuknya data baru, sehingga menghasilkan model yang lebih akurat, kontekstual, dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Dengan rancangan ini, tahap berikutnya dari penelitian difokuskan pada evaluasi potensi implementasi dan tantangan penerapan sistem di Indonesia, mencakup aspek teknis, kebijakan, serta kesiapan sumber daya manusia.

2.4. Evaluasi Potensi Implementasi dan Tantangan

Tahap keempat bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana sistem berbasis *GenAI* dapat diimplementasikan di Indonesia serta mengidentifikasi berbagai tantangan yang mungkin dihadapi. Evaluasi dilakukan melalui analisis deskriptif terhadap aspek teknis, sumber daya manusia, kebijakan, dan infrastruktur pendukung.

Dari sisi teknis, tantangan utama terletak pada keterbatasan data observasi di daerah terpencil serta kebutuhan komputasi yang tinggi dalam pelatihan model AI berskala besar. Selain itu, proses penggabungan data dari berbagai sumber memerlukan standar interoperabilitas yang kuat agar sistem dapat berjalan dengan konsisten. Dari sisi sumber daya manusia, dibutuhkan peningkatan kapasitas peneliti dan teknisi dalam bidang *data science*, pemrograman model AI, serta analisis spasial kebencanaan.

Dari aspek kebijakan, diperlukan dukungan pemerintah dalam bentuk regulasi keterbukaan data, penyediaan infrastruktur pusat data nasional, serta kolaborasi lintas lembaga antara BMKG, BNPB, perguruan tinggi, dan lembaga penelitian. Dengan dukungan yang terarah, penerapan *GenAI* berpotensi menjadi bagian integral dari sistem peringatan dini bencana nasional, membantu proses mitigasi berbasis data, serta memperkuat kesiapsiagaan masyarakat terhadap ancaman bencana alam.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian ini berupa rancangan konseptual penerapan *GenAI* dalam sistem prediksi dan analisis bencana alam, yang berfokus pada integrasi antara data lingkungan dan kemampuan model generatif dalam menghasilkan simulasi prediktif yang akurat. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan pada tahap sebelumnya, diperoleh gambaran bahwa penerapan *GenAI* dapat memperkuat sistem manajemen kebencanaan dengan meningkatkan kualitas data, memperluas cakupan analisis, serta mempercepat proses deteksi dini terhadap potensi bencana.

3.1. Pemanfaatan *GenAI* dalam Analisis Bencana

Hasil kajian menunjukkan bahwa *GenAI* memiliki kemampuan unik untuk mempelajari pola tersembunyi dari data kebencanaan dan menghasilkan data baru yang menyerupai kondisi aktual. Dalam konteks kebencanaan hidrometeorologi, misalnya, model *GANs* dapat digunakan untuk menghasilkan data curah hujan sintetis berdasarkan distribusi historis dan tren iklim yang sedang berlangsung. Data sintetis tersebut berfungsi untuk memperkaya dataset yang sering kali terbatas, terutama di wilayah yang minim stasiun pengamatan.

Pada bidang seismologi, *Variational Autoencoders* (*VAEs*) dapat dimanfaatkan untuk merekonstruksi sinyal seismik yang hilang akibat gangguan sensor atau keterbatasan cakupan jaringan pengamatan. Dengan kemampuan rekonstruksi ini, sistem dapat memetakan aktivitas seismik dengan resolusi spasial yang lebih tinggi dan menghasilkan peta risiko gempa yang lebih komprehensif. Sementara itu, *Diffusion Models* dapat digunakan untuk melakukan simulasi multi-skenario bencana, seperti prediksi arah pergerakan awan hujan ekstrem atau penyebaran debu vulkanik dari letusan gunung berapi.

Dengan demikian, penggunaan *GenAI* tidak hanya berfungsi untuk memprediksi kemungkinan terjadinya bencana, tetapi juga membantu dalam analisis dampak serta pengambilan keputusan strategis dalam fase tanggap darurat dan rehabilitasi. Sistem berbasis AI ini dapat digunakan untuk menguji berbagai skenario kebencanaan melalui data simulatif, sehingga lembaga kebencanaan dapat menyiapkan langkah mitigasi sebelum kejadian nyata berlangsung.

3.2. Peningkatan Kualitas Data dan Simulasi Skenario

Salah satu hasil penting dari penerapan *GenAI* adalah peningkatan kualitas dan kelengkapan data kebencanaan. Model generatif mampu memperbaiki dataset yang tidak lengkap akibat hilangnya data pengamatan, *noise* pada citra satelit, atau keterbatasan sensor di lapangan. Misalnya, dengan menggunakan *autoencoder*, data citra yang tertutup awan dapat direkonstruksi untuk menampilkan kondisi permukaan bumi secara lebih jelas. Hal ini sangat bermanfaat untuk pemantauan banjir dan longsor di daerah tropis seperti Indonesia yang sering tertutup awan tebal.

Selain itu, model generatif juga dapat menghasilkan simulasi skenario bencana dengan tingkat realisme tinggi. Misalnya, pada analisis banjir, model *GANs* dapat digunakan untuk memprediksi pola genangan berdasarkan variabel curah hujan, ketinggian permukaan tanah, dan kepadatan permukiman. Simulasi ini membantu pemerintah daerah memahami potensi penyebaran banjir dan merancang sistem drainase yang lebih efisien. Pada konteks tanah longsor, model generatif dapat digunakan untuk memperkirakan titik-titik rawan dengan mengombinasikan data kelerengan, curah hujan ekstrem, dan jenis tanah. Dengan kemampuan menghasilkan data sintetis dan visualisasi

spasial yang realistis, *GenAI* mendukung proses pengambilan keputusan berbasis bukti (*evidence-based decision making*) dalam kebijakan mitigasi bencana.

3.3. Integrasi Model Generatif dengan Sistem Peringatan Dini

Hasil kajian juga menunjukkan bahwa integrasi *GenAI* dengan sistem peringatan dini dapat meningkatkan efektivitas dalam mendeteksi perubahan kondisi lingkungan secara *real-time*. Melalui sistem berbasis *data-driven adaptive learning*, model generatif mampu mempelajari data baru yang masuk setiap saat, memperbarui prediksi, dan memberikan peringatan lebih dini terhadap potensi bencana.

Sebagai contoh, dalam sistem pemantauan banjir, data curah hujan dari sensor cuaca dapat langsung diproses oleh model generatif untuk memperkirakan potensi luapan sungai di daerah perkotaan. Jika hasil simulasi menunjukkan peningkatan risiko, sistem dapat mengirimkan sinyal peringatan kepada operator dan masyarakat melalui *dashboard* berbasis *Geographic Information System (GIS)*. Pendekatan ini berbeda dengan sistem konvensional yang sering kali bergantung pada data historis statis dan memiliki jeda waktu antara pengamatan dan deteksi.

Integrasi ini juga membuka peluang untuk membangun sistem kebencanaan nasional yang bersifat adaptif dan kolaboratif. Dengan memanfaatkan *cloud computing* dan *big data infrastructure*, data dari berbagai lembaga seperti BMKG, BNPB, dan LAPAN dapat diolah bersama dalam satu ekosistem digital. Hal ini mempercepat pertukaran informasi, memperluas jangkauan prediksi, dan meningkatkan respons terhadap ancaman bencana secara nasional.

3.4. Pembahasan dan Implikasi terhadap Kebijakan Kebencanaan

Penerapan *GenAI* untuk prediksi dan analisis bencana di Indonesia memberikan sejumlah implikasi penting. Dari sisi ilmiah, pendekatan ini mampu menghasilkan data yang lebih kaya dan akurat, memperluas ruang analisis spasial, serta meningkatkan kemampuan model dalam mempelajari pola non-linear yang kompleks. Dari sisi teknis, penggunaan model generatif membuka peluang untuk mengatasi keterbatasan data, memperbaiki kualitas observasi, dan mempercepat waktu respons terhadap kejadian bencana. Namun demikian, hasil penelitian ini juga menunjukkan adanya beberapa tantangan yang perlu diperhatikan. Pertama, proses pelatihan model generatif memerlukan daya komputasi yang tinggi serta dataset yang terstandarisasi agar hasil yang diperoleh konsisten. Kedua, masih terdapat kesenjangan dalam integrasi data antarinstansi karena perbedaan format, resolusi, dan frekuensi pembaruan data. Ketiga, aspek etika dan keamanan data perlu menjadi perhatian, terutama dalam penggunaan data publik yang bersifat sensitif seperti peta penduduk dan citra wilayah terdampak.

Dari perspektif kebijakan, hasil kajian ini menegaskan perlunya strategi nasional yang mendorong pemanfaatan *GenAI* secara sistematis dalam sistem kebencanaan. Pemerintah dapat berperan melalui pengembangan pusat data nasional untuk kebencanaan, peningkatan kapasitas SDM dalam bidang analitik data dan kecerdasan buatan, serta penyusunan panduan etika pemanfaatan AI. Jika diterapkan dengan tepat, *GenAI* berpotensi menjadi fondasi penting dalam transformasi digital kebencanaan di Indonesia, memperkuat ketahanan nasional, dan melindungi masyarakat dari dampak bencana yang semakin kompleks di masa depan.

3.5 Analisis Kritis Antar-Model Generatif

Untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai potensi dan keterbatasan masing-masing pendekatan, dilakukan analisis kritis terhadap tiga model generatif utama yang banyak digunakan dalam penelitian ini, yaitu *GANs*, *Variational Autoencoders (VAEs)*, dan *Diffusion Models*. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik teknis, keunggulan, serta kesesuaian setiap model terhadap berbagai jenis data kebencanaan yang bersifat spasial dan temporal. Dengan memahami perbedaan mendasar di antara ketiganya, peneliti dan praktisi dapat menentukan model yang paling tepat untuk diterapkan pada konteks bencana tertentu, seperti banjir, gempa bumi, atau erupsi gunung berapi.

Perbandingan dilakukan berdasarkan beberapa kriteria evaluasi ilmiah, mencakup kemampuan menghasilkan data sintetis, stabilitas pelatihan, kebutuhan komputasi, serta relevansi model terhadap karakteristik fenomena kebencanaan di Indonesia. Rangkuman hasil analisis disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Antar Model Generatif

Aspek Evaluasi	<i>GANs</i>	<i>Variational Autoencoders (VAEs)</i>	<i>Diffusion Models</i>
Jenis Data yang Cocok	Citra satelit, curah hujan, topografi (data visual/spasial)	Data seismik, suhu, atau citra parsial (data dengan <i>missing value</i>)	Data temporal kompleks seperti pergerakan awan, pola banjir dinamis
Kelebihan Utama	Realisme tinggi, mampu memperkaya dataset	Efisien dalam rekonstruksi data hilang	Akurasi tinggi, hasil stabil, cocok untuk simulasi multi-skenario
Keterbatasan	Pelatihan sulit (<i>mode collapse</i>)	Detail visual kadang kurang tajam	Komputasi berat, waktu pelatihan lama
Aplikasi Ideal	Prediksi banjir, peta genangan	Rekonstruksi data gempa / citra tertutup awan	Simulasi arah angin, penyebaran abu vulkanik, prediksi curah hujan ekstrem

Berdasarkan analisis komparatif, dapat disimpulkan bahwa tidak ada satu model yang bersifat universal optimum. Pemilihan model bergantung pada

jenis data dan kebutuhan sistem. Untuk sistem peringatan dini bencana berbasis citra, *GANs* memberikan performa terbaik dari sisi realisme visual. Namun untuk sistem monitoring berbasis sensor, VAE menawarkan efisiensi komputasi dan kemampuan rekonstruksi yang lebih baik. *Diffusion Model*, meskipun menuntut sumber daya tinggi, memiliki potensi besar untuk digunakan pada skenario simulasi bencana berskala nasional karena hasilnya lebih stabil dan interpretatif.

Dalam konteks Indonesia yang memiliki keragaman topografi dan cuaca ekstrem, pemilihan model generatif perlu disesuaikan dengan jenis bencana. Model *GANs* lebih efektif digunakan untuk prediksi banjir perkotaan, karena mampu menghasilkan citra genangan sintetis berbasis curah hujan dan ketinggian tanah. Sebaliknya, VAE lebih sesuai untuk analisis gempa bumi di wilayah dengan keterbatasan data sensor, karena mampu merekonstruksi sinyal seismik yang hilang. Sementara itu, *Diffusion Model* lebih cocok untuk prediksi dinamika atmosfer, seperti pergerakan awan hujan ekstrem atau penyebaran debu vulkanik, mengingat kemampuannya dalam menghasilkan simulasi temporal yang lebih halus dan stabil.

4. Kesimpulan

Penelitian ini telah mengkaji secara komprehensif potensi penerapan *GenAI* dalam sistem prediksi dan analisis bencana alam di Indonesia. Berdasarkan hasil kajian dan analisis yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *GenAI* memiliki kemampuan yang signifikan dalam meningkatkan kualitas data, memperluas cakupan analisis, serta mempercepat proses deteksi dini terhadap bencana. Melalui model seperti *GANs*, *Variational Autoencoders (VAEs)*, dan *Diffusion Models*, sistem prediksi bencana dapat memperoleh data sintetis yang realistis, merekonstruksi data yang hilang, serta mensimulasikan berbagai skenario bencana secara dinamis. Penerapan *GenAI* terbukti dapat membantu memperbaiki permasalahan utama yang selama ini dihadapi sistem prediksi konvensional, yaitu keterbatasan data observasi, keterlambatan analisis, dan rendahnya akurasi pada kondisi ekstrem. Dengan mengintegrasikan data multimodal seperti meteorologi, seismik, hidrologi, dan citra penginderaan jauh, sistem berbasis *GenAI* dapat menghasilkan analisis spasial dan temporal yang lebih lengkap serta adaptif terhadap perubahan lingkungan.

Selain dari sisi teknis, penelitian ini juga menegaskan pentingnya dukungan kelembagaan dan kebijakan dalam mendorong pemanfaatan teknologi *GenAI* di bidang kebencanaan. Pemerintah perlu membangun ekosistem data yang terbuka, meningkatkan kapasitas sumber daya manusia dalam bidang analisis data dan pembelajaran mesin, serta memperkuat kerja sama antara lembaga penelitian, universitas, dan instansi kebencanaan. Secara keseluruhan, *GenAI* memiliki potensi besar untuk menjadi fondasi utama dalam

pengembangan sistem peringatan dini dan manajemen kebencanaan yang lebih modern, akurat, dan berbasis data. Teknologi ini tidak hanya dapat digunakan untuk prediksi bencana, tetapi juga untuk mendukung perencanaan mitigasi, penilaian risiko, dan simulasi kebijakan adaptif.

Sebagai tindak lanjut, penelitian lanjutan disarankan untuk fokus pada pengujian model generatif menggunakan data kebencanaan aktual di Indonesia, pengembangan sistem prototipe berbasis *cloud computing*, serta penilaian performa model dalam kondisi *real-time*. Langkah ini diharapkan dapat mempercepat proses implementasi *GenAI* sebagai bagian integral dari sistem manajemen kebencanaan nasional dan memperkuat ketahanan Indonesia terhadap ancaman bencana di masa depan.

Daftar Pustaka

- [1] M. Muzani, I. Mataburu, and T. Tafiati, "Vulnerability and tsunami disaster on the west coast Banten province, Indonesia," *All Earth*, vol. 36, pp. 1–12, 2024, doi: 10.1080/27669645.2024.2323355.
- [2] A. Wiyanti and A. Halimatussadiah, "Are Disasters a Risk to Regional Fiscal Balance? Evidence from Indonesia," *International Journal of Disaster Risk Science*, vol. 12, pp. 839–853, 2021, doi: 10.1007/s13753-021-00374-2.
- [3] T. Ophiyandri, A. Junaidi, A. Takagi, and D. Syandriaji, "Hazard Risk Management and Mitigation System of Earthquake and Tsunami on Disaster-Prone Area," *Int J Adv Sci Eng Inf Technol*, p., 2020, doi: 10.18517/ijaseit.10.3.11467.
- [4] M. Brunner, L. Slater, L. Tallaksen, and M. Clark, "Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 8, p., 2021, doi: 10.1002/wat2.1520.
- [5] A. Albahri *et al.*, "A systematic review of trustworthy artificial intelligence applications in natural disasters," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 118, p. 109409, 2024, doi: 10.1016/j.compeleceng.2024.109409.
- [6] Y. Chen, Z. Yan, and Y. Zhu, "A comprehensive survey for generative data augmentation," *Neurocomputing*, vol. 600, p. 128167, 2024, doi: 10.1016/j.neucom.2024.128167.
- [7] X. Yang, T. Ye, X. Yuan, W. Zhu, X. Mei, and F. Zhou, "A Novel Data Augmentation Method Based on Denoising Diffusion Probabilistic Model for Fault Diagnosis Under Imbalanced Data," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 20, pp. 7820–7831, 2024, doi: 10.1109/TII.2024.3366991.
- [8] Md. J. Piran, X. Wang, H. J. Kim, and H.-H. Kwon, "Precipitation nowcasting using transformer-based generative models and transfer learning for improved disaster preparedness," *Int. J. Appl. Earth*

- Obs. Geoinformation*, vol. 132, p. 103962, 2024, doi: 10.1016/j.jag.2024.103962.
- [9] K. Adikari, S. Shrestha, D. Ratnayake, A. Budhathoki, S. Mohanasundaram, and M. Dailey, "Evaluation of artificial intelligence models for flood and drought forecasting in arid and tropical regions," *Environ. Model. Softw.*, vol. 144, p. 105136, 2021, doi: 10.1016/J.ENVSOFT.2021.105136.
- [10] N. Strem, D. Dhimi, B. Schmidt, and K. Kersting, "Multimodal transformer for early alarm prediction," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 139, p. 109643, 2025, doi: 10.1016/j.engappai.2024.109643.
- [11] M. Rüttgers, S. Jeon, S. Lee, and D. You, "Prediction of typhoon track and intensity using a generative adversarial network with observational and meteorological data," *IEEE Access*, vol. PP, p. 1, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3172301.