

Artificial Intelligence dalam Prediksi dan Manajemen Bencana: Tinjauan Literatur Komprehensif

Andi Wafda ^{1*}

¹ Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

* 22917022@students.uii.ac.id

Abstract

Peningkatan frekuensi dan intensitas bencana alam seperti banjir, gempa bumi, dan tsunami menuntut pengembangan sistem yang lebih baik untuk prediksi dan manajemen bencana. Artificial Intelligence (AI) menawarkan potensi besar dalam meningkatkan akurasi dan efektivitas prediksi bencana dengan menganalisis data besar dan kompleks. Namun, penerapannya menghadapi tantangan seperti keterbatasan data dan kebutuhan sumber daya komputasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi aplikasi AI dalam prediksi dan manajemen bencana dengan menilai algoritma Machine Learning (ML) dan Deep Learning (DL), serta mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan metode yang digunakan. Penelitian ini menggunakan metode tinjauan literatur sistematis dengan beberapa langkah utama. Pencarian literatur dilakukan melalui basis data akademis seperti IEEE Xplore, ScienceDirect, dan ArXiv, dengan kata kunci terkait penerapan AI dalam manajemen bencana. Artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan eksklusi dipilih, kemudian melalui seleksi awal berdasarkan judul dan abstrak serta tinjauan teks penuh. Data dari artikel yang relevan diekstraksi, dikategorikan, dan disintesis untuk mengidentifikasi pola dan tren. Penelitian ini menemukan bahwa penerapan AI dalam prediksi bencana alam, seperti banjir, gempa bumi, dan tsunami, telah meningkatkan akurasi dan efektivitas sistem peringatan dini. Teknik deep learning seperti LSTM dan model hibrida efektif dalam prediksi banjir. Untuk gempa bumi, model seperti ELM dan 3D CNN meningkatkan akurasi prediksi. Teknik seperti CNN dan autoencoder menunjukkan hasil menjanjikan dalam memprediksi dan merekonstruksi tsunami. Meskipun demikian, tantangan terkait keterbatasan data dan kebutuhan sumber daya komputasi masih ada, mempengaruhi penerapan praktis AI dalam sistem manajemen bencana. Penerapan AI menunjukkan kemajuan signifikan dalam prediksi bencana, namun beberapa tantangan harus diatasi untuk meningkatkan efektivitasnya. Penelitian lebih lanjut dianjurkan untuk mengeksplorasi integrasi AI dengan sistem respons bencana yang ada dan memperbaiki teknik AI untuk menangani data yang tidak lengkap dan tidak seimbang.

Keywords: *Artificial Intelligence; Prediksi; Manajemen Bencana; Tinjauan Literatur*

Pendahuluan

Manajemen bencana merupakan aspek penting dalam masyarakat, terutama di wilayah yang rawan bencana alam seperti banjir, gempa bumi, dan tsunami. Frekuensi dan intensitas bencana alam yang telah meningkat secara signifikan dalam beberapa dekade terakhir, mengakibatkan kerusakan luas pada infrastruktur, ekonomi, dan kehidupan manusia. Di Indonesia, sebagai negara yang terletak di Cincin Api Pasifik,

merupakan salah satu wilayah yang paling rentan terhadap berbagai jenis bencana ini. Misalnya, gempa bumi besar yang terjadi di Sulawesi Tengah pada tahun 2018 mengakibatkan ribuan korban jiwa dan kerusakan infrastruktur yang meluas (Retno et al, 2020). Banjir yang sering melanda daerah Jawa juga menunjukkan dampak besar pada kehidupan sehari-hari dan ekonomi lokal, dengan kerugian mencapai miliaran rupiah setiap tahunnya (Oktaviani, 2020).

Permasalahan ini menuntut pengembangan sistem yang dapat memberikan prediksi lebih akurat dan respons yang lebih cepat terhadap bencana. Kecerdasan buatan atau Artificial Intelligence (AI) telah muncul sebagai alat yang ampuh yakni berbagai algoritma Machine Learning dan Deep Learning dalam meningkatkan prediksi dan manajemen bencana dengan memanfaatkan kemampuannya dalam analisis data, pengenalan pola, dan pengambilan keputusan. AI dapat menganalisis data besar dan kompleks untuk memberikan prediksi yang lebih tepat tentang bencana, memungkinkan upaya mitigasi yang lebih efektif (Kappi & Mallikarjuna, 2024). Namun, penerapan AI dalam konteks bencana alam menghadapi berbagai tantangan. Keterbatasan data, baik dari segi kualitas maupun kuantitas, sering menjadi hambatan utama dalam pengembangan model yang efektif (Velez & Zlateva, 2023). Model-model ini juga memerlukan sumber daya komputasi yang tinggi dan dapat mengalami kesulitan dalam menangani data yang tidak seimbang atau tidak lengkap (Chandra & Lakshmi, 2024). Selain itu, integrasi sistem AI dengan sistem respons bencana yang ada memerlukan penyesuaian agar teknologi ini dapat diterapkan secara efektif dalam situasi nyata.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada aplikasi AI dalam prediksi dan manajemen bencana khususnya pada bencana banjir, gempa bumi, dan tsunami. Fokus utama terletak pada evaluasi bagaimana algoritma Machine Learning dan Deep Learning diterapkan dalam memprediksi berbagai jenis bencana, penilaian keberhasilan studi kasus yang ada, serta identifikasi keunggulan dan keterbatasan metode yang digunakan. Analisis ini diharapkan dapat memberikan wawasan mengenai kemajuan terkini, tantangan yang dihadapi, dan arah masa depan teknologi AI dalam domain bencana. Tujuan akhirnya adalah merencanakan strategi dan langkah-langkah yang lebih baik dalam penelitian dan penerapan teknologi AI untuk mitigasi dan manajemen bencana di masa depan.

Pertanyaan penelitian yang menjadi fokus adalah bagaimana penerapan berbagai algoritma Artificial Intelligence (AI), yaitu Machine Learning (ML) dan Deep Learning (DL) dalam prediksi dan manajemen bencana seperti gempa bumi, tsunami, dan banjir dapat meningkatkan akurasi dan efektivitas sistem prediksi bencana, serta apa tantangan dan kekurangan yang dihadapi dalam implementasinya?

Tinjauan literatur ini bertujuan untuk mengeksplorasi aplikasi Artificial Intelligence (AI) dalam prediksi dan manajemen bencana dengan fokus pada beberapa tujuan utama, yaitu mengidentifikasi dan membandingkan algoritma AI yang digunakan dalam konteks prediksi bencana seperti penerapan machine learning dan deep learning, menyajikan studi kasus yang menunjukkan penerapan teknik AI dalam memprediksi berbagai jenis bencana, yaitu banjir, gempa bumi dan tsunami, serta menguraikan hasil dan temuan dari berbagai penelitian terkait, seperti akurasi dan efektivitas metode yang digunakan, menilai dampak dan manfaat dari penerapan AI dalam domain ini, dengan fokus pada efektivitas prediksi dan tantangan yang dihadapi, serta memberikan rekomendasi untuk meningkatkan sistem prediksi bencana berbasis AI di masa depan. Referensi yang

digunakan dalam tinjauan ini mencakup berbagai studi yang mengkaji algoritma AI dalam konteks bencana alam, seperti gempa bumi, tsunami, dan banjir. Artikel ini bertujuan memberikan gambaran komprehensif tentang bagaimana teknologi AI dapat digunakan untuk meningkatkan prediksi bencana dan mengurangi dampak yang ditimbulkan.

Metode

Mengikuti metode tinjauan literatur sistematis yang telah ditetapkan, penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang berbeda. Pertama, dilakukan identifikasi sumber pencarian dengan menggunakan berbagai kata kunci yang dikembangkan terkait aplikasi AI dalam prediksi dan manajemen bencana alam, khususnya gempa bumi, tsunami, dan banjir. Kedua, penentuan kriteria inklusi dan eksklusi diterapkan untuk memandu proses seleksi literatur, memastikan bahwa hanya sumber yang relevan, berkualitas, dan sesuai dengan fokus penelitian yang akan disertakan dalam tinjauan ini. Ketiga, dilakukan seleksi awal dan penelusuran mendalam terhadap literatur yang terpilih, diikuti dengan penilaian kritis, ekstraksi data, dan sintesis temuan-temuan sebelumnya. Pendekatan ini dirancang untuk memberikan pandangan komprehensif tentang penerapan AI dalam konteks bencana alam, serta mengidentifikasi tren dan tantangan yang ada di bidang ini.

Strategi pencarian literatur dilakukan secara komprehensif untuk memastikan bahwa seluruh artikel yang relevan dengan topik penelitian diidentifikasi dan dianalisis. Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis data akademis utama, seperti IEEE Xplore, ScienceDirect, dan ArXiv. Basis data ini dipilih karena mereka menyediakan akses ke publikasi ilmiah yang berkualitas tinggi dalam bidang teknologi, sains, dan teknik, serta mencakup berbagai studi terkini tentang aplikasi AI. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian mencakup kombinasi dari istilah-istilah spesifik seperti "Machine learning for Disaster Prediction", "Deep Learning for Disaster Prediction", dan "Deep Learning in Natural Disaster Response". Kata kunci ini dipilih untuk mencakup berbagai aspek penerapan AI dalam manajemen bencana, dengan tujuan memastikan bahwa literatur yang relevan dan terkini ditemukan.

Pencarian dilakukan dengan menggabungkan kata kunci yang berbeda untuk memperoleh artikel yang relevan dari berbagai basis data yang tersedia. Filter pencarian diterapkan untuk membatasi hasil pada artikel yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir (2019-2024) dan berbahasa Inggris. Proses pencarian dilakukan pada tanggal 18-19 Agustus 2024, dan setiap langkah pencarian, termasuk basis data yang digunakan dan hasilnya, didokumentasikan dengan baik untuk memastikan proses ini dapat diverifikasi atau diulangi jika diperlukan. Pada tahap kriteria seleksi, proses dilakukan untuk memastikan bahwa hanya literatur yang relevan dan berkualitas tinggi yang termasuk dalam tinjauan. Kriteria seleksi dibagi menjadi kriteria inklusi dan eksklusi yang membantu memfilter artikel yang memenuhi syarat untuk analisis lebih lanjut.

Kriteria Inklusi mencakup beberapa aspek penting. Pertama, artikel yang dipilih harus dipublikasikan dalam lima tahun terakhir, dari tahun 2019 hingga 2024, untuk memastikan tinjauan ini mencerminkan perkembangan terbaru dan temuan terkini dalam aplikasi AI untuk prediksi dan manajemen bencana. Selanjutnya, hanya artikel yang ditulis dalam bahasa Inggris yang akan dimasukkan, untuk menjaga konsistensi dalam pemahaman dan interpretasi, serta untuk memudahkan akses dan pemahaman oleh peneliti internasional. Selain itu, artikel yang relevan harus berfokus pada penerapan AI dalam konteks bencana,

seperti gempa bumi, tsunami, dan banjir. Ini termasuk penelitian yang membahas algoritma AI, teknik machine learning, atau deep learning yang diterapkan dalam manajemen bencana. Hanya artikel penelitian asli, tinjauan sistematis, dan studi kasus yang akan dipertimbangkan, karena jenis artikel ini memberikan kontribusi yang signifikan dengan data empiris, analisis mendalam, dan temuan yang relevan.

Di sisi lain, kriteria eksklusi dirancang untuk menghindari artikel yang tidak sesuai. Artikel yang tidak membahas penerapan AI dalam konteks bencana atau yang fokusnya berada di luar domain bencana akan dikecualikan. Selain itu, artikel yang tidak memenuhi standar kualitas akademik yang baik, seperti yang memiliki metodologi lemah, data yang tidak memadai, atau hasil yang tidak dapat diandalkan, tidak akan dipertimbangkan. Artikel yang hanya tersedia sebagai abstrak atau tidak dapat diakses secara penuh juga akan dikecualikan, karena keterbatasan akses dapat mempengaruhi kualitas tinjauan dan pemahaman tentang konten artikel. Terakhir, artikel yang dipublikasikan lebih dari lima tahun yang lalu akan dikecualikan, kecuali artikel tersebut dianggap klasik dan sangat relevan untuk perkembangan awal teknik AI dalam konteks bencana. Dengan menetapkan kriteria inklusi dan eksklusi ini, proses seleksi bertujuan untuk menghasilkan kumpulan literatur yang komprehensif dan representatif, memastikan bahwa tinjauan literatur ini berbasis pada sumber-sumber yang relevan dan berkualitas tinggi.

Tahap seleksi studi melibatkan dua langkah utama: seleksi awal dan tinjauan teks penuh, masing-masing dirancang untuk menyaring dan memilih studi yang paling relevan dengan fokus penelitian. Seleksi awal dilakukan terhadap judul dan abstrak artikel untuk mengidentifikasi relevansi awal. Pada tahap ini, semua artikel yang diambil dari proses pencarian akan diperiksa berdasarkan judul dan abstrak mereka. Artikel yang tidak sesuai dengan kriteria inklusi, seperti yang tidak membahas penerapan AI dalam bencana atau yang berada di luar rentang tahun yang ditentukan, akan dihapus dari daftar. Proses ini memungkinkan penyaringan awal untuk menghilangkan studi yang jelas tidak relevan, mempercepat proses tinjauan dan mengurangi jumlah artikel yang perlu ditelaah secara mendalam.

Setelah seleksi awal, langkah berikutnya adalah tinjauan teks penuh dari artikel yang dianggap berpotensi relevan. Pada tahap ini, artikel yang lolos dari seleksi awal akan dibaca secara menyeluruh untuk menilai kesesuaian mereka dengan tujuan tinjauan literatur. Ini berarti bahwa judul dan abstrak tidak cukup untuk menentukan apakah artikel tersebut relevan dan berkualitas tinggi. Evaluasi ini mencakup analisis mendalam terhadap metodologi penelitian, kualitas data, dan relevansi temuan dengan pertanyaan penelitian yang telah ditetapkan. Artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman tentang aplikasi AI dalam prediksi dan manajemen bencana akan dimasukkan dalam tinjauan akhir. Artikel yang dianggap tidak relevan atau berkualitas rendah setelah tinjauan teks penuh akan dikeluarkan dari proses analisis lebih lanjut. Tahap seleksi studi ini penting untuk memastikan bahwa hanya literatur yang paling relevan dan berkualitas tinggi yang disertakan dalam tinjauan literatur, memberikan dasar yang kuat untuk sintesis dan analisis data yang lebih mendalam.

Proses ekstraksi dan sintesis data penelitian dimulai dengan pembuatan tabel ekstraksi yang dirancang untuk memastikan konsistensi dalam pengumpulan informasi dari setiap artikel. Tabel ini mencakup kolom untuk informasi penting seperti judul artikel, penulis, tahun publikasi, teknik AI yang digunakan, data yang digunakan, hasil penelitian,

dan keterbatasan. Dengan tabel ini, setiap artikel yang lolos seleksi dianalisis secara mendalam untuk mengumpulkan informasi relevan. Setelah data dikumpulkan, dilakukan kategorisasi data untuk mengorganisir informasi sesuai dengan jenis bencana, teknik AI yang digunakan, dan temuan utama. Kategorisasi ini memudahkan analisis lebih lanjut dan membantu dalam mengidentifikasi pola dan tren dalam penerapan AI untuk prediksi dan manajemen bencana. Verifikasi data dilakukan untuk memastikan akurasi dan kelengkapan informasi dengan memeriksa kembali sumber asli artikel guna menghindari kesalahan.

Proses sintesis data melibatkan pengidentifikasian pola dan tren dari data yang telah dikumpulkan. Analisis dilakukan untuk membandingkan berbagai teknik AI yang digunakan dan mengevaluasi efektivitas serta kelemahan masing-masing pendekatan. Ini termasuk analisis kekuatan dan kelemahan teknik AI dalam konteks prediksi bencana, seperti akurasi prediksi dan tantangan terkait, seperti keterbatasan data dan kebutuhan sumber daya komputasi. Selanjutnya, temuan-temuan utama dari analisis data dirangkum untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang kemajuan terkini dalam penggunaan AI untuk manajemen bencana. Temuan ini meliputi efektivitas teknik AI yang digunakan, inovasi yang diperkenalkan, dan dampaknya pada praktik prediksi dan mitigasi bencana.

Berdasarkan sintesis data, rekomendasi dikembangkan untuk penelitian lebih lanjut dan penerapan praktis AI dalam manajemen bencana. Rekomendasi ini mencakup area yang memerlukan eksplorasi lebih lanjut, perbaikan dalam teknik yang ada, dan strategi untuk mengatasi tantangan yang diidentifikasi. Hasil ekstraksi dan sintesis data digunakan sebagai dasar untuk menarik kesimpulan, mengevaluasi pertanyaan penelitian, dan menyusun laporan atau artikel penelitian. Pendekatan ini memberikan struktur sistematis untuk analisis literatur dan memfasilitasi proses sintesis temuan secara efektif.

Hasil dan Pembahasan

Setelah pengumpulan artikel dan dikelompokkan berdasarkan konsepnya. Disajikan hasil ekstraksi data dan menganalisis hasil temuan untuk memberikan wawasan mendalam tentang penerapan AI dalam prediksi dan manajemen bencana. Tabel berikut menyajikan ringkasan data dari studi-studi yang telah dianalisis, termasuk informasi tentang algoritma AI yang digunakan, studi kasus yang berhasil, serta dampak dan tantangan yang dihadapi. Berikut tabel literature review mengenai penerapan Artificial Intelligence pada bidang bencana.

Penerapan AI dalam Prediksi Bencana Banjir

Pada tabel ini menyajikan ringkasan dari berbagai studi literatur yang mengkaji penerapan teknik Artificial Intelligence (AI) dalam prediksi bencana banjir. Setiap studi menggunakan metode AI yang berbeda, data yang beragam, serta menghasilkan temuan dan keterbatasan spesifik, yang diuraikan secara singkat dalam tabel berikut.

Tabel 1. Penerapan AI dalam Prediksi Banjir

Judul	Penulis	Teknik AI	Data	Temuan	Keterbatasan
A mixed approach for urban flood prediction using Machine Learning and GIS	Motta et al., 2021	Random Forest, Analisis Hot Spot GIS	Data cuaca dari 3 stasiun	- Random Forest: Koefisien Korelasi Matthews 0,77, Akurasi 0,96. - Model GIS meningkatkan resolusi prediksi spasial.	- Data terbatas pada 3 stasiun - False positive yang tinggi. - Tidak ada fungsi biaya untuk kesalahan klasifikasi

Judul	Penulis	Teknik AI	Data	Temuan	Keterbatasan
Real-Time Flood Disaster Prediction System by Applying Machine Learning Technique	Keum et al., 2020	PNN, neuro-fuzzy model, regresi linier dan nonlinier	Data kedalaman banjir dari model EPA-SWMM dan model inundasi 2D	- Prediksi banjir real-time: goodness-of-fit 85%. - Waktu proses 1 menit 12 detik. - Analisis skenario hujan: goodness-of-fit 70.3%.	- Tantangan menyediakan informasi real-time. - Perlu memastikan validitas model di berbagai skenario banjir.
Rapid spatio-temporal flood prediction and uncertainty quantification using a deep learning method	Hu et al., 2019	LSTM, POD, SVD, ROM	Data tsunami Okushiri	- LSTM-ROM memungkinkan prediksi real-time - Hasil LSTM-ROM sesuai dengan model penuh (Fluidity) namun dengan pengurangan biaya CPU	- Perlu evaluasi lebih lanjut untuk berbagai konfigurasi peramalan. - Teknik asimilasi data mungkin diperlukan prediksi dalam jangka panjang.
Flood Prediction Using Deep Learning Models	Ali et al., 2022	LSTM, BI-LSTM, DRNN, Normalisasi Layer, Leaky ReLU Aktivasi	Data sensori historis dari Malaysia.	- DRNN menunjukkan kinerja terbaik dengan normalisasi layer dan fungsi aktivasi Leaky ReLU. - LSTM sedikit lebih kompleks dan memerlukan backpropagation serta gate. - BI-LSTM memberikan hasil yang baik dengan akurasi yang sedikit lebih rendah.	- Model masih memiliki ruang untuk perbaikan. - Deep learning memerlukan sumber daya komputasi yang besar.
Streamflow Prediction Using Deep Learning Neural Network: Case Study of Yangtze Rive	Liu et al., 2020	En-De-LSTM, EMD	Data aliran stream bulanan Sungai Yangtze (Januari 1952 - Desember 2008).	- Hasil prediksi untuk tahun 1998 dan 2016 (tahun-tahun dengan banjir) menunjukkan R^2 lebih dari 0.8 dan LMI mendekati 0.65. - Untuk ramalan jangka panjang, nilai WI, LMI, R^2 menunjukkan keandalan dan kecocokan yang sangat baik, dengan RMSE 1171.9 m^3.	- Hanya menggunakan dataset dari satu stasiun hidrologi. - Tidak mencakup pengaruh kondisi fisik lainnya dan belum membandingkan metode pencarian hiperparameter secara mendalam.
Urban Flood Modeling Using Deep-Learning Approaches in Seoul, South Korea	Lei et al., 2021	CNN, RNN	Inventarisasi banjir (295 lokasi banjir)	- CNN (AUC = 84%, RMSE = 0.163) - RNN (AUC = 82%, RMSE = 0.186). - RNN dan CNN memberikan hasil yang cepat dan biaya rendah untuk pemetaan risiko banjir.	- Model lebih baik digunakan di daerah dengan data hidrolika terbatas. - Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk efisiensi model di area urban lain.
Physics Informed Data Driven model for Flood Prediction: Application of Deep Learning in prediction of urban flood development	Qian et al., 2019	CNN, cGANs	Data simulasi dengan Partial Differential Equation (PDE) solver	- Model berbasis data-driven memberikan prediksi real-time yang tepat. - Kecepatan komputasi meningkat sekitar $\times 50,000$ dibandingkan dengan model berbasis statistic. - CNN dan cGANs dapat memulihkan dinamika SWE dengan baik.	- Divergensi pada horizon waktu lebih lama dalam cGANs. - Parameter SWE, seperti elevasi dan koefisien gesekan, perlu penyesuaian lebih lanjut.
Decentralized Flood Forecasting Using Deep Neural Networks	Sit & Demir., 2019	DNN	Fokus pada konektivitas titik data di jaringan sungai.	- DNN menunjukkan hasil prakiraan mendekati pengukuran aktual.	- Hasil prakiraan dapat ditingkatkan dengan data tambahan. - Perlu demonstrasi lebih lanjut tentang anggaran air dan peningkatan hasil prakiraan.

Berdasarkan tabel ekstraksi data mengenai penerapan teknik Artificial Intelligence pada bidang bencana alam, berbagai penelitian telah mengeksplorasi penggunaan machine learning atau deep learning yang beragam untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam memprediksi bencana banjir. Penelitian yang dilakukan Motta et al., (2021) menggunakan pendekatan gabungan Random Forest dan GIS untuk memprediksi banjir perkotaan. Temuan menunjukkan akurasi tinggi namun dengan data terbatas dari tiga stasiun. Keterbatasan termasuk tingkat false positive yang tinggi dan kebutuhan untuk pengembangan fungsi biaya. Keum et al., (2020) memanfaatkan Probabilistic Neural Network (PNN), model neuro-fuzzy, serta regresi linier dan non-linier untuk prediksi banjir real-time. Model ini menunjukkan kinerja baik dengan waktu proses yang singkat tetapi menghadapi tantangan dalam menyediakan informasi real-time dan validasi di berbagai skenario. Hu et al., (2019) menerapkan Long Short-Term Memory (LSTM), Proper Orthogonal Decomposition (POD), Singular Value Decomposition (SVD), dan Reduced Order Model (ROM) untuk prediksi banjir tsunami. Temuan menunjukkan peningkatan akurasi dan kecepatan prediksi dengan LSTM-ROM. Keterbatasan mencakup perlunya evaluasi lebih lanjut dan teknik asimilasi data.

Pada penelitian yang dilakukan Ali et al., (2022) menilai kinerja model LSTM, Bidirectional Long Short-Term Memory (BI-LSTM), dan DRNN untuk prediksi banjir menggunakan data historis tingkat air sungai dan curah hujan. Model Deep Recurrent Neural Network (DRNN) menunjukkan kinerja terbaik dengan akurasi tinggi, namun model deep learning secara umum membutuhkan sumber daya komputasi yang besar. Liu et al., (2020) menggunakan Encoder-Decoder Long Short-Term Memory (En-De-LSTM) dan Empirical Mode Decomposition (EMD) untuk memprediksi aliran stream bulanan dan bencana banjir di Sungai Yangtze. Model ini menunjukkan hasil yang sangat baik namun terbatas oleh penggunaan data dari satu stasiun dan tidak mempertimbangkan variabel hidrologi lainnya. Lei et al., (2021) menerapkan Convolutional Neural Network (CNN) dan Recurrent Neural Network (RNN) untuk pemodelan banjir di Seoul, menunjukkan model CNN lebih efektif dengan hasil evaluasi baik meskipun ada kesalahan. Keterbatasan termasuk kebutuhan untuk penelitian lebih lanjut dan penggunaan dataset yang lebih beragam. Qian et al., (2019) mengembangkan model berbasis CNN dan Conditional Generative Adversarial Networks (cGANs) untuk prediksi banjir kota dengan kecepatan komputasi tinggi. Model ini berhasil memulihkan dinamika SWE, namun cGANs mengalami divergensi pada horizon waktu lebih lama dan memerlukan simulasi yang lebih rinci. Sit & Demir., (2019) memanfaatkan Deep Neural Networks (DNN) untuk prakiraan ketinggian sungai dengan hasil menjanjikan, namun model dapat ditingkatkan dengan integrasi data tambahan dan pengukuran evaporasi.

Secara kolektif studi-studi yang dianalisis menunjukkan adanya pola jelas dalam penerapan teknik deep learning untuk prediksi banjir. Model LSTM dan variannya, seperti Bidirectional LSTM (BI-LSTM) serta model gabungan seperti LSTM-ROM, menunjukkan efektivitas yang konsisten dalam meningkatkan akurasi dan kecepatan prediksi dibandingkan metode tradisional. Data sensor tingkat air dan model simulasi menjadi sumber data utama yang memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan akurasi prediksi. Teknik-teknik baru seperti CNN dan cGANs juga muncul, menawarkan kecepatan komputasi yang lebih baik namun menghadapi tantangan dalam penerapan jangka panjang. Pola ini menunjukkan pergeseran menuju penggunaan teknik deep learning dan data yang lebih bervariasi untuk meningkatkan prediksi banjir.

Perbandingan antara teknik menunjukkan bahwa meskipun LSTM dan DRNN menawarkan akurasi yang lebih tinggi, mereka sering kali memerlukan sumber daya komputasi yang signifikan. Di sisi lain, metode berbasis CNN dan cGANs menunjukkan kecepatan tinggi, namun menghadapi tantangan terkait dengan divergensi. Model gabungan dan pendekatan spesifik menunjukkan potensi besar namun juga menyoroti kebutuhan akan data yang lebih bervariasi dan teknik pemodelan yang lebih canggih.

Dari kajian literatur ini terdapat beberapa kesenjangan yang signifikan. Banyak studi mencatat keterbatasan data dari lokasi stasiun tertentu, serta perlunya pengujian model dalam berbagai kondisi banjir untuk memastikan keandalannya. Selain itu, variabel lingkungan yang mempengaruhi prediksi banjir belum sepenuhnya dipertimbangkan, mengindikasikan perlunya integrasi data yang lebih luas dan beragam. Kesenjangan ini juga mencakup kebutuhan untuk teknik asimilasi data yang lebih baik dan validasi model dengan data yang lebih luas untuk meningkatkan akurasi.

Implikasi dari temuan ini menekankan kemajuan dalam penerapan AI untuk prediksi banjir, dengan teknik deep learning dan model gabungan yang terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi dan efisiensi prediksi. Untuk mengatasi keterbatasan yang ada, penting untuk memperluas pengumpulan data dan melakukan validasi model di berbagai skenario banjir. Integrasi teknik AI dengan sistem peringatan dini banjir akan meningkatkan kemampuan respon dan mitigasi bencana, memberikan manfaat yang lebih besar dalam upaya penanggulangan banjir.

Penerapan AI dalam Prediksi Bencana Gempa Bumi

Pada tabel ini menyajikan ringkasan dari berbagai studi literatur yang mengkaji penerapan teknik Artificial Intelligence (AI) dalam prediksi bencana gempa bumi. Setiap studi menggunakan metode AI yang berbeda, data yang beragam, serta menghasilkan temuan dan keterbatasan spesifik, yang diuraikan secara singkat dalam tabel berikut.

Tabel 2. Penerapan AI dalam Prediksi Gempa Bumi

Judul	Penulis, tahun	Teknik AI	Data	Temuan	Keterbatasan
Major earthquake event prediction using various machine learning algorithms	Mallouhy et al., 2019	Random Forest, Naive Bayes, Logistic Regression, MLP, AdaBoost, KNN, SVM, CART	Dataset gempa bumi California (36 tahun)	- KNN, Random Forest, dan MLP menghasilkan paling sedikit false positif (FP) - SVM, KNN, MLP, dan Random Forest memberikan hasil terbaik.	- Perlu penelitian lebih lanjut untuk data nyata. - Tidak mempertimbangkan seleksi fitur
The casualty prediction of earthquake disaster based on Extreme Learning Machine method	Xing et al., 2020	ELM, BP Neural Network, SVM, Modified Partial Gaussian Curve	Data 84 kelompok korban gempa di China (1970–2017)	- Rata-rata kesalahan relatif dari algoritma ELM 3,37%. - R-square untuk prediksi bencana 0,96 dan prediksi cedera 0,97.	- Perlu pengujian lebih lanjut dalam berbagai scenario.
Detecting Earthquakes: A Novel Deep Learning-Based Approach for Effective Disaster Response	Shakeel et al., 2021	3D Convolutional Neural Network (CNN) dan Recurrent Neural Network (RNN)	STanford EArthquake Dataset (STEAD) & data seismometer pribadi (Nov-Dec 2019)	- Akurasi 99.057%, sensitivitas 98.488%, dan spesifisitas 99.621% - Waktu inferensi untuk satu prediksi adalah 2.27 detik. - Model berhasil mendeteksi 63 gempa besar.	- Fokus pada deteksi, bukan respons/prediksi gempa secara langsung. - Perlu peningkatan waktu respons dan prediksi gempa masa depan.

Judul	Penulis, tahun	Teknik AI	Data	Temuan	Keterbatasan
Earthquake Prediction using Hybrid Machine Learning Techniques	Salam et al., 2021	- FPA-ELM - FPA-LS-SVM	Data gempa California Selatan, dengan tujuh indikator seismik	- Model FPA-LS-SVM lebih unggul dalam akurasi prediksi. - FPA-LS-SVM menunjukkan kinerja terbaik dalam mengurangi rasio alarm palsu.	- Fokus pada California Selatan, mungkin perlu penyesuaian untuk daerah lain. - Tidak dibahas aplikasi dalam respons bencana.

Berdasarkan tabel ekstraksi data mengenai penerapan teknik Artificial Intelligence pada bidang bencana alam, berbagai penelitian telah mengeksplorasi penggunaan machine learning atau deep learning yang beragam untuk meningkatkan prediksi dan deteksi bencana gempa bumi. Penelitian Mallouhy et al. (2019) membandingkan berbagai algoritma machine learning, seperti Random Forest, Naive Bayes, Logistic Regression, Multi-Layer Perceptron (MLP), AdaBoost, K-nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machine (SVM), dan Classification and Regression Trees (CART). Data yang digunakan berasal dari pusat gempa di California selama 36 tahun. Temuan menunjukkan bahwa KNN, Random Forest, dan MLP menghasilkan output false positif yang rendah, namun tidak mempertimbangkan seleksi fitur dan data intervensi. Penelitian ini menyarankan penambahan studi kasus berbasis data intervensi nyata dan metode seleksi fitur yang lebih baik. Xing et al. (2020) menggunakan metode Extreme Learning Machine (ELM), dibandingkan dengan BP neural network, SVM, dan modified partial Gaussian curve untuk memprediksi jumlah korban bencana gempa bumi di China dengan data dari 1970 hingga 2017. ELM menunjukkan akurasi dan efisiensi yang tinggi dengan rata-rata kesalahan relatif 3,37% dan koefisien determinasi (R-square) 0,96. Keterbatasan termasuk kebutuhan untuk pengujian lebih lanjut dalam kondisi bencana yang berbeda. Penelitian ini merekomendasikan pengembangan metode untuk meningkatkan akurasi dalam skenario yang lebih luas.

Penelitian Shakeel et al. (2021) memperkenalkan model deep learning 3D Convolutional Neural Network (CNN) dan Recurrent Neural Network (RNN) untuk deteksi gempa bumi dengan data dari Stanford Earthquake Dataset (STEAD) dan seismometer pribadi selama dua bulan. Model ini mencapai akurasi 99.057%, sensitivitas 98.488%, dan spesifisitas 99.621%, dengan waktu inferensi 2.27 detik per prediksi. Keterbatasan mencakup fokus hanya pada deteksi tanpa respons atau prediksi langsung, dan perlunya peningkatan waktu respons peringatan gempa. Penelitian ini menyarankan eksplorasi algoritma AI untuk meningkatkan respons dan prediksi. Salam et al. (2021) mengusulkan model hibrida untuk prediksi gempa bumi menggunakan kombinasi Flower Pollination Algorithm (FPA) dengan Extreme Learning Machine (ELM) dan Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM) dengan data gempa dari California Selatan dengan tujuh indikator seismik. Model FPA-LS-SVM mengungguli FPA-ELM dan model lainnya dalam akurasi dan pengurangan alarm palsu. Keterbatasan termasuk fokus pada wilayah tertentu dan kurangnya pembahasan aplikasi dalam konteks respons bencana. Penelitian ini menyarankan uji coba di wilayah lain dan integrasi dengan sistem respons bencana.

Secara kolektif, penelitian yang ditampilkan dalam Tabel 2 menunjukkan kemajuan signifikan dalam penerapan teknik AI untuk prediksi dan deteksi gempa bumi. Beberapa teknik, termasuk ELM, 3D CNN, serta model hibrida, telah menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam akurasi prediksi dan deteksi gempa. Algoritma seperti KNN, Random

Forest, dan model hibrida FPA-LS-SVM juga terbukti efektif dalam mengurangi alarm palsu sekaligus meningkatkan akurasi prediksi.

Tren yang muncul dari literatur ini menunjukkan pergeseran menuju penggunaan metode yang lebih kompleks dan canggih, seperti deep learning dan model hibrida, yang menawarkan performa superior dibandingkan dengan teknik tradisional. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa metode seperti 3D CNN dan ELM yang dikombinasikan dengan algoritma optimasi dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi. Namun, meskipun ada kemajuan ini, kesenjangan signifikan tetap ada. Sebagian besar studi masih terbatas pada data dari wilayah tertentu seperti California atau China, dan jarang menguji model dalam konteks yang lebih luas atau dengan data real-time. Selain itu, kurangnya integrasi antara model prediksi dan sistem respons bencana yang praktis menunjukkan kebutuhan akan penelitian lebih lanjut. Tujuannya adalah untuk memperluas generalisasi model ke berbagai wilayah dan mengintegrasikan hasil dengan sistem respons bencana yang lebih efisien.

Tabel 2 juga memperlihatkan variasi dalam pendekatan yang digunakan untuk prediksi dan deteksi gempa bumi, dengan teknik seperti Random Forest, KNN, ELM, serta deep learning (CNN dan RNN) muncul sebagai pilihan utama. Temuan ini menunjukkan bahwa metode-metode tersebut berhasil meningkatkan akurasi prediksi dan mengurangi tingkat false positives, sementara model hibrida dan deep learning menunjukkan performa yang paling unggul. Perbandingan antara teknik-teknik ini mengungkapkan perbedaan signifikan dalam hasilnya. Studi yang menggunakan deep learning cenderung menghasilkan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode tradisional seperti Random Forest dan KNN. Meskipun ELM menunjukkan efisiensi tinggi, model ini tetap kalah dalam hal interpretabilitas dibandingkan dengan model hibrida seperti FPA-LS-SVM, yang unggul dalam prediksi magnitudo gempa dan pengurangan alarm palsu.

Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa penerapan teknik AI dalam prediksi gempa bumi memiliki potensi besar untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi sistem peringatan dini. Meskipun demikian, tantangan masih ada terkait generalisasi model di berbagai wilayah dan integrasi dengan sistem respons bencana. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengatasi keterbatasan ini, yang pada akhirnya dapat memperkuat kesiapsiagaan dan respons terhadap gempa bumi secara lebih luas dan efektif.

Penerapan AI dalam Prediksi Bencana Tsunami

Pada tabel ini menyajikan ringkasan dari berbagai studi literatur yang mengkaji penerapan teknik Artificial Intelligence (AI) dalam prediksi bencana tsunami. Setiap studi menggunakan metode AI yang berbeda, data yang beragam, serta menghasilkan temuan dan keterbatasan spesifik, yang diuraikan secara singkat dalam tabel berikut.

Tabel 3. Penerapan AI dalam Prediksi Tsunami

Judul	Penulis	Teknik AI	Data	Temuan	Keterbatasan
Machine Learning Algorithms for Real-time Tsunami Inundation Forecasting: A Case Study in Nankai Region	Fauzi & Mizutani., 2020	- CNN - MLP	Skenario gempa megathrust hipotetik di Jepang.	- CNN dan MLP menunjukkan kecepatan yang sangat tinggi dan sebanding dengan modeling non-linier. - CNN memilih skenario terbaik dari database berdasarkan pola kesamaan, MLP langsung menghasilkan ramalan inundasi.	- Database skenario sederhana dapat membatasi kemampuan CNN. - Ramalan dapat terpengaruh jika pola database berbeda dari hasil

Judul	Penulis	Teknik AI	Data	Temuan	Keterbatasan
				- MLP lebih unggul dalam ramalan langsung saat skenario tidak ada di database.	modeling langsung.
Comparison of Machine Learning Approaches for Tsunami Forecasting from Sparse Observations	Liu et al., 2021	- SVM - DAE - VAE	- 1300 gempa sintetik CSZ - Skenario gempa "L1"	- Autoencoder (DAE, VAE) memberikan prediksi terbaik. - Peningkatan jendela observasi dari 30 menit ke 60 menit meningkatkan akurasi prediksi dan EVS.	- SVM performa terburuk pada data mentah. - Set pelatihan kecil (959 sampel), mungkin membatasi akurasi.
Machine Learning for Tsunami Waves Forecasting Using Regression Trees	Cesario et al., 2024	Regression Trees	Data simulasi tsunami dari gempa bumi dan tsunami Zemmouri-Boumerdes M6.8 2003.	- Akurasi prediksi 92% (gelombang ≤ 0.1 m) dan 77% (gelombang ≥ 1.0 m). - Model memberikan akurasi tinggi dan dapat dijelaskan dan diverifikasi secara fisik.	- Perlu eksplorasi untuk gempa subduksi besar. - Belum ada integrasi paralel di cloud untuk skalabilitas.
Estimation of Tsunami Characteristics from Deposits: Inverse Modeling Using a Deep Learning Neural Network	Mitra et al., 2020	Deep Neural Network (DNN)	- Data Artifisial - Data Deposit Tsunami Tohoku-oki 2011.	- DNN berhasil merekonstruksi kondisi aliran tsunami dari deposit. - Kecepatan aliran 5.4 m/s dan kedalaman maksimum 4.1 m, sesuai dengan pengamatan	- Ketergantungan pada data pelatihan artifisial - Ketidakakuratan mungkin terjadi pada deposit alami di luar data pelatihan.

Berdasarkan tabel ekstraksi data mengenai penerapan teknik AI pada bidang bencana alam, berbagai penelitian telah mengeksplorasi penggunaan machine learning atau deep learning yang beragam untuk prediksi dan rekontruksi bencana tsunami. Penelitian Fauzi & Mizutani., (2020) mengkaji penggunaan Convolutional Neural Networks (CNN) dan Multilayer Perceptron (MLP) untuk forecasting inundasi tsunami secara real-time di wilayah Nankai, Jepang. Studi ini menggunakan data skenario gempa hipotetik dan hasil tsunami maksimum untuk menghasilkan ramalan yang cepat dan akurat. Namun, keterbatasan terletak pada kompleksitas skenario dan kualitas database yang dapat memengaruhi hasil prediksi. Liu et al., (2021) membandingkan beberapa pendekatan machine learning, termasuk Support Vector Machine (SVM), Denoising Autoencoder (DAE), dan Variational Autoencoder (VAE) untuk prediksi tsunami dari observasi yang minim. Studi ini menemukan bahwa model autoencoder memberikan hasil terbaik dalam hal akurasi, sementara SVM memiliki performa terburuk. Keterbatasan utama adalah ukuran dataset yang kecil dan perlu adanya penyesuaian lebih lanjut pada arsitektur model.

Studi yang dilakukan oleh Cesario et al., (2024) menggunakan Regression Trees untuk memprediksi ketinggian gelombang tsunami berdasarkan data simulasi tsunami dari gempa Zemmouri-Boumerdes 2003. Hasilnya menunjukkan akurasi tinggi, terutama untuk gelombang dengan ketinggian ≤ 0.1 m, dan kejelasan model yang mendukung verifikasi konsistensi fisik. Namun, penelitian ini belum mencakup area dengan gempa subduksi magnitudo besar dan perlu integrasi ke platform cloud untuk meningkatkan skalabilitas. Mitra et al., (2020) mengeksplorasi penggunaan Deep Neural Network (DNN) untuk merekonstruksi karakteristik tsunami dari deposit tsunami, menggunakan data artifisial dan deposit tsunami alami dari peristiwa Tohoku-oki 2011. DNN berhasil merekonstruksi kondisi aliran tsunami dengan hasil yang konsisten dengan observasi. Keterbatasan

utama adalah ketergantungan pada data pelatihan artifisial yang mungkin tidak akurat dalam kondisi deposit alami lainnya.

Secara kolektif, dari studi-studi yang dirangkum dalam Tabel 3.3, terlihat beberapa pola mencolok dalam penggunaan teknik machine learning seperti Convolutional Neural Networks (CNN), Multilayer Perceptrons (MLP), dan Deep Neural Networks (DNN). Teknik-teknik ini telah terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi dan kecepatan prediksi tsunami, meskipun hasilnya bervariasi tergantung pada metode dan data yang digunakan. Salah satu tren utama yang muncul dari literatur ini adalah peningkatan efisiensi waktu komputasi melalui penggunaan model seperti autoencoder, khususnya Denoising Autoencoder (DAE) dan Variational Autoencoder (VAE). Model-model ini mampu memberikan hasil yang sangat baik dengan data observasi singkat. Selain itu, upaya untuk meningkatkan interpretabilitas model dengan teknik seperti Regression Trees menunjukkan adanya dorongan untuk menjadikan model AI lebih transparan dan mudah dipahami. Hal ini penting untuk mengakomodasi kebutuhan akan hasil yang dapat diandalkan dalam konteks pengembangan sistem peringatan dini dan kesiapsiagaan bencana.

Perbandingan antar teknik menunjukkan bahwa CNN dan Regression Trees efektif untuk forecasting dan prediksi cepat, sementara autoencoder, terutama DAE dan VAE, unggul dalam situasi dengan keterbatasan data, menghasilkan prediksi yang lebih akurat dibandingkan dengan metode lain seperti Support Vector Machines (SVM). Penelitian yang berfokus pada rekonstruksi tsunami menggunakan DNN juga menunjukkan bahwa teknik ini mampu merekonstruksi karakteristik tsunami dari data deposit dengan akurasi tinggi. Namun, terdapat beberapa kesenjangan yang perlu diperhatikan. Salah satu keterbatasan yang sering muncul adalah ketergantungan pada data sintetik dan ukuran dataset yang kecil, yang dapat membatasi akurasi dan kemampuan generalisasi model. Selain itu, masih diperlukan penerapan teknik-teknik ini dalam skenario yang lebih kompleks dan beragam. Integrasi model-model AI ini dengan infrastruktur komputasi yang lebih canggih, seperti platform cloud, juga diperlukan untuk meningkatkan skalabilitas dan kecepatan eksekusi.

Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa teknik AI memiliki potensi besar untuk meningkatkan kesiapsiagaan bencana, khususnya dalam konteks prediksi dan rekonstruksi tsunami. Penggunaan model seperti CNN dan DNN memungkinkan prediksi yang lebih cepat dan akurat, sementara autoencoder menawarkan solusi yang efisien untuk data yang terbatas. Meskipun demikian, tantangan tetap ada, terutama dalam hal pengaplikasian teknik ini di skenario yang lebih luas dan real-time. Penelitian lebih lanjut yang mengintegrasikan AI dengan infrastruktur cloud dan sistem peringatan dini diharapkan dapat meningkatkan kemampuan prediksi dan kesiapsiagaan terhadap bencana tsunami secara signifikan.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan kecerdasan buatan (AI) dalam manajemen bencana telah mencapai kemajuan signifikan dalam meningkatkan akurasi dan efektivitas prediksi bencana alam. Berbagai teknik AI, termasuk Machine Learning dan Deep Learning, telah diterapkan untuk memprediksi bencana seperti banjir, gempa bumi, dan tsunami, dengan hasil yang menjanjikan dalam memperkuat kemampuan sistem peringatan dini. Dalam konteks banjir, teknik deep learning seperti LSTM dan

variasinya, seperti BI-LSTM serta model gabungan seperti LSTM-ROM, telah terbukti efektif dalam memproses data dan memberikan prediksi yang lebih akurat. Penggunaan data tambahan seperti curah hujan dan variabel hidrologi lainnya juga meningkatkan akurasi prediksi, meskipun masih terdapat kesenjangan dalam validasi model dengan data yang lebih luas dan teknik asimilasi data yang lebih baik. Pada prediksi gempa bumi, penggunaan teknik machine learning dan deep learning seperti ELM, 3D CNN, dan model hibrida menunjukkan peningkatan akurasi dalam memprediksi dan mendeteksi gempa. Namun, masih ada tantangan dalam penerapan model di wilayah yang lebih luas dan integrasi dengan sistem respons bencana yang praktis. Sementara itu, dalam konteks tsunami, teknik seperti CNN, MLP, DNN, dan autoencoder (seperti Denoising Autoencoder dan Variational Autoencoder) menunjukkan kemampuan yang tinggi dalam memprediksi dan merekonstruksi karakteristik tsunami. Tantangan utama dalam hal ini adalah ketergantungan pada data sintetik, ukuran dataset yang kecil, serta kebutuhan untuk integrasi dengan infrastruktur komputasi canggih. Secara keseluruhan, penerapan AI dalam prediksi bencana menawarkan potensi besar untuk meningkatkan kesiapsiagaan dan respons terhadap bencana alam. Namun, tantangan signifikan masih perlu diatasi, termasuk keterbatasan data, generalisasi model, dan integrasi dengan sistem respons bencana yang sudah ada.

Untuk penelitian lanjutan, sebaiknya difokuskan pada perluasan dan peningkatan kualitas data yang digunakan untuk melatih model AI, serta memperluas pengujian model di berbagai kondisi dan wilayah yang berbeda untuk meningkatkan generalisasi dan akurasi prediksi. Selain itu, penting untuk mengeksplorasi integrasi hasil prediksi AI dengan sistem respons bencana yang ada untuk meningkatkan efektivitas mitigasi dan pengembangan sistem peringatan dini yang responsif. Pengembangan model AI yang lebih canggih, termasuk teknik deep learning terbaru dan metode optimasi, juga harus diprioritaskan untuk meningkatkan kecepatan dan akurasi prediksi. Evaluasi model dalam kondisi dunia nyata dengan data real-time perlu dilakukan untuk mengidentifikasi dan mengatasi keterbatasan yang mungkin tidak terlihat dalam penelitian berbasis data historis. Terakhir, kolaborasi multidisiplin antara ilmuwan data, ahli bencana, dan praktisi sistem respons bencana akan membantu memastikan bahwa teknologi AI diterapkan secara efektif dan memenuhi kebutuhan praktis dalam mitigasi bencana.

Acknowledgment

-

Daftar Pustaka

- Ali, M. H. M., Asmai, S. A., Abidin, Z. Z., Abas, Z. A., & Emran, N. A. (2022). Flood prediction using deep learning models. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(9), 972-981.
- Cesario, E., Giampá, S., Baglione, E., Cordrie, L., Selva, J., & Talia, D. (2024). Pembelajaran mesin untuk peramalan gelombang tsunami menggunakan pohon regresi. *Penelitian Data Besar*, 36, 100452. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417424001009>
- Chandra, R., & Lakshmi, D. (2024). Application of artificial intelligence in disaster management and their challenges. In *Internet of Things and AI for Natural Disaster Management and Prediction* (pp. 1-27).

- Fauzi, A., & Mizutani, N. (2020). Algoritma pembelajaran mesin untuk peramalan banjir tsunami secara real-time: Studi kasus di wilayah Nankai. *Geofisika Murni dan Terapan*, 177(3), 1437-1450. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-019-02364-4>
- Hu, R., Fang, F., Pain, C. C., & Navon, I. M. (2019). Rapid spatio-temporal flood prediction and uncertainty quantification using a deep learning method. *Journal of Hydrology*, 575, 911-920. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169419305323>
- Kappi, M., & Mallikarjuna, B. (2024). Artificial intelligence and machine learning for disaster prediction: A scientometric analysis of highly cited papers. *Natural Hazards*. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-024-06616-y>
- Keum, H. J., Han, K. Y., & Kim, H. I. (2020). Real-time flood disaster prediction system by applying machine learning technique. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(9), 2835-2848. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-020-1677-7>
- Lei, X., Chen, W., Panahi, M., Falah, F., Rahmati, O., & Uemaa, E. (2021). Urban flood modeling using deep-learning approaches in Seoul, South Korea. *Journal of Hydrology*, 601, 126684. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169421007320>
- Liu, C. M., Rim, D., Baraldi, R., & LeVeque, R. J. (2021). Perbandingan pendekatan pembelajaran mesin untuk peramalan tsunami dari pengamatan yang jarang. *Geofisika Murni dan Terapan*, 178(12), 5129-5153. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9068095>
- Liu, D., Jiang, W., Mu, L., & Wang, S. (2020). Streamflow prediction using deep learning neural network: Case study of Yangtze River. *IEEE Access*, 8, 90069-90086. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9091176>
- Mallouhy, R., Abou Jaoude, C., Guyeux, C., & Makhoul, A. (2019). Major earthquake event prediction using various machine learning algorithms. In *2019 International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM)* (pp. 1-7). IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9032983>
- Mitra, R., Naruse, H., & Abe, T. (2020). Estimasi karakteristik tsunami dari endapan: Pemodelan terbalik menggunakan jaringan saraf pembelajaran mendalam. *Jurnal Penelitian Geofisika: Permukaan Bumi*, 125(9), e2020JF005583. Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2020JF005583>
- Motta, M., de Castro Neto, M., & Sarmiento, P. (2021). A mixed approach for urban flood prediction using machine learning and GIS. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 56, 102154. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212420921001205>
- Oktaviani, N. (2020). Kajian tentang dampak bencana banjir terhadap perekonomian di sekitaran masyarakat pinggiran Sungai Cimanuk. *Jurnal Tasyri': Jurnal Muamalah dan Ekonomi Syariah*, 2(1), 1-16.
- Qian, K., Mohamed, A., & Claudel, C. (2019). Physics informed data driven model for flood prediction: Application of deep learning in prediction of urban flood development. *arXiv preprint arXiv:1908.10312*. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/1908.10312>

- Retno, P. A. L. U. P. I. I., Wiji, R., & Oktavia Dewi Alfiani, O. D. A. (2020). Analisis guncangan gempa bumi Lombok dan Palu tahun 2018. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 11(2), 87-96.
- Salam, M. A., Ibrahim, L., & Abdelminaam, D. S. (2021). Earthquake prediction using hybrid machine learning techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(5), 654-665.
- Shakeel, M., Itoyama, K., Nishida, K., & Nakadai, K. (2021). Detecting earthquakes: A novel deep learning-based approach for effective disaster response. *Applied Intelligence*, 51(11), 8305-8315. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s10489-021-02285-7>
- Sit, M., & Demir, I. (2019). Decentralized flood forecasting using deep neural networks. *arXiv preprint arXiv:1902.02308*. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/1902.02308>
- Velev, D., & Zlateva, P. (2023). Challenges of artificial intelligence application for disaster risk management. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 387-394.
- Xing, H., Junyi, J., & Jin, H. (2020). The casualty prediction of earthquake disaster based on Extreme Learning Machine method. *Natural Hazards*, 102(3), 873-886. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-020-03937-6>