

# Analisis Kausalitas Banjir Berulang di Kabupaten Grobogan: Pendekatan Kecerdasan Buatan yang Dapat Diinterpretasi untuk Mitigasi Berbasis Bukti

**Danang Kuswardono<sup>1</sup>, Hadi Tanuji<sup>2</sup>, Dwi Puji Prabowo<sup>\*3</sup>, Asih Rohmani<sup>4</sup>**

<sup>1,2</sup> Institut Teknologi dan Bisnis Muhamadiyah Grobogan

<sup>3,4</sup> Universitas Dian Nuswantoro, Semarang

e-mail: <sup>1</sup>danangkuswardono@itbmg.ac.id, <sup>2</sup>haditanuji@itbmg.ac.id,

<sup>3</sup>dwi.puji.prabowo@dsn.dinus.ac.id, <sup>4</sup>aseharsoyo@dsn.dinus.ac.id

<sup>\*</sup>Penulis Korespondensi

Diterima: 19 Agustus 2025; Direvisi: 28 November 2025; Disetujui: 30 November 2025

## **Abstrak**

*Banjir berulang di Kabupaten Grobogan, Jawa Tengah, menimbulkan kerugian signifikan dan mengancam keberlanjutan wilayah. Pendekatan konvensional seringkali terbatas dalam mengidentifikasi pola kompleks dan hubungan kausalitas antar faktor pemicu banjir. Penelitian ini mengusulkan kerangka kerja analisis kausalitas banjir menggunakan Kecerdasan Buatan (AI) yang dapat diinterpretasi (Explainable AI/XAI) untuk mengungkap faktor-faktor dominan (hidrologis, geografis, geologis, dan antropogenik) yang berkontribusi terhadap fenomena ini. Dengan memanfaatkan data spasial-temporal yang komprehensif dan metode AI seperti SHAP dan Grad-CAM, penelitian ini bertujuan untuk mengukur kontribusi masing-masing faktor pemicu, memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang mekanisme banjir. Hasil yang diharapkan akan mendukung perumusan strategi mitigasi yang lebih tepat sasaran dan berbasis bukti, beralih dari respons reaktif menjadi pendekatan proaktif dalam pengelolaan risiko bencana di Kabupaten Grobogan. Hasil yang diharapkan menunjukkan bahwa metode XAI mampu menampilkan kontribusi relatif setiap faktor pemicu banjir, sehingga interpretasi model menjadi lebih transparan dibandingkan pendekatan tradisional. Kerangka kerja ini diproyeksikan dapat meningkatkan akurasi analisis sekaligus mempercepat proses identifikasi wilayah prioritas untuk mitigasi.*

**Kata kunci:** Banjir, grobogan, kecerdasan buatan, interpretasi model, mitigasi bencana

## **Abstract**

*Recurrent flooding in Grobogan Regency, Central Java, causes significant losses and threatens the region's sustainability. Conventional approaches are often limited in identifying complex patterns and causal relationships among flood triggers. This study proposes a flood causality analysis framework using interpretable Artificial Intelligence (XAI) to uncover the dominant factors (hydrological, geographic, geological, and anthropogenic) contributing to this phenomenon. By leveraging comprehensive spatio-temporal data and AI methods such as SHAP and Grad-CAM, this study aims to quantify the contribution of each triggering factor, providing a deeper understanding of flood mechanisms. The expected results will support the formulation of more targeted and evidence-based mitigation strategies, shifting from a reactive response to a proactive approach in disaster risk management in Grobogan Regency. The expected results demonstrate that the XAI method is capable of displaying the relative contribution of each flood-triggering factor, resulting in a more transparent interpretation model compared to traditional approaches. This framework is projected to improve the accuracy of analyses while accelerating the process of communicating priority areas for mitigation.*

**Keywords:** Flood, grobogan, artificial intelligence, model interpretation, disaster mitigation

## 1. PENDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu bencana hidrometeorologi yang paling sering terjadi dan tersebar luas secara global, menyumbang sekitar 41% dari seluruh bencana yang tercatat antara tahun 2008 hingga 2017, serta menyebabkan kerugian finansial yang besar, kerusakan infrastruktur, dan ancaman serius terhadap jiwa manusia [1]. Kabupaten Grobogan, Jawa Tengah, merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang secara historis dan berulang kali mengalami bencana banjir. Wilayah ini memiliki potensi bahaya banjir yang signifikan, dengan luas mencapai 47.626 Ha, menjadikannya kabupaten dengan potensi bahaya banjir tertinggi pada kelas sedang di Provinsi Jawa Tengah [2].

Fenomena banjir di Kabupaten Grobogan bukan merupakan insiden lokal, melainkan masalah sistemik yang berdampak luas. Banjir di Kabupaten Grobogan seringkali disebabkan oleh luapan debit air dari sungai-sungai utama seperti Sungai Tuntang dan Sungai Lusi. Sebagai contoh, RW 06 Desa Ngroto, Kecamatan Gubug selalu terkena dampak banjir yang disebabkan oleh meluapnya debit air dari Sungai Tuntang setiap kali bencana terjadi [3]. Demikian pula, Sungai Lusi, sebagai salah satu sungai terbesar di wilayah Jratunseluna dengan 42 anak sungai, memiliki debit air yang sangat besar di musim hujan, yang seringkali menyebabkan banjir di Kabupaten Grobogan, Blora, dan Kudus [4]. Pentingnya analisis berbasis data spasial dalam mitigasi bencana telah menjadi fokus utama dalam banyak penelitian terkini. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penerapan Sistem Informasi Geografis (SIG) dan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) sangat efektif untuk memetakan daerah rawan bencana secara detail [5]. Selain itu, pemanfaatan algoritma *machine learning* untuk klasifikasi citra, menggunakan *Convolutional Neural Network* (CNN), menunjukkan potensi besar dalam analisis data visual untuk kebencanaan [6].

Dampak banjir sangat terasa di berbagai kecamatan di Kabupaten Grobogan. Peristiwa banjir terbaru pada 10 Maret 2025, misalnya, merendam 23 desa di 6 kecamatan, yaitu Toroh, Tawangharjo, Purwodadi, Kedungjati, Gubug, dan Tegowanu, dengan total 4.606 keluarga terdampak [7]. Beberapa area, seperti Desa Sukorejo di Kecamatan Tegowanu, masih terendam air hingga ketinggian 50-150 cm akibat jebolnya tanggul dan drainase yang buruk [8]. Sifat persisten dan meluasnya banjir di Kabupaten Grobogan, yang mempengaruhi berbagai wilayah dan sistem sungai utama, menunjukkan kerentanan sistemik daripada insiden lokal. Hal ini mengindikasikan bahwa akar penyebabnya kompleks dan saling terkait, membutuhkan pendekatan analitis yang holistik untuk memahami mekanisme yang mendasarinya. Pendekatan seperti pengembangan sistem pendukung keputusan [9] dan analisis sentimen berbasis aspek pada ulasan public [10] menjadi relevan untuk mengumpulkan data kualitatif dan kuantitatif terkait dampak bencana. Lebih lanjut, model prediksi berbasis data historis, seperti yang diterapkan untuk prediksi Indeks Harga Saham Gabungan (IHSG) menggunakan metode ARIMA, juga memiliki paralelisme dalam prediksi kejadian hidrologis [11].

Metode analisis banjir konvensional seringkali memiliki keterbatasan dalam memproses data dalam jumlah besar dan mengidentifikasi pola kompleks yang mendasari peristiwa banjir. Model-model ini, baik empiris, konseptual, maupun berbasis fisika, mungkin memerlukan pemahaman mendalam tentang proses fisik dan dapat memakan waktu serta sumber daya yang besar untuk dikembangkan secara presisi [1]. Keterbatasan data atau kompleksitas interaksi antar faktor juga dapat menghambat akurasi model tradisional.

Teknologi Kecerdasan Buatan (AI), khususnya pembelajaran mesin (*Machine Learning/ML*) dan pembelajaran mendalam (*Deep Learning/DL*), menawarkan solusi inovatif untuk mengatasi keterbatasan ini. AI mampu menganalisis data spasial dan temporal dalam skala besar dengan kecepatan dan akurasi yang lebih tinggi [12]. Pemanfaatan AI memungkinkan

deteksi dini, pemantauan bencana yang lebih cepat, dan prediksi risiko yang lebih akurat dengan menganalisis data dari berbagai sumber seperti sensor cuaca, citra satelit, dan data historis [13]. Keunggulan model berbasis AI meliputi akurasi prediksi yang jauh lebih tinggi (hingga 90% dibandingkan 70-80% pada metode konvensional) dan waktu respons yang lebih cepat (kurang dari 10 menit setelah pembaruan data), memungkinkan sistem peringatan dini yang lebih efektif. Metode seperti *Artificial Neural Networks* (ANNs), *Support Vector Machine* (SVM), *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS), dan *Long Short-Term Memory* (LSTM) telah terbukti efektif dalam berbagai aspek mitigasi banjir [1].

Meskipun AI diakui karena kemampuan prediksinya, signifikansi sebenarnya dalam konteks analisis banjir di Kabupaten Grobogan terletak pada potensinya untuk melakukan analisis kausal dan interpretasi. Bergerak melampaui "apa yang akan terjadi" menuju "mengapa itu terjadi" dengan kontribusi faktor yang dapat diukur adalah krusial untuk perumusan kebijakan yang efektif. Model AI tradisional seringkali dianggap sebagai "kotak hitam" karena sulit untuk memahami bagaimana mereka sampai pada prediksinya. Namun, munculnya teknik AI yang dapat diinterpretasi (*Explainable AI/XAI*) telah menjembatani kesenjangan ini. Teknik-teknik ini memungkinkan peneliti untuk tidak hanya memprediksi bahwa banjir akan terjadi, tetapi juga untuk memahami mengapa banjir terjadi dengan mengkuantifikasi pengaruh faktor-faktor pemicu yang berbeda. Kemampuan untuk mengidentifikasi dan mengukur kontribusi spesifik dari berbagai faktor penyebab ini sangat penting untuk merancang strategi mitigasi yang tepat sasaran dan berbasis bukti, yang seringkali sulit dicapai oleh model konvensional. karakteristik geografis, hidrologis, geologis, dan antropogenik Kabupaten Grobogan yang secara kolektif berkontribusi terhadap kejadian banjir yang berulang, memberikan konteks yang diperlukan untuk analisis berbasis AI.

Pada berbagai penelitian terdahulu, metode hidrologi konvensional seperti model empiris dan model fisik masih menghadapi kendala dalam menangkap interaksi multivariat antara curah hujan, dinamika sungai, tutupan lahan, dan karakteristik geomorfologi. Model tersebut bekerja baik dalam kondisi terkontrol, namun kurang adaptif ketika variabel lingkungan berubah secara cepat atau ketika data tidak lengkap. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengadopsi pendekatan AI yang dapat diinterpretasi (XAI) untuk memberikan penjelasan kuantitatif mengenai kontribusi faktor pemicu banjir, sesuatu yang belum dilakukan oleh studi sebelumnya di Grobogan. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif dibandingkan model prediktif konvensional yang bersifat deterministik.

Kabupaten Grobogan terletak strategis di antara dua Pegunungan Kendeng, yang memberikan karakteristik geografis yang unik dan bervariasi. Secara topografi, wilayah ini dapat dibagi menjadi tiga kelompok utama berdasarkan ketinggian dan kemiringan: dataran rendah (ketinggian hingga 50 meter di atas permukaan laut dengan kemiringan 0-8 derajat), daerah perbukitan (50-100 meter dengan kemiringan 8-15 derajat), dan daerah dataran tinggi (100-500 meter dengan kemiringan lebih dari 15 derajat).

Keberadaan dataran rendah yang luas, seperti yang ditemukan di bagian hilir Daerah Aliran Sungai (DAS) Lusi, memiliki implikasi signifikan terhadap dinamika banjir. Topografi yang relatif datar di area ini menyebabkan air banjir surut secara perlahan, yang pada gilirannya memperparah dampak dan durasi genangan. Fenomena ini menunjukkan bahwa masalah banjir di Kabupaten Grobogan tidak hanya terbatas pada kejadian luapan air, tetapi juga pada kemampuan wilayah untuk mengalirkan air kembali ke sistem alami. Kondisi ini mengindikasikan bahwa Kabupaten Grobogan adalah daerah hilir yang secara alami menerima aliran air dari daerah hulu yang lebih tinggi, menciptakan interaksi kompleks antara aliran air alami, penggunaan lahan, dan kerentanan terhadap banjir. Daerah dataran rendah secara intrinsik rentan terhadap genangan, sementara perubahan di daerah elevasi yang lebih tinggi dapat memperburuk aliran permukaan, menciptakan efek berjenjang yang memperpanjang dampak banjir.

Dua sistem sungai utama yang secara signifikan berkontribusi terhadap kejadian banjir di Kabupaten Grobogan adalah Sungai Tuntang dan Sungai Lusi. Luapan debit air dari Sungai

Tuntang secara konsisten menyebabkan banjir di daerah seperti Desa Ngroto, Kecamatan Gubug[3].

Sungai Lusi merupakan salah satu sungai terbesar di wilayah Jratunseluna, dengan daerah drainase yang sangat luas, mencakup wilayah dari Kabupaten Rembang, Blora, dan berakhir di Kabupaten Grobogan. Sungai ini memiliki jaringan yang kompleks dengan 42 anak sungai [4]. Karakteristik hidrologis Sungai Lusi menunjukkan debit aliran yang sangat besar selama musim hujan, yang seringkali menyebabkan banjir yang meluas tidak hanya di Kabupaten Grobogan, tetapi juga di Kabupaten Blora dan Kudus. Masalah utama yang dihadapi di sepanjang Sungai Lusi adalah luapan air yang melebihi penampang melintang sungai, yang mengakibatkan genangan di permukiman penduduk dan lahan pertanian.

Peristiwa banjir besar pada Pebruari dan Maret 2024, yang merendam sebagian besar wilayah Kecamatan Purwodadi, Tawangharjo, Kradenan, Wirosari, Gabus, Grobogan dan Brati di Kabupaten Grobogan, merupakan contoh nyata dampak luapan Sungai Lusi. Banjir ini bahkan meluas hingga memengaruhi Kecamatan Kaliwungu di Kabupaten Kudus, yang disebabkan oleh luapan Sungai Serang yang menerima debit banjir dari Sungai Lusi [7]. Keberadaan dua sistem sungai utama (Lusi dan Tuntang) dengan banyak anak sungai, ditambah dengan kecenderungan debit tinggi selama musim hujan, menunjukkan bahwa kapasitas sungai dan pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah faktor krusial. Keterkaitan antar sungai ini mengindikasikan bahwa peristiwa banjir seringkali bersifat regional, tidak hanya terlokalisasi pada satu sungai. Ini berarti bahwa masalah banjir di Kabupaten Grobogan bukan hanya masalah lokal, melainkan bagian dari sistem hidrologi regional yang lebih besar.

Curah hujan intensitas tinggi merupakan pemicu langsung dan utama terjadinya banjir. Banjir di Kabupaten Grobogan pada Mei 2025, misalnya, secara langsung disebabkan oleh curah hujan intensitas tinggi. Meskipun demikian, beberapa studi menunjukkan bahwa curah hujan saja mungkin tidak memiliki hubungan signifikan dengan kedalaman atau luas genangan banjir jika ada faktor lain seperti sistem drainase yang memadai atau pengaruh dari aliran sungai hilir. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun curah hujan lebat adalah pemicu langsung yang jelas, magnitudo dan durasi dampaknya diperkuat oleh karakteristik hidrologis sistem sungai, seperti kapasitas debit besar selama musim hujan dan kecenderungan tanggul meluap [8]. Ini menunjukkan bahwa masalahnya bukan hanya hujan, tetapi bagaimana infrastruktur hidrologis dan sistem alami yang ada menangani volume air tersebut.

Luapan air yang melebihi penampang melintang sungai adalah masalah utama di sepanjang Sungai Lusi, menyebabkan genangan di permukiman dan lahan pertanian [4]. Sebaliknya, pada musim kemarau, debit aliran Sungai Lusi cenderung sangat kecil hingga terjadi kekeringan pada beberapa anak sungai, menunjukkan dinamika hidrologi yang ekstrem dalam siklus tahunan.

Komposisi geologis dan karakteristik tanah di Kabupaten Grobogan juga memainkan peran penting dalam kerentanan terhadap banjir. Kabupaten Grobogan memiliki sumber bahan tambang dan galian yang melimpah, termasuk tanah liat. Keberadaan litologi lempung berbutir halus, yang berasal dari batuan yang tererosi, tertransportasi, dan terendapkan bersamaan dengan aliran sungai, dapat menyebabkan akumulasi sedimentasi yang sangat banyak. Akumulasi ini membentuk dasar sungai baru dan menyebabkan pendangkalan sungai. Pendangkalan ini, dikombinasikan dengan curah hujan tinggi, secara langsung mengurangi kapasitas tampung sungai dan menyebabkan air sungai meluap.

Selain itu, karakteristik jenis tanah dan tingkat infiltrasi sangat memengaruhi kerentanan banjir. Tanah dengan tingkat infiltrasi yang rendah (misalnya, jenis tanah Regosol, Litosol, Organosol, Rezina) akan menghasilkan lebih banyak aliran permukaan (*runoff*) dibandingkan tanah dengan tingkat infiltrasi tinggi (misalnya, Alluvial, Planosol, Gray Hydromorphic). Jika Kabupaten Grobogan memiliki banyak area dengan tanah yang "tidak peka" atau "agak peka" terhadap infiltrasi, maka air hujan akan lebih banyak mengalir di permukaan daripada meresap ke dalam tanah, secara langsung memengaruhi volume dan durasi banjir, sehingga meningkatkan risiko banjir.

Tindakan dan intervensi manusia memiliki dampak signifikan dalam memperparah kejadian banjir di Grobogan.

**Alih Fungsi Lahan:** Perubahan penggunaan lahan merupakan kontributor utama. Konversi lahan hutan menjadi perkebunan di daerah pegunungan dan perbukitan, terutama di daerah hulu, diduga menjadi penyebab banjir dan tanah longsor. Perubahan ini mengurangi kapasitas penyerapan air alami oleh tanah, yang pada gilirannya meningkatkan debit air dan sedimentasi sungai, sehingga meningkatkan risiko banjir. Di wilayah perkotaan, peningkatan lahan terbangun (permukaan kedap air) secara signifikan berkorelasi dengan kedalaman dan luas genangan banjir karena mengurangi kapasitas infiltrasi dan meningkatkan aliran permukaan. Alih fungsi lahan dari area penyerapan alami menjadi permukaan kedap air dan kegagalan struktur rekayasa menciptakan efek sinergis, mengubah curah hujan lebat menjadi banjir yang merusak, bahkan di daerah yang jauh dari sungai (banjir pluvial).

**Kerusakan Drainase dan Tanggul:** Kondisi drainase yang buruk dan jebolnya tanggul sungai merupakan penyebab langsung banjir di Kabupaten Grobogan. Contohnya adalah jebolnya tanggul Sungai Kliteh di Desa Sukorejo, Kecamatan Tegowanu dan luapan Sungai Tuntang yang menyebabkan genangan hingga 50-150 cm di Desa Sukorejo, Kecamatan Tegowanu [3]. Jebolnya tanggul Sungai Tuntang di Desa Baturagung, Kecamatan Gubug, juga memperparah banjir. Air di Desa Sukorejo masih belum surut dengan ketinggian 50-150 cm akibat jebolnya tanggul yang belum tertutup, menunjukkan masalah pemeliharaan infrastruktur yang tidak memadai [8].

**Urbanisasi:** Urbanisasi yang pesat, perubahan tata guna lahan, dan kurangnya infrastruktur drainase yang memadai di wilayah perkotaan juga menjadi faktor penting yang meningkatkan kerentanan terhadap banjir. Ini menciptakan efek sinergis, mengubah curah hujan lebat menjadi banjir yang merusak.

Faktor antropogenik, khususnya perubahan tata guna lahan yang tidak terkontrol (deforestasi, urbanisasi) dan pemeliharaan infrastruktur yang tidak memadai (drainase, tanggul), secara signifikan memperparah kerentanan hidrologis alami Kabupaten Grobogan. Konversi area penyerapan alami menjadi permukaan kedap air dan kegagalan struktur rekayasa menciptakan efek sinergis, yang mengubah curah hujan lebat menjadi banjir yang merusak. Ini menunjukkan bahwa tindakan manusia bukan hanya faktor kontribusi, tetapi pemicu aktif yang memperburuk bencana alam.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi data spasial-temporal multi-sumber dengan metode XAI, yang tidak hanya memberikan prediksi tetapi juga menjelaskan kontribusi faktor dalam bentuk nilai kuantitatif. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang berfokus pada prediksi kejadian banjir, studi ini menawarkan kerangka interpretasi faktor penyebab banjir yang dapat menjadi dasar mitigasi berbasis bukti.

## 2. METODE PENELITIAN

Bagian ini akan menguraikan kerangka kerja teoretis dan praktis untuk menerapkan AI dalam menganalisis penyebab banjir, merinci jenis model AI yang relevan, data yang diperlukan, dan keunggulan pendekatan yang digunakan.

Penelitian ini masih bersifat konseptual dan belum pada tahap implementasi penuh secara empiris. Fokus utama adalah merumuskan kerangka kerja, alur data, dan metode analisis yang akan diterapkan pada pengujian lanjutan. Pendekatan konseptual ini penting untuk memastikan validitas metodologis sebelum dilakukan pengumpulan data skala besar.

Dalam penelitian ini, istilah “analisis kausalitas” tidak merujuk pada inferensi kausal formal sebagaimana dalam pendekatan statistik kausal atau model struktural. Sebaliknya, XAI digunakan untuk mengukur kontribusi relatif tiap variabel terhadap keluaran model, sehingga memberikan gambaran faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap kejadian banjir. Model belum diuji secara empiris karena terdapat beberapa keterbatasan teknis, termasuk ketidaklengkapan data spasial-temporal resolusi tinggi, belum tersedianya integrasi data hidrologi real-time dari beberapa pos sungai, serta perbedaan format data antar instansi. Keterbatasan ini

akan diselesaikan pada tahap berikutnya melalui harmonisasi data dan penggunaan sumber penginderaan jauh tambahan.

Penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada prediksi banjir berbasis curah hujan atau indeks hidrologi, tanpa memberikan penjelasan mendalam mengenai faktor-faktor penyebab dominan. Hal ini menciptakan gap berupa minimnya pendekatan yang menggabungkan prediksi dan interpretasi faktor pemicu. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan memanfaatkan XAI untuk menjelaskan kontribusi masing-masing faktor secara terukur.

Pada tahap lanjutan, framework ini akan diuji menggunakan data curah hujan resolusi harian, data debit sungai, data genangan dari Sentinel-1 SAR, serta diverifikasi melalui validasi ahli (*expert judgment*) dari BPBD, BMKG, dan ahli hidrologi lokal. Evaluasi akan dilakukan menggunakan metode validasi silang dan uji performa model (AUC, RMSE, dan SHAP *consistency*).

### 2.1. Tinjauan Metode AI dalam Prediksi dan Pemetaan Banjir

AI dalam mitigasi bencana melibatkan analisis data besar dari berbagai sumber untuk deteksi dini, pemantauan, dan prediksi risiko [13]. Berbagai metode AI telah terbukti efektif dalam konteks ini:

Pembelajaran Mesin (*Machine Learning* - ML): Algoritma ML seperti *Random Forest* (RF), *Support Vector Machine* (SVM), *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost), *Lazy*, *J48 Tree*, *Naïve Bayes* (NB), dan *Logistic Regression* (LR) digunakan untuk mengidentifikasi pola dalam data hidrologi dan meningkatkan ketangguhan masyarakat terhadap bencana[1]. SVM, misalnya, juga digunakan untuk penilaian pemulihan pasca-bencana terkait perubahan tutupan lahan.

Pembelajaran Mendalam (*Deep Learning* - DL): Jaringan Saraf Tiruan (*Artificial Neural Networks* - ANN) dan *Long Short-Term Memory* (LSTM) sangat efektif untuk analisis data hidrologi temporal, mampu mengenali pola curah hujan ekstrem dan memberikan prediksi lebih cepat dibandingkan model regresi statistik. *Convolutional Neural Networks* (CNN) menunjukkan potensi signifikan untuk pemodelan kerentanan banjir, memproses data citra geospasial resolusi tinggi dan menangkap pola spasial yang rumit[1]. Model yang lebih canggih seperti *Informer* dan *Transformer* juga digunakan untuk simulasi puncak banjir dengan kinerja superior.

*Geographic Artificial Intelligence* (Geo-AI): Pendekatan ini secara khusus menggabungkan teknologi AI dengan data geospasial (citra satelit, data cuaca, *Digital Elevation Model/DEM*) untuk identifikasi daerah rawan banjir yang lebih akurat dan efisien. Geo-AI memanfaatkan platform seperti *Google Earth Engine* untuk mengolah dan menganalisis data, mengidentifikasi pola banjir dan daerah rentan tergenang air.

Keunggulan model berbasis AI dalam prediksi banjir sangat menonjol. Model AI menunjukkan akurasi prediksi hingga 90% dibandingkan 70-80% pada metode konvensional. Selain itu, waktu respons peringatan dini dapat kurang dari 10 menit setelah pembaruan data. AI juga mampu mengidentifikasi kerusakan atau kelemahan struktural pada infrastruktur yang berpotensi membahayakan saat terjadi banjir.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Keragaman model AI/ML yang tersedia, masing-masing dengan kekuatan spesifiknya (misalnya, analisis temporal untuk LSTM, pengenalan pola spasial untuk CNN, interpretasi untuk XAI), menunjukkan bahwa analisis komprehensif banjir di Grobogan kemungkinan besar akan mendapatkan manfaat dari pendekatan hibrida atau ansambel. Tidak ada satu model AI tunggal yang merupakan solusi universal; menggabungkan kekuatan komplementer mereka dapat menghasilkan hasil yang lebih kuat, akurat, dan mendalam, terutama untuk fenomena multifaktorial yang kompleks seperti banjir berulang.

Dalam tabel 1 menyajikan perbandingan akurasi dan waktu respons antara model AI dan metode konvensional dalam prediksi banjir, menunjukkan superioritas AI dalam konteks ini.

Tabel 1. Perbandingan Akurasi dan Waktu Respons Model AI vs. Konvensional dalam Prediksi Banjir

Parameter	Metode Konvensional	Model AI
Akurasi Prediksi	70-80	Hingga 90
Waktu Respon (menit)	>10 (misal 30)	<10
Kemampuan Prediksi Curah Hujan Ekstrem	Terbatas	Tinggi

### 3.1. Data Relevan untuk Pemodelan AI

Untuk membangun model AI yang kuat dan akurat dalam menganalisis penyebab banjir di Grobogan, diperlukan pengumpulan dan pengolahan data yang komprehensif dari berbagai sumber:

1. Data Hidrologi: Meliputi curah hujan (data historis dan real-time dari stasiun hujan dan sensor IoT), debit sungai, ketinggian muka air sungai, dan kelembaban tanah. Data curah hujan historis 10 tahun terakhir per stasiun hujan sangat relevan.
2. Data Geospasial/Topografi: *Digital Elevation Model* (DEM) atau NASA SRTM Digital Elevation 30m, dan *Triangulated Irregular Network* (TIN) sangat penting sebagai dasar pemodelan prediksi genangan banjir. Peta kelas lereng juga diperlukan karena memengaruhi kecepatan aliran permukaan.
3. Citra Satelit: Citra Sentinel-1 SAR sangat berharga karena kemampuannya untuk "melihat" melalui awan dan hujan, memungkinkan pemetaan genangan real-time dan deteksi perubahan permukaan tanah termasuk genangan air. Selain itu, data Landsat 8 Level 2 dan JRC *Global Surface Water Mapping Layers* dapat digunakan untuk pemetaan tutupan lahan, perubahan lingkungan, dan luasan air permukaan. Data-data ini dapat diakses secara gratis melalui platform seperti *Google Earth Engine* dan *Copernicus Open Access Hub*, yang mempermudah proses penelitian.
4. Data Penggunaan Lahan/Tutupan Lahan: Peta penggunaan lahan (sawah, tegal/kebun, lahan terbangun, hutan) sangat penting untuk mengidentifikasi area yang berkontribusi pada aliran permukaan. Perubahan penggunaan lahan, seperti alih fungsi lahan dari hutan atau pertanian menjadi permukiman atau industri, dapat secara signifikan meningkatkan koefisien aliran permukaan.
5. Data Geologi/Tanah: Informasi mengenai jenis tanah yang memengaruhi tingkat infiltrasi air dan litologi (misalnya, lempung halus yang menyebabkan sedimentasi) sangat relevan.
6. Data Morfologi Sungai: Termasuk geometri sungai dan perubahan meander sungai, serta informasi sedimentasi sungai yang dapat memengaruhi kapasitas aliran.
7. Data Infrastruktur: Informasi mengenai kondisi drainase (misalnya, kapasitas dan efektivitas sistem pembuangan air) dan kondisi tanggul sungai (misalnya, jebol atau tidak) sangat krusial.
8. Data Sosial-Ekonomi: Kepadatan penduduk dan jumlah jiwa terdampak juga penting untuk analisis dampak banjir.

Kebutuhan data yang komprehensif ini menggarisbawahi perlunya strategi integrasi dan manajemen data yang kuat. Ketersediaan data satelit resolusi tinggi yang dapat diakses secara terbuka (Sentinel-1 SAR, Landsat 8, JRC *Global Surface Water Mapping Layers*) dan platform berbasis *cloud* seperti *Google Earth Engine* secara signifikan menurunkan hambatan masuk untuk studi semacam itu. Hal ini membuat analisis AI yang canggih menjadi lebih layak, bahkan dengan data lapangan langsung yang terbatas, dengan memanfaatkan sumber daya penginderaan jauh yang tersedia.

Pada tabel 2 menguraikan variabel-variabel kunci yang relevan untuk analisis banjir berbasis AI di Kabupaten Grobogan, beserta jenis data, relevansinya, dan sumber potensialnya.

Tabel 2: Data Variabel Kunci dan Sumber Potensial untuk Analisis Banjir Berbasis AI di Kabupaten Grobogan

Kategori Variabel	Contoh Variabel	Relevansi dengan Banjir	Sumber Data Potensial
Hidrologi	Curah Hujan	Pemicu utama banjir, menentukan debit air sungai	BMKG, Sensor IoT, Stasiun Hujan
	Debit/Ketinggian Air Sungai	Indikator langsung luapan sungai (Tuntang, Lusi)	Pos Hidrologi, Sensor IoT
	Kelembaban Tanah	Memengaruhi kapasitas infiltrasi dan aliran permukaan	Data satelit (misal, SMAP), Sensor tanah
Geospasial/ Topografi	Digital Elevation Model (DEM)/SRTM Kelas Lereng	Menentukan kemiringan lereng, cekungan, dan jalur aliran air Memengaruhi kecepatan aliran permukaan dan erosi	NASA SRTM, DEMNAS Data DEM olahan
Citra Satelit	Sentinel-1 SAR	Pemetaan genangan real-time, deteksi perubahan permukaan	Copernicus Open Access Hub
	Landsat 8	Pemetaan tutupan lahan dan perubahan lingkungan	USGS Earth Explorer
	JRC Global Surface Water	Pemetaan luasan air permukaan dan dinamikanya	Google Earth Engine
Penggunaan Lahan /Tutupan Lahan	Peta Penggunaan Lahan	Memengaruhi koefisien aliran permukaan, infiltrasi, dan erosi	Dinas Pertanian, ESA WorldCover
	Lahan Terbangun/Permukiman	Meningkatkan permukaan kedap air, mempercepat runoff	Peta Rupa Bumi Indonesia, Citra Satelit
Geologi/ Tanah	Jenis Tanah	Menentukan laju infiltrasi dan potensi aliran permukaan	Peta Geologi, Peta Tanah
	Litologi	Memengaruhi ketersediaan material sedimen dan erosi	Peta Geologi
Morfologi Sungai	Geometri Sungai	Kapasitas tampung sungai, bentuk penampang	Survei lapangan, Citra satelit
	Sedimentasi Sungai	Pendangkalan sungai, mengurangi kapasitas aliran	Survei lapangan, Analisis citra
Infrastruktur	Kondisi Drainase	Kapasitas dan efektivitas sistem pembuangan air	Survei lapangan, Laporan BPBD
	Kondisi Tanggul Sungai	Integritas struktur penahan air	Survei lapangan, Laporan BPBD
Sosial-Ekonomi	Kepadatan Penduduk	Korelasi dengan jumlah jiwa terdampak banjir	BPS, Global Human Settlement Layers

### 3.2. Keunggulan AI dalam Analisis Data Spasial-Temporal dan Identifikasi Pola Kompleks.

Kemampuan AI untuk memproses dataset yang besar, kompleks, dan heterogen merupakan keunggulan yang jelas dibandingkan metode tradisional. AI mampu menganalisis data dalam jumlah besar dari berbagai sumber dengan cepat dan akurat, memungkinkan deteksi dini dan pemantauan bencana yang lebih efisien. Dengan algoritma pembelajaran mesin, AI dapat mengenali pola dalam data historis dan *real-time*, memungkinkan prediksi yang lebih akurat dan mengurangi keterlambatan dalam penyampaian peringatan.

Model prediksi berbasis AI dapat memperkirakan kemungkinan terjadinya bencana di suatu wilayah dengan mempertimbangkan faktor geografis dan iklim, misalnya memprediksi area rawan banjir berdasarkan pola curah hujan dan kondisi tanah. AI juga mampu mengenali pola curah hujan ekstrem dan memberikan prediksi lebih cepat dibandingkan model regresi statistik. Kemampuan AI untuk mengintegrasikan data *real-time* dari sensor IoT dengan data historis lebih lanjut meningkatkan akurasi dan responsivitas prediksi.



Kemampuan AI untuk menangani data spasial-temporal yang besar dan kompleks sangat penting untuk memahami dinamika banjir yang dipengaruhi oleh banyak variabel yang berubah seiring waktu dan lokasi. Hal ini memungkinkan identifikasi hubungan non-linear yang halus dan pola dinamis di seluruh dimensi spasial dan temporal yang mungkin terlewatkan oleh model yang lebih sederhana. Pendekatan ini mengarah pada pemahaman yang lebih bernuansa tentang kausalitas banjir di Kabupaten Grobogan, termasuk bagaimana hubungan antar faktor berubah seiring waktu dan ruang, misalnya, bagaimana dampak curah hujan berinteraksi dengan tingkat kejenuhan tanah yang berubah, atau bagaimana alih fungsi lahan secara bertahap mengubah respons hidrologis suatu area.

### 3.3 Pendekatan AI yang dapat diinterpretasi untuk Identifikasi Faktor Kausal Banjir

Bagian ini akan membahas inovasi metodologis inti: bagaimana teknik AI yang dapat diinterpretasi akan digunakan untuk melampaui prediksi semata dan memberikan wawasan tentang mekanisme kausal banjir di Kabupaten Grobogan.

1. Pentingnya Interpretasi Model (*Explainable AI/XAI*) dalam Pemahaman Mekanisme Banjir. Meskipun model pembelajaran mendalam (DL) menawarkan akurasi prediksi yang tinggi, sifat "kotak hitam" mereka seringkali membatasi penerapannya dalam pengambilan keputusan kritis, terutama di bidang manajemen bencana. Para pengambil kebijakan, ahli hidrologi, dan perencana membutuhkan pemahaman yang jelas tentang mengapa prediksi dibuat, bukan hanya apa yang diprediksi.

Interpretasi model sangat penting untuk membangun kepercayaan terhadap hasil AI, memvalidasi penalaran model terhadap pengetahuan hidrologi dunia nyata yang sudah ada, dan memastikan bahwa model berfokus pada area dan fitur yang relevan secara fisik. Tanpa kemampuan untuk menjelaskan bagaimana suatu model sampai pada prediksinya, sulit untuk merumuskan strategi mitigasi yang efektif dan berbasis bukti. Kemampuan untuk bergerak melampaui akurasi prediktif semata menuju pemahaman kausal merupakan kontribusi intelektual inti dari penelitian ini. Untuk Kabupaten Grobogan, ini berarti mengidentifikasi secara spesifik faktor-faktor mana (misalnya, perubahan penggunaan lahan tertentu, fitur geologis, atau bagian sungai) yang menjadi pendorong utama banjir berulang, daripada hanya mengetahui bahwa banjir akan terjadi. Pergeseran dari "apa" ke "mengapa" ini sangat penting untuk pengembangan kebijakan dan mitigasi yang tepat sasaran.

2. Penerapan Metode XAI (misalnya, SHAP, Grad-CAM) untuk Mengkuantifikasi Kontribusi Variabel.

Untuk mencapai pemahaman kausal yang mendalam, penelitian ini akan menerapkan metode *Explainable AI (XAI)* yang canggih:

- a) SHAP (*SHapley Additive exPlanation*): Teknik ini mengkuantifikasi dampak setiap fitur input pada prediksi individu, mengungkapkan kontribusi marginal masing-masing fitur dalam model. Nilai SHAP positif menunjukkan dampak positif fitur terhadap prediksi banjir (yaitu, meningkatkan kemungkinan banjir), sementara nilai negatif menunjukkan dampak menekan (yaitu, mengurangi kemungkinan banjir). Dengan menjumlahkan dan memberi peringkat nilai SHAP positif untuk setiap peristiwa banjir, faktor pemicu dominan dari daerah aliran sungai dapat ditentukan. SHAP juga dapat mengungkapkan dampak temporal variabel pada langkah waktu yang berbeda, menantang pemahaman tradisional bahwa variabel yang lebih dekat dengan waktu kejadian banjir memiliki dampak yang lebih besar. Dalam satu studi, SHAP mengidentifikasi *Normalized Difference Water Index (NDWI)*, *Slope*, *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*, *Distance to Road (DTRoad)*, *Elevation*, *Moisture*, dan *Stream Power Index (SPI)* sebagai faktor signifikan yang memengaruhi kejadian banjir.
- b) Grad-CAM (*Gradient-weighted Class Activation Mapping*): Metode ini digunakan untuk model pembelajaran mendalam (terutama *Convolutional Neural Networks/CNN*) untuk menghasilkan peta panas yang menunjukkan wilayah spasial mana yang paling

berkontribusi pada prediksi kerentanan banjir. Grad-CAM membantu memverifikasi apakah model berfokus pada area yang relevan secara hidrologi, bukan pada artefak yang tidak relevan, dan mengkuantifikasi atribusi per fitur. Misalnya, Grad-CAM dapat menunjukkan bahwa kemiringan dan *Topographic Wetness Index* (TWI) adalah fitur paling berpengaruh dalam prediksi banjir.

Penerapan SHAP dan Grad-CAM memungkinkan analisis untuk beralih dari korelasi umum ke kontribusi kausal yang spesifik dan terkuantifikasi. Untuk Kabupaten Grobogan, ini berarti mampu menyatakan, misalnya, "X% risiko banjir disebabkan oleh perubahan penggunaan lahan di sub-DAS Y, dan Z% disebabkan oleh sedimentasi di bagian sungai A," yang memungkinkan upaya mitigasi yang sangat terarah dan hemat biaya. Tingkat detail ini belum pernah terjadi sebelumnya dengan model tradisional dan merupakan kekuatan sejati dari AI yang dapat diinterpretasi dalam manajemen bencana.

### 3. Identifikasi Pola Pemicu Banjir Dominan dan Dinamika Pengaruhnya

Melalui interpretasi model AI, pola pemicu banjir utama dapat diidentifikasi. Dalam studi lain, pola-pola ini termasuk curah hujan, kelebihan air tanah (*excess soil water*), dan pencairan salju. Meskipun pencairan salju mungkin tidak relevan untuk Kabupaten Grobogan, pola curah hujan dan kelebihan air tanah sangat relevan.

Pengaruh faktor dominan bersifat regional dan dampaknya pada banjir dapat menunjukkan perbedaan signifikan dalam langkah waktu. Studi menunjukkan bahwa lebih dari 40% DAS mengalami pergeseran faktor pemicu dominan seiring waktu, dengan DAS yang didominasi curah hujan mengalami perubahan yang lebih signifikan, menguatkan respons perubahan iklim. Sifat dinamis dari pemicu banjir dan variabilitas regionalnya merupakan hal yang sangat penting untuk Kabupaten Grobogan. Hal ini menunjukkan bahwa penyebab banjir tidak statis; mereka dapat bergeser seiring waktu karena perubahan iklim atau aktivitas antropogenik. Ini berarti strategi mitigasi harus adaptif dan dinilai ulang secara berkala, dan AI dapat menyediakan kemampuan pemantauan dan evaluasi ulang berkelanjutan yang diperlukan.

Tabel 3 berikut memberikan contoh bagaimana faktor pemicu banjir dapat diidentifikasi dan dikuantifikasi menggunakan metode AI yang dapat diinterpretasi, yang akan menjadi keluaran kunci dari penelitian ini.

Tabel 3: Contoh Faktor Pemicu Banjir yang diidentifikasi dan dikuantifikasi melalui Metode AI yang dapat diinterpretasi

Faktor Pemicu		Kontribusi Kuantitatif (Contoh)		Metode AI yang Digunakan	Implikasi Kausalitas
Curah Hujan Intensitas Tinggi		SHAP Score: +0.7 (meningkatkan probabilitas banjir)		SHAP	Pemicu langsung, volume air berlebih
Alih Fungsi Lahan (Hulu)		SHAP Score: +0.5 (meningkatkan probabilitas banjir)		SHAP , Grad-CAM	Mengurangi infiltrasi, meningkatkan aliran permukaan dan erosi
Sedimentasi Sungai		Grad-CAM Heatmap: Area tinggi di bagian sungai X		Grad-CAM	Mengurangi kapasitas penampang sungai, mempercepat luapan
Kondisi Drainase Buruk		SHAP Score: +0.4 (meningkatkan probabilitas banjir)		SHAP	Menghambat aliran air, menyebabkan genangan lokal
Jebolnya Tanggul		Grad-CAM Heatmap: Area tinggi di sekitar tanggul Y		Grad-CAM	Memungkinkan luapan air ke area permukiman
Kelembaban Tanah Berlebih		SHAP Score: +0.3 (meningkatkan probabilitas banjir)		SHAP	Mengurangi kapasitas penyerapan tanah, meningkatkan runoff

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini diharapkan memberikan pemahaman yang lebih dalam dan terkuantifikasi mengenai faktor-faktor pemicu banjir berulang di Kabupaten Grobogan, melampaui analisis korelasional sederhana. Dengan mengidentifikasi dan mengukur kontribusi kausal dari faktor hidrologis, geografis, geologis, dan antropogenik, penelitian ini akan mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dan berbasis bukti untuk strategi mitigasi. Pergeseran dari "apa" ke "mengapa" dalam analisis banjir, yang dimungkinkan oleh AI yang dapat diinterpretasi, memiliki implikasi mendalam bagi kebijakan. Hal ini memungkinkan transisi dari respons bencana yang reaktif menjadi strategi mitigasi yang proaktif, terarah, dan hemat biaya. Ini merupakan langkah penting menuju pembangunan ketahanan banjir jangka panjang di Kabupaten Grobogan.

Peta kerentanan banjir yang dihasilkan dari model AI akan lebih akurat dan dinamis, memungkinkan identifikasi area prioritas untuk intervensi. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang penyebab spesifik, sumber daya dapat dialokasikan secara lebih efisien untuk mengatasi akar masalah, daripada hanya merespons gejala.

#### 5. SARAN

Berdasarkan analisis kausal yang mendalam menggunakan AI, beberapa rekomendasi dapat diajukan untuk meningkatkan mitigasi banjir di Kabupaten Grobogan yaitu dengan pengelolaan DAS Terpadu: Mengingat Sungai Lusi memiliki daerah aliran sungai yang luas dan melintasi beberapa kabupaten, rekomendasi harus mencakup pengelolaan DAS terpadu yang melibatkan koordinasi lintas wilayah. Ini termasuk program reboisasi DAS dan pengendalian alih fungsi lahan di daerah pegunungan/perbukitan untuk mengurangi erosi dan aliran permukaan dari hulu. Peningkatan Infrastruktur Drainase dan Tanggul: Prioritas harus diberikan pada perbaikan dan penguatan tanggul yang jebol serta peningkatan kapasitas sistem drainase, terutama di daerah dataran rendah yang rawan genangan berkepanjangan. Hal ini mencakup normalisasi sungai dan perencanaan tanggul.

Sistem Peringatan Dini Berbasis AI: Mengembangkan dan mengintegrasikan sistem peringatan dini yang memanfaatkan model AI real-time dan data IoT untuk memberikan informasi yang cepat dan akurat kepada masyarakat dan pihak berwenang, memungkinkan respons yang lebih cepat dan tepat waktu. Perencanaan Tata Ruang **Berbasis Risiko**: Menggunakan peta risiko banjir yang dihasilkan AI sebagai panduan untuk perencanaan tata ruang, membatasi pembangunan di area sangat rentan dan mendorong pembangunan yang lebih tahan bencana. Ini akan membantu meminimalkan dampak urbanisasi yang tidak terkontrol. Edukasi dan Keterlibatan Masyarakat: Meningkatkan pengetahuan masyarakat mengenai mitigasi banjir dan melibatkan mereka dalam pengumpulan data crowdsourcing untuk memperkaya model AI dan membangun ketahanan komunitas.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Kumar, K. V. Sharma, N. K. Mangukiya, D. K. Tiwari, P. V. Ramkar, and U. Rathnayake, "Machine learning applications in flood forecasting and predictions, challenges, and way-out in the perspective of changing environment," *AIMS Environ Sci*, vol. 12, no. 1, pp. 72–105, 2025, doi: 10.3934/environsci.2025004.
- [2] Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), "Dokumen Kajian Risiko Bencana Nasional - Provinsi Jawa Tengah 2022-2026," 2021.
- [3] Pemerintah Kabupaten Grobogan, "Dari Pengungsian Hingga Tanggul Jebol, Gubernur Jateng Pantau Langsung Penanganan Banjir Grobogan," 2025. [Online]. Available: [https://www.grobogan.go.id/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2758:dar](https://www.grobogan.go.id/index.php?option=com_content&view=article&id=2758:dar)

- i-pengungsian-hingga-tanggul-jebol-gubernur-jateng-pantau-langsung-penanganan-banjir-grobogan&catid=61:berita-terbaru&Itemid=264.
- [4] J. Mediana Ika Syafirina H, “Analisis Zona Rawan Banjir berbasis Pemetaan Geologi pada Wilayah Das Rejoso dan Sekitarnya di Kabupaten Pasuruan,” in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan IX 2021*, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, 2021, pp. 515–521.
  - [5] Nuzla Af'idatur Robbaniyyah, B. N. Syechah, Naoval Husni, Marwan, and Lailia Awalushaumi, “Mapping of Flood Prone Areas in West Lombok Based on Analytic Hierarchy Process and Geographic Information System,” *Mandalika Mathematics and Educations Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 265–274, Jun. 2024, doi: 10.29303/jm.v6i1.6542.
  - [6] N. W. Wulansari and M. Muslih, “Implementasi Metode Convolutional Neural Network Untuk Deteksi Kematangan Buah Pisang Menggunakan Inception V3,” *JOINS (Journal of Information System)*, vol. 8, no. 2, pp. 147–155, Nov. 2023, doi: 10.33633/joins.v8i2.9074.
  - [7] P. D. P. Nugroho and G. S. Putri, “Update Banjir Grobogan, Kecamatan Gubug Masih Terendam, 5 Kecamatan Lain Surut,” *Kompas.com*, Mar. 10, 2025.
  - [8] Humas Provinsi Jawa Tengah, “Jebolan Tanggul Belum Tertutup,” Mei 20, 2025. [Online]. Available: [https://humas.jatengprov.go.id/detail\\_berita\\_gubernur?id=9744](https://humas.jatengprov.go.id/detail_berita_gubernur?id=9744)
  - [9] F. A. Tanti, G. W. Wicaksono, and A. E. Minarno, “Sistem Pendukung Keputusan Prioritas Lokasi Perbaikan Jalan Menggunakan Metode Analytical Hierarchy Process dan Simple Additive Weighting Studi Kasus Kabupaten Pasuruan,” *Jurnal Repositor*, vol. 2, no. 9, pp. 1249–1256, Aug. 2020, doi: 10.22219/repositor.v2i9.1004.
  - [10] D. R. I. M. Setiadi, W. Wardo, A. R. Muslikh, K. Nugroho, and A. N. Safriandono, “Aspect-Based Sentiment Analysis on E-commerce Reviews using BiGRU and Bi-Directional Attention Flow,” *Journal of Computing Theories and Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 470–480, Apr. 2025, doi: 10.62411/jcta.12376.
  - [11] U. Khaira, P. E. P. Utomo, T. Suratno, and P. C. S. Gulo, “Prediksi Indeks Harga Saham Gabungan (IHSG) Menggunakan Algoritma Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA),” *JUSS (Jurnal Sains dan Sistem Informasi)*, vol. 2, no. 2, pp. 11–17, Nov. 2021, doi: 10.22437/juss.v2i2.8449.
  - [12] R. Mutmainah, “Peran AI dalam Mitigasi Bencana Banjir,” Netray, Apr. 02, 2025. [Online]. Available: <https://analysis.netray.id/peran-ai-dalam-mitigasi-bencana/>
  - [13] Hammam Riza, E. W. S. Santoso, Iwan Gunawan Tejakusuma, Firman Prawiradisatra, and Prihartanto, “Pemanfaatan Kecerdasan Artifisial untuk Meningkatkan Mitigasi Bencana Banjir,” in *Prosiding Use Cases Artificial Intelligence Indonesia: Embracing Collaboration for Research and Industrial Innovation in Artificial Intelligence*, Penerbit BRIN, 2023. doi: 10.55981/brin.668.c545.