

MITIGASI BANJIR DI ERA DIGITAL: INTEGRASI TEKNOLOGI DAN MANAJEMEN RISIKO

Tim Penulis :

- Amrullah Mansida
- Dimas Gustoro
- Margaretha Yuneta
- Nenny Roostrianawaty
- Wahyu Hidayat



MITIGASI BANJIR DI ERA DIGITAL: INTEGRASI TEKNOLOGI DAN MANAJEMEN RISIKO

Amrullah Mansida
Dimas Gustoro
Margaretha Yuneta
Nenny Roostrianawaty
Wahyu Hidayat



GET PRESS INDONESIA

MITIGASI BANJIR DI ERA DIGITAL: INTEGRASI TEKNOLOGI DAN MANAJEMEN RISIKO

Penulis :

Amrullah Mansida
Dimas Gustoro
Margaretha Yuneta
Nenny Roostrianawaty
Wahyu Hidayat

ISBN : 978-634-255-713-6

Editor : Mila Sari, M. Si.

Desain Sampul dan Tata Letak : Dede Ahsani Aulia, ST.

PENERBIT : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Agustus 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga buku berjudul *Mitigasi Banjir di Era Digital: Integrasi Teknologi dan Manajemen Risiko* ini dapat diselesaikan. Isi buku ini mencakup pembahasan tentang konsep dasar banjir dan risiko bencana, karakteristik dan potensi banjir di Indonesia, Konsep mitigasi banjir berbasis teknologi, teknologi deteksi dan peringatan dini banjir, teknologi analisis dan prediksi banjir. Akhir kata, semoga buku ini dapat menjadi referensi dan dapat memberikan manfaat serta inspirasi bagi semua pembaca.

Padang, Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	x
BAB 1 KONSEP DASAR BANJIR DAN RISIKO BENCANA	1
1.1 Analisis Data Curah Hujan.....	1
1.2 Jenis-Jenis Banjir	5
1.2.1 Banjir Sungai (Fluvial Flood)	6
1.2.2 Banjir Perkotaan (<i>Urban Flood</i>)	7
1.2.3 Banjir Bandang (Flash Flood).....	8
1.2.4 Banjir Rob (Coastal Flood).....	9
1.2.5 Banjir Genangan (Pluvial Flood)	9
1.2.6 Banjir Akibat Kegagalan Infrastruktur	10
1.3 Faktor Penyebab Terjadinya Banjir.....	11
1.3.1 Curah Hujan Tinggi.....	11
1.3.2 Kerusakan Daerah Aliran Sungai (DAS)	12
1.3.3 Urbanisasi dan Perubahan Tata Guna Lahan	13
1.3.5 Penurunan Muka Tanah dan Banjir Rob	14
1.3.6 Sampah dan Perilaku Masyarakat	15
1.3.7 Perubahan Iklim Global	15
1.4 Konsep Risiko Bencana Banjir.....	16
1.5 Komponen Risiko: Ancaman, Kerentanan, Paparan, dan Kapasitas	20
1.5.1 Ancaman (<i>Hazard</i>).....	21
1.5.2 Kerentanan (<i>Vulnerability</i>).....	22

1.5.3 Kapasitas (<i>Capacity</i>).....	23
1.6 Dampak Banjir terhadap Kehidupan dan Pembangunan	24
1.6.1 Dampak terhadap Kehidupan Sosial Masyarakat.....	25
1.6.2 Dampak terhadap Infrastruktur dan Fasilitas Publik.....	26
1.6.3 Dampak terhadap Perekonomian.....	27
1.6.5 Dampak terhadap Kesehatan dan Sanitasi.....	28
1.6.6 Dampak terhadap Lingkungan dan Pembangunan Berkelanjutan	28
1.7 Urgensi Mitigasi Banjir di Era Digital	30
DAFTAR PUSTAKA	34
BAB 2 KARAKTERISTIK DAN POTENSI BANJIR DI INDONESIA	43
2.1 Pendahuluan.....	43
2.1.1 Kondisi Geografis dan Hidroklimatologi Indonesia.....	44
2.1.2 Sistematika dan Tujuan Penulisan Bab	44
2.2 Karakteristik Fisik Wilayah Indonesia Terhadap Risiko Banjir.....	45
2.2.1 Kondisi Topografi, Geomorfologi, dan Daerah Aliran Sungai (DAS).....	45
2.2.2 Pola Curah Hujan, Monsun, dan Fenomena Iklim Global	47
2.2.3 Karakteristik Tanah dan Kapasitas Infiltrasi	48
2.3 Tipologi Banjir di Indonesia	49
2.3.1 Banjir Luapan Sungai (<i>Fluvial Flood</i>)	49
2.3.2 Banjir Bandang (<i>Flash Flood</i>)	50
2.3.3 Banjir Perkotaan (<i>Pluvial Flood / Urban Flood</i>)	52
2.3.4 Banjir Pesisir (<i>Rob / Coastal Flood</i>).....	53

2.4 Potensi dan Distribusi Spasial Banjir di Pulau-Pulau Besar Indonesia	55
2.4.1 Pulau Sumatera	56
2.4.2 Pulau Jawa	57
2.4.3 Pulau Kalimantan	57
2.4.4 Pulau Sulawesi.....	58
2.4.5 Wilayah Bali, Nusa Tenggara, Maluku, dan Papua	59
2.5 Analisis Faktor Pemicu Banjir di Indonesia	59
2.5.1 Faktor Alamiah (<i>Natural Drivers</i>).....	60
2.5.2 Faktor Antropogenik (<i>Human-Induced Drivers</i>)	61
2.6 Dampak Sosio-Ekonomi dan Kerusakan Infrastruktur	62
2.7 Menuju Manajemen Risiko Banjir di Era Digital: Sebuah Pengantar	65
2.8 Kesimpulan.....	68
DAFTAR PUSTAKA	69
BAB 3 KONSEP MITIGASI BANJIR BERBASIS TEKNOLOGI.....	78
3.1 Pengertian Mitigasi Banjir Berbasis Teknologi.....	78
3.2 Tujuan Mitigasi Banjir Berbasis Teknologi.....	81
3.3 Prinsip Mitigasi Banjir Berbasis Teknologi	85
3.3.1 Prinsip Integrasi Data	86
3.3.2 Prinsip Pemantauan Secara Real-Time (Real-Time Monitoring).....	87
3.3.3 Prinsip Prediktif (Predictive Approach)	88
3.3.4 Prinsip Kolaboratif dan Terintegrasi.....	89
3.3.5 Prinsip Keberlanjutan (Sustainability)	91
3.4 Komponen Sistem Mitigasi Banjir Berbasis Teknologi.....	92
3.4.1 Data Acquisition System (Sistem Akuisisi Data).....	93
3.4.2 Data Processing System (Sistem Pengolahan Data)	94

3.4.3 Decision Support System (DSS).....	96
3.4.4 Early Warning System (EWS).....	97
3.5 Integrasi Teknologi dalam Mitigasi Banjir.....	99
3.6 Peran Mitigasi Berbasis Teknologi dalam Manajemen Risiko Banjir.....	105
3.7 Tantangan Implementasi Mitigasi Banjir Berbasis Teknologi.....	106
DAFTAR PUSTAKA	108
BAB 4 TEKNOLOGI DETEKSI DAN PERINGATAN DINI BANJIR	111
4.1 Pendahuluan.....	111
4.2 Konsep Dasar Sistem Deteksi dan Peringatan Dini Banjir.....	116
4.2.1 Definisi Sistem Peringatan Dini	116
4.2.2 Komponen Utama Early Warning System	117
4.3 Teknologi Sensor dalam Deteksi Banjir.....	123
4.3.1 Sensor Tinggi Muka Air.....	123
4.3.2 Sensor Curah Hujan.....	124
4.3.3 Sensor Debit dan Kecepatan Aliran.....	125
4.7 Internet of Things (IoT) dalam Sistem Peringatan Dini Banjir.....	128
4.8 Artificial Intelligence dan Machine Learning untuk Prediksi Banjir.....	129
4.9 Sistem Komunikasi dan Penyebaran Informasi.....	130
4.10 GIS, Remote Sensing dan Drone	131
4.11 Tantangan Implementasi Teknologi.....	131
4.12 Studi Kasus Implementasi	132
4.13 Pengembangan Teknologi Masa Depan	133
DAFTAR PUSTAKA	134

BAB 5 TEKNOLOGI ANALISIS DAN PREDIKSI BANJIR	137
5.1 Pendahuluan	137
5.2 Pemodelan Hidrologis: Fondasi Kuantitatif Analisis Banjir	140
5.2.1 Klasifikasi dan Karakteristik Model Hidrologis	142
5.2.2 Model Hidrolik dan Simulasi Aliran Dua Dimensi	143
5.2.3 Model Elevasi Digital Beresolusi Tinggi sebagai Input Kritis	147
5.3 Penginderaan Jauh dan SIG: Perspektif Spasial dalam Analisis Banjir	149
5.3.1 Sensor SAR: Pemantauan Banjir Menembus Awan	150
5.3.2 Google Earth Engine: Komputasi Awan untuk Analisis Skala Besar	151
5.3.3 SIG dan Analisis Multi-Kriteria untuk Pemetaan Risiko Banjir	152
5.4 Machine Learning dan Kecerdasan Buatan dalam Prediksi Banjir	154
5.4.1 Ensemble Learning: Random Forest dan Gradient Boosting	154
5.4.2 Deep Learning: LSTM untuk Prediksi Deret Waktu Hidrologi	155
5.4.3 Convolutional Neural Network untuk Segmentasi Citra Banjir	156
5.4.4 Physics-Informed Neural Networks: Sinergi Fisika dan Data	158
5.5 Sistem Peringatan Dini Banjir: Dari Sensor Menuju Tindakan	158
5.5.1 Infrastruktur Pengukuran Hidrometeorologis	159
5.5.2 IoT dan Sensor Cerdas dalam Pemantauan Banjir	160
5.5.3 Prediksi Ensemble dan Pendekatan Probabilistik	161

5.6 Teknologi Radar dan Penginderaan Atmosfer	162
5.6.1 Radar Cuaca Doppler Polarimetrik	163
5.6.2 Satelit GPM dan Produk IMERG	163
5.7 UAV dan Drone: Survei Presisi Tinggi untuk Analisis Banjir.....	164
5.7.1 Fotogrametri UAV dan Rekonstruksi DEM Resolusi Sangat Tinggi.....	164
5.7.2 Sensor Khusus pada UAV: Multispektral dan Termal.....	165
5.8 Digital Twin dan Komputasi Awan dalam Manajemen Banjir Modern	166
5.8.1 Platform Cloud Computing untuk Pemodelan Banjir Operasional	167
5.9 Integrasi Platform Terpadu dan Implementasi di Indonesia	168
5.9.1 Arsitektur Berlapis Sistem Terpadu Manajemen Banjir.....	168
5.9.2 Kemajuan dan Tantangan Implementasi di Indonesia	169
5.10 Tantangan Utama dan Peluang Pengembangan ke Depan.....	170
5.10.1 Kelangkaan Data dan Ketidakmerataan Infrastruktur Pemantauan.....	171
5.10.2 Kesenjangan Kapasitas Sumber Daya Manusia dan Kelembagaan.....	171
5.10.3 Peluang Strategis: Sains Terbuka, AI Generasi Baru, dan Sensor Terjangkau	172
DAFTAR PUSTAKA	174
BIODATA PENULIS.....	186

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Komponen Sistem Mitigasi Banjir berbasis Teknologi.....	99
Gambar 3.2 Integrasi Teknologi dalam Mitigasi Banjir	104
Gambar 4.1 Sensor Tinggi Muka Air.....	124
Gambar 4.2 Sensor Curah Hujan.....	125
Gambar 4.3 Sensor Debit dan Kecepatan Aliran.....	127
Gambar 4.4 Skema Sistem Sensor Modern.....	129
Gambar 5.1 Komponen Utama Siklus Hidrologi dalam Konteks Banjir	139
Gambar 5.2 Alur Integrasi Model Hidrologis dan Hidrolik dalam Prediksi Banjir	145
Gambar 5.3 Perbandingan Kemampuan Sensor SAR dan Optik dalam Pemantauan Banjir	150
Gambar 5.4 Alur Kerja Pemetaan Genangan Banjir Menggunakan Google Earth Engine	152
Gambar 5.5 Kerangka Analisis Risiko Banjir Berbasis SIG dan Multi-Kriteria	154
Gambar 5.6 LSTM untuk Prediksi Debit Banjir	156
Gambar 5.7 Empat Komponen Utama Sistem Peringatan Dini Banjir.....	159
Gambar 5.8 Arsitektur Sistem IoT untuk Pemantauan Banjir Real-Time	161
Gambar 5.9 Konsep dan Arsitektur Digital Twin	167
Gambar 5.10 Peta Jalan Pengembangan Teknologi Prediksi Banjir 2026–2036	173

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tipologi Banjir di Indonesia.....	54
Tabel 4.1 Klasifikasi Status Peringatan banjir.....	121
Tabel 4.2 Tabel Perbandingan Sensor Deteksi Banjir	127
Tabel 5.1 Perbandingan Perangkat Lunak Pemodelan Hidrolik Terkemuka	147
Tabel 5.2 Ringkasan Perbandingan Metode Machine Learning dalam Analisis Banjir	157

BAB 1

KONSEP DASAR BANJIR DAN RISIKO BENCANA

Oleh: Amrullah Mansida

1.1 Analisis Data Curah Hujan

Banjir merupakan salah satu bencana hidrometeorologi yang paling sering terjadi di berbagai wilayah dunia, termasuk Indonesia. Secara umum, banjir diartikan sebagai kondisi meluapnya air ke daratan yang pada keadaan normal tidak tergenang air. Volume air melebihi kapasitas sungai, saluran, dan daya infiltrasi tanah sehingga air melimpas ke kawasan permukiman, lahan pertanian, infrastruktur, maupun pusat aktivitas masyarakat. Dalam perspektif kebencanaan, banjir tidak hanya dipandang sebagai fenomena alam, tetapi juga sebagai ancaman serius terhadap keberlanjutan pembangunan, keselamatan manusia, stabilitas ekonomi, dan kualitas lingkungan hidup. (Liu, Yin and Mostafavi, 2024) (Suci Pradipta Wibowo, 2020); (Sulkifly, 2020).

Di Indonesia, banjir menjadi bencana yang memiliki frekuensi kejadian tinggi karena dipengaruhi oleh kondisi geografis, iklim tropis dengan curah hujan besar, kepadatan penduduk, serta perubahan tata guna lahan yang berlangsung sangat cepat. Fenomena urbanisasi yang tidak terkendali

mengakibatkan berkurangnya area resapan air dan meningkatnya permukaan permukaan. Kondisi tersebut memperbesar limpasan permukaan (surface runoff) sehingga meningkatkan potensi banjir, terutama di kawasan perkotaan. Selain faktor alam, aktivitas manusia seperti penebangan hutan, sedimentasi sungai, pembuangan sampah ke saluran drainase, dan pembangunan di kawasan sempadan sungai turut memperparah kejadian banjir (Kitsikoudis *et al.*, 2021);(Miller and Hutchins, 2017);(Mignot and Dewals, 2022).

Banjir pada hakikatnya merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor hidrologi, lingkungan, sosial, ekonomi, dan tata ruang wilayah. Oleh karena itu, pemahaman tentang banjir tidak dapat dibatasi hanya pada aspek fisik berupa genangan air, tetapi juga harus melihat hubungan antara manusia dan lingkungannya. Dalam konteks modern, banjir dipahami sebagai risiko bencana yang muncul akibat kombinasi antara ancaman (hazard), kerentanan (vulnerability), kapasitas (capacity), dan tingkat paparan (exposure) masyarakat terhadap bahaya banjir. Semakin tinggi tingkat kerentanan dan paparan suatu wilayah, maka semakin besar pula risiko kerugian yang ditimbulkan ketika banjir terjadi (Panigrahi and Sharma, 2024);(Tabasi, Fereshtepour and Roghani, 2025);.

Karakteristik banjir dapat dibedakan berdasarkan sifat, sumber, kecepatan aliran, luas genangan, dan durasi kejadiannya. Salah satu karakteristik utama banjir adalah adanya peningkatan debit air secara signifikan dalam waktu tertentu sehingga kapasitas sungai atau drainase tidak mampu lagi menampung aliran air. Pada beberapa kasus, banjir terjadi secara perlahan akibat akumulasi hujan dalam

waktu lama, namun pada kasus lain dapat terjadi secara tiba-tiba dalam bentuk banjir bandang yang memiliki arus sangat deras dan daya rusak tinggi. Banjir bandang biasanya membawa material lumpur, batu, kayu, dan sedimen yang memperbesar tingkat kerusakan infrastruktur dan korban jiwa(Hendrayana *et al.*, 2024);(Paski *et al.*, 2021) .

Karakteristik lain dari banjir adalah luas genangan dan lamanya air menggenangi suatu wilayah. Banjir dengan durasi pendek mungkin hanya mengganggu aktivitas masyarakat sementara waktu, namun banjir yang berlangsung lama dapat menyebabkan kerusakan ekonomi dan kesehatan masyarakat yang lebih besar. Genangan air dalam waktu lama dapat menimbulkan penyakit berbasis lingkungan seperti diare, leptospirosis, penyakit kulit, dan gangguan sanitasi. Selain itu, banjir juga dapat menyebabkan trauma psikologis, terutama pada kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan masyarakat miskin perkotaan(Baryshnikova and Pham, 2019);(Syukriyah and Himaz, 2024);(Dartanto, 2022);(Carías *et al.*, 2022).

Dalam kajian hidrologi, karakteristik banjir juga dipengaruhi oleh intensitas curah hujan, kondisi topografi, jenis tanah, tutupan lahan, serta kapasitas daerah aliran sungai (DAS). Curah hujan dengan intensitas tinggi dalam waktu singkat dapat meningkatkan debit limpasan secara drastis, terutama pada wilayah dengan tingkat infiltrasi rendah. Kawasan perkotaan memiliki risiko banjir lebih tinggi karena dominasi permukaan kedap air menyebabkan air hujan tidak dapat meresap ke dalam tanah. Kondisi ini diperburuk apabila sistem drainase tidak dirancang sesuai kapasitas debit air yang meningkat akibat perubahan iklim

dan pertumbuhan kota(Cutter *et al.*, 2018);(Schreider, Smith and Jakeman, 2000);(Sciences *et al.*, 2019).

Perubahan iklim global juga menjadi faktor penting yang memengaruhi karakteristik banjir saat ini. Peningkatan suhu permukaan bumi menyebabkan perubahan pola curah hujan dan meningkatnya frekuensi kejadian cuaca ekstrem. Banyak wilayah mengalami hujan dengan intensitas lebih tinggi dibandingkan kondisi normal sehingga meningkatkan potensi banjir besar. Di wilayah pesisir, kenaikan muka air laut juga menyebabkan meningkatnya risiko banjir rob yang mengancam kawasan permukiman dan infrastruktur pantai(Schreider, Smith and Jakeman, 2000);(SONG *et al.*, 2024);(Huang *et al.*, 2018).

Karakteristik banjir di era modern juga semakin dipengaruhi oleh faktor urbanisasi dan perkembangan infrastruktur. Kota-kota besar menghadapi tantangan serius akibat pertumbuhan penduduk yang cepat, konversi lahan terbuka hijau menjadi kawasan terbangun, dan ketidakseimbangan antara pembangunan fisik dengan daya dukung lingkungan. Akibatnya, banjir tidak lagi hanya dipicu oleh faktor alam, tetapi juga oleh kegagalan sistem tata ruang dan pengelolaan lingkungan perkotaan. Kondisi ini terlihat pada berbagai kejadian banjir di Jakarta, Sumatera Barat, dan wilayah perkotaan lainnya yang menimbulkan kerugian sosial dan ekonomi sangat besar(Shatkin, 2019);(Darmayanti *et al.*, 2023);(Colven, 2020);(Silver, 2021).

Selain menimbulkan kerusakan fisik, banjir juga berdampak terhadap terganggunya aktivitas ekonomi dan sosial masyarakat. Infrastruktur transportasi, jaringan listrik, fasilitas pendidikan, layanan kesehatan, dan distribusi logistik sering kali lumpuh akibat banjir. Dalam skala besar, banjir

dapat menghambat pertumbuhan ekonomi daerah dan meningkatkan angka kemiskinan masyarakat terdampak. Oleh karena itu, banjir saat ini dipandang sebagai isu multidimensional yang membutuhkan pendekatan terpadu melalui mitigasi struktural dan nonstruktural (Silver, 2021); (Cutter *et al.*, 2018).

Di era digital, pemahaman tentang karakteristik banjir berkembang seiring kemajuan teknologi informasi dan sistem pemantauan berbasis data. Teknologi seperti Internet of Things (IoT), sensor tinggi muka air, penginderaan jauh, drone, citra satelit, dan sistem informasi geografis (SIG) memungkinkan identifikasi pola banjir secara lebih cepat dan akurat. Integrasi teknologi digital membantu pemerintah dan masyarakat dalam melakukan pemetaan risiko, sistem peringatan dini, simulasi banjir, hingga pengambilan keputusan berbasis data untuk mengurangi dampak bencana. Dengan demikian, pemahaman terhadap pengertian dan karakteristik banjir menjadi fondasi dalam membangun sistem mitigasi banjir yang adaptif, berkelanjutan, dan berbasis teknologi di era digital (Fadhlurrahman, Siswoyo and Asmaranto, 2023); (Yuniartanti, 2018); (Dhuha *et al.*, 2024).

1.2 Jenis-Jenis Banjir

Banjir merupakan bencana hidrometeorologi yang memiliki karakteristik beragam berdasarkan sumber penyebab, lokasi kejadian, proses terjadinya, serta dampak yang ditimbulkan. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan setiap jenis banjir memerlukan pendekatan mitigasi, penanganan, dan pengelolaan risiko yang berbeda. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan dan mitigasi

bencana di era digital, pemahaman mengenai jenis-jenis banjir menjadi sangat penting karena berkaitan langsung dengan strategi pemetaan risiko, sistem peringatan dini, desain infrastruktur, dan pengambilan keputusan berbasis data.

Secara umum, banjir dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu banjir sungai (*fluvial flood*), banjir perkotaan (*urban flood*), banjir bandang (*flash flood*), banjir rob (*coastal flood*), banjir genangan (*pluvial flood*), dan banjir akibat kegagalan infrastruktur. Setiap jenis banjir memiliki karakteristik hidrologi, faktor pemicu, pola penyebaran, serta tingkat ancaman yang berbeda terhadap masyarakat dan lingkungan.

1.2.1 Banjir Sungai (Fluvial Flood)

Banjir sungai merupakan jenis banjir yang terjadi akibat meluapnya debit air sungai melebihi kapasitas tampung alur sungai. Jenis banjir ini umumnya dipicu oleh curah hujan tinggi dalam waktu tertentu sehingga volume air meningkat secara signifikan. Selain faktor hujan, sedimentasi sungai, penyempitan badan sungai, erosi daerah hulu, dan kerusakan daerah aliran sungai (DAS) juga berkontribusi terhadap meningkatnya risiko banjir sungai (Aziza, Somantri and Setiawan, 2021);(Sahid *et al.*, 2022);(Paski *et al.*, 2021).

Dalam perspektif mitigasi modern, pengelolaan banjir sungai tidak hanya dilakukan melalui pembangunan tanggul dan normalisasi sungai, tetapi juga melalui pendekatan berbasis teknologi seperti sistem informasi geografis (SIG), pemodelan hidrologi, sensor tinggi muka air, serta pemanfaatan citra satelit untuk pemantauan debit sungai

secara real-time (Septian, Sabri and Hadi, 2023);(Sahid *et al.*, 2022).

1.2.2 Banjir Perkotaan (*Urban Flood*)

Banjir perkotaan merupakan banjir yang terjadi di kawasan perkotaan akibat ketidakmampuan sistem drainase dalam menampung limpasan air hujan. Jenis banjir ini menjadi semakin umum terjadi seiring meningkatnya urbanisasi dan perubahan tata guna lahan. Permukaan kota yang didominasi beton, aspal, dan bangunan menyebabkan berkurangnya kemampuan tanah dalam menyerap air hujan sehingga limpasan permukaan meningkat secara signifikan (Darmayanti *et al.*, 2023);(Liu, Yin and Mostafavi, 2024).

Karakteristik banjir perkotaan berbeda dengan banjir sungai. Banjir perkotaan dapat terjadi meskipun wilayah tersebut jauh dari sungai karena penyebab utamanya adalah sistem drainase yang tidak memadai. Selain itu, penyumbatan saluran drainase akibat sampah dan sedimentasi menjadi faktor yang memperburuk genangan air di perkotaan. Kota-kota besar seperti Jakarta, Bekasi, Semarang, dan Makassar sering mengalami banjir perkotaan yang menyebabkan lumpuhnya aktivitas ekonomi dan sosial Masyarakat (Septian, Sabri and Hadi, 2023).

Banjir perkotaan juga memiliki hubungan erat dengan perubahan iklim. Intensitas hujan ekstrem yang semakin tinggi menyebabkan kapasitas drainase perkotaan tidak lagi mampu menampung debit air yang masuk. Oleh karena itu, mitigasi banjir perkotaan saat ini diarahkan pada pengembangan konsep kota tangguh bencana melalui pembangunan drainase berkelanjutan, sumur resapan, ruang

terbuka hijau, dan sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT);(Darmawan *et al.*, 2023).

1.2.3 Banjir Bandang (Flash Flood)

Banjir bandang merupakan salah jenis banjir yang terjadi secara tiba-tiba dengan kecepatan aliran air sangat tinggi dan daya rusak tinggi. Banjir ini biasanya dipicu oleh hujan dengan intensitas sangat tinggi di daerah hulu, lereng pegunungan, atau kawasan dengan tingkat kerusakan lingkungan yang tinggi. Berbeda dengan banjir biasa, banjir bandang sering membawa material lumpur, kayu, batu, dan sedimen sehingga menyebabkan kerusakan besar terhadap permukiman dan infrastruktur(Darmawan *et al.*, 2023);(Sahid *et al.*, 2022) .

Karakteristik utama banjir bandang adalah kecepatan aliran yang tinggi dan waktu kejadian yang sangat singkat sehingga masyarakat sering tidak memiliki cukup waktu untuk melakukan evakuasi. Di Indonesia, banjir bandang pernah terjadi di Luwu Utara, Sumatera Barat, dan beberapa wilayah pegunungan lainnya yang menyebabkan korban jiwa serta kerusakan lingkungan yang luas(Septian, Sabri and Hadi, 2023).

Dalam era digital, mitigasi banjir bandang mulai memanfaatkan teknologi penginderaan jauh, drone, metode peringatan dini berbasis sensor data curah hujan, dan model prediksi banjir berbasis kecerdasan buatan untuk mempercepat identifikasi wilayah berisiko tinggi(Septian, Sabri and Hadi, 2023);(Sahid *et al.*, 2022).

1.2.4 Banjir Rob (Coastal Flood)

Banjir rob Adalah banjir yang terjadi akibat kenaikan muka air laut dan diwaktu yang bersamaan terjadi banjir dai Sungai, sehingga air laut masuk ke wilayah daratan pesisir. Jenis banjir ini banyak terjadi di kota-kota pesisir seperti Semarang, Jakarta Utara, Pekalongan, dan beberapa kawasan pantai lainnya. Fenomena kenaikan muka air laut akibat perubahan iklim global menjadi faktor utama meningkatnya risiko banjir Rob dalam beberapa dekade terakhir (Green, I. Haigh, et al., 2024);(Green et al., 2025);(Green, I. D. Haigh, et al., 2024);(Jahani, Ullah and Heravi, 2026).

Selain kenaikan muka air laut, faktor lain yang memperparah banjir rob adalah penurunan muka tanah (land subsidence), eksploitasi air tanah berlebihan, dan pembangunan kawasan pesisir yang tidak memperhatikan daya dukung lingkungan. Oleh karena itu, mitigasi banjir rob memerlukan pendekatan terpadu antara pengendalian tata ruang pesisir, pembangunan tanggul laut, rehabilitasi mangrove, dan sistem pemantauan berbasis data oseanografi digital.

1.2.5 Banjir Genangan (Pluvial Flood)

Banjir genangan atau pluvial flood terjadi ketika air hujan tidak dapat terserap atau dialirkan dengan baik sehingga menggenangi suatu wilayah. Jenis banjir ini biasanya terjadi pada kawasan dengan drainase buruk, topografi rendah, dan tingkat infiltrasi tanah yang kecil. Banjir genangan sering muncul di kawasan perkotaan setelah hujan lebat dengan durasi tertentu (SONG *et al.*, 2024);(Huang *et al.*, 2018);(Liu, Yin and Mostafavi, 2024).

Meskipun sering dianggap sebagai banjir ringan, banjir genangan dapat mengganggu aktivitas masyarakat, transportasi, dan kegiatan ekonomi secara signifikan. Pada wilayah padat penduduk, genangan air juga meningkatkan risiko penyakit berbasis lingkungan akibat tercemarnya sumber air dan buruknya sanitasi.

Mitigasi banjir genangan dilakukan melalui peningkatan kapasitas drainase, pembangunan sumur resapan, pengelolaan sampah, serta penerapan konsep drainase ramah lingkungan berbasis konservasi air.

1.2.6 Banjir Akibat Kegagalan Infrastruktur

Jenis banjir lainnya adalah banjir akibat kegagalan infrastruktur seperti jebolnya bendungan, tanggul, saluran drainase, atau sistem pompa air. Banjir ini biasanya terjadi akibat lemahnya pemeliharaan infrastruktur, tekanan debit air yang tinggi, atau kesalahan perencanaan teknis. Dampak banjir akibat kegagalan infrastruktur dapat sangat besar karena air mengalir secara mendadak ke kawasan permukiman dan fasilitas umum.

Dalam konteks modern, pengawasan infrastruktur pengendali banjir mulai menggunakan teknologi sensor, sistem monitoring digital, dan analisis berbasis big data untuk mendeteksi potensi kerusakan lebih awal sehingga dapat meminimalkan risiko kegagalan sistem.

Secara keseluruhan, jenis-jenis banjir menunjukkan bahwa bencana banjir memiliki karakteristik yang kompleks dan dipengaruhi oleh interaksi antara faktor alam, lingkungan, teknologi, dan aktivitas manusia. Perkembangan teknologi digital memberikan peluang besar dalam meningkatkan efektivitas mitigasi banjir melalui pemantauan

real-time, pemodelan spasial, sistem informasi geografis, dan kecerdasan buatan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap klasifikasi dan karakteristik masing-masing jenis banjir menjadi dasar penting dalam membangun sistem manajemen risiko bencana yang adaptif dan berkelanjutan di era digital.

1.3 Faktor Penyebab Terjadinya Banjir

Banjir merupakan bencana hidrometeorologi yang terjadi akibat interaksi kompleks antara faktor alam dan aktivitas manusia. Dalam beberapa dekade terakhir, frekuensi dan intensitas banjir mengalami peningkatan di berbagai wilayah dunia, termasuk Indonesia. Kondisi ini menunjukkan bahwa banjir bukan hanya semata-mata sebagai fenomena alam, akan tetapi juga sebagai dampak perubahan lingkungan, urbanisasi, perubahan iklim, serta lemahnya pengelolaan wilayah dan sumber daya air. Oleh karena itu, memahami faktor-faktor penyebab banjir menjadi langkah mendasar dalam upaya mitigasi dan manajemen risiko bencana secara berkelanjutan (Cutter *et al.*, 2018).

Secara umum, faktor penyebab banjir dapat dibedakan menjadi dua kelompok utama, yaitu faktor alam dan faktor antropogenik atau faktor akibat aktivitas manusia. Kedua faktor tersebut saling berkaitan dan dalam banyak kasus memperbesar tingkat risiko banjir di suatu wilayah (Agusu *et al.*, 2025); (Arvi *et al.*, 2025).

1.3.1 Curah Hujan Tinggi

Curah hujan yang tinggi merupakan faktor utama penyebab terjadinya banjir akibat tingginya limpasan permukaan dan menurunnya infiltrasi air hujan. Intensitas

hujan relative tinggi dengan tutupan lahan tidak mendukung infiltrasi tanah besar, sedangkan limpasan permukaan lebih tinggi dan daya tampung sungai maupun drainase, air akan mengalir di permukaan dan menyebabkan genangan atau luapan sungai. Di wilayah tropis seperti Indonesia, hujan dengan intensitas tinggi sering terjadi terutama pada musim penghujan akibat pengaruh monsun dan fenomena atmosfer global.

Peristiwa banjir Jakarta tahun 2020 menjadi contoh nyata bagaimana curah hujan ekstrem dapat menyebabkan luapan sungai dan banjir besar di kawasan metropolitan. Curah hujan yang sangat tinggi dalam waktu singkat menyebabkan Sungai Ciliwung dan beberapa sungai lainnya meluap sehingga ribuan rumah terendam banjir (Kiparisov, Lagutov and Pflug, 2023);(Bennett *et al.*, 2023).

1.3.2 Kerusakan Daerah Aliran Sungai (DAS)

Daerah aliran sungai memiliki fungsi penting dalam mengatur tata air dan menjaga keseimbangan hidrologi serta penyimpanan air hujan suatu wilayah. Kerusakan DAS akibat deforestasi, pembukaan lahan, pertambangan, dan alih fungsi hutan menyebabkan berkurangnya kemampuan tanah dalam menyerap air hujan. Akibatnya, limpasan permukaan meningkat dan mempercepat aliran air menuju sungai sehingga meningkatkan risiko banjir(Kitsikoudis *et al.*, 2021)

Penelitian di DAS Air Bengkulu menunjukkan bahwa perubahan penggunaan tutupan lahan dalam kurun waktu sepuluh tahun menyebabkan peningkatan debit sungai dan frekuensi kejadian banjir. Berkurangnya kawasan hutan serta meningkatnya area permukiman, pertanian, dan

pertambangan menjadi faktor dominan dalam meningkatnya risiko banjir di wilayah tersebut (Cutter *et al.*, 2018).

Selain itu, sedimentasi sungai akibat erosi di daerah hulu menyebabkan pendangkalan sungai sehingga kapasitas tampung air menjadi berkurang. Kondisi ini menyebabkan sungai lebih mudah meluap ketika terjadi hujan dengan intensitas tinggi (Dartanto, 2022).

1.3.3 Urbanisasi dan Perubahan Tata Guna Lahan

Urbanisasi yang tidak terkendali menjadi salah satu penyebab utama meningkatnya kejadian banjir di kawasan perkotaan. Pembangunan permukiman, pusat bisnis, jalan raya beton dan aspal, dan kawasan industri yang tertutup dengan beton pelatarannya, menyebabkan permukaan tanah berubah menjadi kedap air. Akibatnya, air hujan tidak dapat meresap ke dalam tanah dan langsung menjadi limpasan permukaan.

Perubahan tata guna lahan berdampak terhadap tinggi limpasan permukaan dan mengurangi ruang terbuka hijau. Di banyak kota besar Indonesia, pembangunan infrastruktur tidak diimbangi dengan pengembangan sistem drainase yang memadai. Kondisi ini menyebabkan kapasitas saluran drainase tidak mampu menampung debit air saat hujan deras terjadi (Arvi *et al.*, 2025).

Jakarta merupakan contoh kota yang mengalami tekanan urbanisasi sangat tinggi. Pertumbuhan penduduk yang cepat, pembangunan di kawasan sempadan sungai, dan buruknya tata ruang menyebabkan banjir menjadi permasalahan rutin setiap tahun (Bennett *et al.*, 2023).

1.3.4 Sistem Drainase yang Tidak Memadai

Sistem drainase memiliki peranan penting dalam mengalirkan air hujan dari kawasan permukiman menuju sungai atau saluran utama. Namun, banyak kawasan perkotaan memiliki sistem drainase yang tidak sesuai dengan peningkatan debit limpasan akibat urbanisasi dan perubahan iklim. Saluran drainase yang sempit, dangkal, tersumbat sampah, atau tidak terpelihara menyebabkan air meluap ke jalan dan permukiman(Darmawan et al., 2023).

Selain itu, banyak sistem drainase di kota-kota lama dirancang berdasarkan kondisi curah hujan masa lalu sehingga tidak lagi mampu menampung intensitas hujan saat ini yang semakin ekstrem. Oleh karena itu, pengembangan sistem drainase berkelanjutan menjadi kebutuhan mendesak dalam mitigasi banjir perkotaan(Bennett et al., 2023).

1.3.5 Penurunan Muka Tanah dan Banjir Rob

Penurunan muka tanah (*land subsidence*) menjadi faktor utama penyebab banjir di kawasan pesisir dan perkotaan. Fenomena ini umumnya terjadi akibat pengambilan air tanah berlebihan, beban bangunan yang tinggi, dan kondisi geologi tertentu. Penurunan muka tanah menyebabkan wilayah menjadi lebih rendah dibandingkan muka air laut atau permukaan sungai sehingga lebih rentan terhadap banjir(Kurniawan *et al.*, 2024);(Jelibseda *et al.*, 2025);(Ardaputra, 2025).

Di wilayah Jabodetabek, penurunan muka tanah bahkan disebut sebagai faktor terbesar yang meningkatkan risiko banjir dibandingkan kenaikan muka air laut. Kondisi ini diperparah oleh fenomena banjir rob akibat pasang laut dan perubahan iklim global(Jelibseda *et al.*, 2025);(Hidayati, 2025).

Banjir rob menjadi semakin sering terjadi di kota-kota pesisir seperti Semarang dan Jakarta Utara. Naiknya muka air laut akibat pemanasan global menyebabkan air laut lebih mudah masuk ke daratan terutama pada wilayah yang mengalami penurunan tanah(Ardaputra, 2025)(ROMADONA, 2025).

1.3.6 Sampah dan Perilaku Masyarakat

Penomena masyarakat yang membuang sampah sembarangan, ke sungai dan tertutupnya saluran drainase juga menjadi penyebab penting terjadinya banjir. Sampah menyebabkan penyumbatan aliran air sehingga kapasitas drainase menurun dan air mudah meluap saat hujan deras. Permasalahan ini sering ditemukan di kawasan padat penduduk dengan sistem pengelolaan sampah yang belum optimal(Wolff *et al.*, 2021).

Selain sampah, rendahnya kesadaran masyarakat terhadap pentingnya menjaga lingkungan turut memperbesar risiko banjir. Banyak masyarakat masih membangun permukiman di daerah rawan banjir, menutup saluran air, atau melakukan aktivitas yang merusak daerah resapan. Oleh karena itu, mitigasi banjir tidak hanya membutuhkan pendekatan teknis, dan juga pendekatan non Teknik dengan mengedukasi dan partisipasi semua elemen-elemen masyarakat secara berkelanjutan(Desportes, Hordijk and Waddell, 2016);(Tran et al., 2024);(Corburn et al., 2022).

1.3.7 Perubahan Iklim Global

Perubahan iklim merupakan faktor global yang saat ini berkontribusi besar terhadap meningkatnya kejadian banjir. Dampak Peningkatan suhu bumi menyebabkan perubahan

pola hujan, peningkatan intensitas badai, dan kenaikan muka air laut. Kondisi ini menyebabkan banjir terjadi lebih sering dan dengan dampak yang lebih besar dibandingkan beberapa dekade sebelumnya (Corburn et al., 2022); (Desportes, Hordijk and Waddell, 2016).

Fenomena El Niño dan La Niña juga memengaruhi pola curah hujan di Indonesia. Pada beberapa wilayah, perubahan pola iklim menyebabkan hujan ekstrem berkepanjangan yang meningkatkan risiko banjir besar. Dalam konteks ini, perubahan iklim menjadi tantangan utama dalam pengelolaan risiko bencana di era modern.

Dengan demikian, faktor penyebab banjir sesungguhnya merupakan kombinasi antara faktor alam dan aktivitas manusia yang saling memengaruhi. Curah hujan tinggi, kerusakan DAS, urbanisasi, buruknya sistem drainase, perubahan iklim, penurunan muka tanah, dan perilaku masyarakat menjadi penyebab utama meningkatnya risiko banjir di berbagai wilayah. Pemahaman terhadap faktor-faktor tersebut sangat penting sebagai dasar dalam merancang strategi mitigasi banjir yang adaptif, berkelanjutan, dan berbasis teknologi di era digital.

1.4 Konsep Risiko Bencana Banjir

Secara umum, risiko bencana banjir diartikan sebagai potensi kerugian yang ditimbulkan akibat interaksi antara ancaman banjir (hazard), tingkat kerentanan masyarakat (vulnerability), tingkat paparan (exposure), dan kapasitas dalam menghadapi bencana (capacity). Risiko akan meningkat apabila suatu wilayah memiliki ancaman banjir tinggi, masyarakat yang rentan, serta kemampuan mitigasi dan adaptasi yang rendah. Sebaliknya, risiko dapat dikurangi

melalui peningkatan kapasitas masyarakat, penguatan sistem peringatan dini, pengelolaan tata ruang yang baik, dan pemanfaatan teknologi mitigasi berbasis data (Azizah *et al.*, 2021);(Siregar and Wibowo, 2019).

Konsep risiko bencana berkembang dari pendekatan konvensional yang sebelumnya lebih menitikberatkan pada respons pascabencana menjadi pendekatan pengurangan risiko bencana (disaster risk reduction). Pendekatan ini menekankan pentingnya identifikasi ancaman, pengurangan kerentanan, serta peningkatan kapasitas masyarakat sebelum bencana terjadi. Dengan demikian, penanggulangan banjir tidak lagi hanya berfokus pada penanganan darurat, tetapi juga pada upaya pencegahan dan mitigasi yang terintegrasi dengan pembangunan wilayah berkelanjutan.

Dalam kajian risiko bencana banjir, ancaman (hazard) merupakan komponen utama yang menggambarkan potensi terjadinya banjir pada suatu wilayah. Ancaman banjir dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti curah hujan ekstrem, luapan sungai, topografi rendah, sedimentasi sungai, banjir rob, hingga perubahan iklim global. Tingkat ancaman biasanya diukur berdasarkan kedalaman genangan, luas wilayah terdampak, kecepatan aliran air, serta frekuensi kejadian banjir. Semakin tinggi intensitas ancaman, maka semakin besar potensi kerusakan yang dapat ditimbulkan(Hendrayana et al., 2024).

Namun, ancaman banjir tidak secara otomatis menjadi bencana apabila tidak terdapat unsur kerentanan. Kerentanan (vulnerability) merupakan kondisi yang menyebabkan masyarakat, infrastruktur, dan lingkungan mudah terdampak oleh banjir. Kerentanan dapat bersifat fisik, sosial, ekonomi, maupun lingkungan. Kerentanan fisik misalnya ditunjukkan

oleh buruknya kualitas bangunan, sistem drainase yang tidak memadai, dan permukiman yang berada di bantaran sungai. Kerentanan sosial berkaitan dengan kepadatan penduduk, tingkat pendidikan, usia rentan, dan rendahnya kesadaran masyarakat terhadap mitigasi bencana. Sementara itu, kerentanan ekonomi berkaitan dengan kemiskinan dan keterbatasan sumber daya untuk melakukan adaptasi dan pemulihan pascabencana(Siregar and Wibowo, 2019).

Selain ancaman dan kerentanan, konsep risiko bencana banjir juga dipengaruhi oleh tingkat paparan (exposure). Paparan mengacu pada keberadaan manusia, aset, infrastruktur, fasilitas umum, dan aktivitas ekonomi di wilayah rawan banjir. Wilayah dengan tingkat kepadatan penduduk tinggi dan konsentrasi infrastruktur penting akan memiliki tingkat risiko lebih besar ketika banjir terjadi. Dalam konteks perkotaan, paparan meningkat seiring pertumbuhan kota dan urbanisasi yang tidak terkendali. Banyak kawasan permukiman dibangun di dataran banjir dan sempadan sungai sehingga meningkatkan jumlah penduduk dan aset yang terdampak ketika banjir terjadi(Tabasi, Fereshtehpour and Roghani, 2025);(Panigrahi and Sharma, 2024);(Tabasi, Fereshtehpour and Roghani, 2024).

Komponen penting lainnya adalah kapasitas (capacity), yaitu kemampuan individu, masyarakat, pemerintah, dan lembaga dalam mengantisipasi, merespons, dan memulihkan diri dari dampak banjir. Kapasitas meliputi sistem peringatan dini, kesiapsiagaan masyarakat, kualitas infrastruktur pengendali banjir, ketersediaan informasi risiko, hingga kemampuan pemerintah dalam mengelola tata ruang dan kebijakan mitigasi bencana. Tingkat kapasitas yang

tinggi dapat mengurangi risiko meskipun suatu wilayah memiliki ancaman banjir yang besar.

Dalam perkembangan ilmu kebencanaan modern, risiko bencana banjir juga dengan melalui pendekatan sistemik dan multidimensional. Risiko tidak hanya dipengaruhi oleh faktor fisik lingkungan, tetapi juga oleh faktor sosial, politik, ekonomi, dan kelembagaan. Kajian terbaru menunjukkan bahwa perubahan iklim, urbanisasi cepat, degradasi lingkungan, dan ketimpangan sosial menjadi faktor yang memperbesar risiko banjir di berbagai negara berkembang.

Perubahan iklim global telah meningkatkan frekuensi dan intensitas kejadian hujan ekstrem di banyak wilayah dunia. Kondisi ini menyebabkan banjir menjadi lebih sulit diprediksi dan memiliki dampak yang semakin besar terhadap masyarakat perkotaan maupun pedesaan. Selain itu, kenaikan muka air laut dan penurunan muka tanah juga meningkatkan risiko banjir rob di kawasan pesisir. Dengan demikian, konsep risiko bencana banjir saat ini tidak dapat dipisahkan dari isu perubahan iklim dan pembangunan berkelanjutan (Foden et al., 2019); (Thornton et al., 2014).

Di era digital, pengelolaan risiko bencana banjir mengalami perkembangan signifikan melalui pemanfaatan teknologi informasi dan data spasial. Sistem informasi geografis (SIG), citra satelit, Internet of Things (IoT), sensor tinggi muka air, drone, dan kecerdasan buatan digunakan untuk memetakan wilayah rawan banjir, memantau kondisi hidrologi secara real-time, dan mendukung sistem peringatan dini. Teknologi digital memungkinkan analisis risiko dilakukan secara lebih cepat, akurat, dan terintegrasi sehingga membantu pengambilan keputusan dalam mitigasi bencana.

Peta risiko bencana banjir menjadi salah satu instrumen penting dalam pengelolaan risiko modern. Peta ini memuat informasi mengenai tingkat ancaman, kerentanan, kapasitas, dan potensi kerugian pada suatu wilayah. Di Indonesia, pemetaan risiko banjir telah dikembangkan melalui platform InaRISK yang dikelola oleh BNPB untuk mendukung perencanaan pembangunan dan mitigasi bencana berbasis risiko (Fadhlurrahman, Siswoyo and Asmaranto, 2023).

Dengan demikian, konsep risiko bencana banjir pada dasarnya merupakan hasil interaksi antara ancaman, kerentanan, paparan, dan kapasitas masyarakat dalam menghadapi banjir. Risiko tidak hanya ditentukan oleh besarnya banjir, tetapi juga oleh kondisi sosial, ekonomi, lingkungan, dan kemampuan adaptasi suatu wilayah. Oleh karena itu, pengurangan risiko banjir memerlukan pendekatan terpadu yang melibatkan teknologi, kebijakan tata ruang, pengelolaan lingkungan, serta partisipasi aktif masyarakat. Pemahaman yang baik mengenai konsep risiko bencana banjir menjadi fondasi utama dalam membangun sistem mitigasi banjir yang tangguh, adaptif, dan berkelanjutan di era digital (Darmayanti et al., 2023).

1.5 Komponen Risiko: Ancaman, Kerentanan, Paparan, dan Kapasitas

Risiko bencana banjir merupakan hasil interaksi berbagai komponen yang saling berkaitan, yaitu ancaman (hazard), kerentanan (vulnerability), paparan (exposure), dan kapasitas (capacity). Keempat komponen tersebut menjadi

dasar utama dalam kajian pengurangan risiko bencana modern karena menentukan tingkat dampak yang ditimbulkan ketika banjir terjadi. Dalam konteks mitigasi bencana di era digital, pemahaman terhadap setiap komponen risiko menjadi sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data, pemetaan risiko, serta pengembangan sistem mitigasi yang lebih adaptif dan berkelanjutan (Foden *et al.*, 2019).

Secara konseptual, risiko bencana tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya ancaman alam, tetapi juga oleh kondisi sosial, ekonomi, lingkungan, dan kemampuan masyarakat dalam menghadapi bencana. Oleh karena itu, banjir dengan intensitas yang sama dapat menimbulkan dampak berbeda pada wilayah yang memiliki tingkat kerentanan, paparan, dan kapasitas yang berbeda pula. Kajian risiko menempatkan masyarakat bukan hanya sebagai objek terdampak, akan tetapi sebagai bagian utama dalam membangun ketangguhan terhadap bencana banjir (Mukhtar and Pradoto, 2021); (Hidayah and Nugroho, 2024).

1.5.1 Ancaman (*Hazard*)

Ancaman merupakan potensi terjadinya suatu bencana yang dapat menimbulkan kerusakan, kerugian, korban jiwa, dan gangguan terhadap kehidupan masyarakat. Dalam konteks banjir, ancaman berkaitan dengan kemungkinan terjadinya genangan air akibat curah hujan ekstrem, luapan sungai, banjir rob, maupun kegagalan sistem drainase. Tingkat ancaman biasanya diukur berdasarkan intensitas, frekuensi, durasi, kedalaman genangan, luas wilayah terdampak, dan kecepatan aliran air (Simatupang, Sucahyanto and Hijrawadi, 2026); (Deasy Ernawati, 2024); (Setiawan *et al.*, 2026).

Ancaman banjir dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kondisi hidrologi, topografi, penggunaan lahan, dan perubahan iklim. Curah hujan tinggi dalam waktu singkat dapat meningkatkan debit sungai secara drastis sehingga menyebabkan luapan air ke kawasan permukiman. Selain itu, sedimentasi sungai dan kerusakan daerah aliran sungai juga memperbesar ancaman banjir di wilayah hilir (Setiawan et al., 2026).

Di era digital, identifikasi ancaman banjir dilakukan menggunakan teknologi milsanya sistem informasi geografis (SIG), penginderaan jauh, citra satelit, drone, dan sensor hidrologi berbasis Internet of Things (IoT). Teknologi ini memungkinkan pemantauan kondisi sungai dan curah hujan secara real-time sehingga ancaman banjir dapat diprediksi lebih cepat dan akurat.

1.5.2 Kerentanan (*Vulnerability*)

Kerentanan merupakan kondisi yang menyebabkan masyarakat, lingkungan, dan infrastruktur mudah mengalami kerusakan atau kerugian ketika terjadi banjir. Kerentanan menunjukkan tingkat kelemahan suatu wilayah dalam menghadapi ancaman bencana. Semakin tinggi kerentanan suatu masyarakat, maka semakin besar pula dampak yang ditimbulkan ketika banjir terjadi (Taki and Wartaman, 2022); (Hadiani and Rahmat, 2025).

Kerentanan fisik berkaitan dengan kualitas bangunan, kondisi infrastruktur, serta ketersediaan fasilitas umum dan fasilitas kritis. Permukiman padat dengan bangunan tidak permanen lebih rentan mengalami kerusakan akibat banjir dibandingkan kawasan dengan infrastruktur yang baik. Kerentanan ekonomi berkaitan dengan kemampuan

masyarakat dalam menghadapi dan memulihkan diri dari dampak banjir. Masyarakat berpenghasilan rendah umumnya memiliki keterbatasan sumber daya untuk melakukan adaptasi maupun pemulihan pascabencana (Dewi, Handayani and Mukherjee, 2025).

Sementara itu, kerentanan lingkungan berkaitan dengan kondisi ekosistem dan kualitas lingkungan wilayah. Kerusakan hutan, degradasi daerah aliran sungai, serta berkurangnya ruang terbuka hijau meningkatkan kerentanan wilayah terhadap banjir. Oleh karena itu, pengurangan kerentanan tidak hanya dilakukan melalui pembangunan fisik, tetapi juga melalui penguatan sosial, ekonomi, dan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

1.5.3 Kapasitas (*Capacity*)

Kapasitas merupakan kemampuan masyarakat, pemerintah, dan lembaga dalam mengantisipasi, menghadapi, merespons, dan memulihkan diri dari dampak banjir. Kapasitas menjadi komponen penting dalam pengurangan risiko karena dapat memperkecil dampak bencana meskipun ancaman dan paparan suatu wilayah cukup tinggi (Agusu *et al.*, 2025).

Kapasitas mencakup berbagai aspek seperti sistem peringatan dini, kesiapsiagaan masyarakat, kualitas infrastruktur pengendali banjir, kemampuan kelembagaan, akses informasi, pendidikan kebencanaan, dan koordinasi antarinstansi (ROMADONA, 2025). Masyarakat yang memiliki tingkat pengetahuan dan kesiapsiagaan tinggi cenderung lebih mampu melakukan evakuasi dan pengurangan risiko secara mandiri ketika banjir terjadi.

Dalam konteks modern, kapasitas juga dipengaruhi oleh pemanfaatan teknologi digital. Sistem peringatan dini berbasis sensor, aplikasi pemantauan banjir, kecerdasan buatan, dan sistem komunikasi darurat menjadi bagian penting dalam meningkatkan kapasitas masyarakat menghadapi bencana. Teknologi memungkinkan penyebaran informasi secara cepat sehingga masyarakat dapat mengambil tindakan lebih awal sebelum banjir mencapai wilayah permukiman.

Dengan demikian, ancaman, kerentanan, paparan, dan kapasitas merupakan empat komponen utama yang saling berinteraksi dalam membentuk risiko bencana banjir. Ancaman menunjukkan potensi kejadian banjir, kerentanan menggambarkan tingkat kelemahan masyarakat, paparan menunjukkan jumlah elemen yang terdampak, sedangkan kapasitas menunjukkan kemampuan dalam mengurangi risiko dan dampak bencana. Pemahaman yang komprehensif terhadap keempat komponen tersebut menjadi dasar penting dalam membangun sistem mitigasi banjir yang tangguh, adaptif, dan berbasis teknologi di era digital (Cutter et al., 2018).

1.6 Dampak Banjir terhadap Kehidupan dan Pembangunan

Dampak banjir merupakan salah satu bencana hidrometeorologi yang memberikan dampak sangat luas terhadap kehidupan masyarakat dan pembangunan wilayah. Dampak banjir tidak hanya dirasakan dalam bentuk kerusakan fisik, tetapi juga memengaruhi aspek sosial,

ekonomi, kesehatan, lingkungan, pendidikan, hingga stabilitas pembangunan jangka panjang. Dalam konteks pembangunan modern, banjir dipandang sebagai ancaman multidimensional yang dapat menghambat pencapaian pembangunan berkelanjutan apabila tidak dikelola secara sistematis dan berbasis mitigasi risiko (Dewi, Handayani and Mukherjee, 2025);.

Dampak banjir dapat dibedakan menjadi dampak langsung dan tidak langsung. Dampak langsung meliputi korban jiwa, kerusakan rumah, infrastruktur, fasilitas umum, dan lahan pertanian. Sementara itu, dampak tidak langsung mencakup terganggunya aktivitas ekonomi, menurunnya kualitas kesehatan masyarakat, kerusakan lingkungan, meningkatnya kemiskinan, serta gangguan terhadap proses pembangunan wilayah. Semakin besar intensitas dan frekuensi banjir, maka semakin besar pula kerugian yang ditimbulkan terhadap masyarakat dan negara (Witanto *et al.*, 2025).

1.6.1 Dampak terhadap Kehidupan Sosial Masyarakat

Banjir memberikan dampak signifikan terhadap kehidupan sosial masyarakat. Ketika banjir terjadi, masyarakat sering kali harus mengungsi karena rumah dan lingkungan tempat tinggal tidak lagi aman untuk dihuni. Kondisi pengungsian menyebabkan terganggunya aktivitas sosial, pendidikan, dan interaksi masyarakat sehari-hari. Selain itu, banjir juga dapat menyebabkan hilangnya dokumen penting, peralatan rumah tangga, serta terganggunya jaringan sosial masyarakat terdampak (Fadhlurrahman, Siswoyo and Asmaranto, 2023);.

Dalam banyak kasus, banjir menyebabkan munculnya kelompok (Huang et al., 2018) rentan baru, seperti anak-anak terlantar, lansia yang kesulitan melakukan evakuasi, dan masyarakat miskin yang kehilangan sumber penghidupan. Penelitian mengenai banjir bandang di Aceh menunjukkan bahwa banjir tidak hanya menimbulkan kerusakan fisik, tetapi juga memunculkan persoalan kesejahteraan sosial yang kompleks, termasuk terganggunya fungsi keluarga, terbatasnya akses layanan dasar, dan meningkatnya ketergantungan masyarakat terhadap bantuan sosial (Fadhlurrahman, Siswoyo and Asmaranto, 2023).

Banjir juga menimbulkan dampak psikologis yang cukup serius. Masyarakat yang mengalami banjir berulang sering mengalami trauma, kecemasan, dan ketidakpastian terhadap masa depan. Kondisi ini dapat menurunkan kualitas hidup dan produktivitas masyarakat, terutama apabila proses pemulihan berlangsung lama dan dukungan sosial terbatas.

1.6.2 Dampak terhadap Infrastruktur dan Fasilitas Publik

Salah satu dampak terbesar banjir adalah kerusakan infrastruktur dan fasilitas publik. Genangan air dengan intensitas tinggi dapat merusak jalan, jembatan, sistem drainase, jaringan listrik, fasilitas pendidikan, rumah sakit, serta sistem transportasi. Kerusakan infrastruktur menyebabkan terganggunya mobilitas masyarakat dan distribusi barang maupun jasa sehingga aktivitas ekonomi menjadi terhambat (Azizah *et al.*, 2021).

Di kawasan perkotaan, kerusakan infrastruktur akibat banjir sering menyebabkan lumpuhnya aktivitas kota. Sistem transportasi tidak dapat berfungsi optimal, jaringan listrik terputus, dan fasilitas umum tidak dapat digunakan. Kejadian

banjir besar di beberapa kota Indonesia menunjukkan bahwa infrastruktur yang tidak dirancang berbasis mitigasi risiko akan sangat rentan mengalami kerusakan ketika terjadi hujan ekstrem (Cutter *et al.*, 2018).

1.6.3 Dampak terhadap Perekonomian

Banjir juga memberikan dampak besar terhadap sektor ekonomi masyarakat dan pemerintah. Kerugian ekonomi dapat berupa rusaknya rumah, lahan pertanian, tempat usaha, fasilitas industri, hingga terganggunya aktivitas perdagangan dan distribusi logistik. Pada sektor pertanian, banjir menyebabkan gagal panen, kerusakan lahan, dan hilangnya sumber pendapatan petani. Sementara itu, pada sektor perkotaan, banjir dapat menghentikan aktivitas perdagangan dan industri dalam waktu tertentu (Miller and Hutchins, 2017).

Kerugian ekonomi akibat banjir tidak hanya dirasakan secara langsung oleh masyarakat terdampak, tetapi juga oleh pemerintah melalui meningkatnya biaya rehabilitasi dan rekonstruksi infrastruktur. Pemerintah harus mengalokasikan anggaran besar untuk memperbaiki jalan, jembatan, tanggul, sistem drainase, dan fasilitas publik lainnya yang rusak akibat banjir. Kondisi ini menyebabkan anggaran pembangunan yang seharusnya digunakan untuk pengembangan wilayah harus dialihkan untuk penanganan bencana (ROMADONA, 2025).

Selain itu, banjir dapat menurunkan produktivitas masyarakat karena aktivitas ekonomi terganggu selama masa tanggap darurat dan pemulihan. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat memperbesar angka kemiskinan dan ketimpangan sosial, terutama pada masyarakat

berpenghasilan rendah yang memiliki kapasitas adaptasi terbatas.

1.6.5 Dampak terhadap Kesehatan dan Sanitasi

Banjir berpengaruh langsung terhadap kualitas kesehatan masyarakat. Genangan air yang tercemar dapat menjadi sumber penyebaran berbagai penyakit antarlain diare, leptospirosis, infeksi kulit, dan penyakit saluran pernapasan. Buruknya sanitasi dan keterbatasan akses air bersih selama banjir memperbesar risiko terjadinya wabah penyakit di wilayah terdampak(Witanto *et al.*, 2025).

Kerusakan sistem sanitasi akibat banjir juga menjadi persoalan serius, terutama di kawasan padat penduduk. Banyak sistem pembuangan limbah dan drainase tidak mampu berfungsi dengan baik ketika banjir terjadi sehingga limbah domestik bercampur dengan genangan air. Kondisi ini meningkatkan risiko pencemaran lingkungan dan gangguan kesehatan masyarakat.

Selain dampak fisik, kesehatan mental masyarakat juga terdampak akibat kehilangan tempat tinggal, ketidakpastian ekonomi, dan pengalaman traumatis selama bencana. Oleh karena itu, penanganan banjir tidak hanya membutuhkan bantuan logistik dan medis, tetapi juga dukungan psikososial bagi masyarakat terdampak.

1.6.6 Dampak terhadap Lingkungan dan Pembangunan Berkelanjutan

Dampak banjir menyebabkan kerusakan lingkungan yang cukup besar, seperti erosi tanah, sedimentasi sungai, pencemaran air, dan kerusakan ekosistem. Di daerah aliran sungai, banjir dapat mempercepat proses degradasi lahan dan

menurunkan kualitas lingkungan hidup. Perubahan tutupan lahan akibat urbanisasi dan eksploitasi hutan juga memperbesar risiko banjir di masa mendatang(Djoharam *et al.*, 2022).

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, banjir menjadi tantangan serius karena dapat menghambat pencapaian tujuan pembangunan, terutama yang berkaitan dengan pengurangan kemiskinan, ketahanan kota, kesehatan masyarakat, dan perlindungan lingkungan. Banjir yang terjadi secara berulang menunjukkan adanya ketidakseimbangan antara pembangunan fisik dan daya dukung lingkungan(Djoharam *et al.*, 2022).

Oleh karena itu, pembangunan modern perlu mengintegrasikan prinsip mitigasi risiko bencana melalui tata ruang berbasis lingkungan, penguatan infrastruktur hijau, konservasi daerah resapan, serta pemanfaatan teknologi digital dalam sistem peringatan dini dan pemetaan risiko banjir.

Di era digital, dampak banjir dapat diminimalkan melalui pemanfaatan teknologi seperti sistem informasi geografis (SIG), sensor tinggi muka air, citra satelit, Internet of Things (IoT), dan kecerdasan buatan untuk mendukung mitigasi dan pengambilan keputusan berbasis data. Teknologi memungkinkan pemerintah dan masyarakat melakukan identifikasi wilayah rawan banjir secara lebih cepat dan akurat sehingga upaya pengurangan risiko dapat dilakukan secara lebih efektif.

Dengan demikian, banjir tidak hanya menjadi persoalan lingkungan, tetapi juga persoalan sosial, ekonomi, kesehatan, dan pembangunan wilayah. Dampaknya yang multidimensional menunjukkan pentingnya pendekatan

terpadu dalam mitigasi banjir melalui penguatan kapasitas masyarakat, pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan, pembangunan infrastruktur adaptif, serta integrasi teknologi digital dalam manajemen risiko bencana.

1.7 Urgensi Mitigasi Banjir di Era Digital

Banjir merupakan salah satu bencana hidrometeorologi yang frekuensi dan dampaknya terus meningkat di berbagai negara, termasuk Indonesia. Perubahan iklim global, urbanisasi yang tidak terkendali, kerusakan lingkungan, serta pertumbuhan kawasan perkotaan menyebabkan risiko banjir semakin kompleks dan sulit dikendalikan. Dalam kondisi tersebut, pendekatan mitigasi konvensional yang hanya mengandalkan pembangunan fisik seperti tanggul dan drainase tidak lagi cukup untuk menghadapi tantangan bencana modern. Oleh karena itu, mitigasi banjir di era digital menjadi kebutuhan mendesak untuk mendukung sistem pengurangan risiko bencana yang lebih cepat, adaptif, akurat, dan berkelanjutan (Tarigan, 2024); (Alamsyah and Wahyudi, 2024).

Mitigasi banjir di era digital mengacu pada pemanfaatan teknologi informasi, sistem sensor, kecerdasan buatan, Internet of Things (IoT), big data, penginderaan jauh, dan sistem informasi geografis (SIG) dalam mendukung identifikasi risiko, pemantauan kondisi hidrologi, sistem peringatan dini, serta pengambilan keputusan kebencanaan. Transformasi digital dalam manajemen banjir memungkinkan data diperoleh secara real-time sehingga pemerintah dan

masyarakat dapat merespons ancaman banjir secara lebih cepat dan tepat(Alamsyah and Wahyudi, 2024).

Salah satu alasan utama urgensi mitigasi banjir di era digital adalah meningkatnya ketidakpastian akibat perubahan iklim. Pola hujan saat ini menjadi lebih sulit diprediksi dibandingkan sebelumnya. Intensitas hujan ekstrem meningkat dalam durasi singkat sehingga menyebabkan banjir datang secara tiba-tiba dan berdampak luas terhadap kawasan permukiman maupun infrastruktur. Dalam kondisi seperti ini, sistem mitigasi berbasis teknologi menjadi sangat penting untuk mendukung pemantauan cuaca dan kondisi sungai secara terus-menerus.

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memberikan peluang besar dalam meningkatkan efektivitas mitigasi banjir. Teknologi IoT memungkinkan berbagai sensor seperti sensor ketinggian air, sensor curah hujan, sensor kelembapan, dan sensor debit sungai terhubung melalui jaringan internet sehingga data dapat dikirim dan dipantau secara real-time. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem monitoring banjir berbasis IoT mampu memberikan informasi kondisi air secara cepat melalui aplikasi smartphone sehingga meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat terhadap ancaman banjir(Pradirta, Piarsa and Dharmaadi, 2022);(Ulum and Badri, 2023).

Selain itu, sistem peringatan dini (Early Warning System/EWS) berbasis digital menjadi salah satu komponen utama mitigasi banjir modern. Sistem ini memungkinkan masyarakat menerima notifikasi lebih awal mengenai potensi banjir melalui aplikasi mobile, sirene otomatis, pesan singkat, maupun media sosial. Dengan adanya peringatan dini, masyarakat memiliki waktu untuk melakukan evakuasi dan

penyelamatan aset sehingga dampak banjir dapat dikurangi secara signifikan.

Penelitian mengenai integrasi smart drainage dan sistem peringatan banjir berbasis IoT menunjukkan bahwa teknologi digital mampu meningkatkan sensitivitas terhadap banjir mendadak dan memberikan waktu evakuasi tambahan sekitar 10–15 menit. Meskipun terlihat singkat, tambahan waktu tersebut sangat penting dalam mengurangi risiko korban jiwa dan kerusakan aset masyarakat (Pradirta, Piarsa and Dharmaadi, 2022); (Ulum and Badri, 2023).

Urgensi mitigasi banjir berbasis digital juga berkaitan dengan kebutuhan pengambilan keputusan yang cepat dan berbasis data. Dalam situasi bencana, keterlambatan informasi dapat menyebabkan meningkatnya jumlah korban dan kerugian ekonomi. Oleh karena itu, pemanfaatan big data, cloud computing, dan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) menjadi sangat penting dalam mendukung analisis risiko dan prediksi banjir. Teknologi ini memungkinkan pengolahan data hidrologi, curah hujan, dan kondisi lingkungan dalam jumlah besar untuk menghasilkan model prediksi banjir yang lebih akurat.

Sistem informasi geografis (SIG) dan penginderaan jauh juga memiliki peranan strategis dalam mitigasi banjir di era digital. Teknologi ini memungkinkan pemetaan wilayah rawan banjir secara spasial dan detail sehingga membantu pemerintah dalam perencanaan tata ruang berbasis risiko bencana. Dengan dukungan citra satelit dan drone, wilayah terdampak banjir dapat dipantau secara cepat tanpa harus melakukan survei manual yang membutuhkan waktu lama (Alamsyah and Wahyudi, 2024).

Meskipun demikian, penerapan mitigasi banjir berbasis digital dihadapkan dengan berbagai tantangan. Beberapa di antaranya adalah keterbatasan infrastruktur teknologi, keamanan data, rendahnya literasi digital masyarakat, serta kurangnya integrasi antarinstansi dalam pengelolaan data kebencanaan. Selain itu, biaya pengembangan dan pemeliharaan sistem digital juga menjadi tantangan bagi daerah dengan kapasitas fiskal terbatas.

Pembangunan berkelanjutan, mitigasi banjir di era digital harus sejalan dengan tujuan Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya pada aspek pembangunan kota berkelanjutan, ketahanan terhadap perubahan iklim, dan pengurangan risiko bencana. Integrasi teknologi digital dalam mitigasi banjir tidak hanya bertujuan mengurangi dampak bencana, tetapi juga mendukung terciptanya kota cerdas (smart city) yang lebih aman, tangguh, dan adaptif terhadap perubahan lingkungan (Al-Ikhsan and Sulaiman, 2026).

Dengan demikian, urgensi mitigasi banjir di era digital terletak pada kebutuhan menghadapi kompleksitas bencana modern yang semakin tinggi akibat perubahan iklim, urbanisasi, dan degradasi lingkungan. Pemanfaatan teknologi seperti IoT, SIG, big data, sensor real-time, dan sistem peringatan dini memberikan peluang besar dalam meningkatkan efektivitas pengurangan risiko banjir. Oleh karena itu, integrasi teknologi digital dengan manajemen risiko bencana menjadi langkah strategis dalam membangun sistem mitigasi banjir yang responsif, akurat, dan berkelanjutan di masa depan (Al-Ikhsan and Sulaiman, 2026); (Soleh, Supriyono and Putri, 2025).

DAFTAR PUSTAKA

- Agusu, L. *et al.* (2025) 'Analisis Faktor Penyebab Bencana Banjir di Kota-Kota Besar Indonesia: Studi Kasus Analisis Banjir Berbasis Literasi: Analysis of the Causing Factors of Flood Disasters in Major Cities in Indonesia: A Case Study of Literacy-Based Flood Analysis', *Einstein's: Research Journal of Applied Physics*, 3(2), pp. 77–80.
- Al-Ikhsan, A.-I. and Sulaiman, O. K. (2026) 'Implementasi Internet of Things (IoT) untuk Sistem Monitoring Ketinggian Air pada Bendungan Aliran Sungai Krueng Lingka', *Blend Sains Jurnal Teknik*, 4(3), pp. 585–591.
- Alamsyah, A. and Wahyudi, E. (2024) 'Transformasi Digital untuk Mitigasi Banjir: Optimalisasi Sistem Informasi di Jawa Barat', *Jurnal Perlindungan Masyarakat: Bestuur Praesidium*, 1(2), pp. 50–62.
- Ardaputra, D. S. (2025) 'Analisis Kebijakan Infrastruktur Pengendalian Banjir di Jakarta: Evaluasi Ketahanan dan Tantangan Pembangunan Giant Sea Wall.', *Journal of Syntax Literate*, 10(12).
- Arvi, M. D. *et al.* (2025) 'Analisis faktor penyebab bencana banjir di kota-kota besar Indonesia: Studi kasus analisis banjir berbasis literasi', *Indonesian Journal of Emerging Trends in Community Empowerment*, 3(1), pp. 1–8.
- Aziza, S. N., Somantri, L. and Setiawan, I. (2021) 'Analisis pemetaan tingkat rawan banjir di Kecamatan Bontang Barat Kota Bontang berbasis sistem informasi geografis', *Jurnal Pendidikan Geografi Undiksha*, 9(2), pp. 109–120.
- Azizah, M. *et al.* (2021) 'Kajian risiko bencana berdasarkan jumlah kejadian dan dampak bencana di indonesia periode tahun 2010–2020', *PENDIPA Journal of Science*

- Education*, 6(1), pp. 35–40.
- Baryshnikova, N. V and Pham, N. T. A. (2019) 'Natural disasters and mental health: A quantile approach', *Economics letters*, 180, pp. 62–66.
- Bennett, W. G. *et al.* (2023) 'Modelling compound flooding: a case study from Jakarta, Indonesia', *Natural Hazards*, 118(1), pp. 277–305.
- Carías, M. S. E. *et al.* (2022) 'Flood disasters and health among the urban poor', *Health Economics*, 31(9), p. 2072.
- Colven, E. (2020) 'Subterranean infrastructures in a sinking city: the politics of visibility in Jakarta', *Critical Asian Studies*, 52(3), pp. 311–331.
- Corburn, J. *et al.* (2022) 'Urban climate justice, human health, and citizen science in Nairobi's informal settlements', *Urban Science*, 6(2), p. 36.
- Cutter, S. L. *et al.* (2018) 'Flash flood risk and the paradox of urban development', *Natural Hazards Review*, 19(1), p. 5017005.
- Darmawan, Y. *et al.* (2023) 'Analisis daerah rawan banjir dengan metode composite mapping analysis (Cma) di kota padang', *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 29(2), pp. 89–97.
- Darmayanti, R. *et al.* (2023) 'Navigating the Future: AI, Floods, Politics, and Entrepreneurship in Management Operations for Resilient Societies in Jakarta', *Floods, Politics, and Entrepreneurship in Management Operations for Resilient Societies in Jakarta (July 18, 2023)*.
- Dartanto, T. (2022) 'Natural disasters, mitigation and household welfare in Indonesia: Evidence from a large-scale longitudinal survey', *Cogent Economics & Finance*, 10(1), p. 2037250.

- Deasy Ernawati, N. P. M. (2024) 'RELEVANSI TATA KELOLA KOLABORATIF DALAM ANTISIPASI BENCANA PADA KOTA SURABAYA DAN JAKARTA SEBAGAI SMART CITY'. Politeknik STIA LAN Jakarta.
- Desportes, I., Hordijk, M. and Waddell, J. (2016) 'Improving flood risk governance through multi-stakeholder collaboration: A case study of Sweet Home informal settlement, Cape Town', *South African Geographical Journal= Suid-Afrikaanse Geografiese Tydskrif*, 98(1), pp. 61–83.
- Dewi, R. S., Handayani, W. and Mukherjee, J. (2025) 'Urban vulnerability along the northern coast of Java: the intersection of development and resilience', *GeoJournal*, 90(5), p. 265.
- Dhuha, M. A. S. *et al.* (2024) 'Impact-Based Forecasting (IBF) untuk Mendukung Manajemen Risiko Banjir di Kawasan Jabodetabek', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(5), pp. 1159–1173.
- Djoharam, V. *et al.* (2022) 'Model Pengelolaan Banjir: Systematic Review dan Arahkan untuk Masa Depan', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(3), pp. 524–545.
- Fadhlurrahman, R., Siswoyo, H. and Asmaranto, R. (2023) 'Pemetaan Ancaman Bencana Banjir di Kecamatan Indra Makmur Kabupaten Aceh Timur Provinsi Aceh', *EXTRAPOLASI*, 20(01), pp. 48–62.
- Foden, W. B. *et al.* (2019) 'Climate change vulnerability assessment of species', *Wiley interdisciplinary reviews: climate change*, 10(1), p. e551.
- Green, J., Haigh, I. D., *et al.* (2024) 'A comprehensive review of coastal compound flooding literature', *arXiv preprint arXiv:2404.01321*.

- Green, J., Haigh, I., *et al.* (2024) 'A comprehensive review of compound flooding literature with a focus on coastal and estuarine regions'.
- Green, J. *et al.* (2025) 'A comprehensive review of compound flooding literature with a focus on coastal and estuarine regions', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(2), pp. 747–816.
- Hadiani, R. R. and Rahmat, A. (2025) 'Assesing Flood Discharge Dynamics in Surakarta Through Land Cover Mapping with Sentinel-2A', *Eduvest-Journal of Universal Studies*, 5(5), pp. 5091–5107.
- Hendrayana, H. *et al.* (2024) 'Multi-Parameter Approach to Determine the Floods Causes in North Luwu, South Sulawesi.', in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, p. 12004.
- Hidayah, N. and Nugroho, H. S. (2024) 'Pengembangan model mitigasi bencana banjir rob di Kelurahan Kandang Panjang, Kota Pekalongan (Analisis kapasitas dan kerentanan aktor pada mitigasi bencana banjir rob)', *Moderat: Jurnal Ilmiah Ilmu Pemerintahan*, 10(2), pp. 281–304.
- Hidayati, N. (2025) 'Kesenjangan Kebijakan Mitigasi Banjir di Daerah', *Sospoli Institute Journal*, 3(5).
- Huang, H. *et al.* (2018) 'The changing pattern of urban flooding in Guangzhou, China', *Science of the Total Environment*, 622, pp. 394–401.
- Jahani, E., Ullah, F. and Heravi, A. (2026) 'Compound flooding risks in coastal cities: a review of causes, mechanisms, and assessment methodologies', *Natural Hazards*, 122(10), p. 426.
- Jelibседа, J. *et al.* (2025) 'PENANGGULANGAN BANJIR DI

JAKARTA: EVALUASI KEBIJAKAN PEMERINTAH DAN SOLUSI BERKELANJUTAN', *Al-Isyraq: Jurnal Bimbingan, Penyuluhan, dan Konseling Islam*, 8(2), pp. 481–488.

- Kiparisov, P., Lagutov, V. and Pflug, G. (2023) 'Quantification of Loss of Access to Critical Services during Floods in Greater Jakarta: Integrating Social, Geospatial, and Network Perspectives', *Remote Sensing*, 15(21), p. 5250.
- Kitsikoudis, V. *et al.* (2021) 'Exchange between drainage systems and surface flows during urban flooding: Quasi-steady and dynamic modelling in unsteady flow conditions', *Journal of Hydrology*, 602, p. 126628.
- Kurniawan, A. T. *et al.* (2024) 'Strategi Mitigasi Bencana Berbasis Masyarakat Dalam Menghadapi Risiko Banjir Di Daerah Perkotaan', *Journal Of Scientech Research And Development*, 6(2), pp. 1117–1125.
- Liu, Z., Yin, K. and Mostafavi, A. (2024) 'Rethinking urban flood risk assessment by adapting health domain perspective', *arXiv preprint arXiv:2403.03996*.
- Mignot, E. and Dewals, B. (2022) 'Hydraulic modelling of inland urban flooding: Recent advances', *Journal of hydrology*, 609, p. 127763.
- Miller, J. D. and Hutchins, M. (2017) 'The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom', *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, pp. 345–362.
- Mukhtar, D. S. and Pradoto, W. (2021) 'Penilaian Tingkat Kapasitas Adaptasi Terhadap Bencana Banjir Rob Berdasarkan Pengaruh Pembangunan Tanggul Laut Pada Kawasan Pesisir Kota Pekalongan (Studi Kasus: Kecamatan Pekalongan Utara)', *Teknik PWK*

- (*Perencanaan Wilayah Kota*), 10(4), pp. 311–320.
- Panigrahi, M. and Sharma, A. (2024) 'Flood Vulnerability Mapping and Resilience in Urban Setting: A Review of Conceptual Frameworks and Assessment Methods', *Flood Risk Management: Assessment and Strategy*, pp. 235–270.
- Paski, J. A. I. *et al.* (2021) 'Analysis of Multi-Scale Hydrometeorological Triggering Flash Flood Event of the 13 July 2020 in North Luwu, South Sulawesi', in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, p. 12014.
- Pradirta, I., Piarsa, I. N. and Dharmaadi, I. P. A. (2022) 'Sistem Pendeteksi Banjir dan Badai Angin serta Monitoring Cuaca Berbasis Internet of Things', *Teknologi Informasi dan*.
- ROMADONA, W. (2025) 'STRATEGI PEMERINTAH DAERAH KOTA TEGAL DALAM MITIGASI BANJIR DI KECAMATAN MARGADANA'. Universitas Pancasakti Tegal.
- Sahid, M. A. *et al.* (2022) 'Analisis Wilayah Rawan Banjir DAS Cimanuk Menggunakan Model Complete Mapping Analysis dan SIG', *Jurnal Georafflesia: Artikel Ilmiah Pendidikan Geografi*, 7(1), pp. 10–21.
- Schreider, S. Y., Smith, D. I. and Jakeman, A. J. (2000) 'Climate change impacts on urban flooding', *Climatic Change*, 47(1), pp. 91–115.
- Sciences, N. A. of *et al.* (2019) *Framing the challenge of urban flooding in the United States*. National Academies Press.
- Septian, A., Sabri, L. M. and Hadi, F. (2023) 'Implementasi metode fuzzy analytical hierarchy process dalam pembuatan peta ancaman banjir (Studi kasus: Kota Bekasi, Jawa Barat)', *Jurnal Geodesi Undip*, 12(3), pp.

301–310.

- Setiawan, R. B. *et al.* (2026) 'IMPLEMENTASI PROGRAM LAYANAN DUKUNGAN PSIKOSOSIAL (LDP) PASCABENCANA (STUDI PADA BADAN PENANGGULANGAN BENCANA DAERAH PROVINSI DAERAH KHUSUS IBUKOTA JAKARTA)', *Jurnal Academia Praja*, 9(1), pp. 18–33.
- Shatkin, G. (2019) 'Futures of crisis, futures of urban political theory: Flooding in Asian coastal megacities', *International Journal of Urban and Regional Research*, 43(2), pp. 207–226.
- Silver, C. (2021) *Urban flood risk management: Looking at Jakarta*. Routledge.
- Simatupang, N. B., Sucahyanto, S. and Hijrawadi, S. N. (2026) 'Analisis Spasial Tingkat Bahaya Bencana Kebakaran Permukiman di Kecamatan Cakung Kota Jakarta Timur', *Jurnal Pendidikan Geografi Undiksha*, 14(1), pp. 10–23.
- Siregar, J. S. and Wibowo, A. (2019) 'Upaya pengurangan risiko bencana pada kelompok rentan', *Jurnal Dialog Penanggulangan Bencana*, 10(1), pp. 30–38.
- Soleh, O., Supriyono, I. A. and Putri, D. S. (2025) 'INTEGRASI SMART DRAINAGE & SISTEM PERINGATAN BANJIR DINI BERBASIS IOT KOTA TANGERANG', *Jurnal Pembangunan Kota Tangerang*, 3(2), pp. 149–158.
- SONG, X. *et al.* (2024) 'Urban flooding in China: current status, causes and challenges', *Advances in Water Science*, 35(3), pp. 357–373.
- Suci Pradipta Wibowo, S. (2020) 'Analisis Struktur Berita Dalam Membangun Dramatik Berita Bencana Alam Palu Dan Donggala Pada Program Berita" Kabar Siang" TVONE (Periode 29 September 2018-12 Oktober 2018'.

Institut Seni Indonesia Yogyakarta.

- Sulkifly, S. (2020) 'analisis Nilai Berita Bencana Tsunami dan Gempa di Palu dan Donggala di Harian Fajar (Periode September-November 2018)'. Universitas Hasanuddin.
- Syukriyah, D. and Himaz, R. (2024) 'Short and medium-run effects of the Indian Ocean tsunami on health costs in Indonesia', *World development*, 180, p. 106648.
- Tabasi, N., Fereshtehpour, M. and Roghani, B. (2024) 'A review on flood risk conceptual frameworks and development of hierarchical structures for assessment criteria', *arXiv preprint arXiv:2409.08803*.
- Tabasi, N., Fereshtehpour, M. and Roghani, B. (2025) 'A review of flood risk assessment frameworks and the development of hierarchical structures for risk components', *Discover Water*, 5(1), p. 10.
- Taki, H. M. and Wartaman, A. S. (2022) 'Study of Flood Vulnerability in Pesangrahan District, South Jakarta', *Journal of Applied Geospatial Information*, 6(2), pp. 647–651.
- Tarigan, M. F. A. (2024) 'Development of a Real-Time Data-Based Geographic Information System to Enhance Disaster Management: The Role of Media and Technology in Mitigation', *Jurnal Penelitian Medan Agama*, 15(2), pp. 213–224.
- Thornton, P. K. *et al.* (2014) 'Climate variability and vulnerability to climate change: a review', *Global change biology*, 20(11), pp. 3313–3328.
- Tran, H. N. *et al.* (2024) 'Citizen scientists' engagement in flood risk-related data collection: A case study in Bui River Basin, Vietnam', *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(3), p. 280.

- Ulum, M. B. and Badri, F. (2023) 'Sistem monitoring cuaca dan peringatan banjir berbasis IoT dengan menggunakan aplikasi MIT App Inventor', *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, 11(3), pp. 319–328.
- Witanto, S. M. *et al.* (2025) 'Analisis Perbedaan Kategori Kejadian Banjir Terhadap Kerusakan Infrastruktur Dan Kelayakan Sanitasi Berdasarkan Provinsi Di Indonesia', *Emerging Statistics and Data Science Journal*, 3(2), pp. 557–572.
- Wolff, E. *et al.* (2021) 'Collaborating with communities: Citizen science flood monitoring in urban informal settlements', *arXiv preprint arXiv:2112.07128*.
- Yuniartanti, R. K. (2018) 'Rekomendasi adaptasi dan mitigasi bencana banjir di Kawasan Rawan Bencana (KRB) banjir Kota Bima', *Journal Of Regional And Rural Development Planning (Jurnal Perencanaan Pembangunan Wilayah Dan Perdesaan)*, 2(2), pp. 118–132.

BAB 2

KARAKTERISTIK DAN POTENSI BANJIR DI INDONESIA

Oleh Dimas Gustoro

2.1 Pendahuluan

Banjir merupakan kondisi ketika air meluap dari batas normal sungai atau badan air lainnya yang kemudian terakumulasi pada wilayah yang biasanya tidak tergenang (Majszak, Zaki and Wani, 2026). Banjir diklasifikasikan berdasarkan proses pembentukan dan sumber penyebabnya. Secara umum, banjir terjadi ketika volume air yang masuk ke suatu sistem hidrologi melebihi kapasitas tampung dan kapasitas alirnya (Viglione and Rogger, 2015).

Indonesia yang merupakan negara kepulauan mempunyai karakteristik dan potensi banjir yang berbeda untuk setiap daerahnya, mulai dari daerah perkotaan yang rentan terkena banjir akibat perubahan tata guna lahan ataupun daerah pesisir yang rentan terkena banjir akibat fenomena pasang surut. Variasi karakteristik dan potensi banjir ini sangat dipengaruhi oleh situasi geografis dan hidroklimatologi Indonesia yang sangat beragam. Oleh karena itu dalam bab ini akan dibahas secara mendalam terkait karakteristik dan potensi banjir di Indonesia.

2.1.1 Kondisi Geografis dan Hidroklimatologi Indonesia

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia yang terletak di wilayah tropis, tepatnya di antara dua benua (Asia dan Australia) dan dua samudra (Hindia dan Pasifik). Secara astronomis, posisi ini menempatkan Indonesia di bawah pengaruh langsung sirkulasi monsun (Monsun Barat dan Monsun Timur) serta Zona Konvergensi Antar-Tropis (*Inter-Tropical Convergence Zone* atau ITCZ). Fenomena ini menyebabkan Indonesia memiliki intensitas curah hujan harian yang sangat tinggi, sering kali melebihi 100 mm/hari pada puncak musim hujan (Aldrian and Dwi Susanto, 2003).

Secara geologis, Indonesia berada di pertemuan tiga lempeng tektonik aktif yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik (Verstappen, 2010). Kondisi ini membentuk topografi yang ekstrem, mulai dari pegunungan tinggi yang curam hingga dataran rendah aluvial yang sangat landai di sepanjang pesisir pantai. Kombinasi antara curah hujan ekstrem, geomorfologi yang dinamis, dan jaringan sungai yang padat secara alami menempatkan Indonesia sebagai salah satu wilayah yang paling rawan terhadap bencana hidrometeorologi, khususnya banjir (Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), 2023).

2.1.2 Sistematika dan Tujuan Penulisan Bab

Penulisan bab buku ini bertujuan untuk mengupas tuntas profil banjir di Indonesia secara holistik. Sistematika pembahasan disusun secara runtut mulai dari:

1. Karakteristik fisik lingkungan dan tipologi banjir yang khas di Indonesia.

2. Analisis komparatif potensi dan historis banjir di pulau-pulau besar (Sumatera, Jawa, Kalimantan, Sulawesi, Bali-Nusa Tenggara, Maluku, dan Papua).
3. Identifikasi faktor pemicu utama, baik faktor alamiah maupun antropogenik (aktivitas manusia).
4. Dampak sosio-ekonomi dan kerusakan infrastruktur yang ditimbulkan.
5. Jembatan pengantar menuju adopsi manajemen risiko banjir berbasis teknologi digital (*smart flood management*).

2.2 Karakteristik Fisik Wilayah Indonesia Terhadap Risiko Banjir

2.2.1 Kondisi Topografi, Geomorfologi, dan Daerah Aliran Sungai (DAS)

Topografi Indonesia dicirikan oleh variasi relief yang sangat kontras. Bagian hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) umumnya berupa perbukitan dan pegunungan dengan lereng curam dengan kemiringan lebih dari 40%. Kondisi ini menyebabkan air hujan mengalir dengan kecepatan tinggi yang menyebabkan waktu konsentrasi aliran menuju jaringan drainase di bawahnya menjadi sangat singkat (Asdak, 2023). Sebaliknya, bagian hilir DAS didominasi oleh dataran rendah aluvial dengan kemiringan yang sangat landai yang umumnya berkisar di angka kurang dari 2%. Format geomorfologi seperti ini secara alami memperlambat laju aliran air menuju laut, sehingga memicu akumulasi volume air dan menyebabkan luapan di kawasan hilir.

Indonesia memiliki lebih dari 5.590 DAS yang tersebar di seluruh kepulauan. Banyak di antara DAS tersebut kini

berada dalam kondisi kritis akibat degradasi lingkungan (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), 2022). Karakteristik DAS di Indonesia dapat diklasifikasikan berdasarkan ukurannya:

1. Daerah Aliran Sungai Besar dan Panjang

DAS seperti ini umumnya ditemukan di pulau-pulau besar seperti Sumatera, seperti contoh DAS Musi di Provinsi Sumatera Selatan dan DAS Batanghari di Provinsi Jambi. Selain itu pulau Kalimantan juga memiliki beberapa sungai dengan karakteristik besar dan panjang seperti contoh DAS Kapuas dan DAS Barito. Banjir di DAS besar dan panjang biasanya menyebabkan genangan luas dengan durasi yang lama, hal ini dikarenakan banjir pada DAS yang luas dan memiliki sungai utama yang panjang cenderung menghasilkan genangan yang lebih luas dan bertahan lebih lama karena waktu konsentrasi dan propagasi gelombang banjir yang lebih panjang, sehingga aliran dari berbagai sub-DAS dapat terakumulasi secara bersamaan di bagian hilir (Serinaldi *et al.*, 2018).

2. Daerah Aliran Sungai Pendek dan Curam

Karakteristik ini umumnya ditemukan di Pulau Jawa, Bali, dan Sulawesi. Aliran sungai yang pendek dan curam menyebabkan waktu konsentrasi yang singkat sehingga air hujan dari bagian hulu dapat dengan cepat mencapai hilir. Kondisi ini menghasilkan respons hidrologi yang cepat berupa banjir bandang (*flash flood*) dengan debit puncak dan kecepatan aliran yang tinggi (Kvočka, Ahmadian and Falconer, 2017; Godara, Bruland and Alfredsen, 2023).

2.2.2 Pola Curah Hujan, Monsun, dan Fenomena Iklim Global

Curah hujan di Indonesia sangat dipengaruhi oleh sistem Monsun Indo-Australia (Chang *et al.*, 2005). Secara singkat monsun di definisikan sebagai suatu sistem angin di daerah tropis yang terus berubah arah setiap musim akibat perbedaan pemanasan antara daratan dan lautan, aktivitas monsun ini ditandai oleh pembalikan arah angin dominan secara musiman serta pergantian musim kering dan musim basah yang jelas (Geen *et al.*, 2020).

Indonesia memiliki dua periode monsun yaitu Monsun Barat dan Monsun Timur. Monsun Barat terjadi pada periode bulan oktober sampai dengan bulan maret yang membawa massa udara basah dari Samudra Pasifik dan Asia, yang menjadi pemicu utama musim hujan dan puncak bencana banjir di sebagian besar wilayah Indonesia. Sebaliknya, Monsun Timur terjadi pada periode bulan April sampai dengan bulan september membawa massa udara kering dari Australia yang menyebabkan terjadinya musim kemarau di Indonesia.

Variabilitas curah hujan di Indonesia tidak hanya dipengaruhi oleh sistem monsun, tetapi juga oleh fenomena iklim global seperti *Indian Ocean Dipole* (IOD) dan *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO). Kedua fenomena tersebut memiliki korelasi yang signifikan terhadap variasi curah hujan di berbagai wilayah Indonesia, termasuk Sumatra, Jawa, Kalimantan, Sulawesi, Nusa Tenggara, dan Papua (Lestari *et al.*, 2018). Kondisi kekeringan cenderung terjadi ketika fase IOD positif berlangsung bersamaan dengan kejadian El Niño. Fenomena La Niña menyebabkan penurunan suhu

permukaan laut di Samudra Pasifik bagian timur, yang berdampak pada peningkatan suhu permukaan laut di sekitar Indonesia. Hal ini memicu peningkatan curah hujan hingga 20% - 40% di atas normal, berujung pada banjir skala besar yang berkepanjangan. Selain itu terdapat fenomena Dipole Mode Negatif yang merupakan interaksi laut-atmosfer di Samudra Hindia. Fase negatif IOD meningkatkan suhu muka laut di bagian timur Samudra Hindia yang berdekatan dengan Indonesia. Kondisi ini memperkuat konveksi atmosfer dan meningkatkan transport uap air ke wilayah Indonesia bagian barat, sehingga curah hujan di Sumatera dan Jawa cenderung meningkat dan risiko banjir menjadi lebih tinggi (Ibnu Khaldun *et al.*, 2018; Lestari *et al.*, 2018; Hatmaja, Rusmanansari and Radjawane, 2019).

2.2.3 Karakteristik Tanah dan Kapasitas Infiltrasi

Jenis tanah di Indonesia sangat bervariasi dan memengaruhi kemampuan infiltrasi (penyerapan air ke dalam tanah). Di wilayah pegunungan vulkanik, jenis tanah cenderung berupa andosol dan regosol yang memiliki porositas tinggi. Namun, di daerah dataran rendah aluvial dan rawa (seperti di pesisir timur Sumatera dan pesisir selatan Kalimantan), jenis tanah didominasi oleh aluvial, glei, dan organosol (gambut) dengan tingkat kejenuhan air yang sudah sangat tinggi (Rayes, 2017).

Ketika tanah telah mencapai titik jenuh air (*saturation point*), kapasitas infiltrasi turun menjadi nol. Akibatnya, setiap tetes air hujan yang jatuh langsung berubah menjadi limpasan permukaan (*surface runoff*). Formula hidro-meteorologi sederhana untuk menggambarkan fenomena ini mengacu pada Metode Rasional (Triatmodjo, 2013):

$$Q = C \times I \times A$$

Di mana:

Q = Debit aliran permukaan maksimum (m^3/detik)

C = Koefisien limpasan

I = Intensitas curah hujan (mm/jam)

A = Luas Daerah Aliran Sungai (km^2)

Di kawasan perkotaan Indonesia, nilai koefisien limpasan (C) meroket mendekati 0,8 hingga 0,9 akibat betonisasi (Suripin, 2014). Artinya, 80% - 90% air hujan langsung berubah menjadi banjir karena tidak mampu diinfiltrasi oleh tanah.

2.3 Tipologi Banjir di Indonesia

Banjir di Indonesia tidak memiliki karakteristik tunggal. Berdasarkan mekanisme terjadinya, letak geografis, dan faktor pemicunya, banjir di Indonesia dibagi menjadi empat tipologi utama yaitu Banjir Luapan Sungai, Banjir Bandang, Banjir Perkotaan, dan Banjir Pesisir.

2.3.1 Banjir Luapan Sungai (*Fluvial Flood*)

Banjir fluvial terjadi ketika debit air di dalam sungai melebihi kapasitas tampung saluran (*bankfull capacity*), sehingga air meluap dan menggenangi dataran banjir (*floodplain*) di kanan-kiri sungai (Chow, Maidment and Mays, 2010). Banjir fluvial umumnya dipicu oleh peningkatan curah hujan di daerah hulu yang menyebabkan kenaikan aliran permukaan (*runoff*) dan peningkatan debit sungai secara cepat hingga melampaui kapasitas alirnya. Kondisi ini diperparah oleh karakteristik hidrologi dan geomorfologi daerah aliran sungai (DAS), seperti bentuk DAS yang sempit

dan topografi curam yang mempercepat konsentrasi aliran serta memperpendek waktu konsentrasi.

Selain itu, degradasi lingkungan seperti deforestasi meningkatkan limpasan permukaan akibat penurunan kapasitas infiltrasi tanah, sementara perubahan tata guna lahan yang meningkatkan permukaan kedap air memperbesar volume aliran menuju sistem sungai. Proses sedimentasi serta penyempitan dan pendangkalan sungai akibat aktivitas antropogenik juga berkontribusi dalam mengurangi kapasitas tampung sungai, sehingga memperbesar potensi terjadinya luapan air ke wilayah dataran banjir.

Karakteristik utama banjir fluvial di Indonesia meliputi waktu propagasi yang relatif lambat sehingga kejadian banjir umumnya dapat diprediksi beberapa jam hingga beberapa hari sebelumnya berdasarkan pemantauan debit di daerah hulu. Selain itu, banjir fluvial cenderung memiliki durasi yang panjang, yakni berlangsung selama beberapa hari hingga beberapa minggu tergantung pada intensitas hujan dan kondisi hidrologi daerah aliran sungai. Dari segi cakupan, banjir fluvial dapat menjangkau area yang sangat luas karena menggenangi dataran banjir di sepanjang sungai. Genangan tersebut berpotensi merendam kawasan permukiman, lahan pertanian, serta berbagai infrastruktur penting yang mendukung aktivitas ekonomi dan sosial Masyarakat (Devitt *et al.*, 2023). Contoh yang sering terjadi di Indonesia adalah banjir tahunan di sepanjang Daerah Aliran Sungai (DAS) Bengawan Solo dan DAS Citarum.

2.3.2 Banjir Bandang (*Flash Flood*)

Banjir bandang merupakan salah satu bencana hidrometeorologi dengan tingkat bahaya tinggi karena

dicirikan oleh aliran yang terjadi secara cepat dengan kecepatan tinggi serta mampu mengangkut material rombakan dalam jumlah besar, seperti lumpur, batu, kayu, dan sedimen berukuran besar. Kombinasi antara energi aliran yang tinggi dan muatan sedimen yang besar menyebabkan banjir bandang memiliki daya rusak yang jauh lebih besar dibandingkan banjir sungai biasa (Church and Jakob, 2020; Fei, Wang and Lan, 2024). Dalam literatur hidrologi dan geomorfologi, fenomena ini juga sering dikategorikan sebagai *flash flood* atau *debris flow flood* yang memiliki karakteristik energi aliran sangat besar dalam waktu yang singkat, sehingga menyebabkan kerusakan infrastruktur dan korban jiwa yang signifikan (Marchi, Cavalli and D'agostino, 2010).

Karakteristik utama banjir bandang adalah waktu kejadian yang sangat cepat dan hampir tidak memberikan waktu peringatan yang memadai bagi masyarakat. Dalam banyak kasus, banjir ini dapat terjadi dalam hitungan menit hingga kurang dari beberapa jam setelah hujan ekstrem dimulai di daerah hulu. Selain itu, banjir bandang juga memiliki tingkat destruktif yang sangat tinggi karena kombinasi antara volume air, kecepatan aliran, dan muatan sedimen yang besar. Wilayah yang paling rentan terhadap fenomena ini di Indonesia umumnya berada di kawasan pegunungan dan perbukitan, seperti Sumatera Barat, Sulawesi Selatan, Nusa Tenggara, dan Papua, yang memiliki kondisi geomorfologi kompleks dan sistem sungai berlereng curam (Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), 2023).

Dengan demikian, banjir bandang merupakan fenomena hidrometeorologi kompleks yang terbentuk dari interaksi antara faktor meteorologis (curah hujan ekstrem), hidrologis

(respon DAS), dan geomorfologis (lereng curam dan material tidak stabil). Kompleksitas ini menjadikan banjir bandang sebagai salah satu bencana dengan tingkat ketidakpastian tinggi dan tantangan besar dalam sistem mitigasi dan peringatan dini.

2.3.3 Banjir Perkotaan (*Pluvial Flood / Urban Flood*)

Banjir pluvial merupakan jenis banjir yang terjadi secara independen tanpa dipengaruhi oleh luapan sungai dan umumnya disebabkan oleh kejadian hujan lokal berintensitas tinggi yang melebihi kapasitas infiltrasi maupun kapasitas sistem drainase perkotaan. Kondisi tersebut menyebabkan limpasan permukaan terakumulasi dan tidak dapat dialirkan secara efektif sehingga menimbulkan genangan pada wilayah perkotaan (Blanc *et al.*, 2012; Hofmann and Schüttrumpf, 2019).

Secara hidrologis, banjir pluvial sangat dipengaruhi oleh karakteristik kawasan perkotaan yang telah mengalami perubahan signifikan akibat urbanisasi. Peningkatan permukaan kedap air (*impervious surfaces*), penurunan kapasitas infiltrasi tanah, serta perubahan tata guna lahan menyebabkan peningkatan volume limpasan permukaan dan mempercepat respon hidrologi suatu wilayah terhadap kejadian hujan ekstrem (Zope, Eldho and Jothiprakash, 2017). Selain itu, ketidakmampuan infrastruktur drainase dalam mengakomodasi peningkatan intensitas hujan akibat perubahan iklim juga menjadi faktor penting yang memperparah kejadian banjir pluvial di kawasan perkotaan. Peningkatan intensitas hujan ekstrem yang dipicu oleh perubahan iklim meningkatkan beban hidrologis pada sistem drainase yang umumnya dirancang berdasarkan kondisi

historis, sehingga pada banyak kasus kapasitasnya tidak lagi mencukupi untuk mengalirkan limpasan permukaan secara efektif dan menyebabkan genangan di wilayah perkotaan (Zhang *et al.*, 2021).

Dari segi karakteristik, banjir pluvial ditandai oleh fase awal kejadian yang berlangsung sangat cepat, biasanya terjadi selama atau segera setelah hujan dengan intensitas tinggi, serta memiliki durasi genangan yang relatif singkat, berkisar antara beberapa jam hingga kurang dari satu hari. Namun, pada wilayah dengan kondisi tertentu seperti penurunan muka tanah (land subsidence) atau keterbatasan kapasitas sistem drainase, durasi genangan dapat berlangsung lebih lama akibat terganggunya proses aliran dan pembuangan air. Fenomena ini banyak terjadi di kota-kota besar di negara berkembang yang mengalami tekanan urbanisasi tinggi, perubahan iklim, serta degradasi sistem drainase perkotaan (Aerts *et al.*, 2018).

Dengan demikian, banjir pluvial dapat dipahami sebagai bentuk banjir yang sangat dipengaruhi oleh faktor antropogenik, khususnya urbanisasi dan perubahan tata guna lahan, serta semakin diperparah oleh peningkatan intensitas hujan ekstrem akibat variabilitas dan perubahan iklim global.

2.3.4 Banjir Pesisir (Rob / Coastal Flood)

Banjir rob merupakan banjir di wilayah pesisir akibat naiknya muka air laut yang dipengaruhi oleh pasang surut astronomis (spring tide), gelombang badai (storm surge), serta kenaikan muka air laut akibat perubahan iklim. Fenomena ini berkaitan dengan dinamika laut, namun dampaknya menjadi lebih besar ketika bertemu dengan kondisi fisik wilayah pesisir yang rentan.

Di Indonesia, banjir rob banyak terjadi di pesisir utara Jawa seperti Semarang, Demak, Pekalongan, dan Jakarta Utara. Kejadian ini tidak hanya dipengaruhi faktor laut, tetapi juga diperparah oleh penurunan muka tanah (land subsidence) akibat penggunaan air tanah berlebihan dan perkembangan kawasan perkotaan. Kombinasi kenaikan muka air laut dan penurunan daratan menyebabkan genangan semakin sering dan meluas dari waktu ke waktu (Chaussard *et al.*, 2013; Abidin *et al.*, 2015).

Secara karakteristik, banjir rob bersifat berulang dan mengikuti siklus pasang surut, sehingga kejadian genangan dapat terjadi secara periodik, terutama saat pasang tinggi. Air yang menggenangi wilayah daratan biasanya bersifat asin atau payau, yang dalam jangka panjang dapat menurunkan kualitas tanah dan merusak infrastruktur akibat sifatnya yang korosif. Pada beberapa wilayah, genangan bahkan dapat bertahan cukup lama apabila tidak didukung oleh sistem pengendalian air yang memadai seperti tanggul atau pompa.

Dengan demikian, banjir rob tidak hanya dapat dipahami sebagai fenomena pasang laut semata, tetapi juga sebagai hasil interaksi antara proses alam dan aktivitas manusia yang terjadi secara bersamaan di wilayah pesisir. Secara umum tipologi banjir di Indonesia dapat dipetakan karakteristiknya seperti pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Tipologi Banjir di Indonesia

Jenis Banjir	Pemicu Utama	Kecepatan Datang	Durasi Genangan	Material yang Dibawa
Fluvial	Luapan air sungai akibat hujan di hulu	Lambat (Hitungan jam - hari)	Lama (Hari - minggu)	Air, sedimen lumpur halus

Jenis Banjir	Pemicu Utama	Kecepatan Datang	Durasi Genangan	Material yang Dibawa
Bandang	Penyumbatan sungai / longsor di lereng curam	Sangat Cepat (Hitungan menit)	Singkat (Hitungan jam)	Air, batu besar, batang pohon, lumpur pekat
Pluvial (Kota)	Drainase buruk + hujan lokal ekstrem	Cepat (1 - 3 jam)	Singkat - Sedang	Air limbah domestik, sampah
Rob (Pesisir)	Pasang laut + <i>Land subsidence</i>	Teratur (Sesuai siklus bulan)	Permanen / Berulang	Air laut (asin/payau)

Sumber: Penulis (2026)

2.4 Potensi dan Distribusi Spasial Banjir di Pulau-Pulau Besar Indonesia

Potensi banjir di Indonesia menunjukkan variasi spasial yang sangat tinggi sebagai akibat dari perbedaan karakteristik geologis, geomorfologis, hidrologis, serta dinamika sosial-ekonomi di setiap pulau. Selain itu, interaksi antara proses alami dan aktivitas antropogenik menjadikan pola kejadian banjir di Indonesia bersifat kompleks dan tidak seragam antarwilayah (Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), 2023). Dalam literatur hidrologi global, risiko banjir dipahami sebagai fenomena kompleks yang ditentukan oleh interaksi antara karakteristik daerah aliran sungai, intensitas curah hujan ekstrem, serta faktor perubahan iklim yang memengaruhi besarnya potensi bahaya banjir. Kompleksitas ini juga mencakup ketidakpastian dalam proses hidrologi dan

peningkatan risiko banjir sungai pada skala global akibat perubahan kondisi iklim (Merz *et al.*, 2010; Alfieri *et al.*, 2017).

2.4.1 Pulau Sumatera

Pulau Sumatera memiliki fisiografi yang sangat kontras antara bagian barat dan timur, dengan Pegunungan Bukit Barisan yang membentang di sisi barat pulau. Keberadaan pegunungan ini membentuk sistem daerah aliran sungai yang relatif pendek dan curam, sehingga menghasilkan respon hidrologi yang cepat terhadap hujan ekstrem. Interaksi antara massa udara lembap dari Samudra Hindia dengan topografi pegunungan juga memperkuat pembentukan hujan orografis yang intens di wilayah barat Sumatera, sehingga meningkatkan frekuensi kejadian banjir bandang di wilayah seperti Sumatera Barat dan Aceh (Baranowski *et al.*, 2020). Dalam studi global, daerah pegunungan dengan kemiringan tinggi memang terbukti memiliki waktu konsentrasi aliran yang pendek sehingga meningkatkan potensi flash flood (Marchi, Cavalli and D'agostino, 2010).

Sebaliknya, bagian timur Sumatera didominasi oleh dataran rendah aluvial dan kawasan rawa yang luas, seperti Riau, Jambi, dan Sumatera Selatan. Wilayah ini dilalui oleh sungai besar seperti DAS Kampar, Batanghari, dan Musi yang memiliki area tangkapan yang luas. Perubahan tata guna lahan, khususnya deforestasi untuk perkebunan kelapa sawit, telah meningkatkan erosi tanah dan muatan sedimen sungai secara signifikan. Studi menunjukkan bahwa degradasi DAS di wilayah tropis lembap dapat meningkatkan limpasan permukaan, produksi sedimen, dan frekuensi banjir fluvial akibat perubahan karakteristik hidrologi DAS (Tarigan, 2016; Sidle and Ziegler, 2017).

2.4.2 Pulau Jawa

Pulau Jawa merupakan wilayah dengan tingkat risiko banjir tertinggi di Indonesia jika ditinjau dari kepadatan penduduk dan intensitas aktivitas ekonomi (Marfai, Sekaranom and Ward, 2015). Secara hidrologis, Jawa menghadapi tekanan besar akibat urbanisasi cepat yang meningkatkan proporsi permukaan kedap air (*impervious surfaces*), sehingga mengurangi infiltrasi, memperbesar limpasan permukaan, dan mempercepat respon hidrologi daerah aliran sungai terhadap kejadian hujan ekstrem (Fletcher, Andrieu and Hamel, 2013).

Pada kawasan Pantai Utara Jawa (Pantura), seperti Jakarta, Semarang, dan Pekalongan, risiko banjir bersifat kompleks karena merupakan kombinasi dari banjir fluvial, pluvial, dan rob (*compound flooding*). Literatur terkini menunjukkan bahwa kejadian banjir di wilayah pesisir urban sering kali merupakan hasil interaksi beberapa proses hidrologi dan oseanografi secara simultan (Wahl *et al.*, 2015; Zscheischler *et al.*, 2018). Kondisi ini diperparah oleh fenomena penurunan muka tanah (*land subsidence*) yang di beberapa wilayah mencapai 5–10 cm per tahun, sehingga memperbesar risiko genangan permanen di kawasan pesisir (Chaussard *et al.*, 2013; Abidin *et al.*, 2015).

2.4.3 Pulau Kalimantan

Secara geologis, Kalimantan berada pada wilayah yang relatif stabil secara tektonik dengan aktivitas tektonik yang rendah, namun secara hidrologis wilayah ini memiliki kerentanan tinggi terhadap banjir fluvial skala besar. Hal ini dipengaruhi oleh keberadaan sungai-sungai utama seperti

Kapuas, Barito, dan Mahakam yang memiliki daerah aliran sungai (DAS) sangat luas dengan perkembangan dataran banjir yang ekstensif. Sistem hidrologi pada DAS Kapuas dan Mahakam menunjukkan bahwa kawasan dataran rendah tropis ini memiliki kapasitas penyimpanan air yang besar pada floodplain serta dipengaruhi oleh mekanisme backwater yang memperlambat aliran dan memperluas genangan saat terjadi peningkatan debit (Merz *et al.*, 2010; Hidayat *et al.*, 2017).

Perubahan penggunaan lahan menjadi perkebunan monokultur dan aktivitas pertambangan telah mengubah struktur tanah dan menurunkan kapasitas infiltrasi. Studi di wilayah tropis menunjukkan bahwa deforestasi dapat meningkatkan runoff hingga beberapa kali lipat dan memperbesar frekuensi banjir musiman (Sidle and Ziegler, 2017). Akibatnya, Kalimantan sering mengalami banjir genangan luas yang berlangsung lama terutama pada musim hujan.

2.4.4 Pulau Sulawesi

Sulawesi memiliki karakteristik geomorfologi yang kompleks dengan dominasi pegunungan terjal, lembah sempit, serta sistem patahan aktif. Kondisi ini menjadikan wilayah tersebut sangat rentan terhadap banjir bandang (*flash flood*) yang dipicu oleh hujan ekstrem dan longsor di daerah hulu.

Dalam literatur global, daerah dengan kombinasi topografi curam dan material lereng tidak stabil memiliki probabilitas tinggi terhadap kejadian debris flow yang berubah menjadi banjir bandang (Marchi, Cavalli and D'agostino, 2010). Peristiwa banjir bandang di Luwu Utara menjadi contoh nyata

bagaimana interaksi antara hujan ekstrem dan longsor dapat menghasilkan aliran dengan daya rusak sangat tinggi.

2.4.5 Wilayah Bali, Nusa Tenggara, Maluku, dan Papua

Wilayah Bali dan Nusa Tenggara secara umum memiliki iklim lebih kering (semi-arid), namun tetap memiliki potensi banjir bandang ketika terjadi hujan ekstrem dalam durasi singkat. Keterbatasan vegetasi penutup tanah meningkatkan limpasan permukaan sehingga wilayah ini sangat sensitif terhadap kejadian hujan intensitas tinggi. Studi menunjukkan bahwa wilayah kering cenderung memiliki risiko flash flood yang tinggi karena rendahnya kapasitas infiltrasi tanah (Gaume *et al.*, 2009).

Di Papua, topografi ekstrem seperti Pegunungan Jayawijaya dan sistem DAS yang masih alami membuat wilayah ini sangat rentan terhadap banjir bandang ketika terjadi gangguan pada tutupan lahan. Perubahan tutupan hutan di daerah hulu terbukti meningkatkan erosi dan meningkatkan risiko sediment-laden flood. Salah satu kejadian besar adalah banjir bandang Sentani yang menunjukkan kombinasi antara hujan ekstrem, longsor, dan sistem sungai berlereng curam (Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), 2023).

2.5 Analisis Faktor Pemicu Banjir di Indonesia

Terjadinya banjir di Indonesia merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor alamiah (*natural drivers*) dan faktor antropogenik (aktivitas manusia). Dalam literatur hidrologi modern, banjir dipahami sebagai fenomena yang dikontrol oleh kombinasi antara karakteristik hujan, respon

DAS, serta perubahan penggunaan lahan yang memodifikasi siklus hidrologi alami (Merz *et al.*, 2010; Kundzewicz *et al.*, 2019). Interaksi ketiga komponen tersebut menyebabkan peningkatan risiko banjir di wilayah tropis seperti Indonesia yang memiliki curah hujan tinggi dan dinamika tata guna lahan yang cepat.

2.5.1 Faktor Alamiah (*Natural Drivers*)

Faktor alamiah merupakan pengendali utama terbentuknya banjir di wilayah Indonesia yang secara geografis berada pada zona tropis basah dengan variabilitas iklim yang tinggi.

Faktor pertama adalah curah hujan ekstrem baik dalam skala temporal pendek maupun panjang. Hujan dengan intensitas tinggi (>100 mm/hari) dapat melampaui kapasitas infiltrasi tanah dan langsung berubah menjadi limpasan permukaan (*surface runoff*) (Aldrian and Dwi Susanto, 2003). Dalam kajian global, kejadian hujan ekstrem menunjukkan tren peningkatan akibat perubahan iklim, yang berkontribusi pada meningkatnya frekuensi banjir di berbagai wilayah dunia karena intensifikasi siklus hidrologi pada kondisi atmosfer yang lebih hangat (Tabari, 2020).

Faktor kedua adalah kondisi fisiografis dan morfologi daerah aliran sungai (DAS). Bentuk DAS, kemiringan lereng, serta kerapatan drainase sangat memengaruhi waktu konsentrasi aliran dan besarnya debit puncak (*peak discharge*). DAS berbentuk membulat cenderung menghasilkan respon hidrologi yang lebih cepat dibandingkan DAS memanjang karena aliran dari berbagai sub-DAS terkonsentrasi secara simultan di sungai utama (Asdak, 2023).

Faktor ketiga adalah proses sedimentasi alami yang terjadi di sepanjang sistem sungai. Material sedimen yang berasal dari erosi hulu akan terbawa menuju hilir dan mengendap pada bagian sungai yang lebih landai. Akumulasi sedimen secara bertahap dapat mengurangi kapasitas penampang sungai melalui perubahan morfologi alur akibat deposisi material, sehingga menurunkan kemampuan sungai dalam menampung debit aliran dan meningkatkan potensi terjadinya luapan saat terjadi peningkatan debit (Lane *et al.*, 2007).

2.5.2 Faktor Antropogenik (*Human-Induced Drivers*)

Faktor antropogenik memainkan peran yang semakin dominan dalam meningkatkan risiko banjir, terutama di wilayah perkotaan dan DAS yang telah mengalami degradasi lingkungan.

Faktor pertama adalah alih fungsi lahan (*land use and land cover change*). Hutan yang berfungsi sebagai sistem hidrologi alami melalui intersepsi dan infiltrasi akan kehilangan fungsi tersebut ketika dikonversi menjadi lahan pertanian, perkebunan, atau kawasan permukiman. Hal ini meningkatkan koefisien limpasan dan mempercepat respon hidrologi DAS terhadap hujan (Sidle and Ziegler, 2017; Asdak, 2023).

Faktor kedua adalah urbanisasi yang tidak terkendali. Peningkatan permukaan kedap air (*impervious surfaces*) serta pembangunan di bantaran sungai menyebabkan penurunan kapasitas infiltrasi dan penyempitan alur sungai. Studi menunjukkan bahwa urbanisasi secara signifikan meningkatkan puncak debit banjir dan mempercepat waktu

respon DAS (Fletcher, Andrieu and Hamel, 2013; Zhou *et al.*, 2019).

Faktor ketiga adalah pengelolaan sampah dan sistem drainase yang tidak optimal. Penumpukan sampah di saluran air menyebabkan tersumbatnya aliran dan menurunkan kapasitas hidraulik sistem drainase perkotaan. Kondisi ini sering menjadi pemicu utama banjir pluvial di kota-kota besar negara berkembang (Suripin, 2014).

Faktor keempat adalah eksploitasi air tanah yang berlebihan yang menyebabkan penurunan muka tanah (*land subsidence*). Fenomena ini sangat signifikan di kota-kota pesisir seperti Jakarta dan Semarang, dan berkontribusi terhadap meningkatnya risiko banjir rob serta genangan permanen di wilayah pesisir (Chaussard *et al.*, 2013; Abidin *et al.*, 2015). Dalam konteks global, penurunan muka tanah merupakan salah satu faktor utama yang memperparah risiko banjir di wilayah delta dan kota pesisir (Nicholls *et al.*, 2021).

2.6 Dampak Sosio-Ekonomi dan Kerusakan Infrastruktur

Banjir merupakan salah satu bencana hidrometeorologi yang tidak hanya berdampak pada kerusakan fisik lingkungan, tetapi juga memberikan konsekuensi luas terhadap aspek sosial, ekonomi, kesehatan masyarakat, serta keberlanjutan infrastruktur. Dalam kajian kebencanaan modern, dampak banjir dipahami tidak hanya sebagai kerugian langsung (*direct losses*), tetapi juga kerugian tidak langsung (*indirect losses*) yang mencakup gangguan aktivitas ekonomi, terganggunya layanan publik, dan penurunan produktivitas Masyarakat

(Jongman *et al.*, 2015; Koks *et al.*, 2015). Beberapa dampak sosio-ekonomi dan kerusakan infrastruktur akibat banjir adalah sebagai berikut:

1. Korban Jiwa dan Dampak Kesehatan Masyarakat

Dampak paling langsung dari banjir adalah korban jiwa serta gangguan kesehatan masyarakat. Tingkat fatalitas umumnya dipengaruhi oleh kecepatan kejadian banjir, terutama pada banjir bandang dan banjir perkotaan yang terjadi secara tiba-tiba sehingga menyulitkan proses evakuasi. Selain itu, genangan air yang bertahan lama menciptakan kondisi lingkungan yang tidak higienis dan meningkatkan risiko penyebaran penyakit.

Penelitian menunjukkan bahwa kejadian banjir berkaitan dengan peningkatan risiko penyakit berbasis air (*waterborne diseases*) seperti diare, leptospirosis, dan infeksi kulit, serta penyakit berbasis vektor seperti Demam Berdarah Dengue (DBD) akibat meningkatnya genangan air sebagai tempat berkembang biak nyamuk (Watson, Gayer and Connolly, 2007; Lowe, Ebi and Forsberg, 2013). Selain itu, dampak banjir juga mencakup aspek psikologis, seperti meningkatnya stres pascabencana dan gangguan kesehatan mental pada masyarakat terdampak (Paranjothy *et al.*, 2011; Fernandez *et al.*, 2015).

2. Kerugian Ekonomi Sektor Pertanian dan Pangan

Sektor pertanian merupakan salah satu sektor yang paling rentan terhadap banjir karena sangat bergantung pada kestabilan kondisi hidrologi. Genangan air dalam waktu tertentu dapat menyebabkan gagal panen (*crop failure*), terutama pada tanaman pangan seperti padi yang sensitif terhadap kondisi tergenang.

Studi menunjukkan bahwa banjir dapat menurunkan produktivitas pertanian melalui kerusakan tanaman, gangguan siklus tanam, serta kerusakan lahan pertanian (Bhakta Shrestha *et al.*, 2019). Selain itu, dampak banjir dapat merambat melalui rantai pasok dan mengganggu distribusi barang serta aktivitas ekonomi di wilayah yang tidak terdampak secara langsung (Hallegatte, 2019; Inoue and Todo, 2019). Dalam konteks negara berkembang, gangguan ini dapat memperburuk ketahanan pangan masyarakat yang sangat bergantung pada produksi lokal.

3. Kerusakan Infrastruktur Vital dan Properti

Banjir juga menyebabkan kerusakan signifikan pada infrastruktur vital seperti jalan, jembatan, sistem drainase, fasilitas publik, serta jaringan utilitas. Kerusakan ini umumnya terjadi akibat tekanan aliran air, erosi, dan beban sedimen yang terbawa oleh banjir.

Penelitian dalam bidang infrastruktur menunjukkan bahwa banjir merupakan salah satu penyebab utama gangguan sistem transportasi dan layanan publik di wilayah perkotaan (Pregnoiato *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2019). Gangguan pada infrastruktur transportasi tidak hanya menyebabkan kerusakan fisik, tetapi juga menghambat mobilitas masyarakat dan aktivitas ekonomi. Lebih jauh, kerugian tidak langsung akibat gangguan infrastruktur sering kali lebih besar dibandingkan kerusakan fisik, karena berdampak pada rantai ekonomi dan distribusi barang serta jasa (Koks *et al.*, 2015).

Di Indonesia, kerusakan infrastruktur akibat banjir sering kali menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan, terutama di wilayah perkotaan dan pesisir yang

memiliki tingkat kepadatan tinggi dan nilai ekonomi besar (Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), 2023).

4. Dampak Sosial dan Perubahan Struktur Masyarakat

Selain dampak fisik dan ekonomi, banjir juga menimbulkan dampak sosial yang cukup luas. Masyarakat terdampak sering mengalami pengungsian, terganggunya aktivitas pendidikan, serta kehilangan pekerjaan sementara. Dalam jangka panjang, kejadian banjir berulang dapat memicu perubahan pola permukiman dan mendorong migrasi dari wilayah rawan ke wilayah yang lebih aman.

Masyarakat yang tinggal di daerah rawan banjir cenderung memiliki tingkat kerentanan sosial yang lebih tinggi akibat keterbatasan kapasitas adaptasi, rendahnya akses terhadap sumber daya, serta ketergantungan pada dukungan eksternal dalam menghadapi dan memulihkan dampak bencana (Rufat *et al.*, 2015). Kondisi ini memperkuat siklus kerentanan (*vulnerability cycle*) yang membuat masyarakat sulit keluar dari risiko bencana secara mandiri.

2.7 Menuju Manajemen Risiko Banjir di Era Digital: Sebuah Pengantar

Strategi penanggulangan banjir di Indonesia selama ini masih didominasi oleh pendekatan struktural konvensional (*hard structural approach*) seperti pembangunan tanggul, normalisasi sungai, dan sistem drainase teknis. Meskipun pendekatan ini terbukti mampu mengurangi risiko banjir pada tingkat tertentu, berbagai kajian menunjukkan bahwa

strategi tersebut memiliki keterbatasan, terutama dari sisi biaya pembangunan, kebutuhan ruang, serta ketidakmampuan untuk mengakomodasi peningkatan intensitas hujan ekstrem di masa depan (Suripin, 2014; Kundzewicz *et al.*, 2019).

Seiring dengan berkembangnya teknologi digital dan meningkatnya kompleksitas risiko banjir akibat perubahan iklim dan urbanisasi, pendekatan manajemen risiko banjir mulai bergeser menuju konsep yang lebih adaptif dan terintegrasi, yang dikenal sebagai *smart flood management*. Pendekatan ini tidak hanya mengandalkan infrastruktur fisik, tetapi juga memanfaatkan teknologi digital untuk meningkatkan kapasitas pemantauan, prediksi, serta respon terhadap kejadian banjir secara real-time.

Salah satu pilar utama dalam sistem ini adalah pemanfaatan Internet of Things (IoT) melalui pemasangan sensor ketinggian muka air seperti Automatic Water Level Recorder (AWLR) yang dapat mengirimkan data secara kontinu dan real-time. Teknologi ini memungkinkan pemantauan kondisi hidrologi secara lebih cepat dan akurat dibandingkan metode manual tradisional (Pasika and Gandla, 2020).

Selain itu, perkembangan Artificial Intelligence (AI) dan machine learning semakin banyak dimanfaatkan dalam sistem prediksi banjir. Algoritma yang memanfaatkan data historis curah hujan, debit sungai, dan karakteristik daerah aliran sungai (DAS) mampu menghasilkan prediksi yang lebih akurat mengenai potensi kejadian banjir, sehingga mendukung pengambilan keputusan dalam sistem peringatan dini (Mosavi, Ozturk and Chau, 2018). Pendekatan berbasis

data ini menjadi semakin penting dalam menghadapi ketidakpastian iklim yang semakin tinggi.

Dalam konteks spasial, teknologi penginderaan jauh (remote sensing) dan Geographic Information System (GIS) memainkan peran penting dalam pemetaan wilayah rawan banjir. Pemanfaatan citra satelit, termasuk radar yang mampu menembus tutupan awan, memungkinkan identifikasi genangan banjir dan analisis paparan penduduk secara lebih akurat untuk mendukung mitigasi risiko bencana (Tellman *et al.*, 2021).

Di sisi lain, integrasi big data dan sistem peringatan dini berbasis komunitas (community-based early warning system) semakin memperkuat pendekatan manajemen risiko banjir modern. Data yang diperoleh dari berbagai sumber, termasuk sensor lapangan dan laporan masyarakat melalui aplikasi digital, dapat dimanfaatkan untuk mempercepat penyebaran informasi peringatan dini kepada masyarakat melalui perangkat seluler. Keterlibatan masyarakat dalam sistem peringatan dini terbukti meningkatkan efektivitas komunikasi risiko, kesiapsiagaan, dan respons terhadap ancaman bencana (Sufri *et al.*, 2020).

Dengan demikian, transformasi menuju manajemen risiko banjir berbasis teknologi digital tidak hanya merupakan inovasi teknis, tetapi juga perubahan paradigma dari pendekatan reaktif menuju pendekatan prediktif dan adaptif. Integrasi antara infrastruktur fisik dan sistem digital diharapkan dapat meningkatkan ketahanan wilayah perkotaan dan pedesaan terhadap ancaman banjir yang semakin kompleks di masa depan.

2.8 Kesimpulan

Karakteristik banjir di Indonesia bersifat kompleks, dinamis, dan memiliki variasi spasial yang tinggi antarwilayah. Kondisi ini dipengaruhi oleh kombinasi faktor alamiah, terutama tingginya intensitas curah hujan tropis serta kondisi geomorfologi kepulauan yang beragam, yang menyebabkan respons hidrologi setiap wilayah berbeda-beda. Selain itu, potensi banjir semakin meningkat akibat tekanan antropogenik seperti perubahan tata guna lahan, urbanisasi, serta degradasi lingkungan yang mengurangi kemampuan sistem alami dalam mengatur keseimbangan siklus hidrologi.

Di sisi lain, perkembangan teknologi digital memberikan peluang penting dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan risiko banjir. Integrasi berbagai teknologi seperti sistem pemantauan real-time, pemodelan prediktif, serta sistem peringatan dini berbasis data memungkinkan pergeseran paradigma pengelolaan bencana dari pendekatan yang bersifat reaktif menuju pendekatan yang lebih proaktif dan adaptif. Dengan demikian, transformasi ini menjadi langkah strategis dalam memperkuat ketahanan wilayah dan mendukung pembangunan berkelanjutan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H.Z. *et al.* (2015) "Study on the risk and impacts of land subsidence in Jakarta," *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, pp. 115–120. Available at: <https://doi.org/10.5194/piahs-372-115-2015>.
- Aerts, J.C.J.H. *et al.* (2018) "Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment," *Nature Climate Change*, 8(3), pp. 193–199. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0085-1>.
- Aldrian, E. and Dwi Susanto, R. (2003) "Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature," *International Journal of Climatology*, 23(12), pp. 1435–1452. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.950>.
- Alfieri, L. *et al.* (2017) "Global projections of river flood risk in a warmer world," *Earth's Future*, 5(2), pp. 171–182. Available at: <https://doi.org/10.1002/2016EF000485>.
- Asdak, C. (2023) *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. 8th ed. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) (2023) *Laporan Kinerja BNPB Tahun 2023: Peta Risiko Bencana Hidrometeorologi Indonesia*.
- Baranowski, D.B. *et al.* (2020) "Social-media and newspaper reports reveal large-scale meteorological drivers of floods on Sumatra," *Nature Communications*, 11(1), p. 2503. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16171-2>.

- Bhakta Shrestha, B. *et al.* (2019) "Methodology for Agricultural Flood Damage Assessment," *Recent Advances in Flood Risk Management*. IntechOpen. Available at: <https://doi.org/10.5772/intechopen.81011>.
- Blanc, J. *et al.* (2012) "Enhanced efficiency of pluvial flood risk estimation in urban areas using spatial-temporal rainfall simulations," *Journal of Flood Risk Management*, 5(2), pp. 143–152. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2012.01135.x>.
- Chang, C.P. *et al.* (2005) "Annual cycle of Southeast Asia maritime continent rainfall and the asymmetric monsoon transition," *Journal of Climate*, 18(2), pp. 287–301.
- Chaussard, E. *et al.* (2013) "Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction," *Remote Sensing of Environment*, 128, pp. 150–161. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015>.
- Chow, V.Te., Maidment, D.R. and Mays, L.W.. (2010) *Applied hydrology*. Tata McGraw-Hill Education.
- Church, M. and Jakob, M. (2020) "What Is a Debris Flood?," *Water Resources Research*, 56(8). Available at: <https://doi.org/10.1029/2020WR027144>.
- Devitt, L. *et al.* (2023) "Flood hazard potential reveals global floodplain settlement patterns," *Nature Communications*, 14(1), p. 2801. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38297-9>.
- Fei, G., Wang, X. and Lan, L. (2024) "A review of flash flood hazards influenced by various solid material sources in mountain environment," *Progress in Physical Geography*:

- Earth and Environment*, 48(5–6), pp. 781–800. Available at: <https://doi.org/10.1177/03091333241280626>.
- Fernandez, A. *et al.* (2015) “Flooding and Mental Health: A Systematic Mapping Review,” *PLOS ONE*, 10(4), p. e0119929. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119929>.
- Fletcher, T.D., Andrieu, H. and Hamel, P. (2013) “Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art,” *Advances in Water Resources*, 51, pp. 261–279. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>.
- Gaume, E. *et al.* (2009) “A compilation of data on European flash floods,” *Journal of Hydrology*, 367(1–2), pp. 70–78. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>.
- Geen, R. *et al.* (2020) “Monsoons, ITCZs, and the Concept of the Global Monsoon,” *Reviews of Geophysics*. Blackwell Publishing Ltd. Available at: <https://doi.org/10.1029/2020RG000700>.
- Godara, N., Bruland, O. and Alfredsen, K. (2023) “Simulation of flash flood peaks in a small and steep catchment using rain-on-grid technique,” *Journal of Flood Risk Management*, 16(3). Available at: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12898>.
- Hallegatte, S. (2019) “Disasters’ impacts on supply chains,” *Nature Sustainability*, 2(9), pp. 791–792. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0380-5>.
- Hatmaja, R.B., Rusmanansari, A.H. and Radjawane, I.M. (2019) “The dynamics of negative Indian Ocean Dipole (nIOD) and its relation to the anomalous high rainfall in West

- Java Province, Indonesia,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 303(1), p. 012004. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/303/1/012004>.
- Hidayat, H. *et al.* (2017) “Hydrology of inland tropical lowlands: the Kapuas and Mahakam wetlands,” *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(5), pp. 2579–2594. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-21-2579-2017>.
- Hofmann, J. and Schüttrumpf, H. (2019) “Risk-Based Early Warning System for Pluvial Flash Floods: Approaches and Foundations,” *Geosciences*, 9(3), p. 127. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences9030127>.
- Ibnu Khaldun, M.H. *et al.* (2018) “The Influence of Indian Ocean Dipole (IOD) on The Variability of Sea Surface Temperature and Precipitation in Sumatera Island,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 165, p. 012008. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/165/1/012008>.
- Inoue, H. and Todo, Y. (2019) “Firm-level propagation of shocks through supply-chain networks,” *Nature Sustainability*, 2(9), pp. 841–847. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0351-x>.
- Jongman, B. *et al.* (2015) “Declining vulnerability to river floods and the global benefits of adaptation,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(18). Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1414439112>.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) (2022) *Status Lingkungan Hidup dan Kehutanan Indonesia 2022*. Direktorat Jenderal PDASRH.

- Koks, E.E. *et al.* (2015) "Integrated Direct and Indirect Flood Risk Modeling: Development and Sensitivity Analysis," *Risk Analysis*, 35(5), pp. 882–900. Available at: <https://doi.org/10.1111/risa.12300>.
- Kundzewicz, Z.W. *et al.* (2019) "Flood risk in a range of spatial perspectives – from global to local scales," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(7), pp. 1319–1328. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1319-2019>.
- Kvočka, D., Ahmadian, R. and Falconer, R. (2017) "Flood Inundation Modelling of Flash Floods in Steep River Basins and Catchments," *Water*, 9(9), p. 705. Available at: <https://doi.org/10.3390/w9090705>.
- Lane, S.N. *et al.* (2007) "Interactions between sediment delivery, channel change, climate change and flood risk in a temperate upland environment," *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(3), pp. 429–446. Available at: <https://doi.org/10.1002/esp.1404>.
- Lestari, D.O. *et al.* (2018) "Respective Influences of Indian Ocean Dipole and El Niño-Southern Oscillation on Indonesian Precipitation," *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 50(3), pp. 257–272. Available at: <https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2018.50.3.3>.
- Lowe, D., Ebi, K. and Forsberg, B. (2013) "Factors Increasing Vulnerability to Health Effects before, during and after Floods," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(12), pp. 7015–7067. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph10127015>.
- Majszak, M., Zaki, A. and Wani, O. (2026) "What defines a flood," *Communications Earth and Environment*. Nature

- Publishing Group. Available at:
<https://doi.org/10.1038/s43247-026-03491-2>.
- Marchi, L., Cavalli, M. and D'agostino, V. (2010) *Hydrogeomorphic processes and torrent control works on a large alluvial fan in the eastern Italian Alps*, *Hazards Earth Syst. Sci.* Available at: www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/547/2010/.
- Marfai, M.A., Sekaranom, A.B. and Ward, P. (2015) "Community responses and adaptation strategies toward flood hazard in Jakarta, Indonesia," *Natural Hazards*, 75(2), pp. 1127–1144. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1365-3>.
- Merz, B. *et al.* (2010) "Fluvial flood risk management in a changing world," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(3), pp. 509–527. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-509-2010>.
- Mosavi, A., Ozturk, P. and Chau, K. (2018) "Flood Prediction Using Machine Learning Models: Literature Review," *Water*, 10(11), p. 1536. Available at: <https://doi.org/10.3390/w10111536>.
- Nicholls, R.J. *et al.* (2021) "A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure," *Nature Climate Change*, 11(4), pp. 338–342. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z>.
- Paranjothy, S. *et al.* (2011) "Psychosocial impact of the summer 2007 floods in England," *BMC Public Health*, 11(1), p. 145. Available at: <https://doi.org/10.1186/1471-2458-11-145>.
- Pasika, S. and Gandla, S.T. (2020) "Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT,"

- Heliyon*, 6(7), p. e04096. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04096>.
- Pregnotato, M. *et al.* (2017) "The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, pp. 67–81. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.020>.
- Rayes, M.L. (2017) *Morfologi dan klasifikasi tanah*. Universitas Brawijaya Press.
- Rufat, S. *et al.* (2015) "Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, pp. 470–486. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.09.013>.
- Serinaldi, F. *et al.* (2018) "Flood propagation and duration in large river basins: a data-driven analysis for reinsurance purposes," *Natural Hazards*, 94(1), pp. 71–92. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3374-0>.
- Sidle, R.C. and Ziegler, A.D. (2017) "The canopy interception–landslide initiation conundrum: insight from a tropical secondary forest in northern Thailand," *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), pp. 651–667. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-21-651-2017>.
- Sufri, S. *et al.* (2020) "A systematic review of Community Engagement (CE) in Disaster Early Warning Systems (EWSs)," *Progress in Disaster Science*, 5, p. 100058. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100058>.
- Suripin, S. (2014) *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan*. Andi Offset.

- Tabari, H. (2020) "Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability," *Scientific Reports*, 10(1), p. 13768. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>.
- Tarigan, S.D. (2016) "Land Cover Change and its Impact on Flooding Frequency of Batanghari Watershed, Jambi Province, Indonesia," *Procedia Environmental Sciences*, 33, pp. 386–392. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.089>.
- Tellman, B. *et al.* (2021) "Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods," *Nature*, 596(7870), pp. 80–86. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>.
- Triatmodjo, B. (2013) *Hidrologi Terapan*. Beta Offset.
- Verstappen, H.Th. (2010) "Indonesian Landforms and Plate Tectonics," *Indonesian Journal on Geoscience*, 5(3), pp. 197–207. Available at: <https://doi.org/10.17014/ijog.5.3.197-207>.
- Viglione, A. and Rogger, M. (2015) "Flood Processes and Hazards," *Hydro-Meteorological Hazards, Risks and Disasters*. Elsevier, pp. 3–33. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394846-5.00001-1>.
- Wahl, T. *et al.* (2015) "Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities," *Nature Climate Change*, 5(12), pp. 1093–1097. Available at: <https://doi.org/10.1038/nclimate2736>.
- Watson, J.T., Gayer, M. and Connolly, M.A. (2007) "Epidemics after Natural Disasters," *Emerging Infectious Diseases*, 13(1), pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.3201/eid1301.060779>.

- Zhang, H. *et al.* (2021) "Impacts of Climate Change on Urban Drainage Systems by Future Short-Duration Design Rainstorms," *Water*, 13(19), p. 2718. Available at: <https://doi.org/10.3390/w13192718>.
- Zhou, Q. *et al.* (2019) "Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation," *Science of The Total Environment*, 658, pp. 24–33. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.184>.
- Zope, P.E., Eldho, T.I. and Jothiprakash, V. (2017) "Hydrological impacts of land use–land cover change and detention basins on urban flood hazard: a case study of Poisar River basin, Mumbai, India," *Natural Hazards*, 87(3), pp. 1267–1283. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2816-4>.
- Zscheischler, J. *et al.* (2018) "Future climate risk from compound events," *Nature Climate Change*, 8(6), pp. 469–477. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>.

BAB 3

KONSEP MITIGASI BANJIR BERBASIS TEKNOLOGI

Oleh Margaretha Yuneta

3.1 Pengertian Mitigasi Banjir Berbasis Teknologi

Mitigasi banjir berbasis teknologi merupakan pendekatan sistematis dalam upaya pengurangan risiko banjir yang mengintegrasikan pemanfaatan teknologi informasi, teknologi komunikasi, serta inovasi rekayasa kebencanaan untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan risiko banjir. Pendekatan ini berkembang sebagai respons terhadap meningkatnya kompleksitas permasalahan banjir yang dipengaruhi oleh perubahan iklim, urbanisasi yang cepat, perubahan tata guna lahan, serta degradasi lingkungan. Kondisi tersebut menyebabkan karakteristik banjir menjadi semakin dinamis sehingga diperlukan sistem mitigasi yang lebih adaptif, akurat, dan berbasis data (UNDRR, 2019).

Secara umum, mitigasi banjir merupakan serangkaian tindakan yang dilakukan untuk mengurangi potensi kerugian akibat kejadian banjir, baik terhadap manusia, lingkungan, maupun infrastruktur. Dalam praktiknya, mitigasi dapat dilakukan melalui pendekatan struktural dan non-struktural. Pendekatan struktural meliputi pembangunan infrastruktur pengendali banjir seperti tanggul, waduk, bendungan, kolam

retensi, dan sistem drainase. Sementara itu, pendekatan non-struktural mencakup perencanaan tata ruang, penyusunan regulasi, peningkatan kapasitas masyarakat, serta pengembangan sistem informasi dan peringatan dini. Seiring perkembangan teknologi digital, kedua pendekatan tersebut semakin terintegrasi untuk menghasilkan sistem mitigasi yang lebih efektif dan berkelanjutan (WMO, 2020).

Secara konseptual, mitigasi banjir berbasis teknologi menempatkan data dan informasi sebagai dasar utama dalam proses pengelolaan risiko bencana. Teknologi digunakan untuk mendukung proses pengumpulan data, pemantauan kondisi lapangan, analisis risiko, prediksi kejadian banjir, hingga penyebaran informasi kepada pemangku kepentingan dan masyarakat. Melalui pemanfaatan teknologi, proses identifikasi bahaya (hazard), analisis kerentanan (vulnerability), serta penilaian risiko dapat dilakukan secara lebih cepat, akurat, dan terukur dibandingkan metode konvensional yang banyak bergantung pada pengamatan manual (UNDRR, 2019).

Perkembangan transformasi digital telah mendorong perubahan paradigma mitigasi banjir dari pendekatan yang bersifat reaktif menjadi lebih proaktif dan prediktif. (Aerts et al., 2014; Tehrany et al., 2014). Pada pendekatan konvensional, tindakan sering kali dilakukan setelah banjir terjadi sehingga fokus utama berada pada penanganan dampak dan pemulihan. Sebaliknya, pendekatan berbasis teknologi memungkinkan deteksi dini terhadap potensi ancaman banjir melalui pemantauan kondisi hidrologi dan meteorologi secara berkelanjutan. Dengan demikian, tindakan pencegahan dan kesiapsiagaan dapat dilakukan sebelum

kejadian banjir mencapai tingkat yang merugikan (IPCC, 2021).

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk mendukung mitigasi banjir, antara lain Geographic Information System (GIS), penginderaan jauh (remote sensing), citra satelit, Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), serta Big Data Analytics. GIS memungkinkan pemetaan wilayah rawan banjir secara spasial, sedangkan teknologi IoT memungkinkan pemantauan parameter hidrologi seperti tinggi muka air dan curah hujan secara real-time melalui jaringan sensor otomatis. Di sisi lain, teknologi AI dan analitik data berperan dalam mengolah data historis dan data aktual untuk menghasilkan prediksi banjir yang lebih akurat dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih efektif (Siddique et al., 2023).

Selain meningkatkan kemampuan pemantauan dan prediksi, mitigasi banjir berbasis teknologi juga mendukung penerapan konsep data-driven decision making dalam pengelolaan risiko bencana. Integrasi data dari berbagai sumber memungkinkan pemerintah dan lembaga terkait memperoleh informasi yang lebih komprehensif mengenai kondisi lapangan. Informasi tersebut menjadi dasar dalam penyusunan kebijakan, pengelolaan infrastruktur pengendali banjir, pengembangan sistem peringatan dini, serta penentuan langkah-langkah tanggap darurat yang lebih tepat sasaran (WMO, 2020).

Dengan demikian, mitigasi banjir berbasis teknologi dapat dipahami sebagai suatu pendekatan multidisipliner yang menggabungkan aspek teknik sipil, hidrologi, teknologi informasi, sistem komunikasi, dan manajemen risiko bencana dalam satu sistem yang terintegrasi. Pemanfaatan teknologi

dalam mitigasi banjir juga menjadi bagian penting dalam konsep smart disaster management yang menekankan penggunaan data real-time untuk meningkatkan ketahanan wilayah terhadap bencana hidrometeorologi (Kumar et al., 2022). Pendekatan ini tidak hanya bertujuan untuk mengurangi dampak banjir, tetapi juga meningkatkan ketahanan (resilience) masyarakat dan wilayah terhadap ancaman bencana hidrometeorologi melalui pemanfaatan teknologi digital yang efektif, adaptif, dan berkelanjutan (UNDRR, 2019; IPCC, 2021).

3.2 Tujuan Mitigasi Banjir Berbasis Teknologi

Mitigasi banjir berbasis teknologi bertujuan untuk meningkatkan efektivitas pengurangan risiko bencana melalui pemanfaatan teknologi digital yang terintegrasi dalam seluruh tahapan manajemen risiko bencana, mulai dari identifikasi bahaya, analisis kerentanan, pemantauan kondisi lapangan, prediksi kejadian banjir, penyebaran informasi peringatan dini, hingga pengambilan keputusan dalam penanganan bencana. Dalam konteks perubahan iklim global yang menyebabkan peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian hidrometeorologi ekstrem, penerapan teknologi menjadi salah satu strategi penting dalam meningkatkan kapasitas adaptasi dan ketahanan wilayah terhadap ancaman banjir (IPCC, 2021; Kumar et al., 2022).

Tujuan utama mitigasi banjir berbasis teknologi adalah meningkatkan kemampuan deteksi dini terhadap potensi terjadinya banjir. Sistem pemantauan berbasis teknologi memungkinkan pengumpulan data hidrologi dan meteorologi secara berkelanjutan melalui berbagai perangkat seperti

sensor tinggi muka air, Automatic Rain Gauge (ARG), Automatic Weather Station (AWS), serta perangkat Internet of Things (IoT). Ketersediaan data secara real-time memungkinkan perubahan kondisi sungai, curah hujan, dan parameter lingkungan lainnya dapat diketahui lebih cepat dibandingkan metode pemantauan konvensional. Dengan demikian, potensi ancaman banjir dapat diidentifikasi sejak tahap awal sehingga tindakan pencegahan dan kesiapsiagaan dapat segera dilakukan (WMO, 2020; Abdulkareem et al., 2021).

Selain meningkatkan kemampuan deteksi dini, mitigasi banjir berbasis teknologi juga bertujuan untuk meningkatkan akurasi prediksi dan analisis risiko banjir. Pemanfaatan model hidrologi, model hidraulika, Geographic Information System (GIS), teknologi penginderaan jauh (remote sensing), serta kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) memungkinkan pengolahan data dalam jumlah besar untuk menghasilkan informasi yang lebih akurat mengenai potensi kejadian banjir. Analisis tersebut tidak hanya memberikan informasi mengenai kemungkinan terjadinya banjir, tetapi juga mampu mengidentifikasi luas genangan, kedalaman banjir, wilayah terdampak, serta tingkat risiko yang mungkin ditimbulkan. Informasi ini sangat penting dalam mendukung penyusunan strategi mitigasi yang lebih tepat sasaran dan berbasis bukti ilmiah (Mosavi et al., 2018; Siddique et al., 2023).

Tujuan berikutnya adalah memperkuat sistem peringatan dini (*Early Warning System/EWS*) sebagai salah satu instrumen utama dalam pengurangan risiko bencana. Sistem peringatan dini berbasis teknologi memungkinkan penyebaran informasi secara cepat dan luas kepada masyarakat melalui berbagai media komunikasi seperti

aplikasi mobile, pesan singkat (SMS), media sosial, dashboard kebencanaan, maupun sirine otomatis. Kecepatan penyampaian informasi tersebut memberikan waktu yang lebih cukup bagi masyarakat untuk melakukan tindakan kesiapsiagaan dan evakuasi sebelum banjir terjadi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa efektivitas sistem peringatan dini berkontribusi secara signifikan terhadap pengurangan korban jiwa dan kerugian akibat bencana banjir (UNDRR, 2019; Krzhizhanovskaya et al., 2011).

Mitigasi banjir berbasis teknologi juga bertujuan untuk meningkatkan kualitas pengambilan keputusan dalam pengelolaan risiko bencana. Konsep *data-driven decision making* memungkinkan keputusan yang diambil oleh pemerintah dan lembaga terkait didasarkan pada data aktual dan hasil analisis yang objektif. Integrasi data dari berbagai sumber, seperti sensor lapangan, citra satelit, data prakiraan cuaca, dan model prediksi banjir menghasilkan sistem informasi yang lebih komprehensif dan mampu memberikan gambaran kondisi lapangan secara menyeluruh. Dengan dukungan informasi tersebut, pemerintah dapat menentukan prioritas penanganan, mengoptimalkan pengelolaan infrastruktur pengendali banjir, serta merumuskan kebijakan mitigasi yang lebih efektif dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan (WMO, 2020; Dawson et al., 2011).

Lebih lanjut, tujuan penting lainnya adalah mengurangi dampak kerugian yang ditimbulkan oleh bencana banjir, baik dari aspek sosial, ekonomi, maupun lingkungan. Banjir sering menyebabkan kerusakan permukiman, infrastruktur transportasi, fasilitas publik, lahan pertanian, serta terganggunya aktivitas ekonomi masyarakat. Dengan adanya sistem pemantauan dan peringatan dini yang akurat, tindakan

antisipatif dapat dilakukan lebih awal sehingga kerugian yang ditimbulkan dapat diminimalkan. Pengurangan risiko tersebut tidak hanya berdampak pada keselamatan masyarakat, tetapi juga mendukung keberlanjutan pembangunan wilayah dalam jangka panjang (Aerts et al., 2014; IPCC, 2021).

Di samping itu, mitigasi banjir berbasis teknologi bertujuan untuk meningkatkan koordinasi antarinstansi dalam pengelolaan bencana. Sistem informasi yang terintegrasi memungkinkan berbagai lembaga, seperti badan penanggulangan bencana, instansi sumber daya air, pemerintah daerah, lembaga meteorologi, dan organisasi kemanusiaan memperoleh akses terhadap data dan informasi yang sama secara bersamaan. Integrasi ini mendukung terciptanya koordinasi yang lebih efektif dalam proses perencanaan, respons darurat, maupun pemulihan pascabencana. Dengan demikian, penanganan bencana dapat dilakukan secara lebih cepat, terkoordinasi, dan efisien (UNDRR, 2019; Aitsi-Selmi et al., 2016).

Dalam perspektif pembangunan berkelanjutan, mitigasi banjir berbasis teknologi juga bertujuan untuk memperkuat ketahanan wilayah (*resilience*) terhadap ancaman bencana hidrometeorologi. Ketahanan wilayah tidak hanya ditentukan oleh keberadaan infrastruktur fisik, tetapi juga oleh kemampuan sistem informasi dalam menyediakan data yang akurat untuk mendukung pengambilan keputusan. Melalui pemanfaatan teknologi digital, pemerintah dan masyarakat dapat meningkatkan kapasitas adaptasi terhadap perubahan iklim, mengurangi tingkat kerentanan, serta memperkuat kemampuan pemulihan setelah terjadinya bencana (IPCC, 2021; Kumar et al., 2022).

Selain itu, mitigasi banjir berbasis teknologi juga bertujuan untuk mendukung terwujudnya konsep *smart disaster management*, yaitu pengelolaan bencana yang memanfaatkan teknologi informasi, sistem komunikasi, analisis data, dan kecerdasan buatan dalam mendukung seluruh siklus manajemen bencana. Konsep ini menekankan pentingnya penggunaan data real-time dan sistem informasi terintegrasi untuk meningkatkan efektivitas mitigasi, kesiapsiagaan, tanggap darurat, serta rehabilitasi dan rekonstruksi pascabencana. Dengan penerapan konsep tersebut, pengelolaan risiko banjir dapat dilakukan secara lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan (Kumar et al., 2022; UNDRR, 2019).

3.3 Prinsip Mitigasi Banjir Berbasis Teknologi

- Mitigasi banjir berbasis teknologi dikembangkan berdasarkan sejumlah prinsip dasar yang menjadi landasan dalam perencanaan, implementasi, pengoperasian, dan pengembangan sistem pengurangan risiko bencana yang efektif, adaptif, dan berkelanjutan. Prinsip-prinsip tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa teknologi yang digunakan tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga mampu mendukung proses analisis, prediksi, komunikasi risiko, serta pengambilan keputusan yang lebih cepat, akurat, dan terkoordinasi. Dalam konteks manajemen risiko bencana modern, penerapan prinsip-prinsip ini menjadi sangat penting untuk mewujudkan sistem mitigasi yang mampu merespons dinamika lingkungan, perubahan iklim, dan

perkembangan wilayah yang semakin kompleks (UNDRR, 2019; IPCC, 2021).

- Prinsip-prinsip mitigasi banjir berbasis teknologi pada dasarnya sejalan dengan konsep *smart disaster management*, yaitu pengelolaan bencana yang memanfaatkan teknologi informasi, sistem komunikasi, analisis data, dan kecerdasan buatan untuk mendukung seluruh siklus manajemen bencana. Melalui penerapan prinsip-prinsip tersebut, sistem mitigasi diharapkan mampu meningkatkan efektivitas pengurangan risiko banjir sekaligus memperkuat ketahanan wilayah terhadap ancaman bencana hidrometeorologi (Kumar et al., 2022).

3.3.1 Prinsip Integrasi Data

- Prinsip integrasi data merupakan fondasi utama dalam mitigasi banjir berbasis teknologi. Prinsip ini menekankan pentingnya penggabungan berbagai jenis data yang berasal dari sumber yang berbeda ke dalam satu sistem informasi yang terintegrasi. Data tersebut meliputi data hidrologi seperti debit sungai, tinggi muka air, dan kapasitas saluran, data meteorologi seperti curah hujan, kelembapan udara, temperatur, dan prakiraan cuaca, serta data spasial seperti topografi, penggunaan lahan, tutupan vegetasi, dan karakteristik daerah aliran sungai (DAS) (WMO, 2020).
- Integrasi data memungkinkan berbagai informasi yang sebelumnya tersebar pada instansi, platform, dan format yang berbeda dapat dikonsolidasikan menjadi satu basis data yang komprehensif. Dengan demikian, proses analisis risiko banjir dapat dilakukan secara lebih

menyeluruh karena seluruh faktor yang memengaruhi kejadian banjir dapat dipertimbangkan secara simultan. Sebagai contoh, peningkatan curah hujan dapat dianalisis bersama dengan kondisi tata guna lahan, kapasitas drainase, dan karakteristik DAS untuk menghasilkan estimasi risiko yang lebih akurat (Tehrany et al., 2014).

- Selain meningkatkan kualitas analisis, prinsip integrasi data juga mendukung penerapan konsep *data-driven decision making*, yaitu pengambilan keputusan yang didasarkan pada data aktual dan hasil analisis ilmiah. Pendekatan ini memungkinkan kebijakan mitigasi yang diambil lebih objektif, terukur, dan sesuai dengan kondisi lapangan sehingga dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan risiko banjir (WMO, 2020; Dawson et al., 2011).

3.3.2 Prinsip Pemantauan Secara Real-Time (Real-Time Monitoring)

- Prinsip berikutnya adalah pemantauan secara real-time, yaitu kemampuan sistem untuk mengamati, merekam, dan menyampaikan perubahan kondisi lapangan secara langsung dan berkelanjutan. Prinsip ini diwujudkan melalui pemanfaatan berbagai perangkat sensor otomatis seperti sensor tinggi muka air, Automatic Rain Gauge (ARG), Automatic Weather Station (AWS), kamera pemantauan, serta perangkat Internet of Things (IoT) yang mampu mengirimkan data secara langsung ke pusat pengendalian atau pusat data (UNDRR, 2019; Abdulkareem et al., 2021).
- Pemantauan secara real-time memiliki peran yang sangat penting dalam meningkatkan kecepatan respons

terhadap potensi kejadian banjir. Informasi yang diperoleh secara langsung memungkinkan perubahan kondisi hidrologi dapat segera terdeteksi sehingga tindakan mitigasi dapat dilakukan sebelum kondisi berkembang menjadi lebih kritis. Kecepatan akses terhadap informasi ini sangat menentukan keberhasilan sistem peringatan dini dalam memberikan waktu yang cukup bagi pemerintah dan masyarakat untuk melakukan tindakan kesiapsiagaan maupun evakuasi (Krzhezhanovskaya et al., 2011).

- Selain itu, sistem pemantauan real-time mampu meningkatkan akurasi data yang digunakan dalam proses analisis dan prediksi banjir. Berbeda dengan metode pemantauan konvensional yang mengandalkan pencatatan manual dan memiliki keterbatasan waktu maupun cakupan wilayah, sistem berbasis teknologi memungkinkan pengumpulan data dilakukan secara otomatis selama 24 jam tanpa jeda. Dengan demikian, kondisi lapangan dapat dipantau secara berkelanjutan sehingga meningkatkan kesiapsiagaan terhadap ancaman banjir yang dapat terjadi sewaktu-waktu (WMO, 2020).

3.3.3 Prinsip Prediktif (Predictive Approach)

- Prinsip prediktif merupakan prinsip yang menekankan kemampuan sistem untuk memperkirakan kemungkinan terjadinya banjir sebelum kejadian berlangsung. Pendekatan ini didasarkan pada analisis data historis, data real-time, model hidrologi, model hidraulika, serta teknologi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dan *machine learning*. Melalui

pendekatan prediktif, sistem tidak hanya memberikan informasi mengenai kondisi saat ini, tetapi juga mampu memproyeksikan kondisi yang mungkin terjadi pada masa mendatang (Siddique et al., 2023).

- Penerapan prinsip prediktif memungkinkan identifikasi wilayah yang berpotensi mengalami genangan, estimasi waktu kedatangan banjir, prediksi tinggi muka air, serta perkiraan tingkat keparahan dampak yang mungkin terjadi. Informasi tersebut sangat penting dalam mendukung proses mitigasi karena memberikan kesempatan bagi pemerintah dan masyarakat untuk melakukan langkah-langkah pencegahan sebelum risiko berkembang menjadi bencana yang lebih besar. Dengan demikian, paradigma mitigasi berubah dari pendekatan yang bersifat reaktif menjadi lebih proaktif dan antisipatif (Mosavi et al., 2018).
- Kemajuan teknologi komputasi dan kecerdasan buatan semakin meningkatkan kemampuan sistem prediksi banjir. Algoritma *machine learning* mampu mengidentifikasi pola hubungan yang kompleks antara curah hujan, debit sungai, perubahan tata guna lahan, dan faktor lingkungan lainnya untuk menghasilkan prediksi yang lebih akurat dibandingkan metode konvensional. Oleh karena itu, prinsip prediktif menjadi salah satu elemen kunci dalam pengembangan sistem mitigasi banjir modern yang berbasis data dan teknologi digital (Siddique et al., 2023).

3.3.4 Prinsip Kolaboratif dan Terintegrasi

- Mitigasi banjir berbasis teknologi tidak dapat berjalan secara efektif tanpa adanya kolaborasi antara berbagai

pemangku kepentingan. Oleh karena itu, prinsip kolaboratif menjadi salah satu dasar penting dalam pengembangan sistem mitigasi yang berkelanjutan. Prinsip ini menekankan pentingnya keterlibatan pemerintah, lembaga penelitian, akademisi, sektor swasta, organisasi masyarakat, dan masyarakat umum dalam proses pengumpulan data, pengelolaan informasi, penyusunan kebijakan, hingga pelaksanaan tindakan mitigasi (IPCC, 2021).

- Kolaborasi diperlukan karena pengelolaan risiko banjir merupakan permasalahan multidimensional yang melibatkan berbagai aspek teknis, sosial, ekonomi, dan lingkungan. Pemerintah berperan dalam penyusunan kebijakan dan penyediaan infrastruktur, akademisi berkontribusi dalam pengembangan metode analisis dan inovasi teknologi, sektor swasta mendukung penyediaan teknologi dan pendanaan, sedangkan masyarakat berperan sebagai pengguna informasi sekaligus pihak yang terdampak langsung oleh bencana. Sinergi antar pihak tersebut akan meningkatkan kualitas data, efektivitas sistem peringatan dini, serta keberhasilan implementasi program mitigasi di lapangan (Aitsi-Selmi et al., 2016).
- Selain aspek kolaborasi kelembagaan, prinsip ini juga menekankan pentingnya interoperabilitas sistem informasi, yaitu kemampuan berbagai platform dan aplikasi untuk saling bertukar data dan informasi secara otomatis. Integrasi antar sistem memungkinkan proses pengambilan keputusan dilakukan secara lebih cepat dan terkoordinasi sehingga respons terhadap ancaman

banjir dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien (UNDRR, 2019).

3.3.5 Prinsip Keberlanjutan (Sustainability)

- Selain prinsip-prinsip di atas, mitigasi banjir berbasis teknologi juga harus menerapkan prinsip keberlanjutan (*sustainability*). Sistem yang dikembangkan tidak hanya ditujukan untuk menjawab kebutuhan jangka pendek, tetapi juga harus mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan, perkembangan teknologi, dinamika sosial masyarakat, serta tantangan perubahan iklim di masa mendatang. Oleh karena itu, keberlanjutan menjadi faktor penting dalam menjamin efektivitas sistem mitigasi dalam jangka panjang (IPCC, 2021).
- Prinsip keberlanjutan mencakup berbagai aspek, seperti pemeliharaan infrastruktur dan perangkat teknologi, peningkatan kapasitas sumber daya manusia, pembaruan sistem dan perangkat lunak, keberlanjutan pendanaan, serta penguatan kelembagaan yang bertanggung jawab terhadap operasional sistem. Tanpa adanya dukungan terhadap aspek-aspek tersebut, sistem mitigasi berpotensi mengalami penurunan kinerja sehingga tidak mampu memberikan manfaat secara optimal (Kumar et al., 2022).
- Penerapan prinsip keberlanjutan juga mendukung upaya pembangunan wilayah yang tangguh terhadap bencana (*disaster-resilient development*). Dengan sistem mitigasi yang berkelanjutan, pemerintah dan masyarakat dapat meningkatkan kapasitas adaptasi terhadap perubahan iklim, memperkuat ketahanan

infrastruktur, serta mengurangi tingkat kerentanan terhadap ancaman banjir di masa depan (IPCC, 2021).

Berdasarkan uraian tersebut, dapat dipahami bahwa mitigasi banjir berbasis teknologi dibangun atas prinsip integrasi data, pemantauan real-time, pendekatan prediktif, kolaborasi multipihak, dan keberlanjutan sistem. Penerapan prinsip-prinsip tersebut menjadi landasan penting dalam mewujudkan sistem pengurangan risiko banjir yang modern, efektif, adaptif, dan mampu mendukung peningkatan ketahanan wilayah terhadap bencana hidrometeorologi secara berkelanjutan.

3.4 Komponen Sistem Mitigasi Banjir Berbasis Teknologi

Sistem mitigasi banjir berbasis teknologi merupakan suatu sistem terintegrasi yang terdiri atas berbagai komponen yang saling berhubungan dan bekerja secara berkesinambungan untuk mendukung proses pengurangan risiko banjir. Sistem ini dirancang untuk mengubah data yang diperoleh dari lapangan menjadi informasi yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam mitigasi dan penanggulangan bencana. Dalam sistem modern, setiap komponen memiliki fungsi yang berbeda namun saling melengkapi, mulai dari proses pengumpulan data, pengolahan informasi, analisis risiko, pengambilan keputusan, hingga penyampaian peringatan kepada masyarakat. Integrasi antar komponen tersebut menjadi faktor penting dalam

mewujudkan sistem mitigasi yang responsif, akurat, dan berbasis data (UNDRR, 2019).

Secara umum, sistem mitigasi banjir berbasis teknologi terdiri atas empat komponen utama, yaitu Data Acquisition System, Data Processing System, Decision Support System, dan Early Warning System. Keempat komponen tersebut membentuk suatu alur informasi yang berkesinambungan sehingga memungkinkan proses mitigasi dilakukan secara lebih efektif dibandingkan pendekatan konvensional yang mengandalkan pengamatan manual dan pelaporan secara bertahap.

3.4.1 Data Acquisition System (Sistem Akuisisi Data)

- Data Acquisition System merupakan komponen awal yang berfungsi sebagai sumber utama dalam penyediaan data bagi seluruh sistem mitigasi banjir. Komponen ini bertugas mengumpulkan berbagai data hidrologi, meteorologi, dan lingkungan secara langsung dari lapangan melalui jaringan perangkat pemantauan otomatis. Kualitas informasi yang dihasilkan oleh sistem mitigasi sangat bergantung pada kualitas data yang diperoleh pada tahap ini, sehingga Data Acquisition System sering disebut sebagai fondasi utama dalam sistem mitigasi berbasis teknologi (WMO, 2020).
- Pengumpulan data dilakukan menggunakan berbagai instrumen seperti sensor tinggi muka air sungai, Automatic Rain Gauge (ARG), Automatic Weather Station (AWS), sensor kelembapan tanah, kamera pemantau sungai, serta perangkat Internet of Things (IoT) yang mampu mengirimkan data secara otomatis ke pusat pengolahan data. Data yang dikumpulkan meliputi curah

hujan, tinggi muka air, debit aliran sungai, kecepatan aliran, kondisi cuaca, serta parameter lingkungan lainnya yang berpengaruh terhadap potensi terjadinya banjir.

- Perkembangan teknologi komunikasi memungkinkan data yang diperoleh dari lapangan dapat dikirimkan secara real-time melalui jaringan internet, radio telemetri, maupun komunikasi seluler. Kemampuan ini sangat penting karena perubahan kondisi hidrologi sering terjadi dalam waktu yang relatif singkat, terutama pada wilayah dengan karakteristik curah hujan tinggi. Oleh karena itu, keberadaan sistem akuisisi data yang andal menjadi syarat utama dalam pengembangan sistem mitigasi banjir yang efektif (WMO, 2020).
- Selain mendukung pemantauan kondisi aktual, data yang dikumpulkan juga menjadi sumber informasi historis yang dapat digunakan dalam pengembangan model prediksi banjir. Semakin lengkap dan akurat data yang tersedia, semakin tinggi tingkat keandalan analisis risiko dan prediksi yang dihasilkan oleh sistem.

3.4.2 Data Processing System (Sistem Pengolahan Data)

- Setelah data diperoleh dari lapangan, tahap berikutnya adalah proses pengolahan data melalui Data Processing System. Komponen ini berfungsi untuk mengubah data mentah menjadi informasi yang memiliki nilai analitis dan dapat digunakan dalam proses pengambilan keputusan. Pada tahap ini dilakukan berbagai proses seperti validasi data, penyaringan data yang tidak relevan, integrasi data dari berbagai sumber, serta analisis menggunakan

metode statistik maupun model komputasi (Siddique et al., 2023).

- Dalam sistem mitigasi modern, Data Processing System umumnya didukung oleh teknologi cloud computing, big data analytics, dan basis data terintegrasi yang mampu mengelola data dalam jumlah besar secara cepat dan efisien. Penggunaan teknologi tersebut memungkinkan data yang berasal dari berbagai lokasi pemantauan dapat diolah secara simultan dan menghasilkan informasi secara real-time.
- Selain pengolahan data dasar, sistem ini juga berfungsi menjalankan berbagai model hidrologi dan hidraulika untuk memperkirakan potensi banjir pada suatu wilayah. Hasil pengolahan dapat berupa prediksi debit sungai, estimasi tinggi genangan, luas wilayah terdampak, hingga waktu kedatangan banjir pada lokasi tertentu. Informasi tersebut menjadi dasar dalam penyusunan strategi mitigasi dan respons bencana yang lebih efektif.
- Perkembangan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) dan machine learning semakin meningkatkan kemampuan sistem pengolahan data dalam mengidentifikasi pola-pola kejadian banjir berdasarkan data historis dan kondisi aktual. Dengan demikian, sistem tidak hanya mampu menggambarkan kondisi saat ini, tetapi juga mampu memprediksi kemungkinan kondisi yang akan terjadi di masa mendatang (Siddique et al., 2023).

3.4.3 Decision Support System (DSS)

- Decision Support System (DSS) merupakan komponen yang berfungsi mendukung proses pengambilan keputusan dalam pengelolaan risiko banjir. DSS berperan sebagai penghubung antara hasil analisis data dengan tindakan yang harus dilakukan oleh pengambil kebijakan. Dalam sistem mitigasi berbasis teknologi, pengambilan keputusan tidak lagi sepenuhnya bergantung pada intuisi atau pengalaman, tetapi didukung oleh data dan hasil analisis yang objektif (IPCC, 2021).
- Sistem ini mengintegrasikan berbagai informasi yang diperoleh dari proses pengolahan data untuk menghasilkan rekomendasi tindakan yang sesuai dengan kondisi lapangan. Rekomendasi tersebut dapat berupa aktivasi sistem peringatan dini, pengaturan operasi pintu air, pengelolaan waduk dan bendungan, penutupan akses pada wilayah berisiko tinggi, hingga pelaksanaan evakuasi masyarakat.
- Keunggulan DSS terletak pada kemampuannya menyajikan informasi dalam bentuk yang mudah dipahami oleh pengambil keputusan. Informasi biasanya disajikan melalui dashboard digital, peta interaktif, grafik tren hidrologi, maupun simulasi skenario banjir. Dengan adanya visualisasi tersebut, proses pengambilan keputusan dapat dilakukan secara lebih cepat, tepat, dan terukur.
- Dalam konteks manajemen risiko bencana, DSS berperan penting dalam mengurangi ketidakpastian yang sering muncul ketika menghadapi situasi darurat. Sistem ini membantu pemerintah dan lembaga terkait

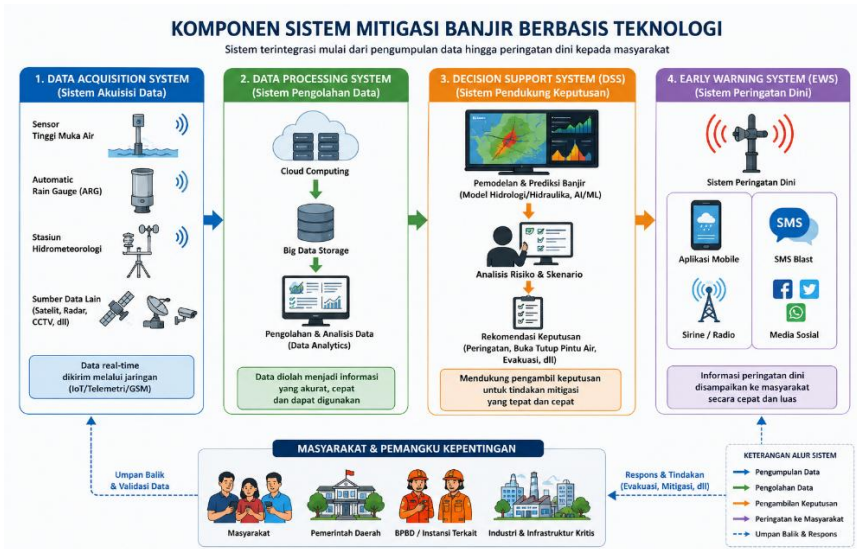
menentukan tindakan yang paling efektif berdasarkan kondisi aktual dan hasil prediksi yang tersedia (IPCC, 2021).

3.4.4 Early Warning System (EWS)

- Early Warning System (EWS) merupakan komponen akhir dalam sistem mitigasi banjir berbasis teknologi yang berfungsi menyampaikan informasi peringatan dini kepada masyarakat dan pemangku kepentingan. Sistem ini menjadi jembatan antara hasil analisis teknis dengan tindakan nyata yang dilakukan oleh masyarakat dalam menghadapi ancaman banjir. Oleh karena itu, keberhasilan mitigasi sering kali ditentukan oleh efektivitas sistem peringatan dini yang digunakan (UNDRR, 2019).
- EWS bekerja dengan memanfaatkan informasi yang dihasilkan oleh Data Processing System dan Decision Support System untuk menentukan tingkat ancaman banjir yang sedang terjadi. Apabila parameter tertentu telah mencapai ambang batas yang ditetapkan, sistem secara otomatis mengirimkan peringatan kepada pihak terkait dan masyarakat yang berada pada wilayah berisiko.
- Penyebaran informasi dapat dilakukan melalui berbagai media komunikasi seperti aplikasi mobile, pesan singkat (SMS), media sosial, dashboard kebencanaan, radio komunikasi, maupun sirine peringatan yang dipasang pada lokasi strategis. Pemanfaatan berbagai saluran komunikasi bertujuan untuk memastikan informasi dapat diterima secara cepat oleh seluruh lapisan masyarakat.

- Keberadaan EWS memberikan waktu yang cukup bagi masyarakat untuk melakukan tindakan antisipatif seperti memindahkan barang berharga, mengamankan aset penting, dan melakukan evakuasi menuju lokasi yang lebih aman. Dengan demikian, sistem peringatan dini berperan langsung dalam mengurangi jumlah korban jiwa, meminimalkan kerugian ekonomi, dan meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat terhadap ancaman banjir (UNDRR, 2019).

Secara keseluruhan, keempat komponen tersebut membentuk suatu sistem yang saling terintegrasi dan tidak dapat dipisahkan satu sama lain. Data Acquisition System menyediakan data, Data Processing System mengolah data menjadi informasi, Decision Support System menghasilkan rekomendasi tindakan, dan Early Warning System menyampaikan informasi kepada masyarakat. Integrasi yang baik antar komponen menjadi kunci utama dalam mewujudkan sistem mitigasi banjir berbasis teknologi yang efektif, adaptif, dan mampu mendukung pengurangan risiko bencana secara berkelanjutan.



Gambar 3. 1 Komponen Sistem Mitigasi Banjir berbasis Teknologi

(Sumber : Penulis, 2026)

3.5 Integrasi Teknologi dalam Mitigasi Banjir

Integrasi teknologi merupakan salah satu elemen fundamental dalam pengembangan sistem mitigasi banjir modern yang efektif, adaptif, dan berbasis data. Konsep integrasi teknologi mengacu pada penggabungan berbagai perangkat, sistem informasi, metode analisis, dan teknologi digital ke dalam suatu platform yang saling terhubung untuk mendukung seluruh proses pengelolaan risiko banjir. Melalui integrasi tersebut, proses pemantauan, analisis, prediksi, pengambilan keputusan, dan penyebaran informasi dapat dilakukan secara lebih cepat, akurat, dan efisien dibandingkan

pendekatan konvensional yang masih bersifat sektoral dan terpisah-pisah (UNDRR, 2019).

Perkembangan teknologi digital telah mengubah paradigma mitigasi banjir dari pendekatan yang berorientasi pada respons pascabencana menjadi pendekatan yang lebih proaktif dan antisipatif. Dalam sistem mitigasi modern, teknologi tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu pengumpulan data, tetapi juga menjadi bagian integral dalam proses analisis risiko dan pengambilan keputusan. Integrasi berbagai teknologi memungkinkan terbentuknya suatu sistem yang mampu mengidentifikasi potensi ancaman banjir sejak dini, memprediksi perkembangan kondisi hidrologi, serta memberikan informasi yang diperlukan untuk mendukung tindakan mitigasi yang tepat waktu (IPCC, 2021).

Salah satu teknologi yang memiliki peran penting dalam mitigasi banjir adalah Geographic Information System (GIS). GIS merupakan sistem berbasis komputer yang digunakan untuk mengumpulkan, menyimpan, mengelola, menganalisis, dan menampilkan data yang memiliki referensi geografis. Dalam mitigasi banjir, GIS dimanfaatkan untuk memetakan wilayah rawan banjir berdasarkan berbagai parameter seperti topografi, kemiringan lahan, penggunaan lahan, jaringan sungai, curah hujan, serta riwayat kejadian banjir. Melalui analisis spasial yang dilakukan oleh GIS, informasi risiko banjir dapat divisualisasikan dalam bentuk peta yang mudah dipahami oleh pengambil kebijakan maupun masyarakat (WMO, 2020).

Pemanfaatan GIS memungkinkan identifikasi wilayah dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap banjir sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan tata ruang, pembangunan infrastruktur pengendali banjir, serta

penyusunan strategi mitigasi. Selain itu, GIS juga mendukung proses simulasi dan pemodelan genangan banjir yang dapat digunakan untuk memperkirakan luas wilayah terdampak dan jumlah populasi yang berisiko. Oleh karena itu, GIS menjadi salah satu instrumen utama dalam mendukung pengambilan keputusan yang berbasis data spasial dan risiko (UNDRR, 2019).

Selain GIS, integrasi teknologi dalam mitigasi banjir juga diwujudkan melalui penerapan Internet of Things (IoT). Teknologi IoT memungkinkan berbagai perangkat sensor yang ditempatkan pada sungai, saluran drainase, waduk, maupun wilayah tangkapan air untuk saling terhubung dan berkomunikasi melalui jaringan internet. Sensor-sensor tersebut berfungsi untuk memantau parameter hidrologi dan meteorologi seperti tinggi muka air, debit sungai, intensitas curah hujan, kelembapan tanah, serta kondisi cuaca secara otomatis dan berkelanjutan (WMO, 2020).

Keunggulan utama teknologi IoT terletak pada kemampuannya menghasilkan data secara real-time. Data yang diperoleh dari lapangan dapat langsung dikirimkan ke pusat pengendalian tanpa memerlukan proses pengumpulan secara manual. Dengan demikian, perubahan kondisi hidrologi dapat diketahui secara cepat sehingga potensi banjir dapat diidentifikasi lebih awal. Kemampuan pemantauan secara real-time ini sangat penting dalam meningkatkan efektivitas sistem peringatan dini dan mendukung pengambilan keputusan yang responsif terhadap kondisi lapangan yang terus berubah (UNDRR, 2019).

Teknologi lain yang semakin banyak digunakan dalam mitigasi banjir adalah penginderaan jauh (remote sensing) dan citra satelit. Teknologi ini memungkinkan pengamatan

kondisi wilayah dalam cakupan yang luas tanpa harus melakukan survei langsung di lapangan. Data citra satelit dapat digunakan untuk memantau perubahan tutupan lahan, perkembangan kawasan perkotaan, kondisi daerah aliran sungai (DAS), serta luas genangan banjir saat kejadian berlangsung. Informasi tersebut sangat berguna dalam proses identifikasi risiko, evaluasi dampak bencana, dan penyusunan strategi mitigasi jangka panjang (IPCC, 2021).

Seiring perkembangan teknologi komputasi, pemanfaatan Artificial Intelligence (AI) dan machine learning juga menjadi bagian penting dalam sistem mitigasi banjir berbasis teknologi. AI memungkinkan sistem untuk mempelajari pola hubungan antara berbagai variabel yang memengaruhi terjadinya banjir, seperti curah hujan, debit sungai, penggunaan lahan, kondisi topografi, dan faktor klimatologi lainnya. Berdasarkan pola tersebut, sistem dapat menghasilkan model prediksi yang mampu memperkirakan kemungkinan terjadinya banjir dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional (Siddique et al., 2023).

Machine learning juga memungkinkan sistem untuk terus meningkatkan kemampuan prediksinya seiring bertambahnya data yang tersedia. Semakin banyak data historis dan data real-time yang dianalisis, semakin baik kemampuan sistem dalam mengenali pola dan memberikan proyeksi kondisi di masa mendatang. Dengan demikian, teknologi AI tidak hanya mendukung proses prediksi banjir, tetapi juga membantu pemerintah dalam merumuskan strategi mitigasi yang lebih efektif dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan (Siddique et al., 2023).

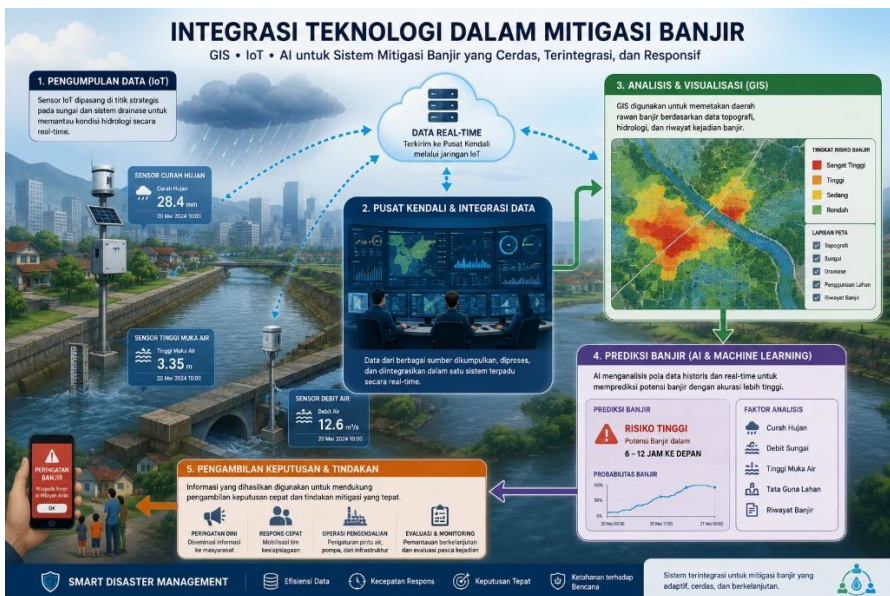
Integrasi teknologi juga didukung oleh pemanfaatan cloud computing dan big data analytics yang memungkinkan pengelolaan data dalam jumlah besar secara cepat dan efisien. Dalam sistem mitigasi banjir modern, data yang diperoleh dari sensor lapangan, citra satelit, sistem informasi geografis, dan model prediksi harus diolah secara bersamaan untuk menghasilkan informasi yang komprehensif. Teknologi cloud computing menyediakan kapasitas penyimpanan dan komputasi yang memadai, sedangkan big data analytics memungkinkan analisis data dilakukan dalam waktu yang relatif singkat meskipun volume data sangat besar (Siddique et al., 2023).

Kombinasi antara GIS, IoT, remote sensing, AI, cloud computing, dan big data analytics membentuk suatu ekosistem mitigasi banjir yang terintegrasi. Dalam ekosistem tersebut, data dikumpulkan dari berbagai sumber, diproses secara otomatis, dianalisis menggunakan model prediksi, kemudian disajikan dalam bentuk informasi yang mendukung pengambilan keputusan. Integrasi ini memungkinkan terbentuknya sistem mitigasi yang tidak hanya mampu merespons kejadian banjir, tetapi juga mampu mengantisipasi potensi bencana sebelum terjadi.

Lebih jauh lagi, integrasi teknologi mendukung implementasi konsep smart disaster management, yaitu pendekatan pengelolaan bencana yang memanfaatkan teknologi digital untuk meningkatkan efektivitas pengurangan risiko bencana. Konsep ini menekankan pentingnya pemanfaatan data real-time, sistem informasi terintegrasi, dan teknologi analitik untuk mendukung pengambilan keputusan yang cepat dan berbasis bukti. Dalam konteks mitigasi banjir, smart disaster management

memungkinkan pemerintah dan pemangku kepentingan untuk meningkatkan kesiapsiagaan, mempercepat respons darurat, serta memperkuat ketahanan wilayah terhadap ancaman bencana hidrometeorologi (UNDRR, 2019).

Dengan demikian, integrasi teknologi dalam mitigasi banjir tidak hanya berfungsi sebagai sarana pendukung operasional, tetapi telah menjadi komponen strategis dalam pengelolaan risiko bencana modern. Melalui pemanfaatan berbagai teknologi yang saling terhubung, sistem mitigasi banjir dapat berjalan secara lebih efektif, akurat, dan berkelanjutan sehingga mampu mendukung upaya pengurangan risiko serta peningkatan ketahanan masyarakat terhadap ancaman banjir di masa depan (IPCC, 2021).



Gambar 3. 2 Integrasi Teknologi dalam Mitigasi Banjir

(Sumber : Penulis, 2026)

3.6 Peran Mitigasi Berbasis Teknologi dalam Manajemen Risiko Banjir

Mitigasi berbasis teknologi memiliki peran strategis dalam keseluruhan siklus manajemen risiko bencana banjir yang mencakup fase pra-bencana, saat bencana, dan pasca-bencana. Integrasi teknologi digital dalam setiap fase tersebut memungkinkan peningkatan efektivitas pengambilan keputusan yang lebih cepat, akurat, dan berbasis data.

Pada fase pra-bencana, pemanfaatan teknologi difokuskan pada kegiatan identifikasi dan analisis risiko melalui pemetaan wilayah rawan banjir, analisis tingkat kerentanan, serta perencanaan tata ruang berbasis data spasial dan historis. Teknologi seperti Geographic Information System (GIS) dan model hidrologi digital berperan penting dalam menghasilkan informasi risiko yang komprehensif sebagai dasar mitigasi struktural maupun non-struktural.

Pada fase saat bencana, sistem berbasis sensor dan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan pemantauan kondisi hidrologi secara real-time. Informasi seperti tinggi muka air, intensitas curah hujan, dan kondisi aliran sungai dapat dipantau secara kontinu dan dikirimkan ke pusat kendali. Selanjutnya, sistem peringatan dini (early warning system) memberikan informasi cepat kepada pemerintah dan masyarakat sehingga proses evakuasi dapat dilakukan secara lebih efektif dan tepat waktu.

Pada fase pasca-bencana, teknologi berperan dalam mendukung proses penilaian dampak (damage assessment),

pemetaan kerusakan infrastruktur, serta perencanaan rehabilitasi dan rekonstruksi wilayah terdampak. Pemanfaatan citra satelit, drone, serta analisis data spasial memungkinkan evaluasi kerusakan dilakukan secara lebih cepat dan akurat.

Secara keseluruhan, penerapan teknologi dalam siklus manajemen risiko bencana memperkuat efektivitas mitigasi dan meningkatkan ketahanan wilayah terhadap ancaman banjir. Hal ini sejalan dengan pendekatan manajemen risiko bencana yang dikembangkan oleh United Nations Office for Disaster Risk Reduction yang menekankan pentingnya integrasi teknologi dalam pengurangan risiko bencana secara berkelanjutan (UNDRR, 2019).

3.7 Tantangan Implementasi Mitigasi Banjir Berbasis Teknologi

Meskipun memiliki potensi yang signifikan dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan risiko banjir, implementasi mitigasi berbasis teknologi masih menghadapi berbagai tantangan yang bersifat teknis, kelembagaan, maupun sosial-ekonomi.

Salah satu tantangan utama adalah keterbatasan infrastruktur digital, khususnya di wilayah pedesaan atau daerah terpencil yang masih belum memiliki jaringan internet dan sistem komunikasi yang stabil. Kondisi ini menyebabkan tidak optimalnya penerapan sistem pemantauan berbasis real-time.

Selain itu, ketersediaan, kelengkapan, dan kualitas data juga menjadi faktor krusial dalam pengembangan sistem prediksi banjir berbasis model komputasi. Data yang tidak

konsisten atau tidak lengkap dapat menurunkan akurasi hasil analisis dan prediksi risiko.

Tantangan lainnya adalah keterbatasan sumber daya manusia (SDM) yang memiliki kompetensi dalam pengelolaan teknologi seperti GIS, IoT, dan kecerdasan buatan. Hal ini berdampak pada rendahnya kemampuan operasionalisasi sistem secara optimal di tingkat daerah.

Di sisi lain, tingginya biaya implementasi teknologi serta kebutuhan investasi awal yang besar menjadi hambatan dalam pengembangan sistem mitigasi berbasis teknologi, terutama bagi pemerintah daerah dengan keterbatasan anggaran.

Selain itu, kurangnya integrasi antar sistem dan lembaga juga menjadi kendala dalam menciptakan sistem mitigasi yang terpadu. Banyaknya platform yang berjalan secara parsial menyebabkan aliran data tidak optimal dan menghambat pengambilan keputusan yang cepat dan terkoordinasi.

Oleh karena itu, diperlukan pendekatan kolaboratif antara pemerintah, akademisi, dan sektor swasta untuk memperkuat ekosistem mitigasi bencana berbasis teknologi yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulkareem, M., Hayder, G., Kareem, O.A. and Hashim, K.S., 2021. Smart flood monitoring and early warning systems: A review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1076(1).
- Aerts, J.C.J.H., Botzen, W.J.W., Emanuel, K., Lin, N., de Moel, H. and Michel-Kerjan, E.O., 2014. Evaluating flood resilience strategies for coastal megacities. Science, 344(6183), pp.473–475.
- Aitsi-Selmi, A., Egawa, S., Sasaki, H., Wannous, C. and Murray, V., 2016. The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction: Renewing the global commitment to people's resilience. Health Affairs, 35(6), pp.1099–1107.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), 2023. Informasi Perubahan Iklim dan Risiko Hidrometeorologi Indonesia. Jakarta: BMKG.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), 2023. Indeks Risiko Bencana Indonesia Tahun 2023. Jakarta: BNPB.
- Dawson, R.J., Peppe, R. and Wang, M., 2011. An agent-based model for risk-based flood incident management. Natural Hazards, 59(1), pp.167–189.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), 2022. Pedoman Pengendalian Banjir dan

- Pengelolaan Drainase Perkotaan. Jakarta: Direktorat Jenderal Sumber Daya Air.
- Kumar, P., Debele, S.E., Sahani, J., Rawat, N. and Marti-Cardona, B., 2022. Smart technologies for flood disaster management: A review. *Remote Sensing*, 14(18).
- Mosavi, A., Ozturk, P. and Chau, K.W., 2018. Flood prediction using machine learning models: Literature review. *Water*, 10(11), p.1536.
- Munawar, H.S., Hammad, A.W.A. and Waller, S.T., 2022. Remote sensing methods for flood prediction: A review. *Sensors*, 22(3), p.960.
- Munawar, H.S., Mojtahedi, M., Hammad, A.W.A., Kouzani, A. and Mahmud, M.A.P., 2022. Disruptive technologies as a solution for disaster risk management: A review. *Science of the Total Environment*, 806, p.151351.
- Samansiri, S., Fernando, T. and Ingirige, B., 2022. Advanced technologies for offering situational intelligence in flood warning and response systems: A literature review. *Water*, 14(13), p.2091.
- Schumann, G.J.P. and Bates, P.D., 2018. The need for a high-accuracy, open-access global DEM. *Frontiers in Earth Science*, 6, p.225.
- Siddique, M.A.B., Islam, T., Alam, M.M. and Rahman, M.S., 2023. Artificial intelligence and machine learning applications for flood forecasting and disaster management: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), pp.42135–42158.
- Tehrany, M.S., Pradhan, B. and Jebur, M.N., 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models. *Journal of Hydrology*, 512, pp.332–343.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2019. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2019. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

World Meteorological Organization (WMO), 2020. State of Climate Services 2020: Risk Information and Early Warning Systems. Geneva: World Meteorological Organization.

BAB 4

TEKNOLOGI DETEKSI DAN PERINGATAN DINI BANJIR

Oleh Nenny Roostrianawaty

4.1 Pendahuluan

Banjir merupakan salah satu bencana hidrometeorologi yang paling sering terjadi di berbagai negara dan memberikan dampak yang signifikan terhadap kehidupan manusia, infrastruktur, lingkungan serta aktivitas ekonomi. Dalam beberapa dekade terakhir, frekuensi dan intensitas banjir mengalami peningkatan yang dipengaruhi oleh perubahan iklim global, pertumbuhan penduduk, urbanisasi, serta perubahan tata guna lahan yang tidak terkendali. Kondisi tersebut menyebabkan meningkatnya limpasan permukaan (*surface runoff*) dan berkurangnya kemampuan daerah aliran sungai (DAS) dalam menampung debit air, sehingga resiko terjadinya banjir semakin besar (Kundzewics, 2019).

Menurut laporan *World Meteorological Organization (WMO)*, perubahan iklim telah menyebabkan peningkatan kejadian cuaca ekstrem, termasuk hujan dengan intensitas tinggi yang memicu banjir pada berbagai wilayah di dunia (WMO, 2021). Peningkatan temperatur global berpengaruh terhadap siklus hidrologi dan menyebabkan distribusi curah hujan menjadi semakin tidak menentu. Akibatnya banyak

wilayah yang sebelumnya relatif aman terhadap banjir kini mulai mengalami peningkatan tingkat kerawanan. Fenomena ini menjadi tantangan besar dalam pengelolaan sumber daya air dan mitigasi bencana, terutama di negara berkembang yang memiliki keterbatasan infrastruktur dan sistem pemantauan hidrologi.

Di Indonesia, banjir merupakan bencana yang paling dominan dibandingkan dengan jenis bencana lainnya. Data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) menunjukkan bahwa banjir menempati proporsi terbesar kejadian bencana tahunan dengan tingkat kerugian ekonomi yang sangat besar (BNPB, 2023). Tingginya frekuensi banjir dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain curah hujan tinggi, berkurangnya daerah resapan air, sedimentasi sungai, kapasitas drainase yang tidak memadai serta perubahan penggunaan lahan di kawasan perkotaan. Selain itu, pertumbuhan wilayah perkotaan yang pesat menyebabkan meningkatnya luas permukaan kedap air (*impermeable area*) sehingga memperbesar debit limpasan dan mempercepat terjadinya genangan.

Pendekatan konvensional dalam pengendalian banjir selama ini lebih banyak berfokus pada upaya struktural seperti pembangunan bendungan, tanggul, kolam retensi, normalisasi sungai dan sistem drainase. Meskipun langkah-langkah tersebut terbukti mampu mengurangi resiko banjir, pendekatan struktural saja tidak cukup untuk mengatasi kompleksitas permasalahan banjir yang semakin meningkat. Oleh karena itu diperlukan pendekatan non-struktural yang mampu meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat melalui sistem deteksi dan peringatan dini banjir (*Flood Early Warning System* atau *FEWS*) (UNDRR, 2022).

Sistem peringatan dini merupakan bagian penting dari strategi pengurangan risiko bencana (*Disaster Risk Reduction*) karena memberikan informasi mengenai potensi ancaman sebelum bencana terjadi. Informasi tersebut memungkinkan masyarakat dan pemerintah memiliki waktu yang cukup untuk melakukan tindakan pencegahan dan evakuasi sehingga dapat meminimalkan korban jiwa maupun kerugian ekonomi. Menurut *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR), sistem peringatan dini yang efektif harus mampu mengintegrasikan identifikasi risiko, pemantauan bahaya, penyebaran informasi serta kemampuan masyarakat dalam merespons peringatan yang diberikan (UNDRR, 2022).

Perkembangan teknologi digital dalam beberapa tahun terakhir telah membawa perubahan yang signifikan dalam sistem mitigasi banjir. Kemajuan di bidang sensor, teknologi komunikasi, *Internet of Things (IoT)*, kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), *cloud computing*, serta sistem informasi geografis (*Geographic Information System* atau *GIS*) memungkinkan proses deteksi dan peringatan dini dilakukan secara lebih cepat, akurat dan real time. Integrasi dari berbagai teknologi tersebut menghasilkan sistem monitoring yang mampu mengumpulkan data hidrologi secara kontinu, menganalisis potensi banjir secara otomatis dan mendistribusikan informasi kepada masyarakat dalam waktu yang sangat singkat (Ahmed et al., 2022).

Internet of Things (IoT), menjadi salah satu teknologi yang paling banyak digunakan dalam pengembangan sistem peringatan dini banjir modern. Teknologi ini memungkinkan berbagai sensor yang ditempatkan pada sungai, waduk maupun sistem drainase untuk saling terhubung melalui jaringan internet dan mengirimkan data secara otomatis ke

pusat pengolahan data. Informasi yang diperoleh kemudian dapat diakses melalui komputer maupun perangkat bergerak (*smartphone*) sehingga kondisi tinggi muka air dan curah hujan dapat dipantau secara real-time (Ahmed et al., 2022). Keunggulan sistem berbasis IoT terletak pada kemampuannya dalam menyediakan informasi yang cepat, biaya operasional yang relatif rendah, serta fleksibilitas dalam pengembangan sistem.

Selain IoT, pemanfaatan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) dan *machine learning* telah membuka peluang baru dalam peningkatan akurasi prediksi banjir. Berbagai algoritma seperti *Artificial Neural Network (ANN)*, *Random Forest*, *Support Vector Machine (SVM)*, dan *Long Short – Term Memory (LSTM)* telah banyak diterapkan dalam pemodelan hidrologi dan prediksi tinggi muka air sungai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode berbasis machine learning memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mengenali pola hubungan antara curah hujan, debit aliran dan kejadian banjir dibandingkan dengan metode statistik konvensional (Mosavi et al., 2018). Dengan demikian, teknologi AI berpotensi meningkatkan efektivitas sistem peringatan dini dalam memberikan informasi yang lebih akurat dan tepat waktu.

Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) dan Sistem Informasi Geografis (GIS) juga memberikan kontribusi yang besar dalam mitigasi banjir. Citra satelit memungkinkan pemantauan kondisi wilayah terdampak banjir secara cepat dan mencakup area yang luas. Sementara itu, GIS berfungsi sebagai alat untuk mengintegrasikan berbagai data spasial dan hidrologi dalam proses pemetaan daerah rawan banjir, analisis risiko, serta perencanaan mitigasi bencana (Longley et.al., 2015).

Kombinasi GIS, citra satelit dan teknologi drone telah meningkatkan kemampuan dalam melakukan pemantauan kondisi lapangan secara real-time dan mendukung proses pengambilan keputusan yang lebih efektif.

Seiring dengan berkembangnya konsep *smart city*, sistem deteksi dan peringatan dini banjir juga mengalami transformasi menuju sistem yang lebih cerdas dan terintegrasi, konsep *smart flood management* menggabungkan teknologi sensor, jaringan komunikasi, analisis data berbasis AI serta platform digital untuk menciptakan sistem pengelolaan banjir yang adaptif dan responsif. Sistem ini tidak hanya berfungsi memberikan peringatan kepada masyarakat tetapi juga mendukung pengambilan keputusan oleh pemerintah dalam pengelolaan infrastruktur sumber daya air secara berkelanjutan (Abou El-Magd et al., 2024).

Meskipun perkembangan teknologi memberikan banyak peluang dalam peningkatan efektivitas mitigasi banjir, implementasinya masih menghadapi berbagai tantangan. Keterbatasan infrastruktur komunikasi, biaya investasi, keamanan data, serta rendahnya literasi digital masyarakat menjadi faktor yang mempengaruhi keberhasilan sistem peringatan dini. Oleh karena itu, diperlukan sinergi antara pemerintah, akademisi, sektor swasta dan masyarakat untuk mewujudkan sistem deteksi dan peringatan dini banjir yang handal dan berkelanjutan.

Teknologi digital dalam mitigasi banjir memiliki beberapa keunggulan dibandingkan sistem konvensional, antara lain :

- Monitoring kondisi sungai secara real-time

- Pengiriman data otomatis
- Kemampuan prediksi berbasis machine learning
- Integrasi dengan smartphone dan media sosial
- Pengambilan keputusan lebih cepat

Penerapan teknologi tersebut telah dilakukan di berbagai negara maju maupun berkembang, Jepang menggunakan sistem radar cuaca resolusi tinggi dan AI untuk prediksi banjir perkotaan, sedangkan Belanda mengembangkan *digital twin flood system* untuk simulasi genangan secara real-time. Di Indonesia, beberapa kota mulai menerapkan sistem monitoring berbasis sensor ultrasonik dan IoT untuk memantau tinggi muka air sungai dan drainase.

Bab ini membahas berbagai teknologi yang digunakan dalam sistem deteksi dan peringatan dini banjir di era digital. Pembahasan meliputi konsep dasar sistem peringatan dini, teknologi sensor, Internet of Things, kecerdasan buatan, sistem komunikasi, GIS, penginderaan jauh, drone, studi kasus implementasi, hingga perkembangan teknologi masa depan dalam mendukung pengelolaan risiki banjir secara terpadu.

4.2 Konsep Dasar Sistem Deteksi dan Peringatan Dini Banjir

4.2.1 Definisi Sistem Peringatan Dini

Sistem peringatan dini banjir (*Flood Early Warning System/FEWS*) merupakan suatu sistem terpadu yang dirancang untuk mendeteksi ancaman banjir, menganalisis tingkat resiko, serta menyampaikan informasi kepada masyarakat sebelum terjadinya bencana. Tujuan utama sistem ini adalah memberikan waktu yang cukup bagi

masyarakat dan pemerintah untuk melakukan tindakan mitigasi sehingga dapat mengurangi korban jiwa dan kerugian ekonomi.

Menurut United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR, 2022), sistem peringatan dini adalah suatu rangkaian kapasitas yang diperlukan untuk menghasilkan dan menyebarkan informasi peringatan yang tepat waktu dan bermakna kepada individu maupun organisasi yang beresiko sehingga mereka dapat bertindak secara efektif dalam mengurangi kemungkinan kerugian akibat bencana (UNDRR, 2022).

Dalam konteks banjir, sistem peringatan dini memanfaatkan berbagai parameter hidrologi dan meteorologi, seperti curah hujan, tinggi muka air, debit aliran dan kecepatan aliran sungai untuk memperkirakan potensi terjadinya banjir. Data tersebut diperoleh melalui sensor lapangan, stasiun hidrologi otomatis, radar cuaca maupun citra satelit yang kemudian dianalisis menggunakan model hidrologi atau algoritma berbasis kecerdasan buatan (WMO, 2021).

Perkembangan teknologi digital telah mengubah sistem peringatan dini dari metode konvensional yang bergantung pada pengamatan manual menjadi sistem otomatis berbasis Internet of Things (IoT), cloud computing, dan machine learning. Sistem modern mampu mengirimkan informasi secara real-time sehingga meningkatkan kecepatan respons terhadap ancaman banjir (Ahmed et al., 2022).

4.2.2 Komponen Utama Early Warning System

Menurut World Meteorological Organization (WMO) dan UNDRR, sistem peringatan dini yang efektif terdiri dari

empat komponen utama, yaitu pengetahuan risiko (*risk knowledge*), pemantauan dan prediksi (*monitoring and forecasting*), penyebaran informasi (*dissemination and communication*), serta kemampuan respons masyarakat (*response capability*) (WMO, 2021; UNDRR, 2022).

1. Pengetahuan Risiko (*Risk Knowledge*)

Pengetahuan risiko merupakan tahap awal dalam sistem peringatan dini yang bertujuan untuk mengidentifikasi wilayah rawan banjir, karakteristik hidrologi daerah aliran sungai (DAS), serta tingkat kerentanan masyarakat terhadap bencana. Informasi ini diperoleh melalui analisis topografi, penggunaan lahan, data curah hujan dan riwayat kejadian banjir. Sistem Informasi Geografis (SIG) memainkan peran penting dalam memetakan daerah yang memiliki tingkat risiko tinggi terhadap genangan banjir (Longley et al., 2105). Pemahaman mengenai risiko sangat penting dalam menentukan strategi mitigasi dan perencanaan tata ruang. Daerah dengan tingkat urbanisasi yang tinggi umumnya memiliki kerentanan yang lebih besar karena meningkatnya luas permukaan kedap air yang menyebabkan berkurangnya infiltrasi dan meningkatnya limpasan permukaan (Kundzewicz, 2019).

2. Monitoring dan Prediksi (*Monitoring and Forecasting*)

Komponen kedua dalam sistem peringatan dini adalah pemantauan dan prediksi kondisi hidrologi. Proses ini dilakukan dengan mengumpulkan data dari berbagai sumber seperti sensor tinggi muka air, alat ukur curah hujan otomatis, radar cuaca dan citra satelit. Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan model hidrologi atau algoritma berbasis machine learning untuk

mempredikasi kemungkinan terjadinya banjir (Abou El-Magd et al., 2024).

Kemajuan teknologi sensor dan Internet of Things memungkinkan proses monitoring dilakukan secara kontinu dan real-time. Data yang dikirimkan dari lapangan dapat di proses secara otomatis sehingga potensi banjir dapat diketahui lebih cepat dibandingkan metode pengamatan konvensional (Ahmed et al., 2022).

3. Penyebaran Informasi (*Dissemination and Communication*)

Penyebaran informasi merupakan tahapan yang sangat penting dalam sistem peringatan dini. Informasi yang dihasilkan dari proses monitoring harus dapat disampaikan kepada masyarakat dan pemangku kepentingan secara cepat, tepat dan mudah dipahami. Media komunikasi yang umum digunakan meliputi SMS, aplikasi berbasis smartphone, media sosial, sirine, radio televisi, serta papan informasi digital (WMO, 2021).

Pada era digital, teknologi komunikasi berbasis internet memungkinkan penyampaian informasi secara lebih luas dan cepat. Sistem notifikasi otomatis melalui Telegram Bot, WhatsApp dan aplikasi mobile telah banyak diterapkan dalam sistem peringatan dini modern karena mampu meningkatkan efektivitas penyampaian informasi kepada masyarakat (Rahman et al., 2023).

4. Kemampuan Respons (*Response Capability*)

Keberhasilan sistem peringatan dini tidak hanya bergantung pada kecanggihan teknologi, tetapi juga pada kemampuan masyarakat dalam memahami dan merespons informasi yang diterima. Masyarakat harus mengetahui arti setiap tingkat peringatan dan langkah-

langkah yang harus dilakukan ketika status siaga atau bahaya diumumkan (UNDRR, 2022).

Program edukasi, simulasi evaluasi dan pelatihan kebencanaan menjadi faktor penting dalam meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat. Sistem peringatan dini yang baik harus di dukung oleh budaya sadar bencana dan koordinasi yang efektif antara pemerintah, lembaga penanggulangan bencana dan masyarakat.

a. Parameter Hidrologi yang Dipantau

Keakuratan sistem peringatan dini sangat dipengaruhi oleh parameter hidrologi yang digunakan. Parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan tingkat risiko dan memprediksi kemungkinan terjadinya banjir.

i. Curah Hujan

Curah hujan merupakan parameter utama dalam analisis hidrologi dan prediksi banjir. Intensitas hujan yang tinggi dalam waktu singkat dapat menyebabkan peningkatan debit limpasan permukaan dan kapasitas sungai terlampaui. Pengukuran curah hujan umumnya dilakukan menggunakan *Automatic Rain Gauge* (ARG) yang mampu mengirimkan data secara real-time (Chow et al., 1988).

ii. Tinggi Muka Air

Tinggi muka air merupakan indikator penting yang menunjukkan kondisi aliran sungai atau saluran drainase. Perubahan tinggi muka air dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan status peringatan banjir. Pengukuran dilakukan menggunakan sensor ultrasonik, sensor tekanan

atau radar level sensor yang terintegrasi dengan sistem monitoring digital (Ahmed et al., 2022).

iii. Debit Sungai (Q)
Debit sungai merupakan volume air yang mengalir melalui suatu penampang sungai dalam satuan waktu tertentu. Dalam ilmu hidraulika, debit dinyatakan sebagai hasil perkalian antara luas penampang aliran dengan kecepatan aliran (Chow et al., 1988)

iv. Kecepatan Aliran
Kecepatan aliran berpengaruh terhadap kemampuan sungai dalam mengalirkan air dan mengangkut sedimen. Pengukuran kecepatan aliran dapat dilakukan menggunakan *current meter* maupun *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)* yang memiliki tingkat akurasi tinggi dalam pengukuran distribusi kecepatan aliran (Brunner, 2016).

b. Tingkat Status Peringatan Banjir
Sistem peringatan dini umumnya menggunakan beberapa tingkatan status untuk menggambarkan tingkat ancaman banjir. Klasifikasi tersebut bertujuan mempermudah masyarakat dalam memahami kondisi yang sedang terjadi dan tindakan yang perlu dilakukan.

Tabel 4. 1 Klasifikasi Status Peringatan banjir

Status	Kondisi	Tindakan
Normal	Kondisi sungai masih aman	Pemantauan rutin
Siaga	Tinggi muka air meningkat	Persiapan evakuasi
Waspada	Potensi banjir tinggi	Aktivasi posko siaga

Bahaya	Banjir telah terjadi atau akan segera terjadi	Evakuasi masyarakat
--------	---	---------------------

Sumber : WMO (2021)

Penetapan ambang batas pada setiap status dilakukan berdasarkan karakteristik hidrologi masing-masing wilayah. Oleh karena itu, nilai ambang batas tinggi muka air dan curah hujan dapat berbeda antara satu daerah dengan daerah lainnya (WMO, 2021).

c. Peran Masyarakat Dalam Sistem Peringatan Dini

Keberhasilan sistem peringatan dini sangat bergantung pada keterlibatan masyarakat sebagai pengguna akhir informasi. Teknologi yang canggih tidak akan memberikan manfaat yang optimal apabila masyarakat tidak memahami arti peringatan yang diberikan atau tidak melakukan tindakan yang sesuai.

Menurut UNDRR (2022), masyarakat harus dilibatkan dalam seluruh tahapan sistem peringatan dini, mulai dari identifikasi risiko, penyusunan rencana evakuasi, hingga pelaksanaan simulasi kebencanaan. Pendekatan berbasis masyarakat (*community based disaster risk reduction*) terbukti mampu meningkatkan kapasitas masyarakat dalam menghadapi ancaman banjir.

Selain itu, perkembangan teknologi informasi memungkinkan masyarakat untuk berpartisipasi dalam sistem pemantauan melalui konsep *citizen science*. Melalui aplikasi berbasis smartphone dan media sosial, masyarakat dapat melaporkan kondisi genangan secara langsung sehingga membantu pemerintah dalam memperoleh informasi lapangan secara lebih cepat dan akurat (Abou El-Magd et al., 2024).

Dengan demikian, sistem peringatan dini yang efektif tidak hanya mengandalkan teknologi, tetapi juga memerlukan partisipasi aktif masyarakat dan koordinasi yang baik antar lembaga terkait.

4.3 Teknologi Sensor dalam Deteksi Banjir

4.3.1 Sensor Tinggi Muka Air

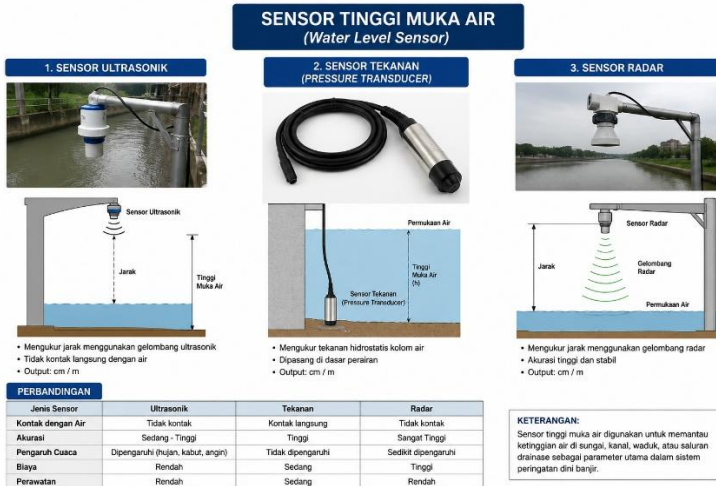
Sensor tinggi muka air merupakan komponen utama dalam sistem deteksi banjir modern. Sensor ini digunakan untuk memantau perubahan elevasi permukaan air sungai secara kontinu. Salah satu sensor yang paling banyak digunakan adalah sensor ultrasonik karena memiliki tingkat akurasi tinggi dan tidak bersentuhan langsung dengan air (Prasetyo & Nugroho, 2022).

Sensor ultrasonik bekerja berdasarkan prinsip pemantulan gelombang suara frekuensi tinggi untuk menghitung jarak antara sensor dan permukaan air (Ahmed et al., 2022). Sensor ultrasonik memiliki beberapa keunggulan antara lain :

- Akurasi tinggi
- Tidak kontak langsung dengan air
- Biaya relatif murah
- Mudah diintegrasikan dengan IoT

Selain sensor ultrasonik, radar water level sensor juga mulai banyak digunakan karena memiliki performa yang lebih stabil gangguan suhu dan kelembaban tinggi (WMO, 2021). Teknologi radar mampu memberikan akurasi pengukuran

yang lebih baik terutama pada kondisi cuaca ekstrem. Berikut beberapa jenis sensor tinggi muka air.



Gambar 4. 1 Sensor Tinggi Muka Air

4.3.2 Sensor Curah Hujan

Curah hujan merupakan parameter utama dalam prediksi banjir. Pengukuran curah hujan otomatis dilakukan menggunakan *Automatic Rain Gauge* tipe *tipping bucket rain*. Alat ini bekerja dengan menghitung jumlah jungkit wadah penampung air hujan sehingga intensitas hujan dapat diketahui secara otomatis dan real-time (Viessman & Lewis, 2003).

Data curah hujan digunakan dalam analisis hidrologi untuk menghitung limpasan permukaan dan debit banjir rencana (Chow et al., 1988). Dalam teknik sipil, hubungan antara intensitas hujan dan debit limpasan dapat dianalisis menggunakan Persamaan Rasional :

$$Q = 0,278 \times C \times I \times A$$

Keterangan :

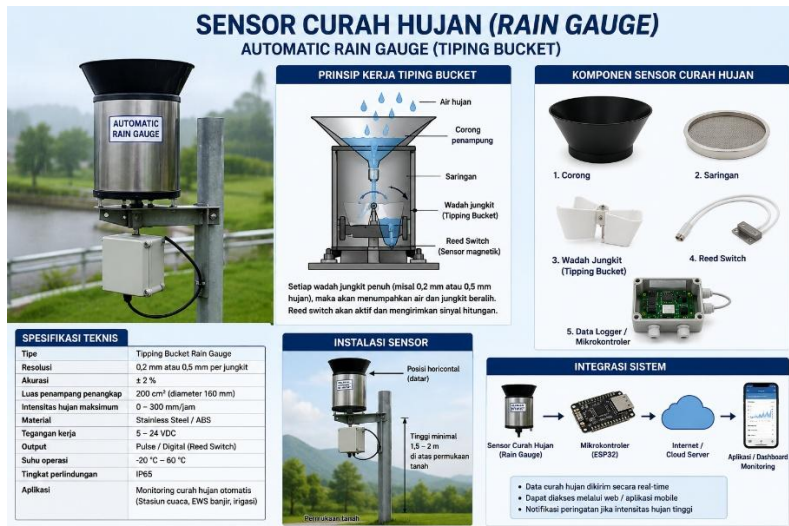
Q = debit puncak ($m^3/detik$)

C = koefisien limpasan

I = intensitas hujan (mm/jam)

A = luas DAS (km^2)

Persamaan tersebut umum digunakan dalam perencanaan drainase perkotaan dan sistem pengendalian banjir. Berikut adalah beberapa gambar sensor curah hujan yang biasa digunakan.



Gambar 4. 2 Sensor Curah Hujan

4.3.3 Sensor Debit dan Kecepatan Aliran

Debit aliran sungai diperoleh dari hasil perkalian luas penampang aliran dengan kecepatan aliran (Chow et al., 1988) atau bisa ditulis dengan rumus :

$$Q = A \times V$$

Keterangan :

Q = debit aliran (m^3/detik)

A = luas penampang (m^2)

V = kecepatan aliran (m/detik)

Pengukuran kecepatan dapat dilakukan dengan menggunakan:

- Current meter
- Electromagnetic sensor
- *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)*

ADCP bekerja dengan memanfaatkan efek Doppler untuk mengukur distribusi kecepatan aliran secara detail dan akurat sehingga banyak digunakan dalam studi hidraulika sungai modern (Brunner, 2016).





Gambar 4. 3 Sensor Debit dan Kecepatan Aliran

Berikut disajikan tabel perbandingan dari beberapa jenis sensor deteksi banjir

Tabel 4. 2 Tabel Perbandingan Sensor Deteksi Banjir

Jenis Sensor	Fungsi	Kelebihan	Kekurangan
Ultrasonik	Mengukur muka air	Akurat, non-kontak	Sensitif suhu
Pressure Sensor	Tekanan hidrostatik	Stabil	Perlu kontak air
Radar Sensor	Pengukuran permukaan	Akurasi tinggi	Harga mahal
Rain Gauge	Curah hujan	Mudah digunakan	Perlu perawatan rutin

Sumber : Ahmed et al. (2022)

4.7 Internet of Things (IoT) dalam Sistem Peringatan Dini Banjir

Internet of Things (IoT) merupakan konsep komunikasi antar perangkat melalui jaringan internet untuk bertukar data secara otomatis. Dalam mitigasi banjir, teknologi IoT memungkinkan sensor lapangan mengirimkan data hidrologi secara real-time ke pusat monitoring (Ashton, 2009). Bagian-bagian sistem IoT umumnya terdiri atas :

1. Sensor lapangan
2. Mikrokontroler
3. Jaringan komunikasi
4. Server/cloud database
5. Dashboard monitoring

Menurut Rahman et al., 2023 penggunaan IoT pada sistem peringatan dini banjir memberikan beberapa keuntungan, antara lain:

1. Monitoring real-time
2. Efisiensi biaya operasional
3. Otomatisasi sistem
4. Akses informasi berbasis smartphone

Perangkat mikrokontroler seperti ESP32 dan NodeMCU banyak digunakan karena memiliki modul WiFi bawaan dan konsumsi daya yang rendah. Teknologi komunikasi data yang digunakan meliputi WiFi, GSM/GPRS, LoRa dan NB-IoT (Ahmed et al, 2022). Pada daerah terpencil LoRa lebih efektif karena memiliki jangkauan komunikasi yang luas dengan kebutuhan energi rendah.

Cloud computing memungkinkan penyimpanan dan analisis data secara daring sehingga operator dapat memantau kondisi sungai melalui smartphone maupun dashboard berbasis web. Sistem monitoring real-time ini mampu meningkatkan efisiensi pengambilan keputusan dalam penanganan banjir.



Gambar 4. 4 Skema Sistem Sensor Modern

4.8 Artificial Intelligence dan Machine Learning untuk Prediksi Banjir

Artificial Intelligence (AI) digunakan untuk meningkatkan kemampuan prediksi banjir melalui analisis data hidrologi dalam jumlah besar. Teknologi machine learning mampu mengenali pola hubungan antara curah hujan, debit sungai dan kejadian banjir secara otomatis. Menurut Mosavi et al. (2018), metode machine learning mampu meningkatkan akurasi prediksi debit sungai dan tinggi muka air dibandingkan metode statistik konvensional. Metode yang banyak digunakan antara lain :

- Artificial Neural Network (ANN)
- Support Vector Machine (SVM)

- Random Forest
- Long Short -Term Memory (LSTM)
- Deep Neural Network (DNN)

Metode Artificial Neural Network (ANN) dapat mengenali pola hubungan antara curah hujan, debit sungai dan potensi banjir secara otomatis (Prasad et al., 2020). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa model LSTM memiliki akurasi tinggi dalam prediksi debit sungai jangka pendek pada wilayah pegunungan dan DAS kompleks. Selain itu, metode fuzzy logic digunakan untuk menentukan tingkat bahaya banjir berdasarkan parameter yang bersifat tidak pasti. Selain prediksi hidrologi, teknologi AI juga digunakan untuk :

- Analisis citra satelit
- Identifikasi genangan banjir
- Klasifikasi wilayah terdampak
- Simulasi evakuasi

4.9 Sistem Komunikasi dan Penyebaran Informasi

Sistem komunikasi berfungsi menyampaikan informasi peringatan banjir kepada masyarakat secara cepat. Teknologi komunikasi modern memanfaatkan SMS gateway, aplikasi seluler dan media sosial untuk mempercepat penyebaran informasi (WMO, 2021)

Penelitian Rahma et al. (2023) menunjukkan bahwa integrasi Telegram Bot dan notifikasi smartphone mampu meningkatkan kecepatan respons masyarakat terhadap ancaman banjir.

4.10 GIS, Remote Sensing dan Drone

GIS berperan penting dalam pemetaan daerah rawan banjir melalui integrasi data spasial dan hidrologi. Teknologi ini memungkinkan analisis topografi, kemiringan lahan, penggunaan lahan serta pola aliran sungai dalam satu platform digital. Menurut Longley et al. (2015), GIS sangat efektif dalam mendukung pemetaan risiko bencana dan simulasi genangan banjir.

Remote sensing memanfaatkan citra satelit untuk monitoring wilayah terdampak banjir secara cepat dan luas (Jensen, 2007). Satelit Sentinel-1 dan Sentinel-2 banyak digunakan dalam pemetaan genangan karena memiliki resolusi spasial yang tinggi. Integrasi citra satelit dan AI mampu meningkatkan akurasi identifikasi banjir secara real-time. Sementara itu, drone digunakan untuk :

- Survey daerah terdampak
- Pemetaan genangan
- Inspeksi infrastruktur sungai
- Dokumentasi pasca banjir

Penggunaan drone sangat membantu pada wilayah yang sulit dijangkau saat terjadi bencana.

4.11 Tantangan Implementasi Teknologi

Implementasi teknologi peringatan dini di negara berkembang masih menghadapi berbagai kendala seperti keterbatasan infrastruktur, jaringan komunikasi, biaya operasional dan kemampuan pemeliharaan perangkat (UNDRR, 2022).

Selain itu, keamanan data dan ancaman serangan cyber menjadi tantangan baru dalam pengembangan sistem IoT berbasis internet dan cloud computing (Ahmed et al., 2022). Oleh karena itu diperlukan sistem keamanan jaringan dan manajemen data yang baik.

Kurangnya literasi digital masyarakat juga mempengaruhi efektivitas sistem peringatan dini. Masyarakat harus memahami arti status siaga dan prosedur evakuasi agar sistem dapat berfungsi optimal.

4.12 Studi Kasus Implementasi

Jakarta telah menerapkan sistem monitoring banjir berbasis sensor tinggi muka air dan CCTV sungai yang terintegrasi dengan aplikasi Jakarta Kini (JAKI). Sistem tersebut memungkinkan masyarakat memperoleh informasi banjir secara real-time (Pemprov DKI Jakarta, 2023).

Kota Semarang telah mengembangkan sistem ROB-EWS untuk memantau banjir rob menggunakan sensor ultrasonik berbasis Iot. Sistem ini mampu mengirimkan informasi real-time kepada masyarakat melalui aplikasi sirine otomatis (Marsha, 2024).

Di Jepang, sistem peringatan dini banjir telah terintegrasi dengan radar cuaca resolusi tinggi dan notifikasi otomatis berbasis smartphone sehingga mampu mengurangi risiko korban jiwa saat banjir besar terjadi (WMO, 2021).

Di Korea Selatan sistem flood early warning dikembangkan dengan menggunakan informasi hindrodinamika sungai kecil untuk meningkatkan kecepatan respons terhadap banjir bandang. Sistem ini terbukti efektif

dalam meningkatkan waktu evakuasi masyarakat (Cheong et al, 2024).

Sementara itu berbagai negara mulai mengintegrasikan AI dan satelit dalam prediksi banjir skala besar guna meningkatkan ketepatan forecasting dan kesiapsiagaan bencana.

4.13 Pengembangan Teknologi Masa Depan

Pengembangan teknologi mitigasi banjir di masa depan mengarah pada integrasi :

- Big data hydrology
- Digital twin
- Edge computing
- AI forecasting
- Smart city platform

Teknologi digital twin memungkinkan simulasi konsisi sungai secara virtual dan real-time sehingga dapat membantu pengambilan keputusan dalam pengendalian banjir. Selain itu, penggunaan AI multimodal berbasis citra satelit dan sensor lapangan diprediksi akan menjadi teknologi utama dalam sistem peringatan dini generasi berikutnya (Mirela et al, 2025).

DAFTAR PUSTAKA

- Abou El-Magd, A., Elbeltagi, A. and Yaseen, Z.M. (2024) 'Artificial intelligence and machine learning techniques for flood prediction and forecasting: Recent advances and future prospects', *Water*, 16(14), p. 2069.
- Ahmed, N., Hasan, M.K. and Alam, M.M. (2022) 'Cloud-based smart flood early warning system using Internet of Things technology', *Sensors*, 22(19), p. 7458.
- Ahmed, S., Rahman, M.M., Islam, M.T. and Hossain, M.A. (2022) 'IoT-based flood monitoring and warning systems: A review', *Journal of Hydrology*, 612, p. 128089.
- Ashton, K. (2009) 'That "Internet of Things" Thing', *RFID Journal*, 22(7), pp. 97–114.
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (2023) *Informasi Perubahan Iklim Indonesia Tahun 2023*. Jakarta: BMKG.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (2023) *Data Informasi Bencana Indonesia Tahun 2023*. Jakarta: BNPB.
- Brunner, G.W. (2016) *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers.
- Choubin, B., Mosavi, A. and Alamdarloo, E.H. (2023) 'Earth observation and artificial intelligence for flood prediction and monitoring: Recent developments', *Science of the Total Environment*, 857, p. 159351.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1988) *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Jensen, J.R. (2007) *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. 2nd edn. Upper Saddle River,

- NJ: Pearson Prentice Hall.
- Kim, Y.S., Lee, J.H. and Park, S.H. (2024) 'Development of a flood early warning system based on hydrodynamic characteristics of small rivers', *Water*, 16(7), p. 1012.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2017) *Modul Hidrologi Terapan*. Jakarta: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2022) *Pedoman Pengendalian Banjir dan Pengamanan Pantai*. Jakarta: Direktorat Jenderal Sumber Daya Air.
- Kundzewicz, Z.W. (2019) 'Flood risk and climate change: Global and regional perspectives', *Hydrological Sciences Journal*, 64(1), pp. 1–18.
- Lee, S.H., Kim, J.H. and Park, J.S. (2024) 'Integration of GIS and artificial intelligence for flood hazard assessment in urban areas', *Environmental Earth Sciences*, 83(3), p. 105.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J. and Rhind, D.W. (2015) *Geographic Information Systems and Science*. 4th edn. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Mosavi, A., Ozturk, P. and Chau, K.W. (2018) 'Flood prediction using machine learning models: Literature review', *Water*, 10(11), p. 1536.
- Prasad, K., Gorai, A.K. and Goyal, M.K. (2020) 'Development of artificial neural network models for flood forecasting', *Environmental Modelling and Software*, 124, p. 104607.
- Prasetyo, A. and Nugroho, D. (2022) 'Machine learning for flood prediction using hydrological parameters', *International Journal of Disaster Management*, 8(2), pp. 55–67.
- Rahman, F., Hidayat, T. and Nugraha, A. (2023) 'Real-time flood monitoring using Internet of Things technology',

- Journal of Water Resources Engineering*, 14(1), pp. 22–35.
- Smith, K. and Ward, R. (1998) *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Soewarno (1995) *Hidrologi: Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data*. Bandung: Nova.
- Sosrodarsono, S. and Takeda, K. (2003) *Hidrologi untuk Pengairan*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Singh, P., Verma, A. and Kumar, R. (2023) ‘Smart flood management using Internet of Things and artificial intelligence technologies’, *Natural Hazards*, 118(2), pp. 1457–1478.
- Triatmodjo, B. (2010) *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Triatmodjo, B. (2019) *Hidraulika II*. Yogyakarta: Beta Offset.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2022) *Early Warning Systems for Disaster Risk Reduction*. Geneva: UNDRR.
- Viessman, W. and Lewis, G.L. (2003) *Introduction to Hydrology*. 5th edn. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- Wang, H., Li, Y. and Zhang, X. (2024) ‘Application of deep learning models for short-term flood forecasting: A review’, *Journal of Hydrology*, 631, p. 130690.
- World Meteorological Organization (2021) *Flood Forecasting and Warning*. Geneva: WMO.
- Zhang, Y., Chen, J. and Liu, H. (2024) ‘Satellite-based flood monitoring and mapping using Sentinel data and machine learning approaches’, *Remote Sensing*, 16(8), p. 1425.

BAB 5

TEKNOLOGI ANALISIS DAN PREDIKSI BANJIR

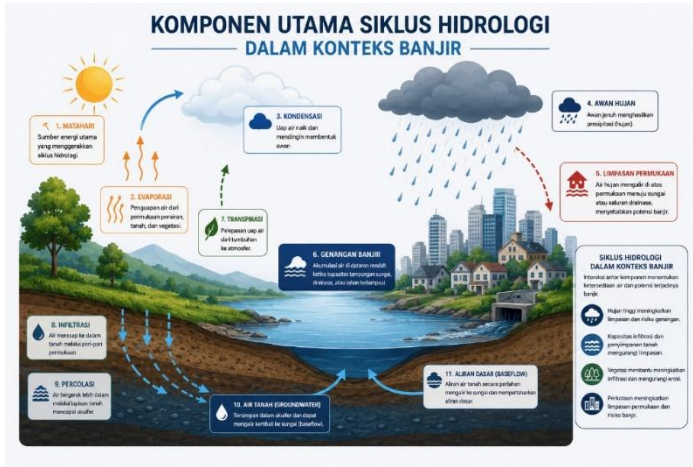
Oleh Wahyu Hidayat

5.1 Pendahuluan

Banjir merupakan peristiwa hidrologis yang terjadi ketika kapasitas tampung sistem aliran sungai atau drainase terlampaui sehingga air meluap ke wilayah sekitarnya. Secara global, banjir menjadi penyebab utama kematian akibat bencana di seluruh dunia. Dalam rentang 1990 hingga 2022, tercatat 4.713 kejadian banjir di 168 negara yang berdampak pada lebih dari 3,2 miliar orang, menyebabkan 218.353 kematian, serta kerugian ekonomi melebihi 1,3 triliun dolar AS (Liu et al., 2024). Sejak tahun 2000, jumlah bencana banjir yang tercatat secara global meningkat sebesar 134% dibandingkan dua dekade sebelumnya, dan banjir kini menyumbang hingga 35–40% dari seluruh kejadian bencana akibat cuaca (UNDRR, 2025). Kondisi ini diperparah oleh perubahan iklim yang terus mendorong peningkatan intensitas dan frekuensi curah hujan ekstrem, khususnya di negara-negara berkembang di kawasan tropis, termasuk Indonesia, yang secara konsisten masuk dalam daftar negara

paling rentan terhadap risiko iklim di dunia (Kurniadi et al., 2024)

Secara geografis, banjir sangat mengancam Indonesia. Lokasi Indonesia di dalam Zona Konvergensi Antartropik, tempat bertemunya angin pasat dari dua belahan bumi, memperkuat aktivitas konvektif dengan tingkat curah hujan tertinggi di seluruh dunia (Yanfatriani et al., 2025). Kondisi ini, dikombinasikan dengan posisi Indonesia yang diapit dua samudra besar serta topografi yang beragam dari pegunungan tinggi hingga dataran pesisir yang landai, menciptakan kerawanan hidrometeorologi yang sangat tinggi. Banjir tercatat sebagai bencana paling dominan di Indonesia, merujuk data BNPB selama 2008–2023, frekuensi kejadiannya terus meningkat dengan rata-rata pertambahan sekitar 57,6 kejadian setiap tahunnya, diikuti longsor dan cuaca ekstrem (Yanfatriani et al., 2025). Banjir mendominasi seluruh kejadian bencana di Indonesia dengan porsi sekitar 34,1%, jauh melampaui cuaca ekstrem (27,5%), tanah longsor (20,3%), kebakaran hutan (11,3%), dan kekeringan (6,7%) (Yanfatriani et al., 2025). Besarnya proporsi ini menunjukkan urgensi pengembangan sistem prediksi dan peringatan dini banjir yang memadai, terutama di wilayah yang secara teknis dapat dimitigasi apabila informasi risiko tersedia secara tepat waktu dan akurat.



Gambar 5. 1 Komponen Utama Siklus Hidrologi dalam Konteks Banjir

(Sumber: Ilustrasi penulis berdasarkan Nearing et al., 2021)

Kemajuan ilmu hidrologi, meteorologi, dan teknologi informasi dalam beberapa dekade terakhir telah mendorong pergeseran paradigma yang signifikan dalam cara banjir dianalisis dan diprediksi. Dari pendekatan konvensional yang mengandalkan pengukuran curah hujan manual dan formula empiris sederhana, kini telah berkembang pendekatan modern yang mengintegrasikan pemodelan numerik, kecerdasan buatan, penginderaan jauh berbasis satelit, serta jaringan sensor berbasis IoT dalam satu kerangka sistem prediksi yang terpadu dan real-time (Karim et al., 2023). Pergeseran ini tidak hanya meningkatkan akurasi prediksi secara substansial, tetapi juga memperpanjang jendela waktu

peringatan yang sangat kritis bagi perlindungan jiwa dan aset masyarakat.

Bab ini menyajikan tinjauan komprehensif mengenai ekosistem teknologi yang saat ini digunakan dalam analisis dan prediksi banjir. Pembahasan meliputi: (1) pemodelan hidrologis dan hidrolik sebagai fondasi analisis kuantitatif; (2) Perspektif Spasial dalam Analisis Banjir; (3) machine learning dan kecerdasan buatan untuk prediksi berbasis data; (4) sistem peringatan dini yang terintegrasi; (5) teknologi radar dan penginderaan atmosfer; (6) pemanfaatan UAV dan drone untuk survei lapangan; (7) konsep Digital Twin; (8) platform terpadu dan implementasi di Indonesia; serta (9) tantangan dan peluang ke depan. Keseluruhan pembahasan dirancang untuk membangun pemahaman yang sistematis dan aplikatif, menghubungkan konsep teoritis dengan implementasi praktis di lapangan.

5.2 Pemodelan Hidrologis: Fondasi Kuantitatif Analisis Banjir

Pemodelan hidrologis merupakan representasi matematis dari proses transformasi curah hujan menjadi aliran permukaan yang bergerak melalui sistem drainase dan sungai. Dalam konteks analisis banjir, model hidrologis berperan sentral dalam mengkuantifikasi besaran debit puncak banjir, volume limpasan total, dan waktu konsentrasi daerah aliran sungai (DAS) yang selanjutnya digunakan sebagai masukan (*boundary condition*) bagi model hidrolik (Li et al., 2023 mengonfirmasi bahwa keluaran model hidrologis berupa hidrograf aliran berfungsi sebagai kondisi batas bagi

model hidrodinamik untuk mensimulasikan proses banjir di saluran sungai; Zhang et al., 2025 menjelaskan bahwa model hidrologis-hidrodinamik terkopel menghubungkan proses pembangkitan limpasan curah hujan dengan proses penelusuran banjir dan genangan). Perkembangan kapasitas komputasi telah mendorong evolusi model hidrologis dari persamaan empiris sederhana menuju model fisik terdistribusi yang mampu mensimulasikan proses hidrologi dengan resolusi spasial dan temporal yang semakin tinggi. Model hidrologis terdistribusi memanfaatkan parameter dan variabel yang bermakna fisik sehingga mampu memberikan representasi pola ruang dan waktu berbagai elemen hidrologis dalam DAS secara lebih komprehensif; pengembangan kerangka pemodelan terdistribusi yang mempertimbangkan proses hidrologis bervariasi secara ruang dan waktu terbukti lebih unggul dibandingkan model lumped dalam simulasi kejadian banjir sub-harian (Zhou dan Liu. 2024).

Penerapan model hidrologis terdistribusi dalam simulasi banjir ekstrem telah banyak didokumentasikan dalam literatur terkini. Wang et al. (2024) mendemonstrasikan bahwa model hidrologis terdistribusi yang dibangun berdasarkan hubungan topologis DAS mampu mensimulasikan proses banjir di kawasan pegunungan dengan kesalahan relatif kedalaman limpasan rata-rata sebesar 4,5% dan kesalahan debit puncak kurang dari 6%. Sementara itu, Li et al. (2023) membuktikan bahwa model terkopel hidrologis-hidrodinamik secara konsisten menghasilkan akurasi simulasi yang lebih baik dibandingkan model hidrologis tunggal, dengan peningkatan nilai *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) yang signifikan pada kejadian banjir

besar. Pengembangan strategi kombinasi model beserta perluasan penerapannya menjadi arah yang menjanjikan untuk meningkatkan akurasi, efisiensi, dan ketangguhan sistem manajemen risiko banjir di masa mendatang (Zhang & Yang, 2025).

5.2.1 Klasifikasi dan Karakteristik Model Hidrologis

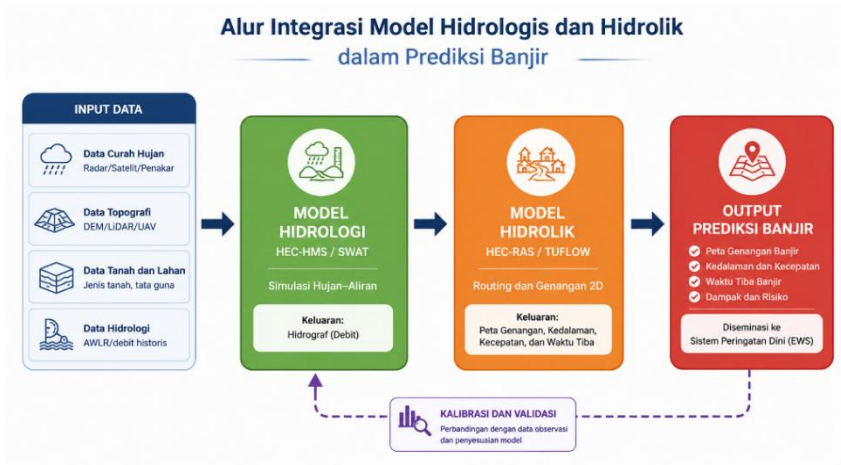
Model hidrologis dapat diklasifikasikan berdasarkan tiga dimensi utama, yaitu representasi proses fisik, distribusi spasial parameter, dan pendekatan temporal. Berdasarkan representasi proses fisiknya, model dibedakan menjadi model empiris yang mengandalkan hubungan statistik antara input dan output tanpa memodelkan proses fisik secara eksplisit, model konseptual yang merepresentasikan proses fisik secara disederhanakan menggunakan reservoir-reservoir konseptual, serta model berbasis fisika yang menyelesaikan persamaan diferensial setiap proses hidrologi secara eksplisit. Berdasarkan distribusi spasial parameternya, model diklasifikasikan menjadi model lumped yang memperlakukan DAS sebagai satu unit homogen, model semi-distributed yang membagi DAS menjadi sub-DAS atau unit respons hidrologi, dan model distributed yang menggunakan grid spasial dengan parameter bervariasi di setiap sel; sedangkan berdasarkan pendekatan temporal, model dibedakan menjadi model steady-state dan model dinamis atau transien (Okiria et al., 2022). HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) yang dikembangkan oleh U.S. Army Corps of Engineers merupakan perangkat lunak hidrologis yang paling banyak digunakan dalam rekayasa sumber daya air secara global; fleksibilitasnya terletak pada kemampuan menggabungkan berbagai metode perhitungan

untuk setiap komponen proses hidrologi, mencakup metode SCS Curve Number atau Green-Ampt untuk infiltrasi, Clark atau SCS Unit Hydrograph untuk transformasi hujan-aliran, serta Muskingum Cunge atau Lag untuk penelusuran aliran (Odey, G., & Cho, Y., 2025), dengan versi terbarunya yang mendukung input curah hujan dari radar dan produk satelit serta integrasi langsung dengan perangkat lunak GIS (Gelete et al., 2023). Sementara itu, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) merupakan model semi terdistribusi yang dikembangkan oleh USDA *Agricultural Research Service* bekerja sama dengan Texas A&M University; model ini menggunakan konsep *Hydrological Response Units* (HRU) yang terbentuk dari perpotongan peta penggunaan lahan, jenis tanah, dan kelas kemiringan lereng, sehingga sangat unggul dalam mensimulasikan dampak jangka panjang perubahan penggunaan lahan, praktik pertanian, dan perubahan iklim terhadap rezim aliran sungai serta kualitas air suatu DAS (Ougahi et al., 2022), yang menjadikan SWAT pilihan utama dalam kajian banjir yang mempertimbangkan skenario perubahan tata guna lahan di kawasan perkotaan yang sedang berkembang (Habte et al., 2024).

5.2.2 Model Hidrolik dan Simulasi Aliran Dua Dimensi

Apabila model hidrologis menghasilkan hidrograf banjir di outlet daerah aliran sungai (DAS), model hidrolik mengambil alih peran untuk mensimulasikan pergerakan massa air di dalam maupun di luar batas saluran sungai. Model hidrolik satu dimensi (1D) seperti HEC-RAS menyelesaikan persamaan Saint-Venant secara implisit menggunakan pendekatan beda hingga untuk menganalisis aliran tak-tunak (unsteady flow) sepanjang jaringan saluran

alami maupun buatan (Mo et al., 2023). Dalam pemodelan ini, persamaan diferensial aliran tak-tunak dan persamaan Saint-Venant 1D digunakan sebagai persamaan kontrol yang diselesaikan dengan metode beda hingga implisit empat titik, sehingga menghasilkan simulasi perambatan banjir secara akurat di sepanjang alur sungai (Mo et al., 2023). Penerapan utama model HEC-RAS 1D mencakup analisis kapasitas tampung penampang sungai, perancangan dimensi tanggul dan bangunan air, serta prakiraan elevasi muka air di titik-titik pengukuran sepanjang alur sungai (Aneesh & Thomas, 2024). Model ini terbukti mampu memprediksi dan mensimulasikan perubahan perilaku hidraulis secara akurat, menghasilkan keluaran berupa plot kecepatan aliran dan peta penampang melintang sungai sebagai dasar identifikasi lokasi yang rentan terhadap kejadian banjir (Aneesh & Thomas, 2024). Selain itu, hidrograf banjir yang dihasilkan dari model hidrologis dapat dijadikan masukan langsung ke dalam HEC-RAS guna membangun simulasi peta genangan banjir pada berbagai periode ulang, sehingga memberikan wawasan yang komprehensif bagi pengelolaan risiko banjir dan perencanaan hidrologis (Spor et al., 2025)



Gambar 5. 2 Alur Integrasi Model Hidrologis dan Hidrolik dalam Prediksi Banjir

(Sumber: Ilustrasi penulis berdasarkan Brunner et al., 2020 dan Mitsopoulos, et al., 2022)

Model hidrolik dua dimensi (2D) seperti TUFLOW, MIKE FLOOD, dan LISFLOOD-FP telah semakin banyak digunakan dalam analisis banjir karena kemampuannya mensimulasikan penyebaran genangan secara spasial di atas dataran banjir. Model-model ini menyelesaikan persamaan air dangkal dua dimensi (two-dimensional shallow water equations/2D-SWEs) secara numeris, yang mencakup berbagai kondisi aliran mulai dari superkritis, gelombang kejut, hingga aliran di atas permukaan yang sangat halus (Shaw et al., 2021). Variabel prognostik yang dihasilkan meliputi kedalaman air (h), debit per satuan lebar (hu dan hv), serta topografi tidak berubah waktu (z), yang seluruhnya direpresentasikan sebagai data raster pada resolusi Digital Elevation Model

(DEM) (Chowdhury & Kesserwani, 2025). Dengan menyelesaikan persamaan tersebut pada grid resolusi tinggi, model 2D mampu menghasilkan informasi spasial yang sangat detail tentang kedalaman genangan, kecepatan aliran, dan distribusi luas genangan di setiap sel komputasi (Costabile & Costanzo, 2021).

Informasi spasial yang dihasilkan model hidrolik 2D sangat bernilai untuk berbagai keperluan pengelolaan risiko banjir. Estimasi genangan yang andal dapat menyediakan informasi yang diperlukan, misalnya luas genangan spasial dan kedalaman air, untuk mengembangkan strategi mitigasi dan memungkinkan pemangku kepentingan mengambil keputusan yang lebih baik dalam manajemen banjir masa depan (Yang et al., 2022). Peta bahaya banjir beresolusi tinggi yang dihasilkan dari pemodelan ini dapat digunakan oleh otoritas lokal untuk mengidentifikasi kawasan rentan, memprioritaskan infrastruktur perlindungan, dan mengoptimalkan perencanaan tata ruang di zona rawan banjir. Keluaran model memberikan masukan berharga bagi strategi kesiapsiagaan darurat, termasuk perencanaan jalur evakuasi dan analisis risiko spasial terhadap aset infrastruktur, sehingga menjadikan pendekatan pemodelan 2D sebagai alat strategis yang tidak tergantikan dalam pengambilan keputusan berbasis sains (Crenganis et al., 2025)

Tabel 5. 1 Perbandingan Perangkat Lunak Pemodelan Hidrolik Terkemuka

Perangkat Lunak	Dimensi	Metode Numerik	Keunggulan Utama	Lisensi
HEC-RAS	1D/2D	Finite Difference	Integrasi GIS, dokumentasi lengkap	Gratis (USACE)
MIKE FLOOD	1D/2D/3D	Finite Difference	Modul lengkap, akurasi tinggi	Berbayar (DHI)
TUFLOW	2D	Finite Volume	Komputasi GPU, sangat efisien	Berbayar (BMT WBM)
LISFLOOD-FP	2D	Inertial Equations	Ringan, cocok untuk DAS besar	Gratis (akademik)
Delft3D	2D/3D	Finite Difference	Modul sedimen dan kualitas air	Open Source

Sumber: Sintesis penulis berdasarkan Shrestha et al. (2025)

5.2.3 Model Elevasi Digital Beresolusi Tinggi sebagai Input Kritis

Kualitas model elevasi digital (DEM) merupakan faktor paling dominan yang menentukan akurasi simulasi hidrolik dua dimensi. Kesalahan elevasi bahkan hanya beberapa desimeter saja sudah cukup menghasilkan perbedaan signifikan dalam pola penyebaran genangan yang disimulasikan, sebab resolusi DEM secara langsung memengaruhi konveyansi saluran sungai dan prediksi luas genangan (Muthusamy et al., 2021). Sumber DEM yang tersedia secara publik seperti SRTM 30 m, ASTER GDEM 30 m,

dan AW3D30 umumnya tidak memadai untuk simulasi banjir perkotaan yang membutuhkan representasi akurat dari fitur-fitur mikrotopografi seperti tanggul kecil, permukaan jalan, dan saluran drainase yang sangat memengaruhi pola aliran. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa DEM global (GDEM) cenderung melebih-estimasi luas genangan dan meremehkan kedalaman banjir, sehingga menghasilkan penilaian risiko banjir yang tidak akurat; bahkan DEM berbasis NASADEM-30 menunjukkan kelebihan estimasi kerugian banjir hingga 161% dibandingkan model referensi beresolusi tinggi (Zandsalimi et al., 2024).

Teknologi LiDAR (*Light Detection and Ranging*) mampu menghasilkan data elevasi dengan resolusi horizontal 0,5 hingga 2 meter dan akurasi vertikal sub-desimeter, serta memiliki kemampuan menembus tutupan vegetasi untuk memperoleh elevasi permukaan tanah yang sebenarnya. Penerapan teknik LiDAR berbasis UAV terbukti mampu menghasilkan DEM dengan akurasi mencapai ± 3 cm, sehingga fitur mikrotopografi seperti saluran kecil dan permukaan jalan yang sangat memengaruhi kedalaman dan kecepatan aliran banjir dapat direpresentasikan secara akurat dalam model hidrodinamik (Li et al., 2021). Lebih lanjut, studi di kawasan perkotaan menunjukkan bahwa model terrain beresolusi sangat tinggi yang diperoleh dari UAV-LiDAR secara signifikan meningkatkan akurasi dan detail area genangan yang disimulasikan dibandingkan produk citra satelit atau airborne konvensional, menjadikan teknologi ini alternatif yang semakin terjangkau terutama untuk wilayah yang belum tercakup survei LiDAR nasional (Trepekli et al., 2022). Integrasi LiDAR DEM dalam simulasi 2D HEC-RAS pada wilayah perkotaan di Indonesia, seperti DAS Cipinang Jakarta,

juga telah menghasilkan nilai koefisien Nash–Sutcliffe sebesar 0,78 yang tergolong sangat memuaskan, mengindikasikan potensi besar penerapan teknologi ini untuk pemetaan bahaya banjir perkotaan yang cepat (Dahlia et al., 2025)

5.3 Penginderaan Jauh dan SIG: Perspektif Spasial dalam Analisis Banjir

Kemampuan penginderaan jauh dalam mengobservasi permukaan Bumi secara periodik dengan cakupan yang sangat luas menjadikannya instrumen yang tidak tergantikan dalam pemantauan dan analisis banjir. Teknologi ini memungkinkan peneliti dan praktisi manajemen bencana untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai kejadian banjir secara hampir real-time, bahkan di wilayah-wilayah terpencil yang sulit diakses melalui jalur darat. Penginderaan jauh mampu mengumpulkan data dengan lebih efisien dibandingkan observasi berbasis darat karena teknologi ini mencakup area spasial yang luas dalam waktu singkat dan memberikan gambaran menyeluruh mengenai objek target (Munawar et al., 2022). Munculnya konstelasi satelit generasi baru dan semakin terbukanya akses data untuk riset telah membuat penginderaan jauh kini jauh lebih terjangkau, terutama bagi komunitas penanggulangan bencana di negara berkembang yang selama ini bergantung pada infrastruktur pemantauan yang sangat terbatas (Schumann, 2024).

5.3.1 Sensor SAR: Pemantauan Banjir Menembus Awan

Synthetic Aperture Radar (SAR) beroperasi pada panjang gelombang mikro yang secara fisik mampu menembus tutupan awan serta beroperasi kapan saja tanpa bergantung pada pencahayaan matahari, sehingga menjadikannya instrumen unggulan dalam pemantauan banjir di segala kondisi cuaca. Efektivitas SAR dalam pemetaan banjir bersumber dari karakteristik backscatter yang khas pada permukaan air, di mana permukaan tersebut tampak gelap dalam citra SAR akibat pantulan spekuler sinyal radar yang menjauhi sensor, sehingga membedakan genangan air dari tipe tutupan lahan lainnya (Misra et al., 2025). Prinsip deteksi ini didasarkan pada kontras nilai backscatter antara permukaan air yang relatif tenang dengan permukaan daratan: air yang tenang berperilaku sebagai cermin spekuler yang memantulkan sinyal radar menjauhi sensor sehingga menghasilkan nilai backscatter sangat rendah dan tampak gelap dalam citra, sedangkan permukaan kasar daratan maupun vegetasi menghasilkan hamburan balik yang lebih kuat dan tampak lebih terang dalam citra.



Gambar 5. 3 Perbandingan Kemampuan Sensor SAR dan Optik dalam Pemantauan Banjir

(Sumber: Ilustrasi penulis berdasarkan Psomiadis et al., 2020)

Misi Sentinel-1 dari *European Space Agency* (ESA) telah menjadi tulang punggung operasional pemantauan banjir berbasis SAR di seluruh dunia, menyediakan citra SAR dengan resolusi spasial 10 meter dan siklus ulang temporal enam hari untuk konstelasi dua satelit. Frekuensi akuisisi yang tinggi ini sangat krusial untuk mengikuti dinamika banjir yang berubah secara cepat. Teknologi radar apertur sintetis pada satelit penginderaan jauh memiliki keunggulan signifikan karena mampu beroperasi sepanjang waktu tanpa terpengaruh kondisi cuaca maupun tutupan awan. Kemampuan ini menjadikan teknologi SAR sangat andal dalam mendukung penanganan bencana banjir secara global. Sentinel-1 tampil sebagai instrumen unggulan yang kini menjadi tulang punggung layanan pemetaan darurat di seluruh dunia (Amitrano et al. 2024). Kejadian bencana besar, ESA mengaktifkan mekanisme *Copernicus Emergency Management Service* (CEMS) yang memungkinkan akuisisi data prioritas dan produksi peta banjir dalam waktu kurang dari delapan jam setelah citra diperoleh.

5.3.2 Google Earth Engine: Komputasi Awan untuk Analisis Skala Besar

Google Earth Engine (GEE) telah merevolusi cara analisis data penginderaan jauh dilakukan dalam penelitian banjir. Platform komputasi awan ini memberikan akses ke arsip data satelit historis yang sangat luas sekaligus menyediakan infrastruktur komputasi berskala masif untuk memproses data dalam jumlah petabyte, sehingga peneliti tidak perlu lagi mengunduh data berukuran ratusan gigabyte karena seluruh komputasi dilakukan langsung di server Google melalui antarmuka pemrograman JavaScript atau

Python yang dapat diakses menggunakan peramban web biasa. Dalam studi pemantauan banjir Sentinel-1 SAR untuk mengidentifikasi pola genangan historis di seluruh DAS dalam cakupan yang luas hanya dengan menuliskan beberapa baris kode. Integrasi antara GEE, data penginderaan jauh, dan algoritma machine learning telah terbukti meningkatkan kemampuan prediksi banjir secara signifikan, di mana dataset referensi kejadian banjir historis yang dihasilkan dari analisis multi-temporal berperan krusial sebagai data latih model maupun untuk analisis tren frekuensi banjir jangka panjang (Hajji et al., 2025).



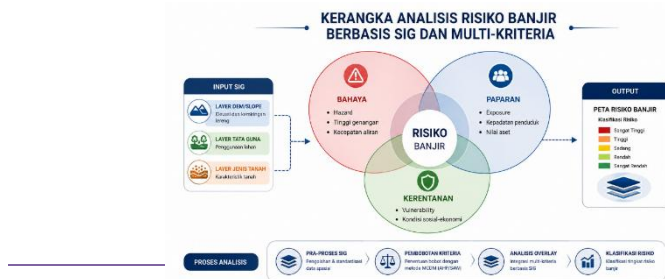
Gambar 5. 4 Alur Kerja Pemetaan Genangan Banjir Menggunakan Google Earth Engine

(Sumber: Ilustrasi penulis berdasarkan Amani et al., 2020)

5.3.3 SIG dan Analisis Multi-Kriteria untuk Pemetaan Risiko Banjir

Sistem Informasi Geografis (SIG) menyediakan platform terintegrasi untuk menggabungkan, menganalisis, dan memvisualisasikan berbagai lapisan data spasial yang relevan

dalam kerangka analisis risiko banjir. Risiko merupakan fungsi dari tiga komponen utama, yaitu bahaya (*hazard*), keterpaparan (*exposure*), dan kerentanan (*vulnerability*), yang ketiganya dapat diintegrasikan secara spasial melalui teknik overlay dalam lingkungan SIG sehingga menghasilkan peta risiko banjir yang komprehensif. Kombinasi metode Analytical Hierarchy Process (AHP) dengan Sistem Informasi Geografis (SIG) menjadi salah satu pendekatan yang paling populer dan banyak diterapkan dalam pemetaan kerentanan banjir di berbagai wilayah. Proses ini melibatkan identifikasi faktor-faktor yang memengaruhi kerentanan, seperti kemiringan lereng, kepadatan jaringan drainase, jenis tutupan lahan, jenis tanah, curah hujan tahunan, dan jarak dari sungai utama, yang kemudian diberikan bobot melalui proses perbandingan berpasangan berdasarkan penilaian pakar. Faktor-faktor berbobot tersebut diintegrasikan secara spasial dalam lingkungan SIG menggunakan teknik weighted overlay untuk menghasilkan peta zona bahaya banjir yang diklasifikasikan ke dalam tingkat kerentanan yang berbeda-beda (Aydin & Sevgi Birincioğlu, 2022). Keluaran akhir dari proses ini berupa peta yang mengklasifikasikan wilayah ke dalam zona-zona tingkat kerentanan.



Gambar 5. 5 Kerangka Analisis Risiko Banjir Berbasis SIG dan Multi-Kriteria

(Sumber: Ilustrasi penulis berdasarkan Khalid & Khan, 2024)

5.4 Machine Learning dan Kecerdasan Buatan dalam Prediksi Banjir

Revolusi kecerdasan buatan telah membawa dampak transformatif pada cara prediksi banjir dilakukan. Algoritma machine learning unggul dalam mengenali pola-pola rumit serta hubungan nonlinear pada data multidimensi, kemampuan yang sulit dicapai oleh model fisika konvensional. Lebih dari itu, kemampuan pembelajaran mesin untuk terus meningkatkan akurasinya seiring bertambahnya data menjadikannya sangat sesuai dengan era big data saat ini di mana volume data hidrologis, meteorologis, dan spasial terus meningkat secara eksponensial

5.4.1 Ensemble Learning: Random Forest dan Gradient Boosting

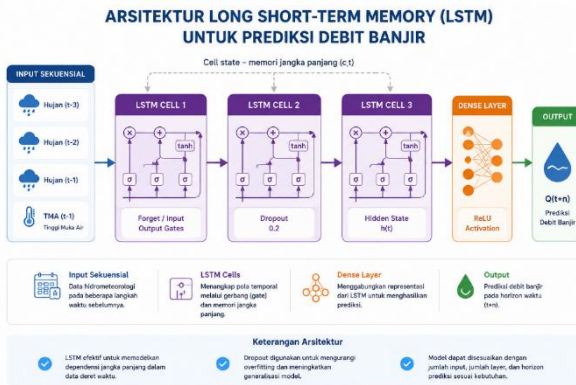
Algoritma ensemble yang menggabungkan prediksi dari sejumlah model dasar telah terbukti sangat efektif dalam pemetaan risiko banjir. Random Forest sebagai keputusan dari subset data latih yang dipilih secara acak, lalu menggabungkan seluruh prediksinya melalui voting mayoritas atau nilai rata-rata. Keunggulan utama metode ini terletak pada kemampuannya mengukur tingkat kepentingan setiap variabel input (variable importance), sehingga faktor-

faktor dominan penyebab kerentanan banjir dapat teridentifikasi dengan lebih jelas.. Sementara itu, XGBoost dan implementasi Gradient Boosting lainnya membangun pohon secara sekuensial untuk mengoreksi kesalahan residual model sebelumnya, memungkinkan konvergensi menuju prediksi yang sangat akurat bahkan dengan data pelatihan yang terbatas. Studi perbandingan komprehensif menunjukkan bahwa algoritma ensemble secara konsisten mengungguli metode tunggal, di mana RF mencapai AUC tertinggi sebesar 0,87, diikuti XGBoost sebesar 0,84, keduanya melampaui ANN (0,83) dan SVM (0,82) dalam penilaian kerentanan banjir di kawasan perkotaan pegunungan (Ren et al., 2024).

5.4.2 Deep Learning: LSTM untuk Prediksi Deret Waktu Hidrologi

Long Short-Term Memory adalah pengembangan dari arsitektur *Recurrent Neural Network* yang dirancang untuk mengatasi kelemahan mendasar RNN konvensional, yakni masalah *vanishing gradient*. Hal ini dicapai melalui mekanisme tiga gerbang kendali, salah satunya *forget gate*, yang mengatur informasi mana yang perlu diingat atau diabaikan. Menyimpan, memperbarui, dan mengeluarkan informasi dari sel memori jangka panjang, sehingga model mampu mempertahankan informasi kejadian hujan beberapa hari sebelumnya yang memengaruhi kejenuhan tanah dan potensi aliran permukaan. Kemampuan ini menjadikan LSTM unggul dalam pemodelan hujan-limpasan, termasuk untuk prediksi debit secara real-time dalam sistem peringatan dini banjir yang memanfaatkan masukan deret waktu dari jaringan sensor IoT dengan horizon prediksi 1–24 jam ke

depan. Kratzert et al. (2021) menunjukkan bahwa model LSTM yang dilatih dengan memanfaatkan sinergi berbagai kumpulan data meteorologis secara regional mampu melampaui akurasi pendekatan hidrologi klasik, sebuah temuan yang sangat relevan bagi Indonesia mengingat sebagian besar DAS di kepulauan ini belum memiliki pos pengukuran hidrologi yang memadai, sehingga pendekatan transfer learning dengan model LSTM pre-trained kini aktif dieksplorasi untuk estimasi debit di DAS tanpa data di kawasan tropis.



Gambar 5. 6 LSTM untuk Prediksi Debit Banjir

(Sumber: Ilustrasi penulis berdasarkan Ebtehaj & Bonakdari, 2024)

5.4.3 Convolutional Neural Network untuk Segmentasi Citra Banjir

Jaringan saraf konvolusional mengekstrak fitur spasial hierarkis dari data citra secara bertahap, di mana lapisan awal menangkap fitur primitif seperti tepi dan tekstur, sedangkan lapisan yang lebih dalam membangun representasi abstrak dan semantis yang relevan untuk segmentasi citra satelit.

Inovasi utama U-Net terletak pada arsitektur encoder-decoder simetris dengan skip connections yang menghubungkan kedua sisi pada resolusi yang sama, sehingga memungkinkan penggabungan informasi kontekstual skala besar dengan detail spasial resolusi tinggi untuk menghasilkan segmentasi yang akurat pada objek berukuran beragam. Arsitektur U-Net dengan encoder ResNet telah banyak digunakan dalam aplikasi pemetaan genangan banjir berbasis SAR karena kemampuannya mengekstrak fitur spasial hierarkis sekaligus menekan noise speckle (Konapala et al., 2021)

Tabel 5. 2 Ringkasan Perbandingan Metode Machine Learning dalam Analisis Banjir

Metode	Tipe Tugas	Input Utama	Keunggulan	Keterbatasan
Random Forest	Klasifikasi/Regresi	Tabular/SIG	Robust, interpretable, var. importance	Kurang ideal untuk deret waktu
XGBoost	Klasifikasi/Regresi	Tabular	Akurasi tinggi, regularisasi L1/L2	Banyak hyperparameter
LSTM	Prediksi deret waktu	Time-series hidro	Memori jangka panjang, generalisasi DAS	Butuh data latih besar
CNN/U-Net	Segmentasi citra	Citra SAR/optik	Fitur spasial otomatis, akurasi tinggi	Perlu GPU dan label banyak
Transformer	Prediksi multi-step	Multi-variate TS	Attention mechanism, paralel	Sangat data-hungry, mahal

PINN	Simulasi fisik+data	Persamaan fisika+obs	Konsisten hukum fisika	Formulasi sangat kompleks
------	---------------------	-------------------------	---------------------------	---------------------------------

Sumber: Sintesis penulis berdasarkan Kumar et al. (2023)

5.4.4 Physics-Informed Neural Networks: Sinergi Fisika dan Data

Physics-Informed Neural Networks (PINN) merupakan pendekatan mutakhir yang mengintegrasikan kemampuan representasi jaringan saraf tiruan dengan kendala persamaan diferensial parsial yang mengatur proses fisik. Berbeda dari model deep learning murni yang belajar sepenuhnya dari data, PINN menyematkan persamaan kekekalan massa, momentum, dan adveksi difusi secara eksplisit ke dalam fungsi kerugian yang diminimalkan selama pelatihan, sehingga konsistensi fisik dari setiap prediksi terjamin (Karniadakis et al., 2021).

5.5 Sistem Peringatan Dini Banjir: Dari Sensor Menuju Tindakan

Sistem peringatan dini banjir yang efektif merupakan salah satu investasi paling cost-effective dalam manajemen risiko bencana. Berbagai studi menunjukkan rasio manfaat-biaya yang sangat menguntungkan di mana setiap satu dolar yang diinvestasikan dalam sistem peringatan dini menghasilkan penghematan empat hingga sepuluh dolar dari kerugian yang dapat dihindari. Namun demikian, efektivitas sistem peringatan dini tidak semata ditentukan oleh kecanggihan komponen teknologinya, melainkan oleh

integrasi yang harmonis antara komponen teknis dan non-teknis dalam sistem yang berpusat pada kebutuhan manusia.



Gambar 5. 7 Empat Komponen Utama Sistem Peringatan Dini Banjir

(Sumber: Ilustrasi penulis berdasarkan Rokhideh et al., 2025)

5.5.1 Infrastruktur Pengukuran Hidrometeorologis

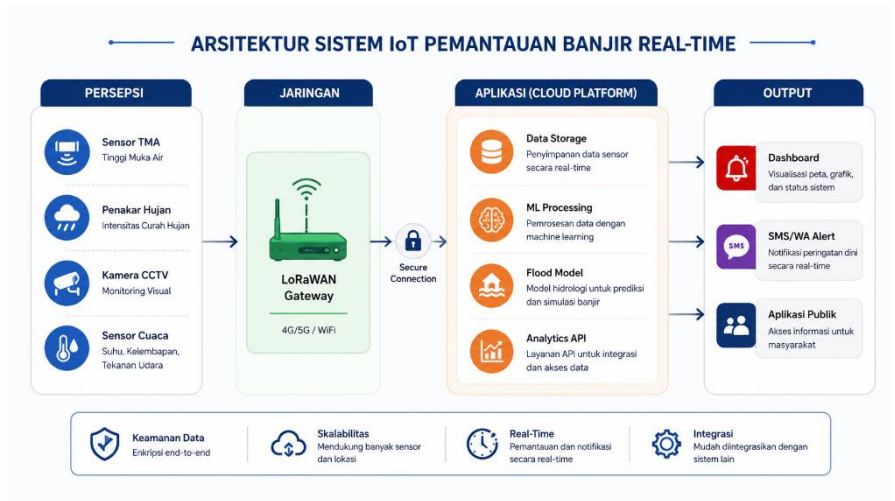
Jaringan stasiun hidrometeorologis otomatis merupakan fondasi sistem peringatan dini banjir, di mana stasiun cuaca dan alat ukur muka air mencatat variabel esensial dan kecepatan angin secara kontinu dengan interval 5 hingga 15 menit, kemudian mengirimkan data secara real-time ke pusat pengolahan melalui kanal GPRS/4G, LoRaWAN,

maupun telemetri satelit VSAT. Teknologi LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) membuka peluang baru dalam pemantauan hidrologi di daerah terpencil karena memungkinkan transmisi data sensor berdaya sangat rendah hingga jarak 15 km pada kondisi line-of-sight, dengan daya tahan baterai bertahun-tahun dan biaya instalasi yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem telemetri konvensional. Zakaria et al. (2023) mengembangkan sistem pemantauan dan peringatan dini banjir berbasis LoRaWAN yang dirancang untuk menjaga konektivitas jaringan yang luas, konsumsi daya minimal, dan laju transmisi data rendah, serta terbukti efektif melalui implementasi nyata di lapangan. Dengan demikian, LoRaWAN menjadi solusi strategis untuk memperluas cakupan jaringan.

5.5.2 IoT dan Sensor Cerdas dalam Pemantauan Banjir

Paradigma *Internet of Things* (IoT) telah memperluas konsep jaringan sensor menjadi ekosistem perangkat yang saling terhubung dan mampu berinteraksi secara cerdas dengan lingkungannya. Dalam konteks pemantauan banjir, sensor-sensor IoT yang dipasang di titik-titik strategis seperti jembatan, bendungan, muara sungai, dan kawasan rawan genangan perkotaan secara otomatis mengumpulkan, memproses, dan mengirimkan data ke platform analitik berbasis cloud untuk menghasilkan gambaran kondisi hidrologi yang komprehensif secara *near-real-time*. Perkembangan *edge computing* semakin memperkuat kapabilitas ini dengan memungkinkan sebagian pemrosesan data dilakukan langsung di perangkat sensor, sehingga deteksi anomali, kompresi data, dan pemicuan peringatan lokal dapat berjalan secara mandiri tanpa bergantung penuh

pada koneksi server pusat. Integrasi teknologi IoT ke dalam sistem peringatan dini telah berkembang pesat sebagai metode efektif untuk mengumpulkan data lingkungan dan memproduksi peringatan bencana secara otomatis. Pendekatan ini tidak hanya menghemat bandwidth transmisi dan biaya komunikasi, tetapi juga mereduksi latensi yang bersifat kritis dalam skenario peringatan dini, di mana setiap menit waktu respons memiliki nilai yang sangat besar bagi keselamatan jiwa (Esposito et al., 2022).



Gambar 5. 8 Arsitektur Sistem IoT untuk Pemantauan Banjir Real-Time

(Sumber: Ilustrasi penulis berdasarkan Cea & Costabile, 2022)

5.5.3 Prediksi Ensemble dan Pendekatan Probabilistik

Ketidakpastian merupakan karakteristik inheren dalam sistem prediksi banjir, bersumber dari kesalahan estimasi curah hujan, ketidakpastian kondisi awal model hidrologis,

ketidakakuratan parameter, serta ketidaksempurnaan struktur model itu sendiri. Pendekatan deterministik tidak mampu mengkomunikasikan spektrum ketidakpastian ini secara operasional kepada pengambil keputusan, sehingga prediksi ensemble menjadi solusi dengan menjalankan model secara berulang menggunakan variasi sistematis pada input dan parameter untuk menghasilkan informasi probabilistik tentang kemungkinan berbagai kejadian hidrologis. GloFAS (*Global Flood Awareness System*) dari ECMWF mengoperasikan ensemble 51 anggota dengan cakupan global dan horizon prediksi hingga 30 hari, dan integrasinya dengan model hidrologis lokal yang terkalibrasi semakin banyak diadopsi oleh otoritas manajemen bencana di negara-negara berkembang, termasuk Indonesia, sebagai strategi peningkatan akurasi prediksi banjir skala regional (Harrigan et al., 2023).

5.6 Teknologi Radar dan Penginderaan Atmosfer

Estimasi curah hujan yang akurat dalam resolusi spasial dan temporal tinggi merupakan tantangan fundamental sekaligus prasyarat mutlak bagi prediksi banjir yang andal. Jaringan penakar hujan konvensional, meskipun memberikan pengukuran titik yang akurat, menghadapi keterbatasan fundamental dalam merepresentasikan variabilitas spasial curah hujan yang tinggi terutama untuk sistem konvektif berskala meso yang sering menjadi pemicu utama banjir bandang di Indonesia

5.6.1 Radar Cuaca Doppler Polarimetrik

Radar cuaca Doppler mengukur intensitas curah hujan berdasarkan daya pantulan sinyal elektromagnetik oleh butiran air hujan yang dinyatakan sebagai nilai reflektivitas, kemudian dikonversi menjadi estimasi curah hujan melalui hubungan empiris Z-R. Dibandingkan penakar hujan konvensional, radar mampu mencakup area hingga ratusan kilometer dengan resolusi spasiotemporal yang tinggi, yakni sekitar 1 km² setiap 5 menit secara operasional (Sokol et al., 2021). Teknologi dual polarisasi yang kini menjadi standar global memberikan informasi tambahan mengenai ukuran, bentuk, dan fase partikel presipitasi melalui pengukuran reflektivitas diferensial, sehingga memungkinkan estimasi curah hujan yang lebih akurat sekaligus membedakan antara hujan, es, dan campuran keduanya di dalam kolom atmosfer kemampuan yang sangat krusial untuk wilayah dataran tinggi maupun kepulauan seperti Indonesia, di mana BMKG mengoperasikan jaringan radar C-band dengan rencana perluasan bertahap.

5.6.2 Satelit GPM dan Produk IMERG

Global Precipitation Measurement merupakan generasi penerus TRMM dengan kemampuan yang jauh lebih unggul, mengintegrasikan radar curah hujan ganda dan radiometer pasif multikanal dalam konstelasi inti, yang dikombinasikan dengan konstelasi mitra berpengamatan gelombang mikro, untuk menghasilkan estimasi curah hujan global setiap 30 menit pada resolusi spasial 0,1° × 0,1° melalui algoritma IMERG. Produk IMERG tersedia dalam tiga tingkat di mana Early Run menjadi pilihan utama untuk keperluan peringatan

dini meskipun akurasiya lebih terbatas, terutama untuk curah hujan intensitas sangat tinggi di kawasan tropis (Ramadhan et al., 2022). Validasi terhadap data penakar hujan di wilayah Benua Maritim Indonesia menunjukkan bahwa ketiga produk IMERG memiliki performa yang memadai pada resolusi temporal bulanan hingga tahunan, namun akurasi pada resolusi sub-harian masih perlu ditingkatkan, dan koreksi bias lokal tetap diperlukan sebelum diterapkan secara langsung pada pemodelan hidrologi regional.

5.7 UAV dan Drone: Survei Presisi Tinggi untuk Analisis Banjir

Teknologi Unmanned Aerial Vehicle telah mengalami kemajuan dramatis yang didorong oleh miniaturisasi komponen elektronik, peningkatan kapasitas baterai, dan pematangan algoritma navigasi otonom. Dalam manajemen banjir, UAV mengisi ceruk yang sangat berharga antara pengamatan darat yang terbatas jangkauannya dan pengamatan satelit yang memiliki resolusi dan temporal revisit yang tidak selalu sesuai kebutuhan operasional. Fleksibilitas UAV dalam terbang rendah di atas area target pada waktu kapanpun memungkinkan pengambilan data dengan resolusi yang jauh melampaui sensor satelit manapun yang tersedia saat ini

5.7.1 Fotogrametri UAV dan Rekonstruksi DEM Resolusi Sangat Tinggi

Teknik *Structure from Motion* (SfM) yang diimplementasikan dalam perangkat lunak fotogrametri

modern memungkinkan rekonstruksi geometri 3D dari sekumpulan foto udara tumpang tindih yang diambil oleh UAV, menghasilkan DEM dengan resolusi horizontal 5–10 cm dan akurasi vertikal 3–15 cm bergantung pada kualitas kamera, ketinggian penerbangan, kondisi cuaca, serta kepadatan titik kontrol tanah. Kualitas ini melampaui seluruh sumber DEM yang tersedia secara publik dan sangat relevan untuk simulasi banjir perkotaan yang memerlukan representasi detail saluran drainase, trotoar, maupun hambatan aliran buatan lainnya. Su et al. (2022) menunjukkan bahwa simulasi banjir beresolusi tinggi berbasis UAV-SfM dengan ukuran grid 0,5 m menghasilkan kesesuaian yang lebih baik terhadap data observasi lapangan dibandingkan simulasi dengan resolusi lebih kasar (5, 10, dan 20 m), mencakup akurasi ekstent banjir, kedalaman, maupun waktu kejadian. Selain untuk pembuatan DEM pra-kejadian, UAV juga sangat efektif untuk pemetaan kerusakan pasca-banjir; dalam waktu beberapa jam setelah air surut, tim UAV dapat mendokumentasikan kerusakan infrastruktur, erosi tebing sungai, dan deposit material banjir secara spasial dengan resolusi sentimetrik dokumentasi yang sangat bernilai untuk kajian forensik banjir, validasi model simulasi, dan perencanaan rehabilitasi. Di Indonesia, pemanfaatan UAV untuk respons bencana banjir telah semakin meluas di kalangan BPBD provinsi dan kabupaten.

5.7.2 Sensor Khusus pada UAV: Multispektral dan Termal

Kemampuan analitik UAV dapat diperluas secara signifikan melalui integrasi sensor multispektral dan termal inframerah yang melampaui keterbatasan kamera RGB konvensional. Sensor multispektral memungkinkan

perhitungan indeks air seperti NDWI dan MNDWI untuk mengidentifikasi area genangan secara lebih akurat, termasuk di bawah naungan vegetasi, sementara sensor termal inframerah mendeteksi anomali suhu permukaan yang mengindikasikan rembesan pada tanggul. Sistem multi-sensor berbasis UAV yang mengintegrasikan kamera termal inframerah, kamera RGB, dan LiDAR memungkinkan akuisisi data secara real-time, cepat, dan tanpa kontak fisik pada struktur tanggul, sehingga mengatasi ketidakefisienan serta risiko keselamatan yang melekat pada metode inspeksi manual (Su et al., 2024)

5.8 Digital Twin dan Komputasi Awan dalam Manajemen Banjir Modern

Konsep Digital Twin yang awalnya diperkenalkan dalam konteks manajemen siklus hidup produk manufaktur kini telah berkembang menjadi paradigma yang diadopsi secara luas dalam manajemen infrastruktur dan kebencanaan, termasuk pengelolaan banjir. Digital Twin didefinisikan sebagai representasi virtual dinamis dari suatu sistem fisik nyata yang dirancang untuk pemantauan real-time, dukungan pengambilan keputusan, dan pengendalian sistem (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Dalam konteks hidrologi, Digital Twin banjir mencakup replika digital dari daerah aliran sungai (DAS), jaringan sungai, infrastruktur pengendali banjir, dan kawasan terbangun, yang terus diperbarui berdasarkan arus data sensor secara real-time dan dikombinasikan dengan kemampuan simulasi prospektif; berbeda dengan model simulasi konvensional yang dijalankan

secara episodik, Digital Twin beroperasi secara kontinu sehingga selalu mencerminkan kondisi terkini sistem fisiknya.



Gambar 5. 9 Konsep dan Arsitektur Digital Twin
(Sumber: Ilustrasi penulis berdasarkan Raes et al., 2025)

Keunggulan paradigma Digital Twin (DT) dibandingkan simulasi konvensional terletak pada kemampuan sinkronisasi data secara real-time dan eksplorasi skenario what-if secara dinamis. Ketika sensor hidrologi di lapangan mendeteksi kondisi yang mendekati ambang kritis, DT secara otomatis memperbarui kondisi awal model dan menjalankan sejumlah simulasi skenario secara paralel melalui infrastruktur cloud. Pendekatan ini dibuktikan oleh platform K-Twin SJ yang memanfaatkan data real-time dan model simulasi hidrologis untuk mendukung pengambilan keputusan respons banjir dan manajemen sumber daya air secara terintegrasi (Park & You, 2023).

5.8.1 Platform Cloud Computing untuk Pemodelan Banjir Operasional

Infrastruktur cloud computing telah menjadi fondasi kritis bagi implementasi sistem manajemen banjir modern

berskala penuh, karena elastisitasnya memungkinkan kapasitas pemrosesan ditingkatkan secara otomatis saat permintaan komputasi melonjak selama kejadian banjir, lalu dikurangi kembali setelah kondisi mereda sehingga mengoptimalkan biaya operasional. Pembangunan sistem prediksi banjir berbasis cloud yang andal dan skalabel "dengan investasi awal yang jauh lebih terjangkau dibandingkan infrastruktur on-premise setara" (Guo et al., 2024)

5.9 Integrasi Platform Terpadu dan Implementasi di Indonesia

Efektivitas sistem prediksi dan manajemen banjir modern tidak ditentukan semata oleh kecanggihan masing-masing komponen teknologinya, melainkan oleh seberapa mulus komponen-komponen tersebut dapat diintegrasikan dalam satu alur kerja operasional yang kohesif. Integrasi yang sukses memerlukan standarisasi format pertukaran data, protokol komunikasi antar sistem yang andal, arsitektur layanan yang modular dan interoperable, serta antarmuka pengguna yang intuitif bagi operator dengan beragam latar belakang teknis.

5.9.1 Arsitektur Berlapis Sistem Terpadu Manajemen Banjir

Arsitektur sistem terpadu manajemen banjir umumnya diorganisasikan dalam empat lapisan fungsional yang beroperasi secara hirarkis. Lapisan akuisisi dan integrasi data mengumpulkan arus data dari sumber-sumber heterogen

jaringan sensor IoT, produk satelit, keluaran model cuaca numerik, dan basis data GIS kemudian mengonversinya ke format standar terpadu menggunakan protokol seperti OGC SensorThings API atau WaterML. Lapisan pemodelan dan analitik menjalankan model prediksi mulai dari model hidrologis-hidrolik deterministik hingga model *ensemble machine learning*. Ahmed et al. (2024) menegaskan bahwa integrasi teknik IoT dan kecerdasan buatan telah menemukan aplikasi yang luas di berbagai bidang, termasuk pemantauan lingkungan dan kota pintar, yang memperkuat relevansi pendekatan hibrida ini dalam pemodelan banjir berbasis data. Lapisan peringatan dini secara otomatis membandingkan keluaran model dengan matriks ambang batas yang telah ditetapkan, lalu memicu notifikasi melalui berbagai kanal komunikasi SMS massal, WhatsApp, sirine komunitas, media sosial resmi, dan aplikasi mobile kepada pemangku kepentingan sesuai tingkat kewaspadaan yang berlaku. Lapisan visualisasi dan pengambilan keputusan menyajikan seluruh informasi tersebut dalam antarmuka dasbor berbasis web maupun mobile, menampilkan kondisi terkini dan prakiraan dalam peta interaktif yang mudah dipahami oleh berbagai kalangan pengambil keputusan

5.9.2 Kemajuan dan Tantangan Implementasi di Indonesia

Indonesia telah mencatat kemajuan signifikan dalam pengembangan kapasitas prediksi dan peringatan dini banjir, yang tercermin dari berbagai inisiatif kelembagaan lintas sektor; BMKG mengoperasikan sistem prediksi berbasis model cuaca numerik beresolusi tinggi, BNPB melalui platform InAWARE mengintegrasikan data kebencanaan

dalam dasbor terpadu yang dapat diakses pemerintah daerah, serta Balai Besar Wilayah Sungai di bawah Kementerian PUPR menjalankan sistem FEWS untuk DAS prioritas di Jawa termasuk Ciliwung, Citarum, dan Bengawan Solo dengan integrasi data telemetri jaringan AWLR dan model hidrologis-hidrolik yang menghasilkan prakiraan muka air ber-lead time 6 hingga 24 jam. Namun demikian, kesenjangan kapasitas yang substansial masih terjadi antara DAS prioritas di Jawa dengan ribuan DAS di luar Jawa, mengingat wilayah Sulawesi, Kalimantan, Sumatera, dan Papua masih kekurangan infrastruktur pemantauan yang memadai, sementara perubahan iklim terbukti telah meningkatkan amplitudo dan frekuensi ekstrem curah hujan sekitar 25% di wilayah utara Indonesia, sehingga memperbesar urgensi perluasan kapasitas prediksi banjir secara merata ke seluruh kepulauan (Hariadi et al., 2025).

5.10 Tantangan Utama dan Peluang Pengembangan ke Depan

Revolusi kecerdasan buatan telah membawa dampak transformatif pada cara prediksi banjir dilakukan. Hubungan nonlinear dalam data multidimensi yang tidak dapat ditangkap oleh model fisika konvensional. Lebih dari itu, kemampuan pembelajaran mesin untuk terus meningkatkan akurasi seiring bertambahnya data menjadikannya sangat sesuai dengan era big data saat ini di mana volume data hidrologis, meteorologis, dan spasial terus meningkat secara eksponensial

5.10.1 Kelangkaan Data dan Ketidakmerataan Infrastruktur Pemantauan

Tantangan paling mendasar dalam pengembangan sistem prediksi banjir di Indonesia adalah kelangkaan data yang parah dan distribusi infrastruktur pemantauan yang tidak merata. Model hidrologi maupun algoritma machine learning yang paling canggih sekalipun tidak akan menghasilkan prediksi yang andal. Kepadatan jaringan pos pengukuran curah hujan dan debit sungai di luar Jawa masih jauh dari standar yang direkomendasikan oleh WMO, sehingga menciptakan kesenjangan besar dalam basis pengetahuan hidrologis bagi wilayah-wilayah yang justru paling membutuhkannya. Banjir di wilayah terpencil menimbulkan tantangan signifikan akibat kelangkaan data yang mempersulit upaya penilaian dampak dan mitigasi (Sampurno et al., 2024)..

5.10.2 Kesenjangan Kapasitas Sumber Daya Manusia dan Kelembagaan

Implementasi efektif teknologi-teknologi sistem prediksi banjir modern memerlukan profil kompetensi sumber daya manusia yang bersifat lintas disiplin, mencakup hidrologi dan hidrolika, statistik dan machine learning, pemrograman dalam Python atau R, penginderaan jauh dan GIS, manajemen basis data, serta komunikasi risiko dan desain antarmuka. Profil kompetensi yang sedemikian luas ini masih sangat langka di institusi-institusi pemerintah maupun akademik di Indonesia, sehingga menciptakan bottleneck yang membatasi kecepatan adopsi teknologi. Tantangan ini diperparah oleh fragmentasi kelembagaan yang melibatkan

banyak institusi dengan kewenangan yang tumpang tindih termasuk BMKG, BNPB, Kementerian PUPR, BRIN, dan pemerintah daerah yang menyulitkan pembangunan sistem peringatan dini yang terintegrasi. Koordinasi yang efektif dalam pengumpulan data, standarisasi format, berbagi informasi, dan respons operasional memerlukan landasan regulasi serta mekanisme koordinasi antarlembaga yang jelas dan berfungsi dengan baik. Banyak negara tidak memiliki model prakiraan yang andal, stasiun pengukuran yang memadai, atau keahlian teknis dan tenaga ahli yang cukup untuk memperkirakan curah hujan dan mengeluarkan peringatan secara tepat waktu. Pembelajaran dari negara-negara yang telah berhasil membangun sistem peringatan dini banjir yang efektif, seperti Belanda, Bangladesh, dan Thailand, menunjukkan bahwa integrasi kelembagaan merupakan faktor penentu keberhasilan yang tidak kalah pentingnya dibandingkan faktor teknologi semata (Painter et al., 2025)

5.10.3 Peluang Strategis: Sains Terbuka, AI Generasi Baru, dan Sensor Terjangkau

Di balik berbagai tantangan tersebut, terdapat sejumlah peluang strategis yang dapat dimanfaatkan untuk mempercepat kemajuan teknologi prediksi banjir di Indonesia. Gerakan sains terbuka yang semakin menguat ditandai dengan tersedianya model open-source berkualitas tinggi, dataset publik, dan platform komputasi gratis secara signifikan menurunkan hambatan pengembangan sistem prediksi banjir canggih tanpa investasi infrastruktur yang besar. Perkembangan foundation models dalam ilmu kebumihan membuka peluang baru melalui pendekatan transfer learning, di mana model yang dilatih pada dataset

hidroklimatologi berskala masif dapat di-fine-tune dengan data lokal yang terbatas untuk mengatasi kendala kelangkaan data. Miniaturisasi sensor IoT yang terus berkembang turut memungkinkan pemasangan jaringan pemantauan berskala luas dengan biaya terjangkau, sehingga secara fundamental mengubah ekonomi pemantauan hidrologi dan memperluas jangkauan sistem peringatan dini ke wilayah-wilayah terpencil. Pendekatan berbasis kecerdasan buatan terbukti mampu meningkatkan keandalan prediksi banjir ekstrem di daerah aliran sungai tanpa data pengukuran, dengan waktu tunggu lima hari yang setara akurasinya dengan sistem konvensional untuk prediksi hari yang sama (Nearing et al., 2024).



Gambar 5. 10 Peta Jalan Pengembangan Teknologi Prediksi Banjir 2026–2036

(Sumber: Ilustrasi penulis berdasarkan Aghenda et al., 2025)

DAFTAR PUSTAKA

- Aghenda, M., Labbaci, A., Bouchaou, L., Hssaisoune, M., & Ait Brahim, Y. (2025). Flood prediction using machine learning and deep learning models: a systematic review. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s42990-025-00201-6>
- Ahmed, I., Ahmad, M., Jeon, G., & Chehri, A. (2024). An Internet of Things and AI-powered framework for long-term flood risk evaluation. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(3), 3812–3819. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3308564>
- Amitrano, D., Di Martino, G., Di Simone, A., & Imperatore, P. (2024). Flood detection with SAR: A review of techniques and datasets. *Remote Sensing*, 16(4), 656. <https://doi.org/10.3390/rs16040656>
- Aneesh, P. C., & Thomas, R. M. (2024). Hydraulic modeling of the Periyar River using HEC-RAS: Unraveling flow dynamics. *Water Science and Technology*, 89(10), 2676–2684. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.138>
- Aydin, M. C., & Sevgi Birincioğlu, E. (2022). Flood risk analysis using gis-based analytical hierarchy process: a case study of Bitlis Province. *Applied Water Science*, 12(6), 122. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01655-x>
- Brunner, M. I., Gilleland, E., Wood, A., Swain, D. L., & Clark, M. (2020). Spatial dependence of floods shaped by spatiotemporal variations in meteorological and land-surface processes. *Geophysical Research Letters*, 47(13),

- e2020GL088000. <https://doi.org/10.1029/2020GL088000>
- Cea, L., & Costabile, P. (2022). Flood risk in urban areas: Modelling, management and adaptation to climate change. A review. *Hydrology*, 9(3), 50. <https://doi.org/10.3390/hydrology9030050>
- Chowdhury, A. A., & Kesserwani, G. (2025). LISFLOOD-FP 8.2: GPU-accelerated multiwavelet discontinuous Galerkin solver with dynamic resolution adaptivity for rapid, multiscale flood simulation. *Geoscientific Model Development*, 18, 9827–9854. <https://doi.org/10.5194/gmd-18-9827-2025>
- Costabile, P., & Costanzo, C. (2021). A 2D-SWEs framework for efficient catchment-scale simulations: Hydrodynamic scaling properties of river networks and implications for non-uniform grids generation. *Journal of Hydrology*, 599, 126306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126306>
- Crenganis, L. M., Pricop, C. I., Diac, M., Olteanu-Raimond, A. M., & Loghin, A. M. (2025). Flood risk prediction and management by integrating GIS and HEC-RAS 2D hydraulic modelling: A case study of Ungheni, Iasi County, Romania. *Water*, 17(20), 2959. <https://doi.org/10.3390/w17202959>
- Dahlia, S., Suprayogi, S., Purwanto, T.H. et al. Integrated rainfall-runoff, HEC-RAS 2D, and Lidar DEM model for flood simulation in urban ungauged catchment area: case study of Cipinang catchment, Jakarta City, Indonesia. *Model. Earth Syst. Environ.* 11, 319 (2025). <https://doi.org/10.1007/s40808-025-02483-z>

- Ebtehaj, I., & Bonakdari, H. (2024). CNN vs. LSTM: a comparative study of hourly precipitation intensity prediction as a key factor in flood forecasting frameworks. *Atmosphere*, 15(9), 1082. <https://doi.org/10.3390/atmos15091082>
- Esposito, M., Palma, L., Belli, A., Sabbatini, L., & Pierleoni, P. (2022). Recent advances in Internet of Things solutions for early warning systems: A review. *Sensors*, 22(6), 2124. <https://doi.org/10.3390/s22062124>
- Gelete, G., Nourani, V., Gokcekus, H., & Gichamo, T. (2023). Ensemble physically based semi-distributed models for the rainfall-runoff process modeling in the data-scarce Katar catchment, Ethiopia. *Journal of Hydroinformatics*, 25(2), 567–592. <https://doi.org/10.2166/hydro.2023.197>
- Guo, Y., Zhang, X., Liu, X., Chen, J., & Wang, Y. (2024). AI-based ensemble flood forecasts and its implementation in multi-objective robust optimization operation for reservoir flood control. *Water Resources Research*, 60(5), e2023WR035693. <https://doi.org/10.1029/2023WR035693>
- Habte, D. G., Belliethathan, S., & Ayenew, T. (2024). Analysis of hydrological response to climate and land use land cover changes in Jewha Watershed using SWAT model, Ethiopia. *Air, Soil and Water Research*, 17, 1–17. <https://doi.org/10.1177/11786221241306768>
- Hariadi, M. H., Harinto, S. N., Sunarti, S., & Ronda, R. J. (2025). Review article: Past and future climate-related hazards in Indonesia. *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-584>

- Harrigan, S., Zsoter, E., Cloke, H., Salamon, P., & Prudhomme, C. (2023). Daily ensemble river discharge reforecasts and real-time forecasts from the operational Global Flood Awareness System. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(1), 1–19. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1-2023>
- Karim, F., Armin, M. A., Ahmedt-Aristizabal, D., Tychsen-Smith, L., & Petersson, L. (2023). A review of hydrodynamic and machine learning approaches for flood inundation modeling. *Water*, 15(3), 566. <https://doi.org/10.3390/w15030566>
- Khalid, R., & Khan, U. T. (2024). Flood susceptibility mapping using ANNs: a case study in model generalization and accuracy from Ontario, Canada. *Geocarto International*, 39(1), 2316653. <https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2316653>
- Konapala, G., Kumar, S. V., & Ahmad, S. K. (2021). Exploring Sentinel-1 and Sentinel-2 diversity for flood inundation mapping using deep learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 180, 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.08.016>
- Kratzert, F., Klotz, D., Hochreiter, S., & Nearing, G. S. (2021). A note on leveraging synergy in multiple meteorological data sets with deep learning for rainfall–runoff modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 2685–2703. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2685-2021>
- Kumar, V., Sharma, K. V., Caloiero, T., Mehta, D. J., & Singh, K. (2023). Comprehensive overview of flood modeling approaches: A review of recent advances. *Hydrology*,

10(7), 141. <https://doi.org/10.3390/hydrology 1007 0141>

- Kurniadi, A., Weller, E., Salmond, J., & Aldrian, E. (2024). Future projections of extreme rainfall events in Indonesia. *International Journal of Climatology*, 44(1), 1–18. <https://doi.org/10.1002/joc.8321>
- Li, B., Hou, J., Li, D., Yang, D., Han, H., Bi, X., Wang, X., Hinkelmann, R., & Xia, J. (2021). Application of LiDAR UAV for high-resolution flood modelling. *Water Resources Management*, 35(5), 1433–1447. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02783-w>
- Li, J., Wang, Z., & Zhang, T. (2023). Flood simulation using the hydrological model and the hydrological–hydrodynamic coupling model in a small watershed in semi-arid and sub-humid region, North China. *Journal of Water and Climate Change*, 14(10), 3496–3516. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.161>
- Li, X., Ye, L., Gu, X., Chu, J., Wang, J., Zhang, C., & Zhou, H. (2024). Development of A distributed modeling framework considering Spatiotemporally varying hydrological processes for Sub-Daily flood forecasting in Semi-Humid and Semi-Arid watersheds. *Water Resources Management*, 38(10), 3725–3754. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03837-5>
- Liu, Q., Du, M., Wang, Y., Deng, J., Yan, W., Qin, C., Liu, M., & Liu, J. (2024). Global, regional and national trends and impacts of natural floods, 1990–2022. *Bulletin of the World Health Organization*, 102(6), 410–420. <https://doi.org/10.2471/BLT.23.290243>
- Misra, A., White, K., Nsutezo, S. F., Straka III, W., & Lavista, J. (2025). Mapping global floods with 10 years of satellite

- radar data. *Nature Communications*, 16(1), 5762. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60973-1>
- Mitsopoulos, G., Panagiotatou, E., Sant, V., Baltas, E., Diakakis, M., Lekkas, E., & Stamou, A. (2022). Optimizing the performance of coupled 1D/2D hydrodynamic models for early warning of flash floods. *Water*, 14(15), 2356. <https://doi.org/10.3390/w14152356>
- Mo, C., Shen, Y., Lei, X., Ban, H., Ruan, Y., Lai, S., Cen, W., & Xing, Z. (2023). Simulation of one-dimensional dam-break flood routing based on HEC-RAS. *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 1027788. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1027788>
- Munawar, H. S., Hammad, A. W. A., & Waller, S. T. (2022). Remote sensing methods for flood prediction: A review. *Sensors*, 22(3), 960. <https://doi.org/10.3390/s22030960>
- Muthusamy, M., Casado, M. R., Butler, D., & Leinster, P. (2021). Understanding the effects of digital elevation model resolution in urban fluvial flood modelling. *Journal of Hydrology*, 596, 126088. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126088>
- Nearing, G. S., Kratzert, F., Sampson, A. K., Pelissier, C. S., Klotz, D., Frame, J. M., Prieto, C., & Gupta, H. V. (2021). What role does hydrological science play in the age of machine learning? *Water Resources Research*, 57(3), e2020WR028091. <https://doi.org/10.1029/2020WR028091>
- Nearing, G., Cohen, D., Dube, V., Gauch, M., Gilon, O., Harrigan, S., Hassidim, A., Klotz, D., Kratzert, F., Metzger, A., Nevo, S., Pappenberger, F., Prudhomme, C., Shalev, G., Shenzen, S., Tekalign, T. Y., Weitzner, D., & Matias, Y. (2024).

- Global prediction of extreme floods in ungauged watersheds. *Nature*, 627(8004), 559–563. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07145-1>
- Odey, G., & Cho, Y. (2025). Event-Based vs. Continuous Hydrological Modeling with HEC-HMS: A Review of Use Cases, Methodologies, and Performance Metrics. *Hydrology*, 12(2), 39. <https://doi.org/10.3390/hydrology12020039>
- Okiria, E., Okazawa, H., Noda, K., Kobayashi, Y., Suzuki, S., & Yamazaki, Y. (2022). A comparative evaluation of lumped and semi-distributed conceptual hydrological models: Does model complexity enhance hydrograph prediction? *Hydrology*, 9(5), 89. <https://doi.org/10.3390/hydrology9050089>
- Ougahi, J. H., Karim, S., & Mahmood, S. A. (2022). Application of the SWAT model to assess climate and land use/cover change impacts on water balance components of the Kabul River Basin, Afghanistan. *Journal of Water and Climate Change*, 13(11), 3977–3999. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.261>
- Painter, P., Semmens, K., Maxfield, K., Cattoën, C., & Carr, R. H. (2025). Designing effective flood early warning systems: A review of barriers, best practices, and key characteristics. *Journal of Flood Risk Management*, 18(4), e70145. <https://doi.org/10.1111/jfr3.70145>
- Park, D., & You, H. (2023). A digital twin dam and watershed management platform. *Water*, 15(11), 2106. <https://doi.org/10.3390/w15112106>
- Psomiadis, E., Diakakis, M. and Soulis, K.X. (2020) 'Combining SAR and optical earth observation with hydraulic simulation for flood mapping and impact assessment',

- Remote Sensing, 12(23), p. 3980. <https://doi.org/10.3390/rs12233980>
- Raes, L., Concilio, G., Doran, C., Temmerman, L., & Cromptoets, J. (2025). Local Digital Twins for Smart Cities: Opportunities for Evidence-Informed Decision-Making. In *Decide Better: Open and Interoperable Local Digital Twins* (pp. 33-57). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81451-8_3
- Ramadhan, R., Yusnaini, H., Marzuki, M., Muharsyah, R., Suryanto, W., Sholihun, S., Vonnisa, M., Harmadi, H., Ningsih, A. P., Battaglia, A., Hashiguchi, H., & Tokay, A. (2022). Evaluation of GPM IMERG performance using gauge data over Indonesian Maritime Continent at different time scales. *Remote Sensing*, 14(5), 1172. <https://doi.org/10.3390/rs14051172>
- Ren, H., Pang, B., Bai, P., Zhao, G., Liu, S., Liu, Y., & Li, M. (2024). Flood susceptibility assessment with random sampling strategy in ensemble learning (RF and XGBoost). *Remote Sensing*, 16(2), 320. <https://doi.org/10.3390/rs16020320>
- Rokhideh, M., Fearnley, C., & Budimir, M. (2025). Multi-hazard early warning systems in the Sendai framework for disaster risk reduction: achievements, gaps, and future directions. *International Journal of Disaster Risk Science*, 16(1), 103-116. <https://doi.org/10.1007/s13753-025-00622-9>
- Sampurno, J., Putra, M. G. E., Faryuni, I. D., & Adriat, R. (2024). Flood impact assessment in remote areas using machine

- learning, SAR, and GIS: A case study of Ngabang District, Indonesia. *Journal of Hydroinformatics*, 26(11), 2928–2938. <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.324>
- Schumann, G. J.-P. (2024). Breakthroughs in satellite remote sensing of floods. *Frontiers in Remote Sensing*, 4, 1280654. <https://doi.org/10.3389/frsen.2023.1280654>
- Shaw, J., Kesserwani, G., Neal, J., Bates, P., & Sharifian, M. K. (2021). LISFLOOD-FP 8.0: The new discontinuous Galerkin shallow-water solver for multi-core CPUs and GPUs. *Geoscientific Model Development*, 14(6), 3577–3602. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3577-2021>
- Shrestha, S., Dahal, D., Poudel, B., Banjara, M., & Kalra, A. (2025). Flood susceptibility analysis with integrated geographic information system and analytical hierarchy process: A multi-criteria framework for risk assessment and mitigation. *Water*, 17(7), 937. <https://doi.org/10.3390/w17070937>
- Sokol, Z., Szturc, J., Orellana-Alvear, J., Popova, J., Jurczyk, A., & Céleri, R. (2021). The role of weather radar in rainfall estimation and its application in meteorological and hydrological modelling A review. *Remote Sensing*, 13(3), 351. <https://doi.org/10.3390/rs13030351>
- Spor, P., Paşa, Y., & Doğan, E. (2025). Evaluation of Simulation Results of HEC-RAS Coupled 1D/2D and 2D Modeling Approaches Through Scenario-Based Analysis. *Water*, 17(8), 1163. <https://doi.org/10.3390/w17081163>
- Su, S., Yan, L., Xie, H., Chen, C., Zhang, X., Gao, L., & Zhang, R. (2024). Multi-level hazard detection using a UAV-mounted multi-sensor for levee inspection. *Drones*, 8(3), 90. <https://doi.org/10.3390/drones8030090>

- Su, Y.-F., Lin, Y.-T., Jang, J.-H., & Han, J.-Y. (2022). High-resolution flood simulation in urban areas through the application of remote sensing and crowdsourcing technologies. *Frontiers in Earth Science*, 9, Article 756198. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.756198>
- Trepekli, K., Balstrøm, T., Friborg, T., Fog, B., Allotey, A. N., Coleman, D. J., & Møller-Jensen, L. (2022). UAV-borne, LiDAR-based elevation modelling: A method for improving local-scale urban flood risk assessment. *Natural Hazards*, 113(1), 423–451. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05308-9>
- UNDRR. (2025). GAR 2025 hazard explorations: Floods. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <https://www.undrr.org/gar/gar2025/hazard-exploration/floods>
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- Wang, D., Zhou, Y., Zhang, X., Liu, Y., Teng, Q., & Ma, M. (2024). Simulated research on distributed hydrological models—a case study of the Daxi Water Basin. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1348730. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1348730>
- Yanfatriani, E., Marzuki, M., Vonnisa, M., Ramadhan, R., Muharsyah, R., & Hermawan, E. (2024). Extreme rainfall trends and hydrometeorological disasters in tropical regions: Implications for climate resilience. *Emerging Science Journal*, 8(5), 1860–1874. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2024-08-05-012>

- Yang, Q., Wu, W., Wang, Q. J., & Vaze, J. (2022). A 2D hydrodynamic model-based method for efficient flood inundation modelling. *Journal of Hydroinformatics*, 24(5), 1004–1019. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.133>
- Zakaria, M. I., Jabbar, W. A., & Sulaiman, N. (2023). Development of a smart sensing unit for LoRaWAN-based IoT flood monitoring and warning system in catchment areas. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.005>
- Zandsalimi, Z., Feizabadi, S., Yazdi, J., & Salehi Neyshabouri, S. A. A. (2024). Evaluating the impact of digital elevation models on urban flood modeling: A comprehensive analysis of flood inundation, hazard mapping, and damage estimation. *Water Resources Management*, 38(11), 4243–4268. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03862-4>
- Zhang, X., & Yang, X. (2025). A review on the coupled hydrological and hydrodynamic modeling for watershed floods. *WIREs Water*, 12(6), e70038. <https://doi.org/10.1002/wat2.70038>
- Zhou, L., & Liu, L. (2024). Enhancing dynamic flood risk assessment and zoning using a coupled hydrological-hydrodynamic model and spatiotemporal information weighting method. *Journal of Environmental Management*, 366, 121831. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121831>

BIODATA PENULIS



Dr. Amrullah Mansida, ST., M.T., Asean Eng.

Dosen Program Studi Teknik Pengairan
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Magister Teknik Sumber Daya Air Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan S₁ pada program Studi Teknik pengairan Unismuh Makassar, melanjutkan S₂ dan menyelesaikan S₃ program Studi Teknik Sipil di Universitas Hasanuddin. Penulis menekuni bidang Menulis Teknik sipil, Teknik Sungai, Morfologi Sungai, Drainase Perkotaan, Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Pengembangan Sumber Daya Air, Insinyur Indonesia, Sistem manajemen K3, Manajemen Risiko; Teori, Kasus, dan Solusi serta Etika Profesi Teknik, Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja, metode penelitian dan pengembangannya, dan Manajemen Teknik: Panduan Praktis untuk Keberhasilan Dalam proyek Teknik, Konservasi Tanah dan Air, Teknik Sungai berkelanjutan dan Drainase Perkotaan Berkelanjutan, Hidrologi dan perencanaan irigasi dan drainase serta Penerapan Lubang Resap Biopori (LRB) pada Daerah Aliran Sungai (DAS).

Pengalaman penulis sebagai mengajar matakuliah Hidrologi Teknik I, Hidrologi Teknik II, Morfologi Sungai, Teknik Sungai, Pengembangan Sumber Daya Air, Perencanaan dan pengelolaan Waduk, Etika Profesi, dan Standar Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), Hidrologi Terapan Lanjut, Teknik Sungai berkelanjutan (Hidrodinamika Sungai) dan Hidrometeorologi (Mitigasi Bencana), sekarang. Selain menjadi akademisi di kampus penulis juga sebagai praktisi dengan pengabdian dalam berpartisipasi membangun bangsa melalui keterlibatan sebagai konsultan perencanaan, pengawasan bidang pengembangan sumber daya air dan menjadi asesor sertifikat SKA Asosiasi serta asesor BKD.

BIODATA PENULIS



Dimas Gustoro, S.T., M.Eng.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang

Penulis lahir di Bengkulu pada 21 Juni 1996. Saat ini penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) pada Jurusan Teknik Sipil di Universitas Islam Indonesia dan melanjutkan pendidikan Magister (S2) pada bidang Teknik Sipil dengan konsentrasi Keairan di Universitas Gadjah Mada.

Bidang keahlian penulis berfokus pada teknik sipil, khususnya sumber daya air yang mencakup hidrologi dan hidraulika. Dalam aktivitas akademik, penulis aktif dalam kegiatan pengajaran, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat. Penulis juga telah menerbitkan sejumlah artikel pada jurnal nasional terakreditasi dan jurnal internasional bereputasi di bidang hidrologi dan hidraulika.

BIODATA PENULIS



Ir. Margaretha Yuneta, S.T., M.T

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Nusa Nipa

Penulis lahir di Maumere, Kabupaten Sikka, Provinsi Nusa Tenggara Timur, pada 1 Juni 1996. Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Nusa Nipa. Pendidikan Sarjana (S1) Teknik Sipil diselesaikan di Universitas Katolik Widya Mandira Kupang pada tahun 2018. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan Magister (S2) Teknik Sipil dengan konsentrasi Manajemen Proyek Konstruksi di Universitas Udayana, Bali, dan lulus pada tahun 2022. Pada tahun 2024, penulis juga menyelesaikan Program Profesi Insinyur (PPI) sebagai bagian dari pengembangan kompetensi profesional di bidang ketekniksipilan.

Sejak tahun 2022, penulis aktif mengajar berbagai mata kuliah di bidang teknik sipil, antara lain Mekanika Tanah, Analisa Struktur, Penjadwalan Proyek Berbantuan Komputer, Ekonomi Teknik, serta Teknik Gempa. Selain menjalankan

tugas pendidikan dan pengajaran, penulis juga aktif melakukan penelitian dan publikasi ilmiah pada berbagai jurnal nasional maupun forum ilmiah lainnya. Bidang penelitian yang menjadi fokus penulis meliputi manajemen konstruksi, rekayasa struktur, teknik sumber daya air, mitigasi bencana, serta pengembangan infrastruktur berkelanjutan. Dalam bidang kepenulisan akademik, penulis juga aktif berkontribusi dalam penyusunan book chapter dan publikasi buku ilmiah. Sejak tahun 2024 hingga 2026, penulis telah menerbitkan empat buku akademik melalui Penerbit Get Press yang berkaitan dengan bidang teknik sipil, manajemen konstruksi, dan pengembangan infrastruktur.

BIODATA PENULIS



Nenny Roostrianawaty, ST.,MT

Dosen Program Studi Teknik Sipil S-1
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Nasional Malang

Penulis lahir di Malang tanggal 21 Juni 1975. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil S-1 Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Pengairan Institut teknologi Nasional Malang (1997) dan menyelesaikan studi jenjang S2 pada Jurusan Teknik Sipil Konsentrasi Teknik Sumberdaya Air Universitas Brawijaya Malang (2000). Saat ini penulis sedang menyelesaikan studi Doktorat di Program Studi Teknik Sumberdaya Air Universitas Brawijaya Malang dan merupakan dosen tetap sekaligus Sekretaris Program Studi Teknik Sipil S-1 Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Malang dengan bidang keahlian Hidrologi, Hidraulika, Mekanika Fluida, Irigasi, Drainase dan Sumberdaya Air.

BIODATA PENULIS



Ir. H. Wahyu Hidayat, S.T., M.Si., IPP, IAP, CAIP.

Dosen Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah
Palopo

Penulis lahir 07091989 di Kota Makassar, Sulawesi Selatan. Menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar hingga Sekolah Menengah Atas di Kota Palopo. S1 di Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar pada Tahun 2011. S2 di Magister pada Program Studi Ilmu Perencanaan Wilayah di Intitut Pertanian Bogor Tahun 2012. Pendidikan Profesi di Universitas Hasanuddin pada Tahun 2025. Saat ini bekerja sebagai dosen tetap di Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota Universitas Muhammadiyah Palopo dengan NIDN 0907098905, Tutor di Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota Universitas Terbuka dan Tenaga Ahli di Yayasan Bumi Sawerigading. Beberapa karya ilmiah (Artikel Jurnal, Buku dan HKI) hasil Penelitian dan Pengabdian kepada

Mayarakat telah diterbitkan dan dapat dilihat pada Sinta
(https://bit.ly/Sinta_Wahyu), Google Scholar
(https://bit.ly/GS_Wahyu), WoS
(https://bit.ly/WoS_Wahyu), Garuda
(<https://bit.ly/4aOU6wL>). wahyuhidayat@umpalopo.ac.id
085242401151 /081245143322