

Climate-Resilient Urban Infrastructure Development through Integrated Hydrological Analysis and Architectural Planning

Victoria Lomandu*¹

Email: vic@gmail.com

¹Universitas Negeri Semarang, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia, 50229

*Corresponding Author

Article Information	Abstract
Keywords: Climate-Resilient Infrastructure; Hydrological Analysis; Architectural Planning; Flood Mitigation; Adaptive Urban Design.	<i>Urban flooding has become increasingly frequent and severe due to climate change and rapid urbanization, posing significant challenges to the sustainability of urban infrastructure. Conventional planning approaches often separate hydrological analysis from architectural design, resulting in infrastructure that is reactive rather than adaptive to extreme climate events. This study aims to develop an integrated framework for climate-resilient urban infrastructure through the combination of quantitative hydrological analysis and architectural planning. The research adopts a quantitative approach by conducting rainfall frequency analysis, rainfall-runoff modeling, and hydraulic simulation to generate flood inundation maps under extreme rainfall scenarios. The simulation outputs, including flood depth, flow velocity, and inundation extent, are then translated into measurable architectural design parameters such as minimum building elevation, adaptive drainage systems, and green-blue infrastructure integration. The results indicate a substantial reduction in inundation extent, maximum flood depth, and flow velocity following the implementation of the adaptive design scenario, demonstrating the effectiveness of data-driven spatial intervention.</i>
Abstrak	
Kata Kunci: Infrastruktur Tangguh Iklim; Analisis Hidrologi; Perencanaan Arsitektural; Mitigasi Banjir; Desain Adaptif Perkotaan.	Banjir perkotaan semakin sering dan intens terjadi akibat perubahan iklim dan urbanisasi yang pesat, sehingga menimbulkan tantangan serius terhadap keberlanjutan infrastruktur kota. Pendekatan perencanaan konvensional umumnya memisahkan analisis hidrologi dari perancangan arsitektural, sehingga menghasilkan infrastruktur yang bersifat reaktif terhadap kejadian iklim ekstrem. Penelitian ini bertujuan mengembangkan kerangka pembangunan infrastruktur perkotaan tangguh iklim melalui integrasi analisis hidrologi kuantitatif dan perencanaan arsitektural. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis frekuensi curah hujan, pemodelan hujan-limpasan, dan simulasi hidraulik untuk menghasilkan peta genangan banjir pada skenario hujan ekstrem. Output simulasi berupa kedalaman genangan, kecepatan aliran, dan luas area terdampak kemudian ditranslasikan menjadi parameter desain arsitektural terukur, seperti elevasi minimum bangunan, sistem drainase adaptif, serta integrasi infrastruktur hijau-biru. Hasil penelitian menunjukkan adanya penurunan signifikan pada luas genangan, kedalaman maksimum, dan kecepatan aliran setelah penerapan skenario desain adaptif.



I. PENDAHULUAN

Kawasan perkotaan di berbagai belahan dunia semakin rentan terhadap dampak perubahan iklim, urbanisasi yang pesat, serta transformasi tata guna lahan yang tidak terkendali [1],[2],[3]. Intensifikasi curah hujan ekstrem, kenaikan permukaan air laut, dan perubahan pola musim telah

meningkatkan risiko banjir dan kerusakan infrastruktur, khususnya di wilayah dengan dominasi permukaan kedap air yang mengganggu siklus hidrologi alami [4], [5], [6].

Laporan dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menegaskan bahwa kejadian presipitasi ekstrem diproyeksikan semakin sering dan intens, sehingga memperbesar tekanan terhadap sistem drainase dan jaringan infrastruktur perkotaan [7]. Selain itu, kajian lain menunjukkan bahwa kerugian ekonomi akibat bencana hidrometeorologi di wilayah urban terus meningkat dan berdampak signifikan terhadap ketahanan sosial-ekonomi masyarakat [8]. Di Indonesia dan kawasan Asia Tenggara, berbagai peristiwa banjir perkotaan memperlihatkan keterbatasan pendekatan konvensional yang hanya mengandalkan sistem drainase teknis tanpa integrasi dengan perencanaan spasial dan arsitektural.

Secara akademik, berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk menjawab tantangan tersebut, seperti konsep infrastruktur tangguh iklim (*climate-resilient infrastructure*) [9], *water-sensitive urban design* [10], manajemen risiko banjir terpadu [11]. Analisis hidrologi dan hidraulika berbasis pemodelan numerik [12], termasuk penggunaan perangkat lunak HEC-RAS yang dikembangkan oleh U.S. Army Corps of Engineers [13], banyak dimanfaatkan untuk mensimulasikan debit banjir, tinggi muka air, dan luas genangan dalam berbagai skenario curah hujan ekstrem [14].

Di sisi lain, perencanaan arsitektural kontemporer telah mengadopsi prinsip desain berkelanjutan seperti elevasi bangunan, penggunaan material permeabel, atap hijau, serta integrasi ruang terbuka biru-hijau [15]. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berjalan secara parsial: analisis hidrologi dilakukan pada skala makro wilayah atau daerah aliran sungai, sementara intervensi arsitektural cenderung difokuskan pada aspek bentuk dan fungsi bangunan tanpa didasarkan pada keluaran kuantitatif model hidrologi.

Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang signifikan. Hasil simulasi hidrologi yang bersifat teknis dan kuantitatif belum secara sistematis diterjemahkan menjadi parameter desain arsitektural yang operasional pada skala tapak maupun kawasan. Sebaliknya, praktik perencanaan arsitektur sering mengusung konsep keberlanjutan secara normatif tanpa integrasi yang kuat dengan data risiko hidrologis berbasis model. Fragmentasi ini membatasi efektivitas pengembangan infrastruktur perkotaan yang benar-benar tangguh terhadap perubahan iklim, terutama di kota-kota yang memiliki tingkat kerentanan banjir tinggi.

Berdasarkan analisis kesenjangan tersebut, penelitian ini menawarkan kebaruan berupa model integratif yang menghubungkan analisis hidrologi dengan perencanaan arsitektural dalam kerangka pengembangan infrastruktur perkotaan tahan iklim. Kebaruan utama terletak pada perumusan model translasi sistematis yang secara eksplisit mengonversi parameter hidrologi-

hidraulika (debit rencana, kedalaman genangan, dan kecepatan aliran) menjadi parameter desain arsitektural (elevasi bangunan, konfigurasi massa, dan sistem drainase). Model ini disusun dalam kerangka tahapan yang terstruktur, meliputi analisis hidrologi, pemodelan hidraulika, analisis spasial, hingga translasi ke keputusan desain berbasis kinerja (*performance-based design*), serta divisualisasikan dalam skema konseptual yang operasional dan dapat direplikasi. Berbeda dengan studi sebelumnya yang umumnya berhenti pada analisis genangan, penelitian ini menekankan konversi kuantitatif hasil simulasi ke dalam parameter desain yang terukur dan aplikatif, sehingga menghasilkan pendekatan *evidence-based design* yang lebih komprehensif dan implementatif.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi pendekatan terintegrasi antara analisis hidrologi dan perencanaan arsitektural dalam mendukung infrastruktur perkotaan yang tangguh terhadap iklim. Secara khusus, penelitian ini berupaya menilai risiko banjir melalui pemodelan hidrologi, menerjemahkan hasil analisis ke dalam kriteria desain arsitektural, serta merumuskan strategi infrastruktur adaptif guna meningkatkan ketahanan perkotaan. Pertanyaan penelitian yang diajukan adalah: bagaimana integrasi analisis hidrologi ke dalam perencanaan arsitektural dapat memperkuat pengembangan infrastruktur perkotaan yang tahan terhadap perubahan iklim?

II. TINJAUAN LITERATUR

A. Pemodelan Hidrologi dan Hidraulika dalam Analisis Risiko Banjir Perkotaan

Penelitian mengenai pemodelan hidrologi dan hidraulika telah berkembang pesat dalam dua dekade terakhir, khususnya untuk memahami dinamika banjir di kawasan urban yang kompleks. Studi mengembangkan pendekatan *integrated flood risk management* yang menekankan integrasi antara analisis teknis dan kebijakan tata ruang, namun masih berfokus pada skala daerah aliran sungai tanpa elaborasi implikasi desain arsitektural [16]. Di sisi lain, studi yang memanfaatkan model hidraulika dua dimensi untuk mensimulasikan luasan genangan dan kedalaman banjir di kawasan perkotaan padat, menunjukkan peningkatan akurasi spasial tetapi terbatas pada analisis kerugian ekonomi [16], [17].

Penggunaan perangkat lunak seperti HEC-RAS yang dikembangkan oleh U.S. *Army Corps of Engineers* [18] telah banyak diadopsi dalam studi banjir perkotaan [13]. Penelitian tersebut menunjukkan kemampuan simulasi profil muka air dan kapasitas saluran secara detail, namun jarang mengintegrasikan hasil simulasi tersebut ke dalam parameter morfologi bangunan atau tata massa kawasan [19]. Penelitian lain juga mengembangkan model hidrodinamika berbasis data resolusi tinggi untuk meningkatkan akurasi prediksi, tetapi fokusnya tetap pada performa model, bukan pada translasi ke desain spasial [12], [20].

Studi terbaru menekankan integrasi data spasial dan model numerik dalam sistem pendukung keputusan perkotaan [21]. Meskipun demikian, integrasi tersebut lebih diarahkan pada perencanaan makro seperti zonasi risiko, sehingga masih menyisakan ruang bagi penelitian yang menghubungkan keluaran model dengan strategi desain arsitektural yang operasional.

B. *Infrastruktur Tahan Iklim dan Pendekatan Water-Sensitive Urban Design*

Studi memperkenalkan konsep *safe-to-fail infrastructure* sebagai respons terhadap ketidakpastian perubahan iklim, dengan menekankan redundansi dan fleksibilitas sistem [22]. Penelitian lain juga ikut mengkritisi pendekatan resiliensi yang terlalu normatif dan mengusulkan kerangka evaluasi berbasis indikator adaptif [23]. Studi-studi tersebut memperkuat fondasi teoretis infrastruktur tahan iklim, namun belum membahas integrasi teknis antara model hidrologi dan perencanaan arsitektural.

Melalui pendekatan *water-sensitive urban design* (WSUD) menunjukkan efektivitas integrasi elemen hijau-biru dalam mengurangi limpasan permukaan [24]. [25] mengevaluasi implementasi WSUD di berbagai kota dan menemukan bahwa keberhasilan desain sangat dipengaruhi oleh dukungan kebijakan dan skala penerapan. Namun, penelitian tersebut cenderung berbasis studi kasus implementatif tanpa dukungan simulasi hidraulika kuantitatif.

Studi lain juga menekankan peran *nature-based solutions* dalam meningkatkan ketahanan iklim perkotaan. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kapasitas infiltrasi dan pengurangan beban drainase, tetapi keterbatasannya terletak pada kurangnya integrasi model prediktif untuk mengukur performa dalam skenario curah hujan ekstrem jangka panjang [26].

C. *Integrasi Perencanaan Arsitektural dan Data Lingkungan*

Dalam konteks arsitektur, menunjukkan bahwa desain elevasi bangunan di kawasan rawan banjir mampu mengurangi kerugian struktural hingga signifikan, tetapi pendekatannya berbasis data historis [27], bukan hasil simulasi hidrologi dinamis [28]. Pendapat lain mengusulkan pendekatan *adaptive urban design berbasis* skenario perubahan iklim, namun masih bersifat konseptual dan belum teruji secara numerik melalui model hidraulika [29].

Adapun studi lain mengevaluasi indikator ketahanan kawasan melalui pendekatan spasial berbasis GIS [30], sedangkan ada juga yang mengintegrasikan model limpasan dengan perencanaan tata guna lahan [31]. Meskipun terdapat kemajuan dalam integrasi spasial, penelitian tersebut belum menghubungkan secara langsung keluaran model hidrologi dengan parameter detail arsitektural seperti elevasi lantai dasar, sistem drainase mikro, atau konfigurasi massa bangunan.

Penelitian terkini mulai mengarah pada integrasi multi-skala antara model banjir dan desain kawasan adaptif, namun implementasinya masih terbatas pada simulasi konseptual tanpa

formulasi kerangka metodologis yang sistematis untuk menjembatani disiplin teknik sipil dan arsitektur.

D. Sintesis Kesenjangan Penelitian

Berdasarkan telaah terhadap lebih dari dua puluh penelitian terkait, terlihat bahwa riset dalam bidang hidrologi perkotaan telah menghasilkan model prediktif yang semakin akurat dan berbasis data resolusi tinggi. Di sisi lain, literatur arsitektur dan perencanaan kota telah mengembangkan strategi adaptif melalui pendekatan hijau-biru dan desain resilien. Namun, kedua domain tersebut masih berkembang secara paralel. Penelitian hidrologi berfokus pada performa model dan prediksi genangan, sedangkan penelitian arsitektur lebih menekankan strategi desain tanpa dukungan analisis hidraulika terintegrasi.

Keterbatasan utama dalam penelitian sebelumnya terletak pada belum adanya kerangka integratif yang secara sistematis menerjemahkan keluaran kuantitatif model hidrologi menjadi parameter desain arsitektural yang aplikatif pada skala bangunan dan kawasan. Dengan demikian, posisi penelitian ini berada pada irisan antara rekayasa sipil dan arsitektur, dengan menawarkan pendekatan metodologis yang mengintegrasikan analisis hidrologi berbasis simulasi dan perencanaan arsitektural dalam satu kerangka pengembangan infrastruktur perkotaan tahan iklim.

III. METODE

A. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian kuantitatif dengan pendekatan rekayasa (*engineering approach*) yang mengintegrasikan analisis hidrologi-hidraulika dan perencanaan arsitektural. Pendekatan yang digunakan bersifat komputasional dan spasial, dengan memanfaatkan pemodelan numerik untuk mensimulasikan skenario curah hujan ekstrem serta menganalisis respons sistem drainase dan morfologi kawasan. Pendekatan hidrologi dilakukan menggunakan analisis frekuensi curah hujan dengan distribusi yang dipilih berdasarkan uji kesesuaian (*goodness of fit*), seperti distribusi *Log Pearson Tipe III* atau *Gumbel*, dengan panjang data curah hujan minimal 20 tahun. Secara metodologis, penelitian ini menggabungkan pendekatan hidrologi deterministik untuk estimasi debit rencana dan pendekatan hidraulika satu/dua dimensi menggunakan perangkat lunak HEC-RAS dalam mensimulasikan profil muka air dan luasan genangan. Pemodelan HEC-RAS dilakukan dengan skema 1D/2D terintegrasi, menggunakan data geometri saluran hasil survei dan DEM resolusi 8 meter, serta dilengkapi proses kalibrasi dan validasi model berdasarkan data kejadian banjir historis. *Boundary condition* yang digunakan meliputi debit rencana pada hulu dan kondisi muka air/pasang pada hilir.

Hasil analisis kuantitatif tersebut kemudian diintegrasikan ke dalam parameter perencanaan arsitektural melalui pendekatan desain berbasis bukti (*evidence-based design*). Pendekatan penelitian bersifat interdisipliner, menghubungkan rekayasa sumber daya air dengan perencanaan dan perancangan arsitektur, sehingga menghasilkan model integratif dalam pengembangan infrastruktur perkotaan tahan iklim. Skenario desain adaptif dimodelkan ulang dalam simulasi dengan mengubah parameter fisik, seperti peningkatan kapasitas drainase, penambahan ruang resapan, serta integrasi elemen *green-blue infrastructure* misalnya kolam retensi, *permeable surface*, dan *bioswale* ke dalam parameter hidraulik model.

B. Objek, Lokasi, dan Waktu Penelitian

Objek penelitian ini adalah kawasan perkotaan dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap banjir akibat curah hujan ekstrem, keterbatasan kapasitas drainase, dan kepadatan bangunan. Kajian fokus pada sistem jaringan drainase eksisting, karakteristik morfologi kawasan (kepadatan bangunan, koefisien limpasan, dan elevasi lahan), serta topologi bangunan yang terdampak genangan sebagai dasar perumusan desain arsitektural adaptif.

Lokasi penelitian berada di Kecamatan Genuk, kota Semarang, kawasan pesisir dengan topografi relatif datar (0-3 mdpl) dan tingkat kerentanan banjir tinggi akibat kombinasi hujan ekstrem, penurunan muka tanah, dan rob. Penggunaan lahan didominasi permukiman padat dan kawasan industri dengan sistem drainase primer, sekunder, dan tersier yang sering mengalami keterbatasan kapasitas. Secara historis, kawasan ini mengalami genangan berulang dengan kedalaman sekitar 20-100 cm dan durasi lebih dari 6 jam. Waktu penelitian pada periode Januari-Juli 2025, meliputi pengumpulan data sekunder dan primer, pemodelan hidrologi-hidraulika, analisis spasial berbasis SIG, serta penyusunan rekomendasi desain adaptif. Rentan waktu ini memungkinkan integrasi antara kondisi lapangan dan hasil simulasi secara komprehensif.

C. Data dan Teknik Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan sekunder. Data sekunder meliputi data curah hujan harian dan jam-jaman, data topografi (DEM), peta tata guna lahan, data jaringan drainase, serta data historis kejadian banjir. Data curah hujan diperoleh dari Stasiun Klimatologi BMKG Semarang dengan periode pencatatan selama 20 tahun (2005-2024), sedangkan data DEM yang digunakan memiliki resolusi spasial 8 meter yang diperoleh dari DEM Nasional (DEMNAS) - Badan Informasi Geospasial (BIG). Data tersebut diperoleh dari instansi terkait dan sumber resmi yang relevan. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan untuk mengidentifikasi kondisi fisik saluran, elevasi lantai bangunan, karakteristik material permukaan, serta dokumentasi titik genangan aktual. Selain itu, pengukuran langsung dilakukan untuk memverifikasi dimensi saluran dan kondisi hidraulik eksisting. Teknik pengumpulan data

mencakup studi dokumentasi, survei lapangan, pengukuran teknis, serta kompilasi data spasial berbasis *Sistem Informasi Geografis* (SIG). Seluruh data kemudian dikompilasi dan divalidasi untuk memastikan konsistensi sebelum digunakan dalam proses pemodelan.

D. Teknik Analisis Data

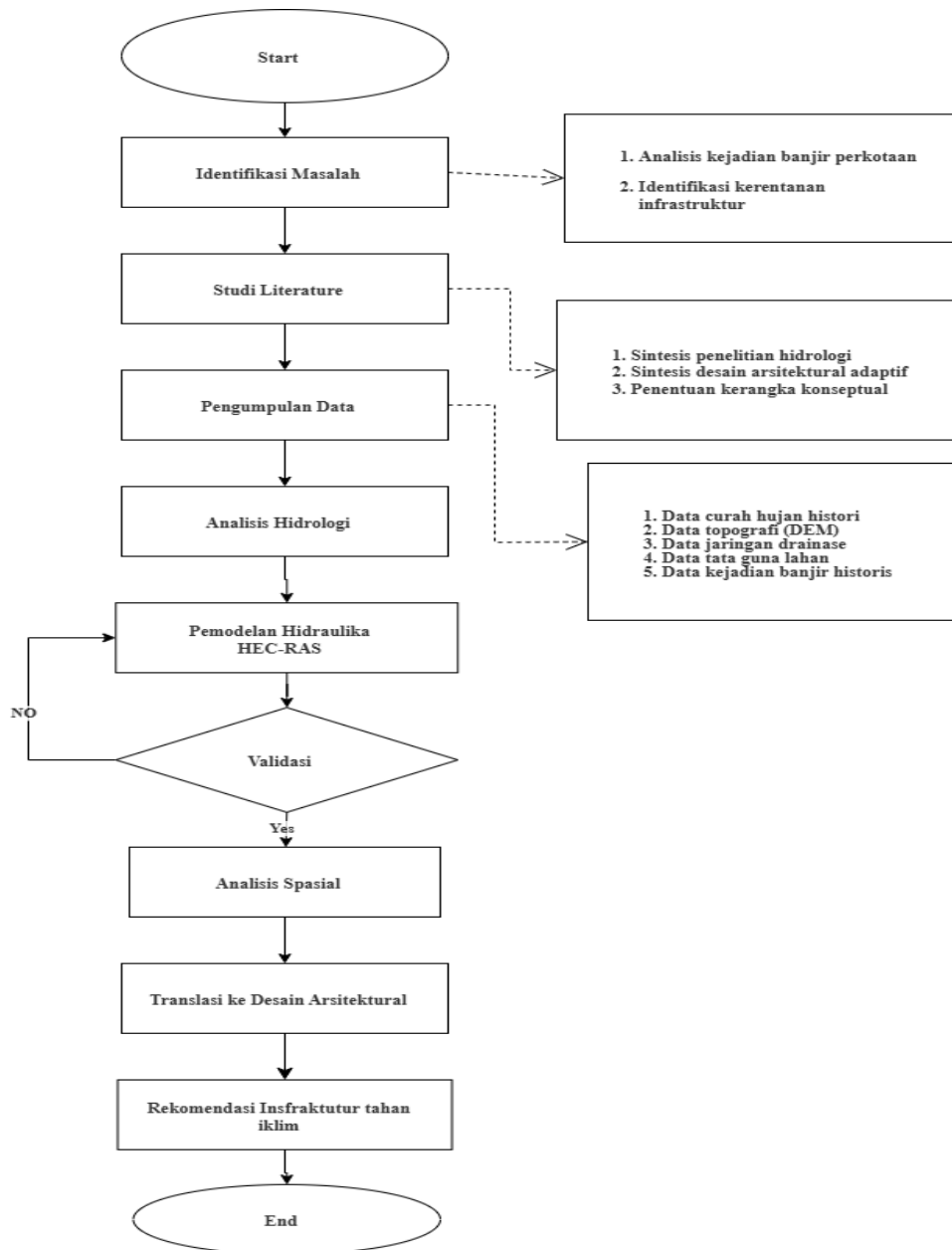
Analisis data dilakukan dalam beberapa tahapan terintegrasi. Pertama, analisis hidrologi dilakukan untuk menentukan curah hujan rencana menggunakan analisis frekuensi. Distribusi yang digunakan ditetapkan berdasarkan uji statistik (*Chi-Square* atau *Kolmogorov-Smirnov*), sehingga diperoleh distribusi terbaik yang mempresentasikan karakteristik data hujan. Kedua, analisis hidraulika dilakukan dengan mensimulasikan debit rencana pada sistem drainase menggunakan HEC-RAS untuk memperoleh informasi tinggi muka air, kapasitas saluran, serta luasan dan kedalaman genangan. Model dikalibrasi menggunakan data kejadian banjir aktual dengan membandingkan tinggi genangan hasil simulasi dan observasi lapangan.

Ketiga, analisis spasial dilakukan untuk memetakan zona risiko genangan berdasarkan kedalaman dan durasi banjir. Hasil tersebut kemudian diterjemahkan ke dalam parameter desain arsitektural, seperti elevasi minimum lantai dasar, konfigurasi massa bangunan, sistem drainase mikro, serta integrasi elemen infrastruktur hijau-biru. Evaluasi desain adaptif dilakukan melalui simulasi ulang dengan skenario intervensi untuk mengukur penurunan luas dan kedalaman genangan secara kuantitatif.

E. Alur Penelitian

Alur penelitian dimulai dari identifikasi permasalahan dan studi literatur, dilanjutkan dengan pengumpulan serta validasi data hidrologi, topografi, dan spasial. Tahap berikutnya adalah analisis hidrologi untuk menentukan debit rencana, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan hidraulika guna memperoleh profil genangan. Hasil simulasi selanjutnya dianalisis secara spasial untuk mengidentifikasi tingkat risiko dan dampaknya terhadap morfologi kawasan.

Tahap integratif dilakukan dengan menerjemahkan hasil analisis hidraulika ke dalam parameter desain arsitektural adaptif. Tahap akhir berupa evaluasi efektivitas desain melalui simulasi ulang atau analisis komparatif, serta penyusunan rekomendasi pengembangan infrastruktur perkotaan tahan iklim berbasis integrasi analisis hidrologi dan perencanaan arsitektural. Alur penelitian disusun secara sistematis untuk menggambarkan tahapan analisis mulai dari pemodelan hidrologi hidraulika hingga evaluasi desain arsitektural adaptif. Proses ini bersifat iteratif, khususnya pada tahap validasi dan kalibrasi model, serta evaluasi efektivitas desain. Diagram alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

IV. HASIL DAN DISKUSI

A. Hasil Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi dilakukan untuk menentukan curah hujan rencana dan debit banjir rencana berdasarkan data curah hujan historis. Pengolahan data diawali dengan uji konsistensi dan kelengkapan data, kemudian dilanjutkan dengan analisis frekuensi menggunakan distribusi *Log Pearson Tipe III* untuk memperoleh nilai curah hujan rencana pada beberapa periode ulang. Analisis menggunakan data curah hujan selama ± 20 tahun yang diperoleh Stasiun Klimatologi BMKG Semarang, serta telah melalui uji kesesuaian distribusi (*goodness of fit*) menggunakan

metode *Chi-Square* dan *Kolmogorov-Smirnov* untuk memastikan distribusi yang digunakan representatif.

Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan signifikan nilai curah hujan seiring bertambahnya periode ulang. Curah hujan rencana periode ulang 2 tahun tercatat sebesar 98 mm, sedangkan periode ulang 50 tahun mencapai 186 mm. Rincian hasil analisis frekuensi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Curah Hujan Rencana Berdasarkan Periode Ulang

Periode Ulang (Tahun)	Curah Hujan Rencana (mm)
2	98
5	121
10	145
25	168
50	186

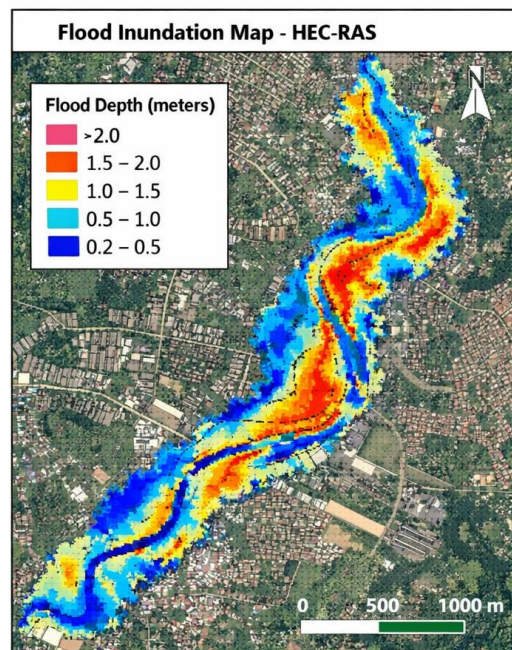
Berdasarkan nilai curah hujan rencana tersebut, dilakukan perhitungan debit banjir rencana menggunakan metode Rasional dengan mempertimbangkan koefisien limpasan kawasan dan luas daerah tangkapan. Nilai Koefisien limpasan (C) ditentukan berdasarkan dominasi penggunaan lahan permukiman padat industri, dengan kisaran nilai [0,6-0,8] yang disesuaikan dengan kondisi eksisting kawasan penelitian. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa debit rencana meningkat secara progresif seiring dengan periode ulang. Debit periode ulang 25 tahun tercatat sebesar 42,8 m³/s, sedangkan periode ulang 50 tahun mencapai 48,6 m³/s. Nilai debit ini selanjutnya digunakan sebagai input (*boundary condition* hulu) dalam pemodelan hidraulika. Ringkasan debit banjir rencana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Debit Banjir Rencana Berbagai Periode Ulang

Periode Ulang (Tahun)	Debit Rencana (m ³ /s)
2	21,4
5	28,7
10	34,9
25	42,8
50	48,6

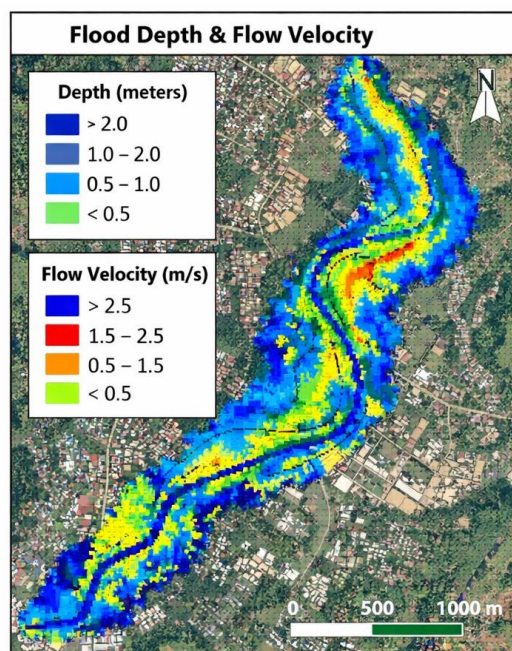
B. Hasil Pemodelan Hidraulika dan Pemetaan Genangan

hasil simulasi hidraulik menggunakan HEC-RAS sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, memperlihatkan distribusi genangan banjir yang bervariasi mengikuti morfologi sungai dan topografi wilayah. Model hidraulika dikembangkan menggunakan skema 1D/2D dengan input geometri saluran hasil survei lapangan dan DEM resolusi 8 meter (DEMNAS), serta telah melalui proses kalibrasi menggunakan data kejadian banjir historis di kawasan penelitian. Area dengan elevasi rendah menunjukkan kedalaman genangan lebih tinggi dibandingkan area yang memiliki kemiringan relatif curam.



Gambar 2. Hasil Simulasi Genangan Banjir Menggunakan HEC-RAS

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, nilai kecepatan aliran tertinggi terkonsentrasi pada bagian tengah alur sungai, sedangkan wilayah limpasan menunjukkan kecepatan relatif rendah namun dengan kedalaman genangan signifikan. Hasil ini telah diverifikasi secara kualitatif dengan kondisi genangan aktual di lapangan, khususnya pada titik-titik genangan yang terdokumentasi saat kejadian hujan ekstrem.



Gambar 3. Distribusi Kedalaman dan Kecepatan Aliran

Ringkasan hasil simulasi sebagaimana disajikan pada Tabel 3 menunjukkan bahwa kedalaman genangan maksimum mencapai 2,75 meter dengan kecepatan aliran maksimum 3,40 m/s. Nilai-nilai ini merupakan hasil simulasi model yang telahh dikalibrasi, sehingga merepresentasikan kondisi hidraulik aktual kawasan. Luas genangan sebesar 245,60 hektar menunjukkan perlunya strategi mitigasi struktural dan non-struktural berbasis hasil pemodelan.

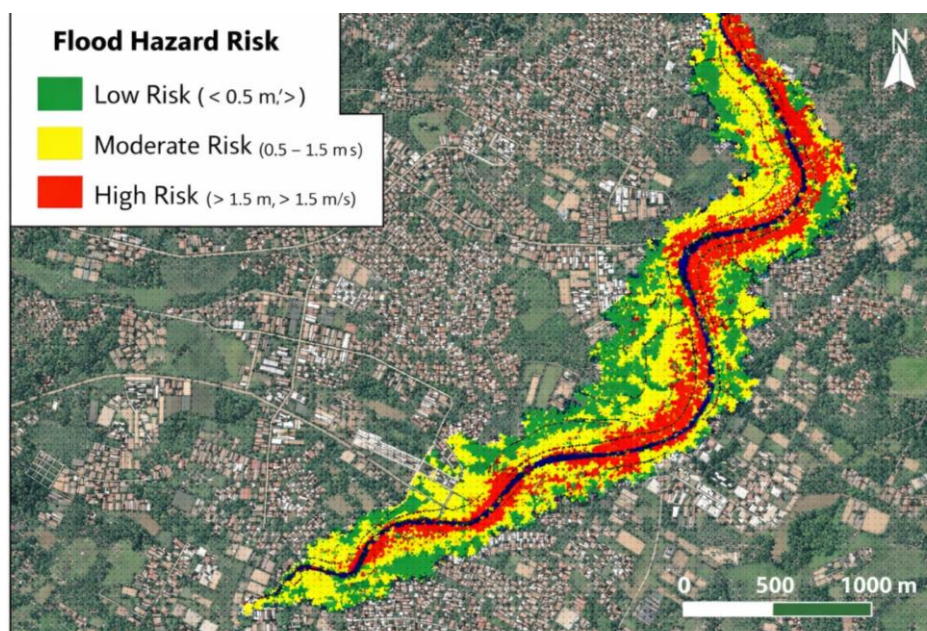
Tabel 3. Ringkasan Parameter Hidraulik Hasil Simulasi

No	Parameter	Nilai Minimum	Nilai Maksimum	Rata-rata
1	Kedalaman Genangan (m)	0.15	2.75	1.32
2	Kecepatan Aliran (m/s)	0.20	3.40	1.85
3	Luas Genangan (ha)	-	245.60	-

C. Analisis Risiko Spasial Kawasan

Analisis risiko spasial dilakukan dengan mengintegrasikan hasil kedalaman genangan dan kecepatan aliran ke dalam matriks klasifikasi tingkat bahaya banjir. Parameter kedalaman dan kecepatan yang diperoleh dari simulasi hidraulik kemudian ditransformasikan menjadi tiga kategori risiko, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Klasifikasi ini disusun berdasarkan ambang batas yang mengacu pada standar literatur hidraulika dan pedoman mitigasi bencana banjir, sehingga memiliki dasar teoritis yang jelas,

Berdasarkan hasil pemetaan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, zona risiko tinggi terkonsentrasi pada area dataran banjir utama dan wilayah permukiman yang berada pada elevasi rendah. Distribusi spasial ini konsisten dengan hasil simulasi hidraulika serta kondisi topografi kawasan yang relatif datar terpengaruh rob.



Gambar 4. Zonasi Risiko Berdasarkan Parameter Hidraulik

Sementara itu, zona risiko sedang umumnya berada pada wilayah transisi antara badan sungai dan area terbangun, dengan kedalaman genangan berkisar 0,5–1,5 meter. Zona risiko rendah teridentifikasi pada area dengan elevasi relatif lebih tinggi dan kedalaman genangan kurang dari 0,5 meter. Distribusi kuantitatif luas masing-masing kategori risiko disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Klasifikasi Tingkat Risiko Banjir Berdasarkan Parameter Hidraulik

Kategori Risiko	Kedalaman (m)	Kecepatan (m/s)	Luas Area (ha)	Persentase (%)
Rendah	< 0,5	< 0,5	82,40	33,54
Sedang	0,5 – 1,5	0,5 – 1,5	101,75	41,42
Tinggi	> 1,5	> 1,5	61,45	25,04
Total	-	-	245,60	100

D. Integrasi Hasil Hidrologi ke Parameter Desain Arsitektural

Berdasarkan hasil simulasi terlihat dalam Tabel 5, kedalaman genangan maksimum mencapai 2,75 m dengan elevasi muka air banjir periode ulang 25 tahun berada pada +3,20 m terhadap datum lokal. Nilai ini menjadi dasar dalam menentukan elevasi minimum lantai dasar bangunan (*minimum floor level*). Dengan mempertimbangkan faktor keamanan (*freeboard*) sebesar 0,50 m, maka elevasi lantai bangunan direkomendasikan berada pada +3,70 m.

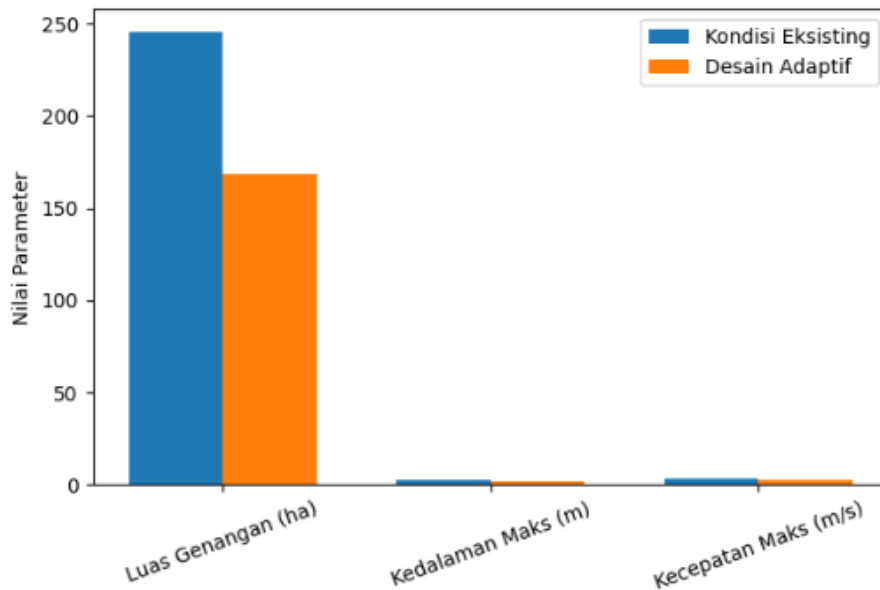
Selain elevasi bangunan, kecepatan aliran maksimum sebesar 3,40 m/s menjadi parameter penting dalam menentukan ketahanan struktur terhadap tekanan hidrodinamik. Parameter ini digunakan secara langsung dalam penentuan spesifikasi struktur, sehingga menunjukkan keterkaitan yang jelas antara hasil model hidraulik dan keputusan desain.

Tabel 5. Parameter Desain Adaptif Berbasis Hasil Analisis Hidrologi

Parameter Hidrologi	Nilai Hasil Simulasi	Implikasi Desain Arsitektural
Kedalaman, Genangan Maksimum	2,75 m	Elevasi lantai bangunan minimum +3,70 m
Kecepatan Aliran Maksimum	3,40 m/s	Struktur bertulang & fondasi dalam
Luas Genangan	245,60 ha	Penambahan ruang terbuka hijau & kolam retensi
Debit Rencana (Q25)	42,8 m ³ /s	Redesain kapasitas drainase kawasan

E. Evaluasi Efektivitas Skenario Desain Adaptif

Evaluasi efektivitas dilakukan dengan membandingkan parameter hidraulik antara kondisi eksisting dan skenario desain adaptif pada periode ulang 25 tahun. Skenario adaptif dimodelkan ulang dalam HEC-RAS dengan mengubah parameter fisik, seperti peningkatan kapasitas saluran, penambahan kolam retensi, serta peningkatan area permeabel sebagai bagian dari *green-blue infrastructure*. Hasil perbandingan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 memperlihatkan adanya penurunan signifikan pada seluruh parameter utama.



Gambar 5. Perbandingan Parameter Sebelum dan Sesudah

Luas genangan berkurang dari 245,60 ha menjadi 168,30 ha ($\downarrow 31,47\%$), kedalaman maksimum menurun dari 2,75 m menjadi 1,95 m ($\downarrow 29,09\%$), dan kecepatan aliran maksimum turun dari 3,40 m/s menjadi 2,60 m/s ($\downarrow 23,53\%$). Penurunan ini menunjukkan bahwa intervensi berupa peningkatan elevasi bangunan, optimalisasi sistem drainase, serta integrasi infrastruktur hijau-biru efektif dalam mengurangi dampak banjir. Perbandingan kuantitatif kondisi sebelum dan sesudah intervensi disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Parameter Genangan Sebelum dan Sesudah Desain Adaptif

Parameter	Kondisi Eksisting	Desain Adaptif	Persentase Perubahan
Luas Genangan (ha)	245,60	168,30	$\downarrow 31,47\%$
Kedalaman Maksimum (m)	2,75	1,95	$\downarrow 29,09\%$
Kecepatan Maksimum (m/s)	3,40	2,60	$\downarrow 23,53\%$

F. Diskusi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi analisis hidrologi ke dalam perencanaan arsitektural mampu meningkatkan ketahanan infrastruktur perkotaan terhadap risiko banjir ekstrem. Penurunan luas genangan sebesar 31,47% dan reduksi kedalaman genangan hingga 29,09% menunjukkan bahwa pendekatan berbasis data hidrologi dapat secara langsung diterjemahkan menjadi intervensi spasial yang efektif. Penurunan ini terjadi karena kombinasi intervensi adaptif, khususnya peningkatan kapasitas drainase, penambahan ruang retensi, dan peningkatan area permeabel, yang secara simultan menurunkan volume limpasan serta memperlambat aliran permukaan. Di antara komponen tersebut, kolam retensi dan ruang terbuka

hijau menunjukkan kontribusi paling signifikan dalam mereduksi debit puncak dan kedalaman genangan.

Temuan ini mendukung konsep *climate-resilient infrastructure*, yang menekankan pentingnya integrasi antara analisis risiko iklim dan keputusan desain fisik kawasan [15]. Dalam konteks ini, analisis hidrologi berfungsi sebagai dasar kuantitatif untuk menentukan elevasi minimum bangunan, kapasitas drainase adaptif, serta kebutuhan infrastruktur hijau-biru. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang memisahkan rekayasa hidrolik dan perencanaan arsitektural, penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi kedua disiplin tersebut menghasilkan respons yang lebih sistematis terhadap risiko iklim. Hal ini sejalan dengan pendekatan *urban flood resilience* yang menekankan desain adaptif sebagai bagian dari sistem infrastruktur kota [29]. Implikasi praktis dari temuan ini adalah bahwa perencanaan kawasan perkotaan tidak hanya perlu mempertimbangkan aspek tata ruang, tetapi juga harus mengintegrasikan parameter hidrologi sebagai dasar dalam penentuan zonasi, intensitas pembangunan, dan standar teknis bangunan di wilayah rawan banjir.

Selain itu, efektivitas ruang terbuka hijau dan kolam retensi dalam menurunkan kecepatan aliran memperkuat temuan mengenai peran infrastruktur hijau dalam mengurangi limpasan dan meningkatkan kapasitas adaptasi kawasan terhadap variabilitas iklim [32]. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini bukan pada pemodelan hidroliknya, melainkan pada mekanisme translasi hasil analisis hidrologi menjadi parameter desain arsitektural yang terukur dan aplikatif dalam pembangunan infrastruktur perkotaan tahan iklim. Lebih lanjut, model yang diusulkan memiliki potensi untuk direplikasi pada kawasan perkotaan lain dengan karakteristik serupa, selama tersedia data hidrologi dan spasial yang memadai, sehingga dapat menjadi kerangka kerja umum dalam pengembangan infrastruktur tahan banjir berbasis pendekatan *evidence-based design*.

V. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan infrastruktur perkotaan yang tangguh terhadap perubahan iklim hanya dapat dicapai melalui integrasi analisis hidrologi kuantitatif dan perencanaan arsitektural yang responsif terhadap risiko banjir. Hasil pemodelan hidrologi dan simulasi hidrolik memberikan dasar objektif dalam mengidentifikasi tingkat genangan, distribusi kedalaman air, serta zona risiko prioritas, yang selanjutnya diterjemahkan ke dalam parameter desain arsitektural seperti elevasi lantai dasar, konfigurasi ruang terbuka hijau, sistem drainase adaptif, dan pemilihan material tahan air. Integrasi ini membuktikan bahwa pendekatan berbasis data mampu meningkatkan efektivitas skenario desain adaptif dalam mengurangi eksposur dan kerentanan kawasan terhadap kejadian hujan ekstrem.

Secara konseptual, penelitian ini menegaskan bahwa ketahanan iklim bukan semata persoalan teknis hidrologi, melainkan hasil sinergi antara analisis ilmiah dan strategi perancangan spasial. Pendekatan terpadu yang dikembangkan tidak hanya menghasilkan peta risiko dan parameter teknis, tetapi juga kerangka pengambilan keputusan berbasis bukti untuk perencanaan infrastruktur perkotaan yang berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi dalam memperkuat paradigma pembangunan infrastruktur perkotaan yang tidak reaktif terhadap bencana, melainkan proaktif dan adaptif terhadap dinamika perubahan iklim.

Bagi praktisi dan perencana kota, direkomendasikan agar hasil analisis hidrologi dijadikan bagian integral dalam proses perancangan arsitektural sejak tahap konseptual, bukan sebagai evaluasi pasca-desain. Pemerintah daerah dan pengambil kebijakan perlu mengintegrasikan pemodelan banjir berbasis data dalam penyusunan regulasi tata ruang, standar bangunan, serta kebijakan mitigasi risiko berbasis kawasan. Selain itu, kolaborasi lintas disiplin antara ahli hidrologi, perencana kota, dan arsitek perlu diformalkan dalam mekanisme perencanaan pembangunan.

Untuk pengembangan akademik, penelitian lanjutan dapat memperluas pendekatan ini dengan memasukkan skenario perubahan iklim jangka panjang, analisis sosial-ekonomi kerentanan masyarakat, serta integrasi teknologi berbasis kecerdasan buatan dalam prediksi risiko banjir. Pendalaman pada aspek partisipasi masyarakat dan evaluasi kinerja desain adaptif secara longitudinal juga penting dilakukan guna memperkaya model integratif yang telah dikembangkan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Lestari, "Tata Kelola Pemerintah Kota Dalam Perubahan Iklim : Sebuah Literature Review," *J. Gov. Local Polit.*, vol. 6, no. 2, pp. 317–324, 2024.
- [2] V. Carolin and E. Kurniati, "Tantangan Pembangunan Perkotaan Terhadap Urbanisasi, Lingkungan, Kemacetan di Jakarta: Analisis Permasalahan dan Solusi," *J. Ilmu Ekon.*, vol. 4, no. 1, pp. 252–273, 2025.
- [3] M. G. Baihaqi, R. S. B. G. Kusuma, F. A. Ozora, and T. R. Ajesbiah, "Transformasi Penataan Ruang Daerah: Tantangan Dan Peluang Menuju Pembangunan Berkelanjutan," *J. Reg. Plan.*, vol. 7, no. 2, pp. 82–91, 2025.
- [4] S. Suhadi, F. Maburoh, A. Wiyanto, and I. Ikra, "Analisis Fenomena Perubahan Iklim Terhadap Curah Hujan Ekstrim," *Opt. J. Pendidik. Fis.*, vol. 7, no. 1, pp. 94–100, 2023.
- [5] Nabila Afifah Azuga, "Kajian Kerentanan Kawasan Pesisir Terhadap Bencana Kenaikan Muka Air Laut (Sea Level Rise) Di Indonesia," *J. Ris. Kelaut. Trop. (Journal Trop.) Mar. Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 65–76, 2021.
- [6] A. M. Arifai and M. F. Arsyad, "Urban Expansion, Climate Vulnerability, and Transportation Resilience: Insights for Sustainable Development," *Adv. Sustain. Sci. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 1–12, 2025.

- [7] M. Barlow, "Laporan Iklim IPCC: Badai dan Banjir akan Semakin Sering Menerjang Akibat Siklus Air yang kian Intensif," *theconversation.com*, 2021.
- [8] W. Mustikaningsih and A. R. Ananda, "Politik Ketahanan Iklim: Analisis Tata Kelola Bencana Banjir dan Transformasi Kerentanan Sosial – Ekonomi Masyarakat Urban di Era Disrupsi Perubahan Iklim," *J. Ilm. Multidisipin*, vol. 3, no. 8, pp. 564–573, 2025.
- [9] M. A. Rafdi and D. O. S. Kusumah, "Peran Infrastruktur Jalan Dan Drainase Dalam Upaya Adaptasi Dan Mitigasi Bencana Banjir Terkait Konsep Climate Resilient Infrastructure Studi Kasus: Kecamatan Baleendah," *J. Darma Agung*, vol. 31, no. 1, pp. 402–413, 2023.
- [10] W. Wu, B. Jamali, K. Zhang, L. Marshall, and A. Deletic, "Water Sensitive Urban Design (WSUD) Spatial Prioritisation through Global Sensitivity Analysis for Effective Urban Pluvial Flood Mitigation," *Water Res.*, vol. 235, no. October 2022, p. 119888, 2023.
- [11] Alfiana, R. F. Lubis, M. R. Suharyadi, E. Y. Utami, and B. Sipayung, "Manajemen Risiko dalam Ketidakpastian Global: Strategi dan Praktik Terbaik," *J. Bisnis dan Manaj. West Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 260–271, 2023.
- [12] H. M. Benavides-Muñoz and K. M. Román-Aguilar, "Hydrodynamic Modeling and Flood Mitigation Strategies in an Andean Valley City," *PLOS Water*, vol. 4, no. 7 June, pp. 1–35, 2025.
- [13] M. I. Ullah, K. S. Qureshi, A. ur Rauf, and L. A. Shah, "Advanced Floodplain Mapping: HEC-RAS and ArcGIS Pro Application on Swat River," *J. Umm Al-Qura Univ. Eng. Archit.*, vol. 15, no. 3, pp. 245–258, 2024.
- [14] D. D. More, B. K. Gavit, and S. B. Nandgude, "Hydrologic Engineering Centers-River Analysis System(HEC-RAS) - A Review," *J. Agric. Res. Technol.*, vol. 1, no. 49, pp. 139–150, 2024.
- [15] F. Well and F. Ludwig, "Development of an Integrated Design Strategy for Blue-Green Architecture," *Sustain.*, vol. 13, no. 14, 2021.
- [16] B. Liu, C. Xu, J. Yang, S. Lin, and X. Wang, "Effect of Land Use and Drainage System Changes on Urban Flood Spatial Distribution in Handan City: A Case Study," *Sustain.*, vol. 14, no. 21, pp. 2–18, 2022.
- [17] M. Zolghadr *et al.*, "Computation of Time of Concentration Based on Two-Dimensional Hydraulic Simulation," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 19, pp. 1–20, 2022.
- [18] S. Ansarifard *et al.*, *Simulation of Floods Under the Influence of Effective Factors in Hydraulic and Hydrological Models Using HEC-RAS and MIKE 21*, vol. 4, no. 1. Springer International Publishing, 2024.
- [19] N. N. Zainal and S. H. A. Talib, "Review Paper on Applications of the HEC-RAS Model for Flooding, Agriculture, and Water Quality Simulation," *Water Pract. Technol.*, vol. 19, no. 7, pp. 2883–2900, 2024.
- [20] N. Fraehr, Q. J. Wang, W. Wu, and R. Nathan, "Assessment of Surrogate Models for Flood Inundation: The Physics-Guided LSG model vs. State-of-the-Art Machine Learning Models," *Water Res.*, vol. 252, no. January, p. 121202, 2024.
- [21] H. Rezaei *et al.*, "A Spatial Decision Support System for Modeling Urban Resilience to Natural Hazards," *Sustain.*, vol. 15, no. 11, pp. 2–18, 2023.

- [22] A. Chaurasia, A. Bose, S. Patil, and T. Khan, "Resilient & Climate-Adaptive Infrastructure," *J. Build. Constr. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 74–84, 2025.
- [23] N. Kirby, "Strengthening Community Resilience Through Participation—a Conceptual Exploration," *Environ. Sociol.*, vol. 12, no. 1, pp. 76–91, 2025.
- [24] R. Ghrieb, A. Ahriz, A. Grib, M. Beladjila, and M. E. Matallah, "The Correlation Between Water Sensitive Urban Design and Urban Climate: A Bibliometric Analysis," *Environ. Res. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 1018–1034, 2025.
- [25] X. Meng, "Understanding the Effects of Site-Scale Water-Sensitive Urban Design (WSUD) in the Urban Water Cycle: A Review," *Blue-Green Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 45–57, 2022.
- [26] Y. Cui, M. Yin, X. Cheng, J. Tang, and B. J. He, "Towards Cool Cities and Communities: Preparing for an Increasingly Hot Future by the Development of Heat-Resilient Infrastructure and Urban Heat Management plan," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 34, no. October 2023, p. 103568, 2024.
- [27] A. Rasidi and W. Boediningsih, "Tinjauan Yuridis Tentang Peran Manusia dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup di Indonesia," *J. Cendekia Ilm.*, vol. 3, no. 5, pp. 4589–4597, 2024.
- [28] M. Alfarizi, W. N. Alfarizi, and D. W. Astuti, "Adaptasi Bangunan pada Kawasan Rawan Banjir Studi Kasus: Bangunan SMPN 6 Surakarta," *Pros. Semin. Ilm. Arsit.*, pp. 428–435, 2024.
- [29] X. Ke, W. Yang, L. Misheng, and Z. Ranting, "Urban and Architectural Design from the Perspective of Flood Resilience: Framework Development and Case Study of a Chinese University Campus," *J. Asian Archit. Build. Eng.*, vol. 22, no. 5, pp. 3100–3114, 2023.
- [30] H. Desalegn and A. Mulu, "Mapping Flood Inundation areas using GIS and HEC-RAS model at Fetam River, Upper Abbay Basin, Ethiopia," *Sci. African*, vol. 12, p. e00834, 2021.
- [31] U. Dan and R. Banjir, "Pengaruh Perubahan Tata Guna Lahan Terhadap Peningkatan Limpasan Permukaan Akibat Urbanisasi dan Risiko Banjir," *J. Ilmu Tek. Sipil Indones.*, vol. 2, no. 1, pp. 14–20, 2026.
- [32] A. A. Bara, R. Cornelis, and D. Lau, "Integrasi Green–Blue Infrastructure untuk Ketahanan Iklim dan Air di Nusa Tenggara Timur: Sebuah Systematic Literature Review dari Perspektif Semi-Arid Urban Systems," *J. Kridatama Sains dan Teknol.*, vol. 7, no. 2, pp. 828–838, 2025.