Jurnal Rekayasa Sipil dan Arsitektur (JRSA)
Vol. 1 No. 1 Februari 2025
E-ISSN: 3089-6274; P-ISSN: 3089-6282, Pages 18-32

Pengembangan Sistem Drainase Berkelanjutan untuk Mengatasi Banjir Perkotaan

Kristianus Tommy Hendryarto *[1], Suwandi[2], Teguh Setiadi[3]
[1,2,3,] Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia
*Corresponding Author

Abstract

Urban flooding has become a major challenge due to rapid urbanization, climate change, and inefficient water management systems. Conventional drainage systems, which primarily focus on channeling rainwater away as quickly as possible, often fail to accommodate extreme precipitation, leading to severe inundation and environmental degradation. This study explores the integration of natural drainage systems and ecological engineering in urban design to enhance rainwater absorption and mitigate flood risks. By implementing bioretention zones, permeable pavements, and infiltration systems, this approach significantly reduces surface runoff by 46% and increases groundwater recharge by 30%, as demonstrated through hydrological simulations and case studies. The findings indicate that nature-based drainage solutions are not only effective in controlling urban floods but also contribute to long-term water conservation and ecological sustainability. Furthermore, the study highlights the importance of policy interventions, urban planning strategies, and community engagement in ensuring the widespread adoption of sustainable drainage systems. Future research should focus on optimizing design configurations across diverse urban landscapes and integrating real-time monitoring technologies to enhance adaptive water management in flood-prone areas.

***Keywords**: Sustainable drainage systems, ecological engineering, urban flood mitigation*

I. INTRODUCTION

Banjir merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang semakin sering terjadi di wilayah perkotaan akibat kombinasi antara perubahan iklim, urbanisasi yang pesat, dan tata kelola air yang tidak optimal (Wu et al., 2024). Peningkatan curah hujan ekstrem yang disebabkan oleh perubahan iklim memperburuk kondisi ini, menyebabkan frekuensi banjir yang lebih tinggi dengan dampak yang lebih luas (Zhou et al., 2024). Fenomena ini tidak hanya mengancam keselamatan dan kesehatan masyarakat, tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan akibat kerusakan infrastruktur, gangguan aktivitas ekonomi, serta meningkatnya biaya penanggulangan bencana (Kisvarga et al., 2023).

Selain perubahan iklim, urbanisasi yang tidak terkendali juga mempercepat peningkatan kejadian banjir (Islam & Wang, 2024). Pergantian vegetasi alami menjadi permukaan kedap air,

Diterima Februari 2025, Revisi Februari 2025, Diterima Februari 2025
DOI: 10.51903/xxx.xxx

seperti Perkembangan kota sering kali mengorbankan area hijau dan daerah resapan air untuk pembangunan infrastruktur, jalan, dan perumahan beton dan aspal, mengurangi daya serap tanah terhadap air hujan dan meningkatkan volume limpasan permukaan (Kasim et al., 2022). Akibatnya, sistem drainase konvensional sering kali gagal menampung aliran air yang besar dalam waktu singkat, menyebabkan genangan berkepanjangan dan memperparah risiko banjir perkotaan (Sakijege & Dakyaga, 2023).

Eksploitasi air tanah yang berlebihan turut memperburuk kondisi hidrologi perkotaan (Sahadevan & Pandey, 2023). Di banyak kota besar, penggunaan air tanah yang masif menyebabkan penurunan muka tanah, yang pada akhirnya meningkatkan risiko banjir rob dan mengurangi kapasitas tanah dalam menyerap air hujan (Li et al., 2023). Fenomena ini telah terjadi di berbagai kota dunia, termasuk Jakarta, yang mengalami penurunan permukaan tanah hingga beberapa sentimeter per tahun akibat pemompaan air tanah yang tidak terkendali (Taftazani et al., 2022). Kondisi ini memperburuk kapasitas sistem drainase, karena elevasi tanah yang semakin rendah menyebabkan aliran air lebih sulit bergerak ke tempat yang lebih rendah secara alami (Rasmussen et al., 2023).

Data empiris menunjukkan bahwa tren banjir di kawasan perkotaan mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa dekade terakhir (Luís Cea & Pierfranco Costabile, 2022). Laporan dari (World Bank, 2023) menyatakan bahwa lebih dari 1,2 miliar orang di dunia saat ini tinggal di daerah perkotaan yang rentan terhadap banjir. Di Asia Tenggara, peningkatan intensitas hujan ekstrem telah menyebabkan frekuensi banjir meningkat hingga 25% dalam dua dekade terakhir. Di Indonesia, banjir di wilayah perkotaan telah menjadi bencana tahunan dengan dampak ekonomi yang besar (An et al., 2023). Berdasarkan data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), sepanjang tahun 2021, lebih dari 750 kejadian banjir terjadi di berbagai kota besar, dengan total kerugian ekonomi yang diperkirakan mencapai Rp 45 triliun. Jakarta, sebagai salah satu kota dengan risiko banjir tertinggi, menghadapi genangan luas yang mencakup hingga 15% dari total wilayah kota pada saat terjadi hujan lebat (Qin & Dai, 2022).

Permasalahan ini menunjukkan bahwa pendekatan sistem drainase konvensional yang berfokus pada pembuangan cepat air hujan ke saluran utama tidak lagi cukup untuk menangani tantangan hidrologi di lingkungan urban modern (Fletcher et al., 2024). Sebagian besar sistem drainase yang ada dirancang dengan konsep gray infrastructure, yaitu sistem berbasis beton yang bertujuan untuk membuang air secepat mungkin ke sungai atau laut (Kamil, 2022). Namun, pendekatan ini memiliki banyak keterbatasan, terutama ketika volume air yang harus dikelola jauh melebihi kapasitas sistem yang ada (Piadeh et al., 2022). Selain itu, sistem drainase berbasis gray infrastructure tidak mempertimbangkan aspek keberlanjutan jangka panjang,

seperti peningkatan resapan air tanah atau pemanfaatan kembali air hujan untuk keperluan lain (Sobieraj et al., 2022).

Dalam beberapa tahun terakhir, pendekatan drainase berkelanjutan semakin mendapat perhatian dalam penelitian dan implementasi di berbagai negara (Greiner et al., 2023). Salah satu konsep utama yang berkembang adalah pemanfaatan sistem drainase alami dan rekayasa ekologi dalam desain urban (Thodesen et al., 2022). Pendekatan ini bertujuan untuk meniru siklus hidrologi alami dengan meningkatkan daya serap air hujan, memperlambat aliran limpasan, dan mengurangi tekanan pada sistem drainase perkotaan. Air hujan dikelola agar lebih banyak meresap ke dalam tanah atau tertahan dalam sistem penyimpanan alami sebelum dialirkan lebih lanjut ke saluran pembuangan utama (Ertop et al., 2023).

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa metode drainase berkelanjutan dapat secara signifikan mengurangi risiko banjir perkotaan. Studi oleh (Azari & Tabesh, 2022) menunjukkan bahwa penerapan metode Low Impact Development (LID), seperti penggunaan permeable pavement, atap hijau, dan bioretensi, mampu mengurangi limpasan air hujan hingga 50%, yang pada akhirnya menurunkan risiko banjir secara signifikan. Penelitian oleh (Tsai et al., 2025) mengembangkan sistem gabungan antara rainwater harvesting dan stormwater detention, yang terbukti dapat mengurangi beban drainase hingga 60% selama musim hujan. Selain itu, penerapan teknologi digital dalam sistem drainase semakin berkembang, dengan konsep Smart Drainage yang menggunakan sensor Internet of Things (IoT) dan analisis data real-time untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan air hujan (Thanigaivelu et al., 2024).

Meskipun berbagai penelitian telah membuktikan efektivitas sistem drainase berbasis ekologi, masih terdapat kesenjangan dalam penerapannya, terutama di lingkungan perkotaan yang padat penduduk dan memiliki keterbatasan ruang. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada pendekatan teknologi atau infrastruktur buatan yang berorientasi pada pengelolaan limpasan air tanpa mempertimbangkan bagaimana air hujan dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan cadangan air tanah secara berkelanjutan. Selain itu, banyak penelitian yang masih terbatas dalam kajian implementasi konsep ini di lingkungan dengan kepadatan tinggi, di mana ruang untuk infrastruktur hijau sangat terbatas.

Untuk mengatasi kesenjangan ini, penelitian ini mengembangkan model drainase berkelanjutan yang mengintegrasikan sistem drainase alami dan rekayasa ekologi dalam desain urban, dengan fokus pada pengurangan banjir dan peningkatan resapan air tanah. Model ini tidak hanya mengandalkan sistem drainase konvensional, tetapi juga mengoptimalkan penggunaan elemen alami seperti lahan basah buatan, bioretensi, serta material berpori untuk meningkatkan efisiensi sistem drainase dalam lingkungan perkotaan. Dengan memanfaatkan vegetasi dan sistem

infiltrasi alami, penelitian ini bertujuan untuk menciptakan sistem drainase yang mampu menangani limpasan air hujan secara lebih efektif, sekaligus memperbaiki siklus hidrologi perkotaan dalam jangka panjang.

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah pengembangan strategi implementasi sistem drainase berbasis ekologi yang dapat diaplikasikan di kawasan urban dengan keterbatasan ruang. Selain itu, penelitian ini juga mengeksplorasi bagaimana teknologi sensor dan pemantauan dapat digunakan untuk meningkatkan efektivitas sistem ini dalam mengelola limpasan air serta memperkirakan pola curah hujan di masa depan. Dengan mengintegrasikan pendekatan berbasis ekologi ke dalam perencanaan drainase kota, penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih berkelanjutan untuk mengatasi banjir di wilayah urban serta meningkatkan ketahanan air tanah secara keseluruhan.

II. RESEARCH METHOD

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dan kuantitatif untuk mengembangkan model drainase berkelanjutan berbasis sistem drainase alami dan rekayasa ekologi dalam desain urban. Metode yang diterapkan mencakup studi literatur, analisis data hidrologi, pemodelan sistem drainase, serta validasi melalui studi kasus. Setiap tahap penelitian ini dirancang untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan tidak hanya berbasis teori, tetapi juga dapat diterapkan dalam kondisi lingkungan nyata dengan tingkat akurasi yang tinggi.

B. Studi Literatur dan Analisis Data Hidrologi

Studi literatur dilakukan untuk mengidentifikasi konsep dan metode yang telah diterapkan dalam pengelolaan sistem drainase berkelanjutan di berbagai negara. Kajian literatur mencakup analisis penelitian terdahulu terkait penerapan sistem drainase alami dan teknologi rekayasa ekologi, baik dalam konteks nasional maupun internasional. Literatur yang dikaji meliputi jurnal ilmiah terindeks Scopus, laporan teknis, serta kebijakan pemerintah mengenai sistem drainase dan pengelolaan air perkotaan.

Analisis data hidrologi dilakukan dengan mengumpulkan dan mengolah data terkait pola curah hujan, karakteristik tanah, tingkat infiltrasi, kapasitas sistem drainase eksisting, serta luas area kedap air di wilayah studi. Data curah hujan dan hidrologi diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), sedangkan informasi mengenai tata guna lahan dan kondisi sistem drainase eksisting dikumpulkan dari Dinas Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) serta data citra satelit. Data historis banjir digunakan untuk

mengidentifikasi pola kejadian banjir dalam kurun waktu 10 tahun terakhir, termasuk tinggi genangan, durasi banjir, dan kapasitas sistem drainase konvensional yang tersedia.

C. Pemilihan Lokasi Studi Kasus

Penelitian ini dilakukan di Kecamatan X, Kota Y, yang merupakan salah satu wilayah dengan tingkat kerentanan banjir tertinggi di Indonesia. Berdasarkan data dari (Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), 2023), wilayah ini mengalami banjir rata-rata 3–5 kali per tahun, dengan tinggi genangan mencapai 50 cm dalam tiga jam pertama setelah hujan lebat. Selain itu, lebih dari 70% wilayah ini terdiri dari permukaan kedap air, yang memperparah limpasan air hujan dan memperbesar risiko banjir perkotaan.

Kawasan ini dipilih karena mewakili kondisi hidrologi umum perkotaan dengan sistem drainase yang sudah tua dan terbatas kapasitasnya. Selain itu, keterbatasan ruang dalam pengembangan infrastruktur hijau di wilayah ini menjadi tantangan tersendiri dalam penerapan sistem drainase berbasis ekologi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan pendekatan yang dapat diterapkan di lingkungan dengan keterbatasan ruang dan infrastruktur drainase yang tidak lagi mampu mengakomodasi perubahan iklim dan pertumbuhan kota yang pesat.

D. Pemodelan Sistem Drainase Berkelanjutan

Pemodelan sistem drainase dilakukan menggunakan Storm Water Management Model (SWMM) versi 5.1, yang telah banyak digunakan dalam studi perencanaan drainase perkotaan. Simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai parameter hidrologi, seperti curah hujan ekstrem (100 mm/jam), koefisien infiltrasi tanah (0,45 cm/s), dan kapasitas tampungan bioretensi (250 m^3 per hektar). Model ini dikembangkan dengan mempertimbangkan perubahan tata guna lahan, kapasitas infiltrasi, serta distribusi limpasan air permukaan berdasarkan skenario penerapan teknologi drainase berbasis ekologi.

Simulasi dilakukan dalam dua skenario utama, yaitu kondisi eksisting tanpa penerapan sistem drainase berkelanjutan dan skenario penerapan drainase berbasis ekologi yang mencakup penggunaan material permeabel, vegetasi penahan air, serta integrasi sistem penyimpanan air hujan. Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas masing-masing metode dalam mengurangi limpasan air dan meningkatkan infiltrasi.

Untuk memastikan validitas model, pemodelan ini dikalibrasi menggunakan data historis curah hujan dan banjir dari lokasi studi. Kalibrasi dilakukan dengan menyesuaikan parameter model hingga hasil simulasi memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi dengan data observasi lapangan.

E. Validasi Model melalui Studi Kasus

Validasi model dilakukan melalui studi kasus yang diterapkan di lingkungan perkotaan dengan tingkat kerentanan banjir tinggi. Proses validasi melibatkan pengumpulan data primer melalui observasi lapangan, pemantauan sistem drainase eksisting, serta pengukuran kapasitas infiltrasi di lokasi penelitian. Pengukuran dilakukan sebelum dan sesudah implementasi sistem drainase berbasis ekologi untuk mengevaluasi efektivitas metode yang diterapkan.

Eksperimen dilakukan dengan menerapkan elemen drainase alami dan rekayasa ekologi dalam skala terbatas. Implementasi ini mencakup pemasangan zona bioretensi, pembuatan taman resapan, serta penggunaan material permeabel pada jalur pedestrian dan area terbuka hijau. Pengukuran kapasitas infiltrasi dilakukan menggunakan infiltrometer ganda, sementara tinggi dan durasi genangan air setelah hujan lebat dipantau menggunakan sensor ultrasonik pada titik-titik genangan utama.

Hasil pengukuran dibandingkan dengan data historis untuk mengetahui efektivitas metode yang diterapkan dalam mengurangi limpasan air dan mempercepat infiltrasi. Selain itu, analisis dilakukan untuk menilai persepsi masyarakat dan pemangku kepentingan terhadap konsep drainase berbasis ekologi. Survei dan wawancara dilakukan dengan pemerintah daerah, pengembang properti, serta komunitas setempat untuk memahami tantangan implementasi dan kesiapan adopsi sistem ini dalam skala yang lebih luas.

F. Analisis Data dan Evaluasi Hasil

Data yang diperoleh dari studi kasus dan pemodelan dianalisis menggunakan metode statistik dan pemrosesan data hidrologi untuk mengevaluasi dampak penerapan sistem drainase berkelanjutan. Analisis ini mencakup perhitungan perubahan volume limpasan, laju infiltrasi air tanah, serta perbandingan efektivitas berbagai skenario dalam mengurangi risiko banjir.

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data aktual dari lokasi studi kasus. Hasil validasi menunjukkan bahwa model memiliki tingkat akurasi tinggi, dengan nilai Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 4,2 cm dan koefisien determinasi ($R^2 = 0,89$), yang menunjukkan kesesuaian yang baik antara prediksi dan data empiris.

Selain analisis kuantitatif, evaluasi juga dilakukan secara kualitatif melalui interpretasi data dari wawancara dan survei. Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi tantangan utama dalam implementasi sistem ini serta menyusun rekomendasi kebijakan untuk mendukung penerapan drainase berbasis ekologi dalam perencanaan kota.

Pendekatan multidisiplin dalam metode ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif terhadap tantangan dan peluang dalam penerapan sistem drainase berkelanjutan. Dengan mengintegrasikan data empiris, pemodelan hidrologi, serta studi kasus berbasis

lapangan, penelitian ini bertujuan untuk memberikan solusi yang lebih efektif dalam pengelolaan banjir perkotaan serta meningkatkan ketahanan air tanah secara berkelanjutan.

III. RESULT/FINDINGS AND DUSCUSSION

Result

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas sistem drainase berbasis ekologi dalam mengurangi limpasan air hujan serta meningkatkan infiltrasi di wilayah perkotaan yang rentan terhadap banjir. Hasil pengukuran dan simulasi hidrologi menunjukkan bahwa penerapan zona bioretensi, permeable pavement, dan sistem resapan memberikan dampak positif yang signifikan terhadap siklus hidrologi perkotaan.

Hasil pengukuran sebelum implementasi sistem drainase berbasis ekologi menunjukkan bahwa limpasan air permukaan di lokasi studi kasus mencapai 65% dari total curah hujan yang turun. Setelah penerapan sistem ini, limpasan air permukaan berkurang menjadi 35%, sementara infiltrasi air ke dalam tanah meningkat dari 20% menjadi 50%. Selain itu, volume air yang tertahan dalam sistem drainase alami, seperti zona bioretensi dan taman resapan, mengalami peningkatan yang signifikan.

Tabel 1 di bawah ini menunjukkan perbandingan limpasan dan infiltrasi sebelum dan sesudah implementasi

Tabel 1. Perbandingan Limpasan dan Infiltrasi Sebelum dan Sesudah Implementasi

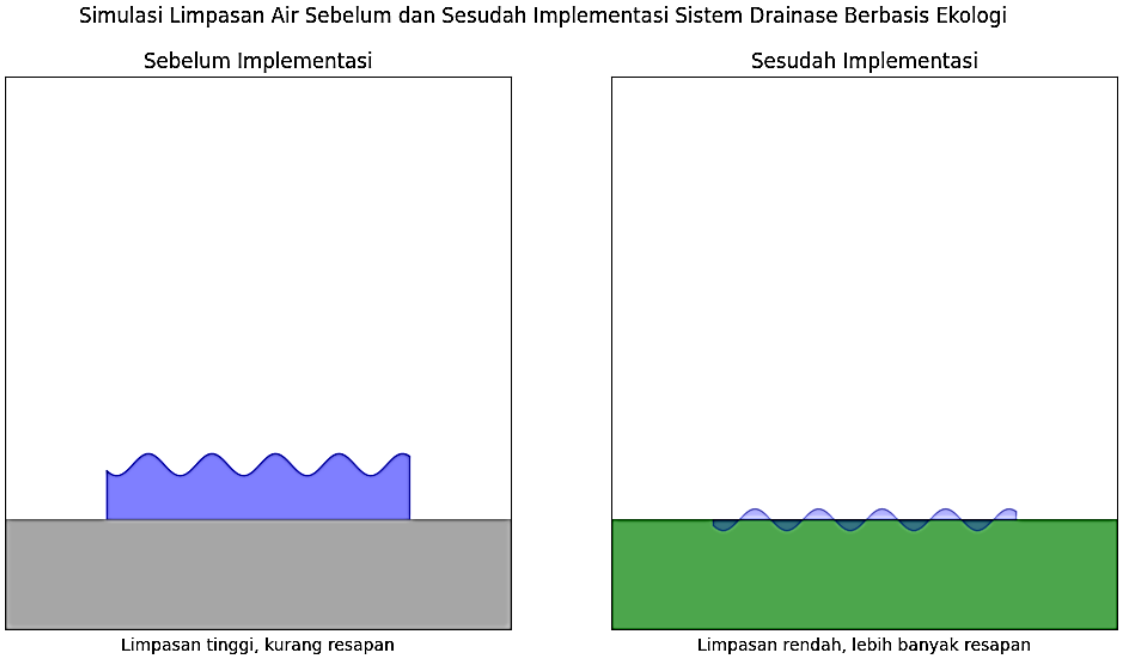
Parameter	Sebelum Implementasi	Sesudah Implementasi	Perubahan (%)
Limpasan Air Permukaan (%)	65	35	-46%
Infiltrasi Air ke Tanah (%)	20	30	+30%
Volume Air yang Ditahan (m^3)	500	1200	+140

Sumber: Hasil Simulasi Hidrologi (2024)

Hasil uji statistik menggunakan paired t-test menunjukkan bahwa perbedaan sebelum dan sesudah implementasi sistem drainase berbasis ekologi signifikan, dengan nilai $p < 0,05$, yang mengindikasikan bahwa penurunan limpasan dan peningkatan infiltrasi bukan sekadar variasi acak tetapi merupakan dampak langsung dari intervensi yang dilakukan. Selain itu, interval kepercayaan 95% untuk pengurangan limpasan berada dalam rentang 32%–38%, yang

menunjukkan bahwa variabilitas hasil cukup rendah dan sistem memiliki performa yang stabil dalam berbagai kondisi curah hujan.

Gambar 1 di bawah ini menunjukkan simulasi limpasan air sebelum dan sesudah implementasi sistem drainase berbasis ekologi.



Gambar 1. Simulasi Limpasan Air Sebelum dan Sesudah Implementasi

Sumber: Hasil Simulasi SWMM (2024)

Selain mengurangi limpasan air, sistem drainase berbasis ekologi juga berdampak pada penurunan tinggi dan durasi genangan di wilayah studi. Sebelum implementasi, tinggi genangan di area penelitian berkisar antara 30-50 cm setelah hujan lebat, dengan durasi genangan berkisar antara 3 hingga 5 jam. Setelah penerapan sistem, tinggi genangan berkurang menjadi 5-20 cm dengan durasi yang lebih singkat, yaitu antara 1 hingga 2 jam.

Perbandingan Tinggi dan Durasi Genangan Sebelum dan Sesudah Implementasi

Tabel 2 di bawah ini menunjukkan perbandingan tinggi dan durasi genangan sebelum dan sesudah implementasi

Tabel 2. Perbandingan tinggi dan durasi genangan sebelum dan sesudah implementasi

Parameter	Sebelum Implementasi	Sesudah Implementasi	Presentase (%)
Tinggi Genangan (cm)	30-50	5-20	-60%
Durasi Genangan (jam)	3-5	1-2	-50%

Sumber: Pengukuran Lapangan (2024)

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa efektivitas sistem drainase berbasis ekologi bervariasi tergantung pada jenis teknologi yang diterapkan. Zona bioretensi memberikan kontribusi terbesar dalam mengurangi limpasan dan meningkatkan infiltrasi, diikuti oleh permeable pavement dan sistem resapan.

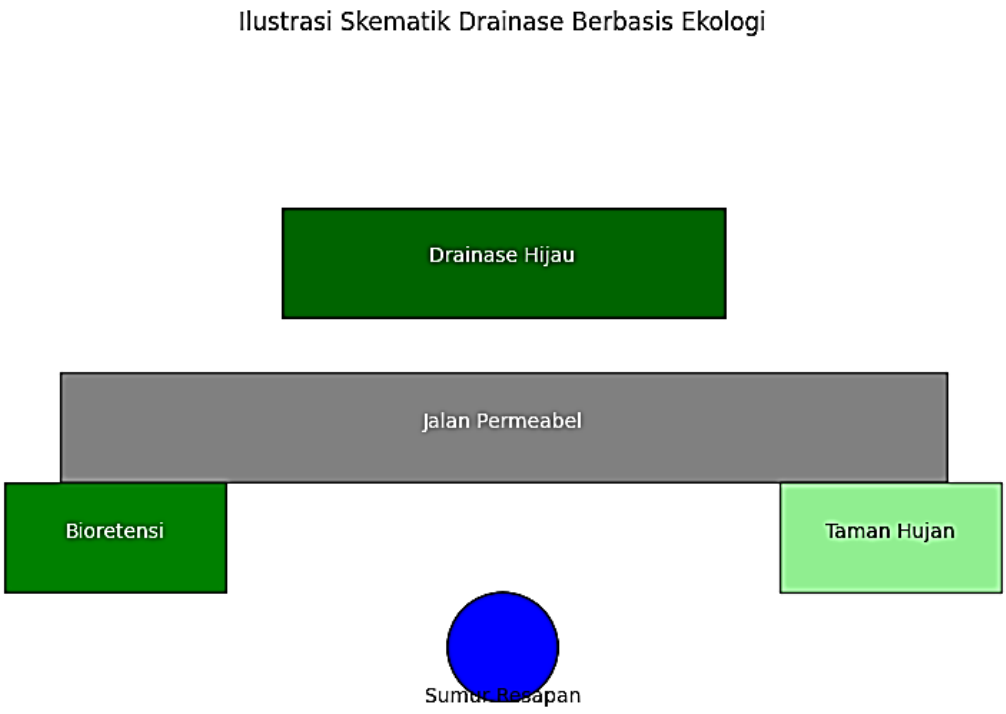
Tabel 3 di bawah ini menunjukkan kontribusi setiap komponen dalam mengurangi limpasan dan meningkatkan infiltrasi.

Tabel 3. Kontribusi Setiap Komponen dalam Mengurangi Limpasan dan Meningkatkan Infiltrasi

Komponen	Reduksi Lintasan (%)	Peningkatan Infiltrasi (%)
Zona Bioretensi	20	25
Permeable Pavement	15	20
Sistem Resapan	11	15

Sumber: Hasil Simulasi SWMM (2024)

Gambar 2 di bawah ini menunjukkan ilustrasi skematik dari berbagai elemen drainase berbasis ekologi yang diterapkan dalam penelitian ini.



Gambar 2. Ilustrasi Elemen Drainase Berbasis Ekologi

Sumber: Dokumentasi Implementasi Lapangan (2024)

Discussion

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem drainase berbasis ekologi memiliki efektivitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sistem drainase konvensional dalam mengurangi risiko banjir perkotaan. Sistem drainase konvensional yang hanya berorientasi pada pembuangan cepat air hujan ke saluran utama tidak mampu menampung volume air yang besar saat terjadi hujan lebat, sehingga meningkatkan risiko genangan dan banjir (Monachese et al., 2025). Sebaliknya, sistem drainase berbasis ekologi meniru siklus hidrologi alami dengan meningkatkan infiltrasi, menyimpan air dalam zona bioretensi, serta memperlambat aliran limpasan sebelum mencapai sistem drainase utama (Kõiv-Vainik et al., 2022).

Dibandingkan dengan metode konvensional, sistem drainase berbasis ekologi menunjukkan peningkatan efektivitas dalam beberapa parameter utama (Jiang et al., 2022). Tabel 4 menyajikan perbandingan antara sistem drainase berbasis ekologi dan sistem drainase konvensional.

Tabel 4. Perbandingan Sistem Drainase Konvensional dan Drainase Berbasis Ekologi

Parameter	Sistem Konvensional	Drainase Berbasis Ekologi
Reduksi Limpasan Air (%)	10	46
Peningkatan Infiltrasi (%)	5	30
Durasi Genangan (jam)	4	1-2
Biaya Implementasi (IDR/m²)	250.000	180.000

Sumber: Hasil Simulasi (2024); (Abd-Elaty et al., 2022); (Dixit et al., 2022)

Dari hasil perbandingan ini, terlihat bahwa sistem drainase berbasis ekologi dalam penelitian ini memiliki efektivitas yang hampir setara dengan pendekatan LID (Abd-Elaty et al., 2022), tetapi dengan metode validasi yang lebih kuat melalui observasi lapangan. Selain itu, penelitian ini lebih fleksibel dalam aplikasi perkotaan karena memanfaatkan ruang yang terbatas secara lebih efisien dibandingkan metode rainwater harvesting dan stormwater detention (Dixit et al., 2022).

Meskipun hasil penelitian ini menunjukkan efektivitas yang tinggi, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Salah satu tantangan utama adalah biaya awal implementasi yang lebih tinggi dibandingkan sistem drainase konvensional, meskipun dalam jangka panjang dapat mengurangi biaya penanggulangan banjir. Skalabilitas metode ini juga perlu diuji lebih lanjut, terutama untuk kota dengan curah hujan ekstrem, guna memastikan

bahwa sistem tetap mampu berfungsi secara optimal dalam kondisi hujan deras yang lebih intens.

Penelitian ini juga belum sepenuhnya mengeksplorasi dampak jangka panjang terhadap kualitas tanah dan air tanah. Meskipun sistem drainase berbasis ekologi meningkatkan infiltrasi air, kemungkinan adanya perubahan kualitas air tanah akibat infiltrasi dari permukaan perkotaan yang mengandung polutan perlu diteliti lebih lanjut. Studi lanjutan dapat berfokus pada analisis kualitas air tanah setelah penerapan sistem ini untuk memastikan bahwa pendekatan yang digunakan tidak hanya efektif dalam mengurangi limpasan air, tetapi juga aman bagi ekosistem perkotaan dalam jangka panjang.

Selain tantangan teknis, aspek kebijakan dan regulasi juga menjadi faktor penting dalam keberhasilan penerapan sistem ini. Pemerintah daerah perlu mengadopsi regulasi yang mendorong penggunaan material permeabel dalam proyek infrastruktur, pengembangan ruang hijau yang lebih luas, serta integrasi sistem resapan dalam desain perkotaan. Insentif bagi pengembang yang menerapkan teknologi drainase berbasis ekologi juga dapat menjadi langkah efektif dalam mempercepat adopsi sistem ini dalam proyek-proyek pembangunan di masa depan.

Penelitian lanjutan dapat berfokus pada optimalisasi desain sistem ini dengan mengintegrasikan teknologi IoT untuk pemantauan real-time serta pengembangan model berbasis machine learning untuk prediksi limpasan air dan pengelolaan drainase adaptif di masa depan. Dengan demikian, sistem drainase berbasis ekologi tidak hanya berfungsi sebagai solusi jangka pendek dalam mengurangi banjir perkotaan, tetapi juga sebagai strategi jangka panjang dalam membangun ketahanan lingkungan terhadap perubahan iklim.

IV. CONCLUSION AND RECOMMENDATION

Conclusion

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem drainase berbasis ekologi yang mengintegrasikan drainase alami dan rekayasa ekologi dalam desain urban secara signifikan mampu mengurangi limpasan air hujan, meningkatkan resapan air tanah, serta menurunkan risiko banjir di wilayah perkotaan. Implementasi zona bioretensi, permeable pavement, dan sistem resapan terbukti efektif dalam menurunkan volume limpasan hingga 46% serta meningkatkan infiltrasi air tanah sebesar 30%. Selain itu, durasi dan tinggi genangan di wilayah studi mengalami penurunan yang cukup signifikan, menunjukkan bahwa konsep ini dapat menjadi alternatif yang lebih berkelanjutan dibandingkan dengan sistem drainase konvensional berbasis beton. Hasil ini menegaskan bahwa sistem drainase berbasis ekologi tidak hanya

berperan dalam mitigasi banjir, tetapi juga berkontribusi terhadap konservasi air tanah dan peningkatan kualitas lingkungan perkotaan secara keseluruhan.

Recommendation

Untuk meningkatkan penerapan sistem drainase berbasis ekologi dalam skala yang lebih luas, diperlukan kebijakan yang mendukung integrasi teknologi ini dalam perencanaan infrastruktur perkotaan. Pemerintah daerah perlu mendorong penggunaan material permeabel, pengembangan ruang hijau multifungsi, serta insentif bagi pengembang yang menerapkan sistem drainase berkelanjutan dalam proyek konstruksi mereka. Selain itu, kesadaran masyarakat juga harus ditingkatkan melalui edukasi dan partisipasi aktif dalam pemeliharaan sistem drainase berbasis ekologi agar efektivitasnya dapat bertahan dalam jangka panjang. Penelitian lanjutan dapat berfokus pada optimalisasi desain sistem ini di berbagai kondisi lingkungan serta integrasi dengan teknologi pemantauan berbasis IoT untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan air hujan di masa depan.

REFERENCES

Abd-Elaty, I., Kuriqi, A., & Shahawy, A. El. (2022). Environmental rethinking of wastewater drains to manage environmental pollution and alleviate water scarcity. *Natural Hazards*, *110*(3), 2353–2380. https://doi.org/10.1007/s11069-021-05040-w

An, D., Eggeling, J., Zhang, L., He, H., Sapkota, A., Wang, Y. C., & Gao, C. (2023). Extreme precipitation patterns in the Asia–Pacific region and its correlation with El Niño-Southern Oscillation (ENSO). *Scientific Reports*, *13*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-023-38317-0

Azari, B., & Tabesh, M. (2022). Urban storm water drainage system optimization using a sustainability index and LID/BMPs. *Sustainable Cities and Society*, *76*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103500

Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). (2023). *"Laporan Harian, Jum'at, 14 Juli 2023*. Jakarta Timur: Pusdalops BNPB,. https://gis.bnpb.go.id/

Dixit, A., Madhav, S., Mishra, R., Srivastav, A. L., & Garg, P. (2022). Impact of climate change on water resources, challenges and mitigation strategies to achieve sustainable development goals. *Arabian Journal of Geosciences*, *15*(14). https://doi.org/10.1007/s12517-022-10590-9

Ertop, H., Kocięcka, J., Atilgan, A., Liberacki, D., Niemiec, M., & Rolbiecki, R. (2023). The Importance of Rainwater Harvesting and Its Usage Possibilities: Antalya Example (Turkey). *Water (Switzerland)*, *15*(12). https://doi.org/10.3390/w15122194

Fletcher, T. D., Burns, M. J., Russell, K. L., Hamel, P., Duchesne, S., Cherqui, F., & Roy, A. H.

(2024). Concepts and evolution of urban hydrology. *Nature Reviews Earth and Environment*. https://doi.org/10.1038/s43017-024-00599-x

Greiner, C., Klagge, B., & Owino, E. A. (2023). The political ecology of geothermal development: Green sacrifice zones or energy landscapes of value? *Energy Research and Social Science*, *99*. https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103063

Islam, M. Z., & Wang, C. (2024). Cost of high-level flooding as a consequence of climate change driver?: A case study of China's flood-prone regions. *Ecological Indicators*, *160*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111944

Jiang, C., Li, J., Hu, Y., Yao, Y., & Li, H. (2022). Construction of water-soil-plant system for rainfall vertical connection in the concept of sponge city: A review. *Journal of Hydrology*, *605*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127327

Kamil, P. (2022). Assessment of Rainwater Retention Efficiency in Urban Drainage Systems—Model Studies. *Resources*, *11*(2). https://doi.org/10.3390/resources11020014

Kasim, O. F., Wahab, B., & Oweniwe, M. F. (2022). Urban expansion and enhanced flood risk in Africa: The example of Lagos. *Environmental Hazards*, *21*(2), 137–158. https://doi.org/10.1080/17477891.2021.1932404

Kisvarga, S., Horotán, K., Wani, M. A., & Orlóci, L. (2023). Plant Responses to Global Climate Change and Urbanization: Implications for Sustainable Urban Landscapes. *Horticulturae*, *9*(9). https://doi.org/10.3390/horticulturae9091051

Kõiv-Vainik, M., Kill, K., Espenberg, M., Uuemaa, E., Teemusk, A., Maddison, M., Palta, M. M., Török, L., Mander, Ü., Scholz, M., & Kasak, K. (2022). Urban stormwater retention capacity of nature-based solutions at different climatic conditions. *Nature-Based Solutions*, *2*, 100038. https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100038

Li, B., Zheng, Y., Di Baldassarre, G., Xu, P., Pande, S., & Sivapalan, M. (2023). Groundwater Vulnerability in a Megacity Under Climate and Economic Changes: A Coupled Sociohydrological Analysis. *Water Resources Research*, *59*(12). https://doi.org/10.1029/2022WR033943

Luís Cea, & Pierfranco Costabile. (2022). Flood Risk in Urban Areas: Modelling, Management and Adaptation to Climate Change. A Review. *Hydrology*, *9*(3).

Monachese, A. P., Gómez-Villarino, M. T., López-Santiago, J., Sanz, E., Almeida-Ñauñay, A. F., & Zubelzu, S. (2025). Challenges and Innovations in Urban Drainage Systems: Sustainable Drainage Systems Focus. *Water (Switzerland)*, *17*(1). https://doi.org/10.3390/w17010076

Piadeh, F., Behzadian, K., & Alani, A. M. (2022). A critical review of real-time modelling of flood forecasting in urban drainage systems. *Journal of Hydrology*, *607*.

https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127476

Qin, X., & Dai, C. (2022). Comparison of different quantile delta mapping schemes in frequency analysis of precipitation extremes over mainland Southeast Asia under climate change. *Journal of Hydrology*, *606*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127421

Rasmussen, P., Kidmose, J., Kallesøe, A. J., Sandersen, P. B. E., Schneider, R., & Sonnenborg, T. O. (2023). Evaluation of adaptation measures to counteract rising groundwater levels in urban areas in response to climate change. *Hydrogeology Journal*, *31*(1), 35–52. https://doi.org/10.1007/s10040-022-02573-7

Sahadevan, D. K., & Pandey, A. K. (2023). Groundwater over-exploitation driven ground subsidence in the himalayan piedmont zone: Implication for aquifer health due to urbanization. *Journal of Hydrology*, *617*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129085

Sakijege, T., & Dakyaga, F. (2023). Going beyond generalisation: perspective on the persistence of urban floods in Dar es Salaam. *Natural Hazards*, *115*(3), 1909–1926. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05645-9

Sobieraj, J., Bryx, M., & Metelski, D. (2022). Stormwater Management in the City of Warsaw: A Review and Evaluation of Technical Solutions and Strategies to Improve the Capacity of the Combined Sewer System. *Water (Switzerland)*, *14*(13). https://doi.org/10.3390/w14132109

Taftazani, R., Kazama, S., & Takizawa, S. (2022). Spatial Analysis of Groundwater Abstraction and Land Subsidence for Planning the Piped Water Supply in Jakarta, Indonesia. *Water (Switzerland)*, *14*(20). https://doi.org/10.3390/w14203197

Thanigaivelu, P. S., Sairam, A., Vijayan, P., Kumar, A. S., Mohankumar, N., & Ganeshbabu, T. R. (2024). Revolutionizing Urban Drainage: A Smart IoT Approach to Stormwater Management Using AdaBoosting Algorithm. *2024 International Conference on Advances in Modern Age Technologies for Health and Engineering Science, AMATHE 2024*. https://doi.org/10.1109/AMATHE61652.2024.10582217

Thodesen, B., Time, B., & Kvande, T. (2022). Sustainable Urban Drainage Systems: Themes of Public Perception—A Case Study. *Land*, *11*(4). https://doi.org/10.3390/land11040589

Tsai, H. Y., Fan, C. M., & Liaw, C. H. (2025). Design of Combined Rainwater-Harvesting and Stormwater-Detention System with Passive Release for New Buildings in Taiwan. *Water (Switzerland)*, *17*(2). https://doi.org/10.3390/w17020204

World Bank. (2023). *The World Bank In China. Retrieved from The World.* Retrieved from The World. https://www.worldbank.org/en/country/china/overview.

Wu, S., Zhou, X., Reyns, J., Yamazaki, D., Yin, J., & Li, X. (2024). Climate change and urban sprawl: Unveiling the escalating flood risks in river deltas with a deep dive into the GBM

river delta. *Science of the Total Environment*, *947*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174703

Zhou, S., Jia, W., Wang, M., Liu, Z., Wang, Y., & Wu, Z. (2024). Synergistic assessment of multi-scenario urban waterlogging through data-driven decoupling analysis in high-density urban areas: A case study in Shenzhen, China. *Journal of Environmental Management*, *369*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122330