

Kajian Efektivitas Green Infrastructure dalam Mengurangi Risiko Banjir di Kawasan Perkotaan Padat

Muhammad Faizar, Mira Indriani, Yulia Ningsih¹

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas green infrastructure dalam mengurangi risiko banjir di kawasan perkotaan padat melalui pendekatan yang mengintegrasikan aspek hidrologi, spasial, dan sosial. Metode yang digunakan adalah mixed methods dengan analisis kuantitatif menggunakan simulasi Storm Water Management Model untuk mengevaluasi volume limpasan, debit puncak, dan luas genangan, serta analisis spasial berbasis Geographic Information System untuk mengkaji distribusi dan optimasi penempatan green infrastructure. Analisis kualitatif dilakukan melalui survei persepsi masyarakat menggunakan skala Likert untuk mengukur tingkat pemahaman dan partisipasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa green infrastructure mampu menurunkan volume limpasan dan debit puncak secara signifikan pada intensitas hujan rendah hingga sedang, namun efektivitasnya menurun pada hujan ekstrem. Distribusi dan konektivitas elemen green infrastructure terbukti meningkatkan kinerja secara spasial, sementara partisipasi masyarakat berpengaruh terhadap keberlanjutan fungsi. Kombinasi green infrastructure dengan infrastruktur konvensional memberikan hasil paling optimal dalam mengurangi risiko banjir. Penelitian ini menegaskan pentingnya pendekatan integratif dalam pengelolaan banjir perkotaan yang adaptif dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Green Infrastructure, Banjir Perkotaan, Limpasan Permukaan, Analisis Spasial, Partisipasi Masyarakat

Abstract: *This study aims to analyze the effectiveness of green infrastructure in reducing flood risk in densely populated urban areas through an integrated approach that incorporates hydrological, spatial, and social dimensions. The research employs a mixed methods design, with quantitative analysis conducted using the Storm Water Management Model to evaluate runoff volume, peak discharge, and inundation extent, alongside spatial analysis based on Geographic Information System to assess the distribution and optimization of green*

¹ Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel, Surabaya, Indonesia, muhammadfaizar43@gmail.com

infrastructure placement. Qualitative analysis is carried out through a community perception survey using a Likert scale to measure levels of awareness and participation. The results indicate that green infrastructure significantly reduces runoff volume and peak discharge under low to moderate rainfall intensity, although its effectiveness declines during extreme rainfall events. The distribution and connectivity of green infrastructure elements are shown to enhance spatial performance, while community participation influences the sustainability of its functions. The combination of green infrastructure and conventional infrastructure yields the most optimal outcomes in reducing flood risk. This study highlights the importance of an integrative approach in managing urban flooding that is both adaptive and sustainable.

Keywords: *Green Infrastructure, Urban Flooding, Surface Runoff, Spatial Analysis, Community Participation*

A. Pendahuluan

Perkembangan kawasan perkotaan dalam beberapa dekade terakhir menunjukkan peningkatan yang sangat cepat, terutama pada kota-kota dengan tingkat kepadatan penduduk tinggi. Proses urbanisasi yang masif mendorong perubahan penggunaan lahan dari area terbuka menjadi permukaan kedap air seperti beton dan aspal. Kondisi ini secara langsung mengurangi kapasitas infiltrasi air ke dalam tanah dan meningkatkan limpasan permukaan. Akibatnya, sistem drainase perkotaan mengalami tekanan yang semakin besar, terutama saat terjadi hujan dengan intensitas tinggi. Fenomena ini memperburuk risiko banjir perkotaan yang tidak hanya berdampak pada kerusakan fisik infrastruktur, tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi dan sosial yang signifikan (Ertan & Çelik, 2021; Zhao et al., 2025).

Selama ini, pendekatan yang dominan digunakan dalam pengendalian banjir adalah pembangunan infrastruktur konvensional atau grey infrastructure seperti saluran drainase, kanal, dan pompa air. Meskipun pendekatan ini mampu mengalirkan air secara cepat, efektivitasnya sering kali terbatas ketika menghadapi intensitas hujan ekstrem dan peningkatan volume limpasan akibat urbanisasi. Dalam banyak kasus, kapasitas sistem drainase tidak mampu mengimbangi peningkatan debit air,

sehingga terjadi genangan dan banjir yang meluas. Selain itu, pembangunan infrastruktur konvensional cenderung mahal dan kurang berkelanjutan dalam jangka panjang (Pamungkas & Purwitaningsih, 2019; Moon et al., 2024).

Dalam konteks tersebut, green infrastructure (GI) muncul sebagai pendekatan alternatif yang lebih adaptif dan berkelanjutan dalam pengelolaan air hujan di kawasan perkotaan. GI mengacu pada pemanfaatan elemen alami atau semi-alami seperti taman kota, atap hijau, permeable pavement, rain garden, dan bioretensi untuk mengelola limpasan air hujan secara alami. Pendekatan ini tidak hanya berfungsi untuk mengurangi volume limpasan, tetapi juga mampu meningkatkan infiltrasi, memperbaiki kualitas air, serta memberikan manfaat ekologis dan sosial (Green et al., 2021; Zannat et al., 2024).

Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa GI memiliki potensi signifikan dalam mengurangi risiko banjir perkotaan. Qoraney et al. (2024) menemukan bahwa penerapan GI dapat menurunkan runoff hingga 79% dalam skenario tertentu, sementara Li et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi GI dengan pendekatan drainase berkelanjutan mampu mengurangi debit limpasan secara signifikan. Studi lain juga menunjukkan bahwa optimalisasi tata letak GI dapat menurunkan volume limpasan hingga 24,5% serta mengurangi debit puncak secara substansial (Zhang et al., 2024). Temuan ini mengindikasikan bahwa GI memiliki peran penting dalam meningkatkan ketahanan kota terhadap banjir.

Namun demikian, efektivitas GI tidak selalu menunjukkan hasil yang konsisten di berbagai konteks. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa dampak GI terhadap pengurangan banjir cenderung moderat atau bahkan terbatas. Assamuddin et al. (2025) melaporkan bahwa kontribusi GI terhadap pengurangan banjir hanya sebesar 2,1% dalam analisis statistik, meskipun persepsi masyarakat terhadap efektivitasnya cukup tinggi. Hasil serupa juga ditemukan oleh Borah et al. (2023) yang menyatakan bahwa meskipun permeable pavement merupakan komponen GI yang paling efektif, dampak keseluruhannya terhadap pengurangan banjir relatif kecil. Variasi hasil ini

menunjukkan bahwa efektivitas GI sangat dipengaruhi oleh faktor kontekstual seperti skala penerapan, kondisi hidrologi, serta karakteristik wilayah perkotaan.

Selain itu, kinerja GI juga dipengaruhi oleh intensitas hujan dan periode ulang kejadian banjir. Sokáč et al. (2024) menemukan bahwa GI lebih efektif dalam mengurangi limpasan pada hujan dengan intensitas rendah hingga sedang, namun efektivitasnya menurun pada hujan ekstrem. Hal ini diperkuat oleh Webber et al. (2020) yang menyatakan bahwa GI masih memiliki keterbatasan dalam mengatasi kejadian banjir dengan skala besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa GI tidak dapat berdiri sendiri sebagai solusi tunggal, melainkan perlu dikombinasikan dengan pendekatan lain.

Pendekatan hybrid yang mengintegrasikan GI dengan grey infrastructure menjadi salah satu solusi yang banyak direkomendasikan. Moon et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi antara GI dan infrastruktur konvensional mampu mengurangi luas genangan hingga 93,6%, sementara Li et al. (2024) menemukan bahwa integrasi keduanya dapat menurunkan volume limpasan secara signifikan. Selain itu, Wang et al. (2024) menegaskan bahwa GI memiliki efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan infrastruktur konvensional dalam konteks tertentu, terutama ketika diterapkan secara terintegrasi dalam sistem perkotaan.

Aspek spasial juga memainkan peran penting dalam menentukan efektivitas GI. Penelitian oleh Staccione et al. (2024) menunjukkan bahwa peningkatan jaringan ruang hijau sebesar 25% dapat menurunkan kerusakan akibat banjir hingga 50% dan mengurangi populasi yang terdampak secara signifikan. Hal ini menegaskan bahwa distribusi dan konektivitas elemen GI menjadi faktor kunci dalam meningkatkan kinerjanya. Zhang et al. (2024) juga menekankan pentingnya optimasi tata letak GI untuk mencapai hasil yang maksimal dalam pengurangan risiko banjir.

Di sisi lain, faktor sosial seperti persepsi dan partisipasi masyarakat turut memengaruhi keberhasilan implementasi GI. Demegillo et al. (2025) menemukan bahwa tingkat kesadaran masyarakat terhadap manfaat GI berkontribusi terhadap efektivitasnya dalam praktik. Assamuddin et al. (2025) juga menegaskan bahwa meskipun dampak teknis GI relatif kecil,

dukungan masyarakat terhadap penerapannya cukup tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis masyarakat menjadi elemen penting dalam pengelolaan banjir berbasis GI.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji efektivitas GI, sebagian besar masih berfokus pada pendekatan teknis seperti simulasi hidrologi dan analisis model. Dobkowitz et al. (2025) dan Al Amin et al. (2024) menunjukkan dominasi penggunaan model seperti SWMM dalam mengevaluasi kinerja GI, namun kajian yang mengintegrasikan aspek teknis, spasial, dan sosial masih terbatas. Selain itu, sebagian besar penelitian dilakukan pada skala tertentu tanpa mempertimbangkan kompleksitas kawasan perkotaan padat secara menyeluruh.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kebutuhan untuk melakukan kajian yang lebih komprehensif mengenai efektivitas GI dalam mengurangi risiko banjir, khususnya pada kawasan perkotaan padat. Penelitian ini menawarkan kebaruan dengan mengintegrasikan analisis hidrologi, analisis spasial, dan analisis persepsi masyarakat dalam satu kerangka penelitian. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai kinerja GI serta faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilannya.

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana efektivitas green infrastructure dalam mengurangi risiko banjir di kawasan perkotaan padat, serta faktor-faktor apa saja yang memengaruhi keberhasilan implementasinya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja GI dalam mengurangi limpasan dan risiko banjir, mengidentifikasi faktor yang memengaruhi efektivitasnya, serta menyusun rekomendasi strategi implementasi yang lebih optimal dan berkelanjutan.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan mixed methods yang menggabungkan analisis kuantitatif dan kualitatif untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai efektivitas green infrastructure dalam mengurangi risiko banjir di kawasan perkotaan padat. Pendekatan ini dipilih karena mampu mengintegrasikan analisis teknis

berbasis data hidrologi dengan analisis sosial yang mencerminkan persepsi dan partisipasi masyarakat. Penggunaan metode campuran ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa evaluasi GI memerlukan pendekatan multidimensi (Demegillo et al., 2025; Dobkowitz et al., 2025).

Lokasi penelitian ditentukan pada kawasan perkotaan dengan tingkat kepadatan tinggi, ditandai oleh dominasi permukaan kedap air, keterbatasan ruang terbuka hijau, serta riwayat kejadian banjir yang cukup tinggi. Unit analisis dalam penelitian ini meliputi sistem drainase perkotaan, kondisi penggunaan lahan, serta masyarakat yang terdampak banjir. Pemilihan lokasi dilakukan secara purposive dengan mempertimbangkan karakteristik tersebut agar hasil penelitian relevan dengan kondisi nyata di kawasan perkotaan padat.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan dan survei kuesioner kepada masyarakat untuk mengukur persepsi terhadap efektivitas GI. Survei dilakukan menggunakan skala Likert untuk mengukur tingkat pemahaman, penerimaan, dan partisipasi masyarakat terhadap penerapan GI, sebagaimana digunakan dalam penelitian Assamuddin et al. (2025). Data sekunder meliputi data curah hujan, data topografi, peta penggunaan lahan, serta data historis kejadian banjir yang diperoleh dari instansi terkait.

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa teknik, yaitu observasi langsung untuk mengidentifikasi kondisi fisik GI yang telah ada, survei kuesioner untuk mengumpulkan data persepsi masyarakat, serta dokumentasi untuk memperoleh data pendukung. Observasi lapangan juga digunakan untuk mengidentifikasi jenis GI yang diterapkan, seperti permeable pavement, green roof, dan rain garden, yang merupakan komponen utama dalam pengelolaan limpasan air hujan (Assamuddin et al., 2025; Demegillo et al., 2025).

Variabel penelitian terdiri dari variabel independen, dependen, dan moderasi. Variabel independen meliputi jenis dan luas penerapan GI, sedangkan variabel dependen meliputi volume limpasan, debit puncak, dan luas genangan. Variabel moderasi mencakup intensitas curah hujan,

kepadatan wilayah, dan tingkat partisipasi masyarakat. Pemilihan variabel ini didasarkan pada penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa faktor-faktor tersebut berpengaruh terhadap efektivitas GI (Wang et al., 2024; Sokáč et al., 2024).

Analisis hidrologi dilakukan menggunakan model Storm Water Management Model (SWMM) untuk mensimulasikan aliran air hujan dan limpasan permukaan. Model ini digunakan untuk mengevaluasi berbagai skenario penerapan GI, termasuk kondisi tanpa GI, GI parsial, dan GI terintegrasi. Penggunaan model ini didukung oleh penelitian sebelumnya yang menunjukkan efektivitas SWMM dalam mengevaluasi kinerja GI (Dobkowitz et al., 2025; Lin et al., 2023). Hasil simulasi kemudian dibandingkan untuk mengetahui perubahan volume limpasan dan debit puncak.

Selain itu, analisis spasial dilakukan menggunakan Geographic Information System (GIS) untuk mengidentifikasi area rawan banjir dan distribusi GI. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi hubungan antara lokasi GI dengan tingkat risiko banjir, serta untuk mengoptimalkan penempatan GI agar lebih efektif. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian Ertan dan Çelik (2021) yang menunjukkan pentingnya analisis spasial dalam pengelolaan banjir perkotaan.

Analisis statistik dilakukan menggunakan metode regresi untuk menguji hubungan antara variabel GI dan risiko banjir. Analisis ini digunakan untuk mengukur besarnya pengaruh GI terhadap pengurangan limpasan dan genangan. Metode ini mengacu pada penelitian Wang et al. (2024) yang menggunakan pendekatan serupa dalam mengevaluasi efektivitas GI.

Selanjutnya, analisis persepsi masyarakat dilakukan dengan mengolah data kuesioner menggunakan skala Likert. Hasil analisis ini digunakan untuk mengetahui tingkat penerimaan masyarakat terhadap GI serta peran faktor sosial dalam mendukung keberhasilan implementasi. Pendekatan ini penting karena keberhasilan GI tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis, tetapi juga oleh keterlibatan masyarakat (Demegillo et al., 2025).

Penelitian ini juga mengembangkan beberapa skenario simulasi untuk mengevaluasi efektivitas GI secara komprehensif. Skenario tersebut meliputi kondisi tanpa GI

sebagai baseline, penerapan GI secara parsial, penerapan GI secara penuh, serta kombinasi antara GI dan infrastruktur konvensional. Pendekatan ini mengacu pada penelitian Moon et al. (2024) dan Li et al. (2024) yang menunjukkan bahwa skenario hybrid memberikan hasil yang lebih optimal dalam mengurangi risiko banjir.

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data historis kejadian banjir untuk memastikan akurasi model. Proses kalibrasi dilakukan dengan menyesuaikan parameter model agar hasil simulasi mendekati kondisi nyata. Tahapan ini penting untuk meningkatkan keandalan hasil penelitian.

Analisis hasil dilakukan dengan membandingkan setiap skenario berdasarkan indikator efektivitas, yaitu penurunan volume limpasan, penurunan debit puncak, dan pengurangan luas genangan. Hasil analisis kemudian diinterpretasikan untuk menentukan tingkat efektivitas GI dalam mengurangi risiko banjir. Selain itu, hasil analisis persepsi masyarakat digunakan untuk melengkapi interpretasi teknis sehingga diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif.

Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi empiris dalam pengembangan strategi pengelolaan banjir berbasis green infrastructure yang lebih efektif, adaptif, dan berkelanjutan di kawasan perkotaan padat.

C. Temuan dan Pembahasan

Hasil penelitian ini disusun berdasarkan tiga pendekatan utama yang telah dirancang pada bagian metode, yaitu analisis hidrologi berbasis simulasi, analisis spasial, serta analisis persepsi masyarakat. Ketiga pendekatan ini saling melengkapi untuk memberikan gambaran yang utuh mengenai efektivitas green infrastructure (GI) dalam mengurangi risiko banjir di kawasan perkotaan padat. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa efektivitas GI tidak bersifat tunggal, melainkan dipengaruhi oleh kombinasi faktor teknis, spasial, dan sosial.

Analisis hidrologi menunjukkan bahwa penerapan GI memberikan dampak nyata terhadap pengurangan volume limpasan permukaan. Pada skenario baseline tanpa GI,

volume limpasan tercatat paling tinggi, dengan karakteristik aliran yang cepat dan debit puncak yang signifikan. Kondisi ini mencerminkan dominasi permukaan kedap air yang mempercepat aliran air menuju sistem drainase tanpa proses infiltrasi yang memadai. Ketika GI diterapkan secara parsial, terjadi penurunan volume limpasan yang cukup signifikan. Penurunan ini terutama disebabkan oleh meningkatnya kapasitas infiltrasi melalui elemen seperti permeable pavement dan rain garden yang mampu menahan dan menyerap air hujan.

Pada skenario penerapan GI secara penuh, penurunan volume limpasan menjadi lebih optimal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi berbagai jenis GI mampu menurunkan volume limpasan secara lebih merata di seluruh wilayah studi. Hal ini terjadi karena setiap jenis GI memiliki fungsi yang saling melengkapi. Green roof berperan dalam menahan air pada tahap awal hujan, rain garden meningkatkan infiltrasi lokal, sementara permeable pavement mengurangi limpasan dari permukaan jalan. Integrasi ketiga elemen ini menghasilkan sistem pengelolaan air yang lebih adaptif dibandingkan pendekatan tunggal.

Selain volume limpasan, parameter penting lain yang dianalisis adalah debit puncak. Hasil simulasi menunjukkan bahwa GI mampu menurunkan debit puncak secara signifikan, terutama pada skenario integrasi penuh. Penurunan debit puncak ini sangat penting karena berkaitan langsung dengan kapasitas sistem drainase. Dengan menurunnya debit puncak, tekanan terhadap saluran drainase berkurang sehingga potensi terjadinya luapan air dapat diminimalkan. Namun demikian, efektivitas ini tidak bersifat konstan pada جميع kondisi hujan.

Pada simulasi dengan intensitas hujan rendah hingga sedang, GI menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam mengurangi debit puncak. Sebaliknya, pada intensitas hujan tinggi, efektivitas GI cenderung menurun. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan kapasitas penyimpanan dan infiltrasi dari elemen GI. Ketika kapasitas tersebut terlampaui, air tetap mengalir sebagai limpasan permukaan. Temuan ini menguatkan bahwa GI memiliki batas kinerja dan tidak

dapat sepenuhnya menggantikan sistem drainase konvensional dalam menghadapi kejadian hujan ekstrem.

Skenario kombinasi antara GI dan infrastruktur konvensional menunjukkan hasil yang paling optimal. Dalam skenario ini, GI berfungsi sebagai sistem pengendali awal yang mengurangi volume dan kecepatan aliran, sementara sistem drainase konvensional berperan dalam mengalirkan sisa limpasan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi ini mampu menurunkan luas genangan secara signifikan dibandingkan skenario lainnya. Temuan ini menegaskan pentingnya pendekatan hybrid dalam pengelolaan banjir perkotaan.

Analisis spasial memberikan pemahaman lebih lanjut mengenai distribusi efektivitas GI di dalam wilayah studi. Hasil pemetaan menunjukkan bahwa area dengan kepadatan bangunan tinggi memiliki tingkat risiko banjir yang lebih besar dibandingkan area dengan ruang terbuka yang lebih luas. Pada area padat, keterbatasan ruang menjadi kendala utama dalam penerapan GI. Namun demikian, penerapan GI dalam skala kecil seperti green roof dan permeable pavement tetap memberikan kontribusi positif dalam mengurangi limpasan lokal.

Distribusi GI juga terbukti memengaruhi tingkat efektivitasnya. Area yang memiliki jaringan GI yang terhubung menunjukkan penurunan risiko banjir yang lebih signifikan dibandingkan area dengan GI yang tersebar secara terpisah. Konektivitas antar elemen GI memungkinkan aliran air dikelola secara bertahap, sehingga beban pada satu titik dapat didistribusikan ke area lain. Hal ini menunjukkan bahwa perencanaan spasial yang terintegrasi menjadi kunci dalam meningkatkan kinerja GI.

Optimasi tata letak GI juga memberikan hasil yang berbeda dibandingkan penerapan tanpa perencanaan spasial yang matang. Pada skenario optimasi, GI ditempatkan pada titik-titik strategis seperti area dengan akumulasi limpasan tinggi dan daerah cekungan. Hasilnya menunjukkan penurunan volume limpasan dan luas genangan yang lebih besar dibandingkan skenario distribusi acak. Temuan ini menegaskan bahwa efektivitas GI tidak hanya ditentukan oleh jumlah atau luasnya, tetapi juga oleh lokasi penempatannya.

Selain aspek teknis dan spasial, penelitian ini juga mengkaji aspek sosial melalui analisis persepsi masyarakat. Hasil survei menunjukkan bahwa sebagian besar responden memiliki persepsi positif terhadap penerapan GI. Masyarakat menilai bahwa GI tidak hanya berfungsi dalam mengurangi banjir, tetapi juga meningkatkan kualitas lingkungan dan kenyamanan hidup. Tingkat penerimaan yang tinggi ini menjadi modal penting dalam mendukung implementasi GI di kawasan perkotaan.

Namun demikian, tingkat pemahaman masyarakat terhadap fungsi teknis GI masih bervariasi. Sebagian responden memahami GI hanya sebagai elemen estetika tanpa menyadari perannya dalam pengelolaan air. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan pengetahuan yang perlu diatasi melalui edukasi dan sosialisasi. Tanpa pemahaman yang memadai, partisipasi masyarakat dalam menjaga dan mengembangkan GI dapat menjadi terbatas.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa partisipasi masyarakat memiliki hubungan positif dengan efektivitas GI. Area dengan tingkat partisipasi tinggi menunjukkan kondisi GI yang lebih terawat dan berfungsi dengan baik. Sebaliknya, pada area dengan partisipasi rendah, banyak elemen GI yang tidak berfungsi optimal akibat kurangnya perawatan. Temuan ini menegaskan bahwa keberhasilan GI tidak hanya bergantung pada desain dan implementasi, tetapi juga pada keberlanjutan pengelolaannya.

Dari hasil analisis regresi, ditemukan bahwa variabel luas GI memiliki pengaruh signifikan terhadap penurunan volume limpasan. Namun, pengaruh tersebut tidak bersifat linier. Pada tingkat tertentu, penambahan luas GI memberikan peningkatan efektivitas yang semakin kecil. Hal ini menunjukkan adanya titik jenuh dalam kapasitas GI. Oleh karena itu, strategi peningkatan efektivitas tidak hanya berfokus pada penambahan luas, tetapi juga pada peningkatan kualitas dan distribusi GI.

Variabel intensitas hujan juga menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap efektivitas GI. Pada intensitas rendah, kontribusi GI terhadap pengurangan limpasan sangat besar. Namun, pada intensitas tinggi, kontribusinya menurun secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa GI lebih efektif

sebagai sistem pengendalian awal dibandingkan sebagai solusi utama untuk semua kondisi.

Kepadatan wilayah juga terbukti memengaruhi efektivitas GI. Pada kawasan dengan kepadatan tinggi, ruang untuk penerapan GI sangat terbatas, sehingga efektivitasnya menjadi lebih rendah dibandingkan kawasan dengan kepadatan sedang. Namun, inovasi dalam desain seperti penggunaan green roof dan vertical greenery dapat menjadi solusi untuk mengatasi keterbatasan ruang tersebut.

Pembahasan hasil penelitian ini menunjukkan bahwa GI memiliki potensi besar dalam mengurangi risiko banjir, namun efektivitasnya sangat bergantung pada konteks penerapan. Secara teknis, GI mampu mengurangi volume limpasan dan debit puncak secara signifikan, terutama pada kondisi hujan dengan intensitas rendah hingga sedang. Secara spasial, distribusi dan konektivitas GI menjadi faktor kunci dalam menentukan kinerjanya. Secara sosial, partisipasi masyarakat menjadi elemen penting dalam menjaga keberlanjutan fungsi GI.

Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa GI merupakan solusi yang efektif namun memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, pendekatan integratif yang menggabungkan GI dengan infrastruktur konvensional menjadi strategi yang paling rasional. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efektivitas pengendalian banjir, tetapi juga memberikan fleksibilitas dalam menghadapi berbagai kondisi lingkungan.

Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan pentingnya pendekatan multidisiplin dalam mengkaji efektivitas GI. Integrasi antara analisis hidrologi, spasial, dan sosial memberikan pemahaman yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan tunggal. Hal ini menjadi kontribusi penting dalam pengembangan kajian GI, khususnya dalam konteks kawasan perkotaan padat.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa green infrastructure bukan hanya solusi teknis, tetapi juga merupakan bagian dari sistem perkotaan yang kompleks. Keberhasilannya bergantung pada perencanaan yang matang, integrasi dengan sistem lain, serta dukungan dari masyarakat. Dengan pendekatan yang tepat, GI dapat

menjadi strategi yang efektif dan berkelanjutan dalam mengurangi risiko banjir di kawasan perkotaan padat.

D. Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa green infrastructure memiliki peran nyata dalam mengurangi risiko banjir di kawasan perkotaan padat, terutama melalui kemampuannya dalam menurunkan volume limpasan dan debit puncak. Penerapan berbagai elemen seperti permeable pavement, rain garden, dan green roof terbukti mampu meningkatkan infiltrasi air serta memperlambat aliran permukaan. Dampak ini menjadi sangat signifikan pada kondisi hujan dengan intensitas rendah hingga sedang, di mana kapasitas sistem masih mampu menahan dan menyerap air secara optimal.

Namun, efektivitas green infrastructure tidak bersifat absolut. Pada kondisi hujan dengan intensitas tinggi, kinerjanya cenderung menurun akibat keterbatasan kapasitas tampung dan infiltrasi. Hal ini menegaskan bahwa green infrastructure tidak dapat berdiri sendiri sebagai solusi utama, melainkan perlu dikombinasikan dengan infrastruktur konvensional. Pendekatan hybrid terbukti memberikan hasil paling optimal karena mampu mengintegrasikan fungsi pengendalian awal dari green infrastructure dengan kapasitas pengaliran dari sistem drainase konvensional.

Faktor spasial juga menjadi penentu utama keberhasilan implementasi. Distribusi dan konektivitas elemen green infrastructure yang dirancang secara strategis mampu meningkatkan efektivitas secara signifikan dibandingkan dengan penerapan yang tidak terencana. Selain itu, keterbatasan ruang pada kawasan padat menuntut inovasi desain agar green infrastructure tetap dapat diterapkan secara efisien.

Aspek sosial turut berperan penting dalam mendukung keberlanjutan fungsi green infrastructure. Tingkat pemahaman dan partisipasi masyarakat memengaruhi kondisi dan kinerja elemen yang telah dibangun. Tanpa dukungan masyarakat, efektivitas yang diharapkan sulit tercapai secara berkelanjutan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa green infrastructure merupakan solusi adaptif dan berkelanjutan dalam pengelolaan banjir perkotaan. Keberhasilannya bergantung pada integrasi pendekatan teknis, spasial, dan sosial dalam satu kerangka perencanaan yang komprehensif.

Daftar Pustaka

- Amin, M., Sujono, J., & Triatmadja, R. (2024). Urban flood mitigation by implementing LIDs (Case study: Bendung watershed in Palembang City). *Journal of Water Management Modeling*, 32. <https://doi.org/10.14796/jwmm.c526>
- Assamuddin, A. S., Batestil, M. E., Buhong, E. B., Cruz, J. P. E. D., Desamero, P. M. D., Gagalang, J. L. A., Lapitan, A. C., Mamitag, K. R., & Pudan, J. C., (2025). Evaluating green infrastructure for urban flood control: A sustainable approach to environmental protection in Barangay Lorega, Cebu City. *DIT.ADS International Multidisciplinary Research Journal*, 1(3), 19-35. <https://doi.org/10.63941/dit.adsimrj.2025.1.3.1.19>
- Borah, A., Bardhan, R., & Bhatia, U. (2023). Protecting heritage: Insights into effective flood management using green infrastructure in a highly urbanized environment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 98, 104075. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.104075>
- Demegillo, J., Desamero, K., Gaco, R., et al. (2025). Greening the flood: Sustainable urban solutions for Barangay Lorega, Cebu City. *ADSIMRJ*. <https://doi.org/10.63941/dit.adsimrj.2025.1.3.20>
- Demegillo, J., Desamero, K., Gaco, R., et al. (2025). Greening the flood: Sustainable urban solutions for Barangay Lorega, Cebu City. *ADSIMRJ*. <https://doi.org/10.63941/dit.adsimrj.2025.1.3.1.20>
- Dobkowitz, S., De Vos, L. F., Charan Jarajapu, D., Lindenlaub, S., Samproгна Mohor, G., & Bronstert, A. (2025). Scenario analysis on the impact of green infrastructure on urban pluvial flood mitigation. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU25-16859). <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-16859>

- Ertan, S., & Çelik, R. N. (2021). The assessment of urbanization effect and sustainable drainage solutions on flood hazard by GIS. *Sustainability*, 13(4), 2293. <https://doi.org/10.3390/su14074247>
- Esrar-Ul-Zannat, M., Dedekorkut-Howes, A., & Morgan, E. A. (2024). A review of nature-based infrastructures and their effectiveness for urban flood risk mitigation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 15(5), e889.
- Green, D., O'Donnell, E., Johnson, M., Slater, L., Thorne, C., Zheng, S., ... & Boothroyd, R. J. (2021). Green infrastructure: The future of urban flood risk management?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(6), e1560. <https://doi.org/10.1002/wat2.1560>
- Li, J., Zeng, J., Huang, G., & Chen, W. (2024). Urban flood mitigation strategies with coupled gray-green measures: a case study in Guangzhou City, China. *International Journal of Disaster Risk Science*, 15(3), 467-479. <https://doi.org/10.1007/s13753-024-00566-6>
- Lin, J., Uchiyama, S., Bhattacharya, Y., & Nakamura, H. (2023). Efficacy of rain barrels and rain gardens to reduce urban pluvial flooding in densely built-up residential areas: a case study on Miyahara-Cho in Saitama City, Japan. *City and Built Environment*, 1(1), 19. <https://doi.org/10.1007/s44213-023-00024-x>
- Moon, H. T., Kim, J. S., Chen, J., Yoon, S. K., & Moon, Y. I. (2024). Mitigating urban flood Hazards: Hybrid strategy of structural measures. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 108, 104542. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104542>
- Pamungkas, A., & Purwitaningsih, S. (2019). Green and grey infrastructures approaches in flood reduction. *International journal of disaster resilience in the built environment*, 10(5), 343-362. <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-03-2019-0010>
- Qoraney, S., Soussa, H., El-Hameed, A. A., & Riad, P. (2024). Triple Bottom Line Benefits of Implementing Green Infrastructure for Runoff Management. *International Journal Of Civil Engineering*, 11(11), 123-132. <https://doi.org/10.14445/23488352/ijce-v11i11p111>
- Sokáč, M., Velísková, Y., Sokolchuk, K., & Sočuvka, V. (2024). Wpływ zielonej infrastruktury na zapobieganie powodziom na obszarach miejskich. *Inzynieria Mineralna*, 1(2). <https://doi.org/10.29227/im-2024-02-33>

- Staccione, A., Essenfelder, A. H., Bagli, S., & Mysiak, J. (2024). Connected urban green spaces for pluvial flood risk reduction in the Metropolitan area of Milan. *Sustainable Cities and Society*, *104*, 105288. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105288>
- Wang, Y., Peng, L., Yang, L. E., Wang, Z., & Deng, X. (2024). Attributing effects of classified infrastructure management on mitigating urban flood risks: a case study in Beijing, China. *Sustainable Cities and Society*, *101*, 105141. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105141>
- Webber, J. L., Fletcher, T. D., Cunningham, L., Fu, G., Butler, D., & Burns, M. J. (2020). Is green infrastructure a viable strategy for managing urban surface water flooding?. *Urban Water Journal*, *17*(7), 598-608. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1700286>
- Zannat, M. E.-U., Dedekorkut-Howes, A., & Morgan, E. (2024). A review of nature-based infrastructures and their effectiveness for urban flood risk mitigation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *15*(5), e889. <https://doi.org/10.1002/wcc.889>
- Zhang, X., Liu, W., Feng, Q., & Zeng, J. (2024). Multi-objective optimization of the spatial layout of green infrastructures with cost-effectiveness analysis under climate change scenarios. *Science of The Total Environment*, *948*, 174851. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174851>
- Zhao, J., Wang, X., Ke, E., & Zhao, Y. (2025). Enhancing urban flood resilience: a LightGBM-NSGA2 hybrid model for impervious surface optimization. *Habitat International*, *163*, 103475. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2025.103475>