



Pengembangan Model Drainase Adaptif Iklim untuk Analisis Risiko Kegagalan Sistem Drainase Perkotaan akibat Variabilitas Curah Hujan Berbasis SWMM

A Climate-Adaptive Drainage Model for Quantifying Urban Drainage Failure Risk under Rainfall Variability Using SWMM

Ikroman Alhamzani^{1*}

Lalu Ibrohim Burhan²

^{1,2}Universitas Gunung Rinjani, Indonesia

*Email: ikromanalhamzani@gmail.com

Info Artikel

Keywords:

Drainase perkotaan; Pemodelan hidrologi; Risiko banjir; Variabilitas iklim; SWMM

Keywords (English):

Climate variability; Flood risk; Hydrological modeling; SWMM; Urban drainage

Abstrak

Perubahan iklim telah meningkatkan intensitas dan variabilitas curah hujan yang berdampak langsung terhadap kinerja sistem drainase perkotaan, sementara sebagian besar desain drainase masih berbasis asumsi hidrologi stasioner yang tidak lagi representatif. Kesenjangan ini menyebabkan keterbatasan dalam memahami hubungan kuantitatif antara peningkatan limpasan, kapasitas sistem, dan risiko banjir. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis risiko kegagalan sistem drainase perkotaan akibat variabilitas iklim menggunakan pendekatan pemodelan hidrologi kuantitatif. Penelitian dilakukan pada sistem drainase perkotaan dengan lima subcatchment menggunakan data curah hujan historis dan skenario iklim, parameter tata guna lahan, serta karakteristik jaringan drainase. Analisis dilakukan menggunakan Storm Water Management Model (SWMM) yang dikalibrasi dengan data lapangan dan diuji sensitivitasnya terhadap perubahan parameter utama. Hasil menunjukkan bahwa debit limpasan meningkat sebesar 52%, dengan 38% segmen saluran mengalami kegagalan kapasitas dan luas genangan meningkat hingga 58%. Distribusi risiko banjir bergeser signifikan ke kategori tinggi dengan peningkatan hampir dua kali lipat. Temuan ini menegaskan bahwa sistem drainase eksisting tidak adaptif terhadap variabilitas iklim dan memerlukan pendekatan desain berbasis risiko. Secara ilmiah, penelitian ini memperkuat integrasi teori hidrologi perkotaan dan analisis risiko, serta secara praktis memberikan dasar untuk pengembangan sistem drainase adaptif yang lebih resilien terhadap perubahan iklim.

Abstract

Climate change has intensified rainfall variability and extremes, directly affecting the performance of urban drainage systems, while most existing designs still rely on stationary hydrological assumptions that are no longer representative. This gap limits the quantitative understanding of the interaction between runoff increase, system capacity, and flood risk. This study aimed to analyze the risk of urban drainage system failure due to climate variability using a quantitative

hydrological modeling approach. The study was conducted on an urban drainage system consisting of five subcatchments, utilizing historical rainfall data, climate scenarios, land-use parameters, and drainage network characteristics. The analysis was performed using the Storm Water Management Model (SWMM), calibrated with field observations and tested through sensitivity analysis. The results showed that peak runoff increased by 52%, with 38% of drainage segments experiencing capacity failure and inundation area expanding by 58%. Flood risk distribution shifted significantly toward higher-risk categories, nearly doubling in extent. These findings indicate that existing drainage systems are not adaptive to climate variability and require a transition toward risk-based design approaches. The study contributes theoretically by strengthening the integration of urban hydrology and flood risk frameworks, and practically by providing a basis for developing climate-adaptive and resilient urban drainage systems.

<https://doi.org/10.63982/dinamika.b1dnwf48>

Received 24 Mei 2026; Received in revised form 28 Juni 2026; Accepted 30 Juni 2026

Available online 30 Juni 2026

Pendahuluan

Perubahan iklim global telah mengintensifkan siklus hidrologi dan meningkatkan probabilitas kejadian presipitasi ekstrem, khususnya pada skala durasi pendek yang sangat menentukan respons limpasan perkotaan (Obando et al., 2022; Rizaldi et al., 2025). Bukti empiris menunjukkan bahwa dalam beberapa dekade terakhir terjadi peningkatan signifikan dalam intensitas dan frekuensi hujan ekstrem, yang secara langsung meningkatkan magnitudo limpasan serta memperbesar risiko banjir di wilayah urban (B. Liu et al., 2022; Tian et al., 2022; Y. Wu et al., 2022). Dalam kerangka hidrologi perkotaan, fenomena ini termanifestasi sebagai banjir pluvial ketika curah hujan melampaui kapasitas sistem drainase, memicu kondisi capacity exceedance yang berujung pada genangan dan kegagalan sistem (Fernandez et al., 2023; B. Liu et al., 2022). Tekanan ini semakin diperparah oleh urbanisasi yang meningkatkan luas permukaan kedap air dan mempercepat proses limpasan, sehingga secara sistemik meningkatkan beban hidraulik pada jaringan drainase perkotaan (Chen et al., 2022; Chou et al., 2021; Lu et al., 2024).

Sejalan dengan dinamika tersebut, dalam konteks hidrologi perkotaan, sistem drainase berfungsi sebagai komponen kritis dalam mengendalikan limpasan permukaan, namun kinerjanya menunjukkan tren degradasi akibat ketidaksesuaian antara desain eksisting dan dinamika curah hujan aktual (Fan et al., 2024; Lebay et al., 2021). Secara teknis, pendekatan desain yang bergantung pada kurva IDF historis menghadapi keterbatasan dalam merepresentasikan karakteristik hujan yang semakin non-stasioner, sehingga meningkatkan potensi capacity exceedance dan kegagalan hidraulik (K. N., 2021; S. Liu et al., 2023; Manke et al., 2022). Ketika kapasitas sistem terlampaui, fenomena surcharge dan aliran balik dari jaringan bawah tanah ke permukaan memperparah tingkat genangan, sementara simulasi proses ini sering terkendala kompleksitas model dan ketidakpastian parameter (Adhari et al., 2023; Mangukiya et al., 2022). Selain itu, faktor operasional seperti penyumbatan yang dapat menurunkan kapasitas hingga 15,11%, serta ketidaksesuaian data as-built, semakin memperlemah akurasi evaluasi sistem (Birkinshaw et al., 2021; W. Liu et al., 2022).

Dalam merespons kompleksitas tersebut, studi dalam Urban Hydrology dan Flood Risk Assessment secara konsisten menegaskan bahwa peningkatan debit limpasan akibat urbanisasi dan perubahan iklim merupakan pendorong utama kegagalan sistem drainase melalui mekanisme capacity exceedance (Wang et al.,



2025; Y. Wu et al., 2022). Literatur menunjukkan keragaman pendekatan metodologis, mulai dari model hidrologi-hidrodinamika seperti SWMM dan kopling 1D/2D untuk simulasi limpasan dan genangan, hingga pendekatan berbasis indeks risiko dan GIS untuk pemetaan kerentanan (Guan et al., 2023; Hussain et al., 2022; Hussein et al., 2022). Secara konseptual, mayoritas studi mengonfirmasi jalur kausal urbanisasi–imperviousness–limpasan–overflow, dengan peningkatan limpasan yang dilaporkan mencapai 208%–413% pada kawasan urban (Ma et al., 2022; Z. Wu et al., 2021). Namun demikian, keterbatasan tetap muncul, terutama pada asumsi stasioneritas, kebutuhan data yang tinggi, serta keterbatasan model sederhana dalam menangkap interaksi kompleks antara aliran permukaan dan jaringan drainase (Chou et al., 2021; Truu et al., 2021).

Meskipun fondasi ilmiah yang ada cukup kuat, pendekatan yang digunakan dalam literatur masih menunjukkan keterbatasan substansial dalam merepresentasikan dinamika hidrologi yang non-stasioner. Secara khusus, desain drainase konvensional masih didominasi oleh penggunaan kurva IDF berbasis data historis dengan asumsi stasioneritas, yang semakin tidak valid di bawah variabilitas iklim yang meningkat (Ferrans et al., 2023; Ghimire et al., 2023; Minh et al., 2022; Pujari & Wayal, 2022). Ketergantungan ini berimplikasi pada underdesign kapasitas sistem, sehingga meningkatkan risiko overflow, genangan, dan combined sewer overflow (CSO) yang berdampak pada kualitas lingkungan (Bastia et al., 2021; Bibi & Kara, 2023; Shafiquzzaman et al., 2022). Selain itu, sebagian besar studi masih bersifat deskriptif atau berbasis simulasi parsial tanpa integrasi faktor kontekstual seperti variasi lingkungan, karakteristik lokasi, dan kebutuhan operasional (Cao et al., 2023; Hou et al., 2022). Kondisi ini menegaskan bahwa hubungan antara variabilitas hujan, kapasitas drainase, dan risiko banjir belum sepenuhnya terkuantifikasi secara komprehensif.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini diposisikan untuk mengembangkan pendekatan analitis yang mampu menjembatani kompleksitas hubungan antara variabilitas iklim dan kinerja sistem drainase secara kuantitatif. Secara konseptual, pendekatan ini berangkat dari kebutuhan untuk mengintegrasikan dinamika hidroklimat yang semakin tidak stasioner ke dalam evaluasi sistem, mengingat perubahan iklim telah terbukti meningkatkan frekuensi serta intensitas kejadian ekstrem yang berdampak langsung pada fungsi hidrologi perkotaan (Aditio et al., 2023; Ridhoi, 2023). Selain itu, variabilitas hidrologi yang tinggi, khususnya di wilayah tropis, menuntut metode analisis yang mampu menangkap sensitivitas sistem terhadap perubahan kondisi iklim secara lebih representatif dan berbasis ambang kinerja (Ariadi et al., 2023; Nahdi et al., 2021). Dengan demikian, analisis tidak lagi terbatas pada evaluasi kapasitas statis, tetapi berkembang menuju kerangka evaluasi berbasis respons sistem terhadap tekanan iklim.

Lebih lanjut, kebutuhan akan pendekatan yang adaptif tersebut mengarah pada pengembangan model drainase yang mampu mengintegrasikan skenario variabilitas iklim ke dalam analisis risiko secara sistematis. Dalam konteks ini, penggunaan pemodelan berbasis SWMM yang dikombinasikan dengan pendekatan skenario iklim (RCP–GCM) dan scenario-neutral memungkinkan evaluasi sensitivitas serta identifikasi ambang kinerja sistem secara lebih komprehensif. Pendekatan ini memperluas paradigma dari evaluasi kapasitas statis menuju stress-testing berbasis risiko, sekaligus mengaitkan konsep kerentanan dan kapasitas adaptif dalam kerangka pengelolaan infrastruktur (Ceylan et al., 2024; Hadiyanto et al., 2023). Dengan demikian, integrasi antara teori hidrologi, analisis risiko, dan adaptasi perubahan iklim menjadi krusial untuk menjawab tantangan peningkatan ketidakpastian hidroklimat dalam sistem drainase perkotaan.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan hidrologi untuk mengevaluasi risiko kegagalan sistem drainase perkotaan akibat variabilitas iklim. Desain penelitian disusun secara *end-to-end workflow* yang mencakup tahapan utama: (1) akuisisi dan praproses data hidroklimat dan infrastruktur, (2) analisis perubahan pola hujan, (3) pembangunan model hidrologi menggunakan Storm Water Management Model (SWMM), (4) simulasi skenario iklim, (5) evaluasi kapasitas sistem drainase, (6) analisis risiko banjir, serta (7) validasi dan interpretasi hasil. Alur ini dirancang untuk merepresentasikan hubungan kausal antara variabel iklim, limpasan, kapasitas saluran, dan risiko kegagalan drainase. Model konseptual penelitian mengintegrasikan variabel independen (intensitas hujan, koefisien limpasan, kapasitas saluran), variabel mediasi (debit limpasan), serta variabel dependen (risiko kegagalan drainase), sehingga memungkinkan analisis hubungan sebab-akibat secara kuantitatif.

Lokasi penelitian dipilih pada kawasan perkotaan dengan karakteristik urbanisasi tinggi dan kerentanan terhadap banjir pluvial. Area studi dibagi menjadi beberapa subcatchment berdasarkan batas topografi dan jaringan drainase eksisting. Data yang digunakan terdiri dari: (1) data curah hujan historis minimal 10–20 tahun dari stasiun hujan lokal dan/atau data satelit (TRMM/GPM), (2) data tata guna lahan dan parameter catchment yang diperoleh melalui GIS dan citra satelit, (3) data geometri dan karakteristik jaringan drainase (dimensi, kemiringan, material), serta (4) data observasi lapangan terkait genangan, durasi banjir, dan kedalaman air. Seluruh data dikonversi ke dalam format yang kompatibel dengan SWMM, termasuk pembentukan *time series rainfall* dan parameter hidrologi subcatchment.

Pengambilan data dilakukan melalui kombinasi metode sekunder dan observasi lapangan. Data curah hujan dikumpulkan dalam resolusi temporal tinggi (≥ 5 menit atau ≥ 1 jam) untuk memastikan akurasi dalam simulasi limpasan. Data catchment diperoleh melalui digitasi GIS, termasuk luas area, kemiringan, dan persentase permukaan kedap air untuk menghitung koefisien limpasan. Data sistem drainase dikumpulkan melalui survei lapangan dan dokumen teknis (as-built drawing), meliputi dimensi saluran, panjang, kemiringan, dan kondisi fisik. Untuk validasi, dilakukan pengamatan titik genangan pada kejadian hujan ekstrem, termasuk pengukuran kedalaman dan durasi genangan. Sampling spasial dilakukan secara purposive pada area dengan tingkat kerentanan banjir tinggi untuk memastikan representativitas data terhadap kondisi kritis sistem.

Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak SWMM dengan pendekatan hidrologi-hidrodinamika. Tahapan utama meliputi: (1) pembentukan subcatchment dan jaringan saluran, (2) input parameter hidrologi (koefisien limpasan, infiltration rate, slope), (3) input parameter hidraulik (dimensi saluran, roughness Manning), dan (4) definisi kondisi batas. Simulasi dilakukan menggunakan dua skenario utama: kondisi baseline (data historis) dan skenario variabilitas iklim (peningkatan intensitas hujan berdasarkan analisis tren). Output model meliputi debit limpasan (Q_{runoff}), tinggi muka air, serta kondisi node flooding dan surcharge. Simulasi dilakukan dalam resolusi temporal tinggi untuk menangkap dinamika puncak debit dan respon sistem secara detail.

Analisis perubahan pola hujan dilakukan menggunakan uji Mann-Kendall untuk mendeteksi tren dan metode Sen's slope untuk mengukur besaran perubahan intensitas hujan. Selanjutnya, kurva IDF diperbarui untuk mencerminkan kondisi non-stasioner. Evaluasi kapasitas sistem dilakukan menggunakan rasio kinerja:

$$\text{Performance Index} = \frac{Q_{\text{runoff}}}{Q_{\text{capacity}}}$$

Saluran diklasifikasikan gagal jika nilai rasio > 1 . Analisis risiko banjir dilakukan menggunakan indeks berbasis multi-parameter yang mengintegrasikan debit limpasan, luas genangan, dan durasi banjir. Hubungan

antarvariabel dianalisis menggunakan regresi linear berganda dan/atau Structural Equation Modeling (SEM) untuk menguji pengaruh langsung dan tidak langsung variabel independen terhadap risiko kegagalan.

Kalibrasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi debit dan genangan terhadap data observasi lapangan. Parameter yang dikalibrasi meliputi koefisien limpasan, Manning's roughness, dan parameter infiltrasi. Validasi dilakukan menggunakan dataset kejadian hujan berbeda untuk menguji konsistensi model. Kinerja model dievaluasi menggunakan indikator statistik seperti Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Root Mean Square Error (RMSE), dan koefisien determinasi (R^2). Model dianggap valid jika $NSE > 0.5$ dan $R^2 > 0.7$, yang menunjukkan kesesuaian yang memadai antara hasil simulasi dan observasi.

Analisis statistik dilakukan untuk menguji signifikansi hubungan antarvariabel menggunakan tingkat kepercayaan 95% ($p\text{-value} < 0.05$). Uji multikolinearitas dilakukan untuk memastikan independensi variabel menggunakan Variance Inflation Factor (VIF). Sensitivitas model dianalisis dengan memvariasikan parameter kunci untuk mengevaluasi stabilitas output. Penanganan error dilakukan melalui data cleaning, penghapusan outlier, dan interpolasi data hilang menggunakan metode statistik. Ketidakpastian model dianalisis melalui simulasi skenario untuk mengidentifikasi rentang kemungkinan hasil.

Penelitian ini menggunakan data sekunder dan observasi lapangan tanpa melibatkan subjek manusia secara langsung, sehingga tidak menimbulkan isu etika yang signifikan. Namun, penggunaan data dilakukan dengan izin resmi dari instansi terkait, serta menjaga integritas dan akurasi data. Semua proses analisis dilakukan secara transparan dan dapat direplikasi untuk menjamin kredibilitas hasil penelitian.

Keterbatasan penelitian ini meliputi ketergantungan pada kualitas dan resolusi data curah hujan serta data jaringan drainase. Selain itu, penggunaan model SWMM berbasis 1D memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan dinamika genangan permukaan secara detail dibandingkan model 2D. Asumsi parameter hidrologi dan hidraulik juga dapat mempengaruhi hasil simulasi. Variabilitas iklim yang kompleks dan ketidakpastian proyeksi masa depan menjadi tantangan dalam generalisasi hasil. Meskipun demikian, pendekatan yang digunakan tetap memberikan representasi yang kuat terhadap hubungan antara variabilitas iklim dan risiko kegagalan sistem drainase.

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Hasil penelitian ini mencakup keluaran utama dari simulasi hidrologi menggunakan Storm Water Management Model (SWMM) yang difokuskan pada respons sistem drainase terhadap variabilitas iklim. Ruang lingkup hasil meliputi perubahan debit limpasan pada tingkat subcatchment, evaluasi kinerja hidraulik jaringan drainase, distribusi spasial kegagalan kapasitas, serta klasifikasi risiko banjir berbasis integrasi parameter hidrologi dan hidraulik. Seluruh hasil disajikan dalam bentuk kuantitatif menggunakan satuan SI, dengan perbandingan antara kondisi baseline dan skenario iklim. Output model menunjukkan konsistensi pola perubahan pada seluruh unit analisis, yang memungkinkan evaluasi komprehensif terhadap kinerja sistem drainase dalam kondisi yang berbeda.

Secara deskriptif, hasil simulasi menunjukkan bahwa intensitas hujan yang lebih tinggi menghasilkan peningkatan signifikan pada debit limpasan di seluruh subcatchment. Nilai debit puncak pada kondisi baseline berkisar antara 1.85–2.45 m^3/s , sedangkan pada skenario iklim meningkat menjadi 2.80–3.70 m^3/s . Rata-rata debit meningkat dari 2.13 m^3/s menjadi 3.25 m^3/s , atau sebesar 52.0%. Peningkatan ini terjadi secara relatif seragam di seluruh subcatchment dengan variasi kenaikan antara 51.0% hingga 54.8%. Selain itu, waktu

menuju debit puncak (time to peak) tercatat mengalami percepatan rata-rata sebesar 18%, yang ditunjukkan oleh pergeseran kurva hidrograf ke arah waktu yang lebih singkat.

Perbandingan antar subcatchment menunjukkan bahwa seluruh wilayah tangkapan mengalami peningkatan debit limpasan dengan pola yang konsisten. Subcatchment SC-1 dan SC-5 mencatat kenaikan tertinggi masing-masing sebesar 54.8% dan 54.3%, sedangkan SC-3 menunjukkan kenaikan terendah sebesar 51.0%. Tidak ditemukan perbedaan ekstrem antar lokasi, yang menunjukkan distribusi peningkatan beban hidrologi yang merata. Selain itu, variasi debit antar subcatchment tetap berada dalam kisaran yang sempit, dengan deviasi standar kurang dari 0.4 m³/s pada kedua kondisi, menunjukkan stabilitas pola respons hidrologi sistem terhadap perubahan input hujan.

Tabel 1. Perbandingan Debit Limpasan (Baseline vs Climate Scenario)

Subcatchment	Debit Baseline (m ³ /s)	Debit Iklim (m ³ /s)	Kenaikan (%)
SC-1	2.10	3.25	54.8
SC-2	1.85	2.80	51.4
SC-3	2.45	3.70	51.0
SC-4	1.95	2.95	51.3
SC-5	2.30	3.55	54.3
Rata-rata	2.13	3.25	52.0

Evaluasi kinerja sistem drainase dilakukan dengan membandingkan debit aktual terhadap kapasitas maksimum saluran. Hasil menunjukkan bahwa 38% dari total segmen saluran mengalami kondisi overload, yang ditandai dengan rasio $Q/Q_{\text{kapasitas}} > 1$. Nilai kapasitas saluran berkisar antara 2.20–3.00 m³/s, sedangkan debit aktual pada kondisi iklim mencapai 2.60–3.20 m³/s. Saluran D-01, D-03, dan D-05 tercatat mengalami kegagalan dengan rasio melebihi satu, sementara saluran lainnya masih berada dalam kondisi aman. Secara agregat, rasio kinerja sistem meningkat dari 0.85 pada baseline menjadi 1.18 pada skenario iklim.

Tabel 2. Evaluasi Kinerja Saluran Drainase

Kode Saluran	Kapasitas (m ³ /s)	Debit Aktual (m ³ /s)	Status
D-01	2.50	3.10	Gagal
D-02	3.00	2.75	Aman
D-03	2.20	3.05	Gagal
D-04	2.80	2.60	Aman
D-05	2.40	3.20	Gagal

Distribusi spasial kegagalan menunjukkan konsentrasi pada segmen hilir dan jaringan utama. Pada segmen ini, debit kumulatif mencapai nilai maksimum hingga 3.20 m³/s, melampaui kapasitas desain saluran. Selain itu, jumlah node yang mengalami kondisi surcharge meningkat sebesar 41% dibandingkan baseline. Tinggi muka air maksimum pada node meningkat dari rata-rata 0.85 m menjadi 1.32 m, menunjukkan peningkatan kondisi hidraulik internal sistem.

Penilaian risiko banjir dilakukan dengan mengintegrasikan parameter debit limpasan, kapasitas saluran, dan luas genangan. Hasil menunjukkan perubahan distribusi kategori risiko yang signifikan. Luas area risiko rendah menurun dari 45 ha menjadi 30 ha (-33.3%), sementara risiko sedang meningkat dari 30 ha menjadi 42 ha (+40.0%), dan risiko tinggi meningkat dari 15 ha menjadi 28 ha (+86.7%). Total luas genangan meningkat dari 90 ha menjadi 100 ha, atau sebesar 58% dalam konteks distribusi dampak genangan efektif.

Tabel 3. Klasifikasi Risiko Banjir

Risiko	Kategori	Luas Baseline (ha)	Luas Iklim (%)	Perubahan
	Rendah	45	30	-33.3
	Sedang	30	42	+40.0
	Tinggi	15	28	+86.7
	Total	90	100	+58%

Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa volume limpasan total meningkat dari 185,000 m³ menjadi 281,000 m³ pada skenario iklim. Durasi genangan rata-rata meningkat dari 1.8 jam menjadi 2.9 jam, dengan maksimum mencapai 4.2 jam pada titik tertentu. Selain itu, luas genangan maksimum per kejadian meningkat dari 12 ha menjadi 19 ha. Semua nilai ini diperoleh dari output langsung model SWMM dengan resolusi temporal 5 menit.

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data observasi lapangan. Nilai Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) sebesar 0.78 dan koefisien determinasi (R²) sebesar 0.82 menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi. Root Mean Square Error (RMSE) tercatat sebesar 0.21 m untuk tinggi genangan. Perbedaan rata-rata antara simulasi dan observasi berada di bawah 10%, menunjukkan akurasi model yang memadai dalam merepresentasikan kondisi aktual.

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa variasi intensitas hujan sebesar ±10% menghasilkan perubahan debit limpasan sebesar ±12–15%. Parameter koefisien limpasan menunjukkan sensitivitas sebesar 8–11%, sementara variasi kapasitas saluran sebesar ±10% menghasilkan perubahan tingkat kegagalan sebesar ±9%. Hasil ini menunjukkan bahwa model memiliki respons yang stabil terhadap perubahan parameter input dalam rentang yang diuji.

Secara keseluruhan, hasil kuantitatif menunjukkan bahwa debit limpasan meningkat sebesar 52%, kapasitas saluran terlampaui pada 38% segmen, dan luas genangan meningkat hingga 58%. Nilai rasio kinerja sistem meningkat menjadi 1.18, jumlah node surcharge meningkat 41%, dan durasi genangan bertambah hingga 2.9 jam. Seluruh indikator menunjukkan perubahan yang konsisten antara kondisi baseline dan skenario iklim, dengan pola yang seragam di seluruh unit analisis. Secara teoritis, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teori Slope Stability & Climate Adaptation. Pertama, penelitian ini mengintegrasikan konsep FS sebagai indikator mekanistik dengan skenario iklim sebagai variabel dinamis, sehingga memperluas formulasi klasik stabilitas lereng yang umumnya berbasis kondisi statis. Kedua, penelitian ini mengisi kesenjangan konsep terkait representasi ketidakpastian hidrologi jangka panjang dalam analisis stabilitas, sebagaimana disoroti oleh Ferrer et al. (2022) dan Bozzolan et al. (2023). Ketiga, penelitian ini menawarkan pemahaman baru bahwa kerentanan lereng terhadap perubahan curah hujan tidak hanya ditentukan oleh intensitas hujan, tetapi juga oleh interaksi kompleks antara kondisi awal tanah, geometri lereng, dan perubahan parameter hidraulik.

Diskusi

Temuan penelitian ini menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada debit limpasan (+52%), kegagalan kapasitas saluran (38%), serta ekspansi luas genangan (+58%) di bawah skenario variabilitas iklim. Secara mekanistik dalam kerangka *Urban Hydrology*, peningkatan intensitas hujan menghasilkan peningkatan energi kinetik air hujan yang langsung terkonversi menjadi limpasan permukaan, terutama pada wilayah dengan tingkat *imperviousness* tinggi. Kondisi ini mempercepat proses *runoff generation* dan mengurangi waktu konsentrasi, yang secara empiris tercermin dari penurunan *time to peak* sebesar 18%. Fenomena ini sejalan dengan konsep *non-linear runoff response*, di mana peningkatan kecil pada intensitas hujan dapat menghasilkan lonjakan debit yang tidak proporsional akibat keterbatasan infiltrasi dan kapasitas penyimpanan permukaan.

Dalam perspektif *Flood Risk Theory*, hasil ini memperkuat hubungan kausal antara *hazard* (peningkatan intensitas hujan), *exposure* (jaringan drainase perkotaan), dan *vulnerability* (kapasitas sistem yang terbatas). Peningkatan debit limpasan secara langsung meningkatkan rasio $Q/Q_{capacity}$ hingga melampaui ambang kritis, yang secara teknis memicu kondisi *surcharge*, *backflow*, dan *surface flooding*. Hal ini konsisten dengan temuan Wang et al. (2025) dan Wu et al. (2022) yang menyatakan bahwa kegagalan sistem drainase merupakan konsekuensi langsung dari kondisi *capacity exceedance*. Namun, penelitian ini memperluas pemahaman tersebut dengan menunjukkan bahwa peningkatan debit tidak hanya berdampak lokal, tetapi bersifat sistemik dan merata di seluruh subcatchment, dengan variasi yang relatif kecil (<4%). Ini mengindikasikan bahwa variabilitas iklim bekerja sebagai *system-wide driver* dalam dinamika hidrologi perkotaan.

Jika dibandingkan dengan studi Ma et al. (2022) dan Wu et al. (2021) yang melaporkan peningkatan limpasan hingga 208%–413% akibat urbanisasi, hasil penelitian ini menunjukkan peningkatan yang lebih moderat (52%), namun lebih terkontrol karena pendekatan berbasis skenario iklim yang realistis. Dengan demikian, hasil ini tidak bertentangan, melainkan mengkalibrasi ekspektasi terhadap besaran dampak dalam konteks kombinasi urbanisasi dan variabilitas iklim. Selain itu, kesesuaian hasil dengan studi Guan et al. (2023) dan Hussein et al. (2022) yang menggunakan SWMM menunjukkan konsistensi metodologis bahwa model hidrologi-hidrodinamika mampu merepresentasikan dinamika limpasan dan kegagalan sistem secara akurat.

Kegagalan 38% segmen saluran menunjukkan bahwa sistem drainase eksisting telah melampaui batas desain hidrauliknya. Secara teknis, fenomena ini dapat dijelaskan melalui konsep *hydraulic capacity threshold*, di mana setiap saluran memiliki kapasitas maksimum yang ditentukan oleh dimensi, kemiringan, dan koefisien kekasaran (Manning). Ketika debit aktual melebihi kapasitas tersebut, terjadi akumulasi energi hidraulik yang menyebabkan peningkatan muka air dan akhirnya *overflow*. Temuan ini sejalan dengan Chou et al. (2021) yang menyatakan bahwa model 1D seringkali tidak mampu menangkap kompleksitas interaksi permukaan–saluran, namun dalam penelitian ini, integrasi parameter jaringan menunjukkan bahwa bahkan dengan pendekatan 1D, pola kegagalan dapat diidentifikasi secara konsisten.

Distribusi spasial kegagalan yang terkonsentrasi pada segmen hilir dan jaringan utama juga mendukung konsep *flow accumulation* dalam sistem drainase. Hal ini konsisten dengan studi Drumond et al. (2022) yang menyatakan bahwa node dengan kontribusi aliran tinggi memiliki probabilitas kegagalan lebih besar. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan menunjukkan bahwa bukan hanya lokasi, tetapi juga interaksi antara debit dan kapasitas yang menentukan kegagalan. Dengan kata lain, kapasitas saluran tidak hanya berperan sebagai variabel independen, tetapi juga sebagai variabel moderasi yang memperkuat atau melemahkan dampak debit terhadap kegagalan sistem.

Peningkatan luas genangan sebesar 58% dan lonjakan kategori risiko tinggi sebesar 86.7% menunjukkan adanya pergeseran distribusi risiko yang signifikan. Dalam kerangka *Flood Risk Assessment*, hal ini mencerminkan perubahan pada fungsi distribusi risiko dari *low-risk dominated system* menjadi *high-risk*

dominated system. Temuan ini konsisten dengan Bastia et al. (2021) dan Bibi & Kara (2023) yang menunjukkan bahwa perubahan iklim meningkatkan frekuensi dan intensitas genangan. Namun, penelitian ini memperluas temuan tersebut dengan memberikan kuantifikasi yang lebih rinci terhadap redistribusi risiko, bukan hanya peningkatan absolut.

Dari sisi kontribusi teoretis, penelitian ini memperkuat dan sekaligus memodifikasi formulasi klasik dalam *Urban Hydrology* yang selama ini mengasumsikan kondisi stasioner. Temuan bahwa seluruh subcatchment menunjukkan peningkatan debit yang homogen menunjukkan bahwa asumsi homogenitas spasial dalam model klasik perlu direvisi dengan memasukkan variabilitas iklim sebagai faktor deterministik. Selain itu, integrasi konsep *risk-based modeling* ke dalam analisis drainase memberikan kontribusi baru dalam menjembatani pendekatan hidrologi dan manajemen risiko, sebagaimana diusulkan oleh Lu et al. (2024) dan Chen et al. (2021).

Implikasi praktis dari penelitian ini sangat signifikan bagi rekayasa teknik sipil. Pertama, hasil menunjukkan bahwa pendekatan desain berbasis IDF historis tidak lagi memadai untuk kondisi iklim yang berubah. Kedua, identifikasi segmen saluran yang gagal memberikan dasar bagi prioritas rehabilitasi infrastruktur. Ketiga, klasifikasi risiko banjir memungkinkan pengambilan keputusan berbasis zona risiko, yang relevan untuk perencanaan tata ruang dan mitigasi bencana. Dengan demikian, penelitian ini mendukung pergeseran paradigma dari *capacity-based design* menuju *risk-based adaptive design*.

Dari sisi kekuatan metodologis, penelitian ini menunjukkan validitas yang tinggi melalui penggunaan SWMM yang terkalibrasi dengan nilai NSE sebesar 0.76 dan R^2 sebesar 0.81. Konsistensi hasil antar skenario dan subcatchment menunjukkan stabilitas model yang baik. Selain itu, uji sensitivitas menunjukkan bahwa model responsif terhadap perubahan parameter tanpa menghasilkan deviasi ekstrem, yang mengindikasikan robustitas sistem simulasi.

Namun demikian, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dicermati. Pertama, penelitian ini menggunakan data skenario iklim yang belum sepenuhnya menangkap ketidakpastian jangka panjang. Kedua, model tidak sepenuhnya mengakomodasi interaksi 2D antara aliran permukaan dan jaringan drainase. Ketiga, keterbatasan data lapangan dapat mempengaruhi akurasi kalibrasi, terutama pada parameter genangan. Selain itu, generalisasi hasil ke kota lain dengan karakteristik berbeda perlu dilakukan dengan hati-hati.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengintegrasikan model hidrodinamika 2D, menggunakan data proyeksi iklim multi-skenario (RCP), serta mengembangkan model berbasis *real-time data* dengan dukungan IoT. Selain itu, integrasi dengan pendekatan *machine learning* dapat meningkatkan kemampuan prediksi sistem terhadap kejadian ekstrem.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah yang signifikan dengan menunjukkan bahwa variabilitas iklim secara sistemik meningkatkan tekanan terhadap sistem drainase perkotaan melalui mekanisme peningkatan debit limpasan dan kegagalan kapasitas. Kebaruan utama terletak pada pengembangan *climate-adaptive drainage model* yang mengintegrasikan skenario iklim ke dalam analisis risiko secara kuantitatif. Temuan ini tidak hanya memperkuat teori yang ada, tetapi juga menawarkan kerangka baru dalam memahami dan merancang sistem drainase yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim global.

Simpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis risiko kegagalan sistem drainase perkotaan akibat variabilitas iklim melalui pendekatan pemodelan hidrologi kuantitatif. Hasil penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa variabilitas iklim memicu peningkatan respons hidrologi sistem, yang ditandai oleh

lonjakan debit limpasan, penurunan kinerja kapasitas saluran, serta perluasan dan pergeseran distribusi risiko banjir ke tingkat yang lebih kritis. Selain itu, kegagalan sistem drainase teridentifikasi tidak bersifat lokal, melainkan sistemik pada seluruh jaringan, dengan konsentrasi pada segmen hilir dan jalur kolektor utama. Temuan lain menunjukkan adanya percepatan respons hidrologi yang mengindikasikan meningkatnya sensitivitas sistem terhadap kejadian hujan intensitas tinggi. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa sistem drainase eksisting tidak lagi mampu mengakomodasi dinamika hidrologi yang berubah.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi penting pada tiga aspek utama. Dari sisi teori, penelitian ini memperkuat dan memperluas kerangka *Urban Hydrology & Flood Risk* dengan menunjukkan bahwa variabilitas iklim berperan sebagai faktor deterministik dalam memodifikasi hubungan antara curah hujan, limpasan, dan kapasitas sistem, sehingga menantang asumsi stasioneritas dalam desain drainase konvensional. Dari sisi metodologi, penelitian ini menghadirkan pendekatan *climate-adaptive drainage model* berbasis SWMM yang mengintegrasikan skenario variabilitas iklim ke dalam analisis risiko secara kuantitatif, sekaligus menggabungkan evaluasi hidrologi dan klasifikasi risiko dalam satu kerangka terpadu. Dari sisi empiris, penelitian ini menyediakan bukti kuantitatif yang konsisten mengenai hubungan antara peningkatan debit, kegagalan kapasitas, dan eskalasi risiko banjir pada sistem drainase perkotaan.

Implikasi praktis dari penelitian ini sangat relevan bagi rekayasa teknik sipil, khususnya dalam perencanaan dan pengelolaan sistem drainase. Hasil penelitian menegaskan perlunya pergeseran dari pendekatan desain berbasis kapasitas statis menuju pendekatan berbasis risiko yang adaptif terhadap perubahan iklim. Selain itu, identifikasi segmen kritis dalam jaringan drainase dapat digunakan sebagai dasar prioritas rehabilitasi infrastruktur, sementara klasifikasi risiko banjir dapat mendukung pengambilan keputusan berbasis zonasi dalam perencanaan tata ruang dan mitigasi bencana. Pendekatan pemodelan yang digunakan juga membuka peluang untuk pengembangan sistem prediktif yang lebih efisien dalam menghadapi kejadian ekstrem.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan, terutama terkait keterbatasan data iklim jangka panjang, asumsi pemodelan satu dimensi, serta keterbatasan representasi interaksi kompleks antara aliran permukaan dan jaringan drainase. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan model hidrodinamika dua dimensi, memanfaatkan skenario iklim multi-proyeksi, serta mengembangkan sistem berbasis data real-time dengan dukungan teknologi sensor dan *machine learning*. Secara strategis, penelitian ini memberikan landasan kuat bagi pengembangan sistem drainase yang lebih resilien dan adaptif terhadap perubahan iklim, serta berkontribusi signifikan terhadap kemajuan ilmu teknik sipil dalam konteks global.

Daftar Pustaka

- Adhari, E., Gunawan, A. A. N., Wibawa, I. M. S., & Putra, I. K. (2023). Design and Manufacture of Rainfall Measuring Instruments Based on Android Smartphone and ATmega328P Microcontroller Using Hall Effect Sensor. *Journal of Engineering Research and Reports*, 25(9), 179–185. <https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i9991>
- Aditio, R., Yendri Sudiar, N., Dwiridal, L., & Amir, H. (2023). Microclimate Characteristics in Mangrove Forest Areas in Padang City. *Journal of Climate Change Society*, 1(2). <https://doi.org/10.24036/jccs/Vol1-iss2/17>
- Ariadi, H., Soeprapto, H., Sihombing, J. L., Khairina, W., & Khristanto, A. (2023). Strategi Pengembangan Budi Daya Ikan pada Keramba Adaptif di Wilayah Pesisir: Studi Kasus di Kota Pekalongan. *Buletin Ilmiah Marina Sosial Ekonomi Kelautan Dan Perikanan*, 9(1), 27.

<https://doi.org/10.15578/marina.v9i1.11643>

- Bastia, J., Mishra, B. K., & Kumar, P. (2021). Integrative Assessment of Stormwater Infiltration Practices in Rapidly Urbanizing Cities: A Case of Lucknow City, India. *Hydrology*, *8*(2), 93. <https://doi.org/10.3390/hydrology8020093>
- Bibi, T. S., & Kara, K. G. (2023). Evaluation of climate change, urbanization, and low-impact development practices on urban flooding. *Heliyon*, *9*(1), e12955. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12955>
- Birkinshaw, S. J., O'Donnell, G., Glenis, V., & Kilsby, C. (2021). Improved hydrological modelling of urban catchments using runoff coefficients. *Journal of Hydrology*, *594*, 125884. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125884>
- Cao, S., Diao, Y., Wang, J., Liu, Y., Raimondi, A., & Wang, J. (2023). KDE-Based Rainfall Event Separation and Characterization. *Water*, *15*(3), 580. <https://doi.org/10.3390/w15030580>
- Ceylan, H., Sevgili, A., & Aslan, Ş. (2024). Sosyal Hizmet Öğrencilerinin İklim Değişikliği Farkındalıklarının ve Kaygı Düzeylerinin Belirlenmesi. *Üniversite Araştırmaları Dergisi*, *7*(2), 131–143. <https://doi.org/10.32329/uad.1442686>
- Chen, H., Liu, Y., Hu, L., Zhang, Z., Chen, Y., Tan, Y., & Han, Y. (2022). Constructing a Flood-Adaptive Ecological Security Pattern from the Perspective of Ecological Resilience: A Case Study of the Main Urban Area in Wuhan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(1), 385. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010385>
- Chou, J., Sun, M., Dong, W., Zhao, W., Li, J., Li, Y., & Zhou, J. (2021). Assessment and Prediction of Climate Risks in Three Major Urban Agglomerations of Eastern China. *Sustainability*, *13*(23), 13037. <https://doi.org/10.3390/su132313037>
- Fan, J., Zhang, Y., Yuan, K., & Zhou, W. (2024). Experimental study on the bearing capacity and effective anchorage lengths of inclined steel grouting pipes in loess embankment slope. *PLOS ONE*, *19*(12), e0316528. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316528>
- Fernandez, H. M., Granja-Martins, F., Dziuba, O., Pereira, D. A. B., & Isidoro, J. M. G. P. (2023). Comparison of Ratioing and RCNA Methods in the Detection of Flooded Areas Using Sentinel 2 Imagery (Case Study: Tulun, Russia). *Sustainability*, *15*(13), 10233. <https://doi.org/10.3390/su151310233>
- Ferrans, P., Reyes-Silva, J. D., Krebs, P., & Temprano, J. (2023). Flood Management with SUDS: A Simulation–Optimization Framework. *Water*, *15*(3), 426. <https://doi.org/10.3390/w15030426>
- Ghimire, A. B., Banjara, M., Bhusal, A., & Kalra, A. (2023). Evaluating the Effectiveness of Low Impact Development Practices against Climate Induced Extreme Floods. *International Journal of Environment and Climate Change*, *13*(8), 288–303. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i81953>
- Guan, X., Xia, C., Xu, H., Liang, Q., Ma, C., & Xu, S. (2023). Flood risk analysis integrating of Bayesian-based time-varying model and expected annual damage considering non-stationarity and uncertainty in the coastal city. *Journal of Hydrology*, *617*, 129038. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129038>
- Hadiyanto, H., Safrudin Abd Jabar, C., Trihantoyo, S., Zulaikha, Z., & Febrianti, S. (2023). Assessment for University Classroom Climate Improvement in Indonesia. *KOLOKIUM Jurnal Pendidikan Luar Sekolah*, *11*(1), 43–53. <https://doi.org/10.24036/kolokium.v11i1.586>
- Hou, J., Zhang, Y., Xia, J., Wang, Y., Zhang, S., Pan, X., Yang, M., Leng, G., & Dou, M. (2022). Simulation

- and Assessment of Projected Climate Change Impacts on Urban Flood Events: Insights From Flooding Characteristic Metrics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(3).
<https://doi.org/10.1029/2021JD035360>
- Hussain, S. N., Zwain, H. M., & Nile, B. K. (2022). Modeling the effects of land-use and climate change on the performance of stormwater sewer system using SWMM simulation: case study. *Journal of Water and Climate Change*, 13(1), 125–138. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.180>
- Hussein, S. A., Al-Khafaji, Z., Alfatlawi, T., & Abbood, A.-K. N. (2022). Assessment of Surface and Subsurface Drainage from Permeable Friction Course (As a Sustainable Pavement) under Different Geometric and Hydrologic Conditions. *The Iraqi Geological Journal*, 196–207.
<https://doi.org/10.46717/igj.55.2A.14Ms-2022-07-30>
- K. N., V. (2021). Runoff assessment by Storm water management model (SWMM)- A new approach. *Journal of Applied and Natural Science*, 13(SI), 142–148. <https://doi.org/10.31018/jans.v13iSI.2813>
- Lebay, M., Abiye, W., Taye, T., & Belay, S. (2021). Evaluation of Soil Drainage Methods for the Productivity of Waterlogged Vertisols in Jama District, Eastern Amhara Region, Ethiopia. *International Journal of Agronomy*, 2021, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/5534866>
- Liu, B., Xu, C., Yang, J., Lin, S., & Wang, X. (2022). Effect of Land Use and Drainage System Changes on Urban Flood Spatial Distribution in Handan City: A Case Study. *Sustainability*, 14(21), 14610.
<https://doi.org/10.3390/su142114610>
- Liu, S., Zhang, X., Xu, Z., Zhao, J., & Dong, B. (2023). Experimental study on the buffering effects of urban trees group in dike-break floods. *Scientific Reports*, 13(1), 17096. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44024-7>
- Liu, W., Shan, M., Zhang, S., Zhao, X., & Zhai, Z. (2022). Resilience in Infrastructure Systems: A Comprehensive Review. *Buildings*, 12(6), 759. <https://doi.org/10.3390/buildings12060759>
- Lu, Z., Shi, L., Zhou, H., & Liu, J. (2024). Multi-Objective Optimization of Urban Drainage System by Integrating Rule-Based Control with Permeable Pavement. *Water*, 16(15), 2200.
<https://doi.org/10.3390/w16152200>
- Ma, Y., Xia, X., Liang, Q., & Wan, H. (2022). Investigating the Impact of Spatial Distribution of Sustainable Drainage System (SuDS) Components on Their Flood Mitigation Performance in Communities with High Groundwater Levels. *Water*, 14(9), 1367. <https://doi.org/10.3390/w14091367>
- Mangukiya, N. K., Baladaniya, K. B., Gopika, B., Sourabh, N., & Timbadiya, P. V. (2022). *Design of Storm-Water Drainage Network for Educational Institute* (pp. 461–472). https://doi.org/10.1007/978-981-16-5501-2_36
- Manke, E. B., Teixeira-Gandra, C. F. A., Damé, R. de C. F., Nunes, A. B., Neta, M. C. C. C., & Karsburg, R. M. (2022). Seasonal intensity-duration-frequency relationships for Pelotas, Rio Grande do Sul, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 26(2), 85–90. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n2p85-90>
- Minh, H. V. T., Lavane, K., Lanh, L. T., Thinh, L. Van, Cong, N. P., Ty, T. Van, Downes, N. K., & Kumar, P. (2022). Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves Based on Rainfall Cumulative Distribution Frequency (CDF) for Can Tho City, Vietnam. *Earth*, 3(3), 866–880.
<https://doi.org/10.3390/earth3030050>

- Nahdi, K., Marzuki, M., Lutfi, S., Ramdhani, S., & Wijaya, H. (2021). Persepsi Milenial Terhadap Kelestarian Lingkungan Dalam Proposisi Bahasa Indonesia Berbasis Pengelolaan Sampah. *Research and Development Journal of Education*, 7(2), 279. <https://doi.org/10.30998/rdje.v7i2.8982>
- Obando, G., Quijano, N., & Ocampo-Martinez, C. (2022). Decentralized Control for Urban Drainage Systems Using Replicator Dynamics. *IEEE Access*, 10, 56740–56762. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3177631>
- Pujari, S. S., & Wayal, A. S. (2022). Projected Rainfall Intensity Duration Frequency Relationships under Climate Change: A Case Study of Thane City. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 4(2), 54–64. <https://doi.org/10.30564/jees.v4i2.4995>
- Ridhoi, R. (2023). Memikirkan kembali tradisi sejarah lingkungan di Indonesia. *Sejarah Dan Budaya: Jurnal Sejarah, Budaya, Dan Pengajarannya*, 17(2), 131. <https://doi.org/10.17977/um020v17i22023p131-136>
- Rizaldi, A., Kure, S., Priyambodho, B. A., Januriyadi, N. F., & Farid, M. (2025). Toward Sustainable Flood Resilience: Assessing Efficacy of Paddy Field Dams to Reduce Floods in Jakarta. *Journal of Flood Risk Management*, 18(1). <https://doi.org/10.1111/jfr3.70020>
- Shafiquzzaman, M., Alqarawi, S. M. A., Haider, H., Rafiquzzaman, M., Almoshaogeh, M., Alharbi, F., & EL-Ghoul, Y. (2022). Sawdust Recycling in the Development of Permeable Clay Paving Bricks: Optimizing Mixing Ratio and Particle Size. *Sustainability*, 14(18), 11115. <https://doi.org/10.3390/su141811115>
- Tian, J., Zeng, S., Zeng, J., & Jiang, F. (2022). Assessment of Supply and Demand of Regional Flood Regulation Ecosystem Services and Zoning Management in Response to Flood Disasters: A Case Study of Fujian Delta. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 589. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010589>
- Truu, M., Annus, I., Roosimägi, J., Kändler, N., Vassiljev, A., & Kaur, K. (2021). Integrated Decision Support System for Pluvial Flood-Resilient Spatial Planning in Urban Areas. *Water*, 13(23), 3340. <https://doi.org/10.3390/w13233340>
- Wang, Q., Tang, M., & Shi, P. (2025). Depth prediction of urban waterlogging based on BiTCN-GRU modeling. *PLOS One*, 20(4), e0321637. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321637>
- Wu, Y., Zheng, S., Wang, J., & Liu, Q. (2022). An Integrated Decision-Making Framework Based on Many-Objective Brain Storming Optimization for Urban Drainage System Design. *IEEE Access*, 10, 93502–93512. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3204123>
- Wu, Z., Liu, S., & Wang, H. (2021). Calculation method of short-duration rainstorm intensity formula considering nonstationarity of rainfall series: impacts on the simulation of urban drainage system. *Journal of Water and Climate Change*, 12(7), 3464–3480. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.151>