

Evaluasi Efektivitas *Rain Barrel* dalam Pengendalian Limpasan Permukaan di Kawasan Perumahan Modern di Kota Bogor

Evaluation of The Effectiveness of Rain Barrels in Surface Runoff Management in Modern Residential Areas in Bogor City

Muhamad Demirel Prasetya¹⁾ Doddi Yudianto¹⁾* Willy¹⁾

¹⁾Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan
Jln Ciumbuleuit No.94, Bandung, Indonesia

*Corresponding email: doddi_yd@unpar.ac.id

Diterima: 27 Januari 2025; Direvisi: 27 Februari 2025; Disetujui: 03 Desember 2025

Abstract

Bogor City, with a population of approximately 1,064,000 in 2022 and an annual growth rate of 2.01%, faces increasing pressure to meet housing demands. To accommodate this need, one modern residential development in the area has undergone extensive expansion. A previous assessment indicated that the development of a 10.75-hectare residential area in this neighborhood could increase peak discharge by approximately 24.74% for the 2-year return period and 16.67% for the 5-year return period. Based on these findings, this study aims to evaluate the effectiveness of Low Impact Development (LID) measures, specifically the use of rain barrels, in mitigating the hydrological impacts of land-use changes. Simulations were conducted using the Storm Water Management Model (SWMM) to: (1) analyze changes in peak discharge and runoff volume before and after development; (2) design the residential drainage system while testing different rain barrel capacities; and (3) evaluate the effectiveness of rain barrels in reducing peak discharge and runoff. Simulation results indicate that the installation of two rain barrels per household, each with a diameter of 1.41 m and a height of 1.19 m, can reduce peak discharge by 19.66%, approaching pre-development conditions. However, total runoff volume remains higher than baseline levels, suggesting that additional LID strategies are necessary for more comprehensive flood mitigation. These findings underscore the potential of rain barrels as an effective tool for urban runoff management and provide practical guidance for optimizing their implementation in similar residential developments.

Keywords: low impact development, peak discharge, rain barrel, Rancamaya, SWMM.

Abstrak

Kota Bogor, dengan jumlah penduduk sebanyak 1.064.000 orang pada tahun 2022 dan tingkat pertumbuhan tahunan sebesar 2,01%, menghadapi tekanan yang semakin besar dalam pemenuhan kebutuhan perumahan. Untuk mengakomodasi kebutuhan tersebut, salah satu perumahan modern di wilayah ini melakukan pengembangan kawasan huniannya secara masif. Studi terdahulu menunjukkan pengembangan hunian seluas 10,75 hektar di kawasan perumahan tersebut berpotensi menyebabkan peningkatan debit puncak sebesar 24,74% untuk periode ulang 2 tahun dan 16,67% untuk periode ulang 5 tahun. Atas dasar itu, studi ini bertujuan mengevaluasi efektivitas penerapan Low Impact Development (LID) melalui penggunaan rain barrel dalam mereduksi dampak perubahan tata guna lahan. Simulasi dilakukan menggunakan Storm Water Management Model (SWMM) untuk: (1) menganalisis peningkatan volume limpasan debit puncak sebelum dan sesudah pembangunan; (2) merancang sistem drainase kawasan sekaligus menguji variasi kapasitas rain barrel; serta (3) mengevaluasi efektivitas rain barrel dalam mereduksi dampak pembangunan. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan diketahui bahwa pemanfaatan dua buah rain barrel per rumah, dengan diameter 1,41 m dan tinggi 1,19 m, mampu menurunkan debit puncak sebesar 19,66% atau mendekati kondisi sebelum pembangunan. Meskipun demikian, total volume limpasan tetap lebih tinggi dibanding kondisi awal, menandakan perlunya integrasi strategi LID tambahan untuk mitigasi banjir yang lebih komprehensif. Temuan ini menegaskan potensi rain barrel sebagai sarana yang efektif dalam pengelolaan limpasan permukaan dan sekaligus memberikan panduan praktis untuk optimalisasi penggunaannya pada pengembangan perumahan serupa.

Kata Kunci: debit puncak, low impact development, rain barrel, Rancamaya, SWMM.

PENDAHULUAN

Konsep pengelolaan air hujan modern menekankan pentingnya konservasi dan pengembalian air ke dalam siklus hidrologi alami. Namun, praktik perencanaan drainase di Indonesia masih dominan berorientasi pada pembuangan air secepat mungkin ke saluran drainase. Pendekatan ini, apabila tidak diimbangi dengan upaya peningkatan infiltrasi, dapat memicu terjadinya genangan dalam jangka panjang (Muliawati & Mardiyanto, 2015). Genangan kerap terjadi di kawasan perkotaan akibat alih fungsi lahan dari area tidak kedap air menjadi kedap air, yang menurunkan kapasitas infiltrasi tanah secara signifikan (Laksmi, 2020).

Sebagai alternatif, Sustainable Urban Drainage System (SUDS) menawarkan pendekatan yang lebih alami dalam mengelola limpasan hujan, dengan manfaat penurunan risiko banjir serta peningkatan kualitas air di kawasan perkotaan (Ashley & Smith, 2024). SUDS banyak dikembangkan melalui konsep Low Impact Development (LID), yaitu strategi desentralisasi pengendalian limpasan sehingga kondisi hidrologis kawasan dapat didekatkan kembali pada keadaan pra-pembangunan (Bai *et al.*, 2018). Pada prinsipnya, LID berfokus pada pengurangan luas lahan kedap air, peningkatan infiltrasi, serta pemanfaatan kembali air hujan pada area tangkapannya (Qin *et al.*, 2013). Dukungan terhadap pendekatan ini juga datang dari studi yang menegaskan bahwa kombinasi LID dapat secara signifikan menurunkan limpasan dan debit puncak sehingga menjadikannya opsi *cost-effective* dibanding sistem konvensional (Abduljaleel & Demissie, 2022). Selain itu, hasil studi oleh Hidayah dan Farid pada tahun 2023 turut menegaskan bahwa LID terbukti efektif dalam mengurangi volume limpasan hujan, sekaligus mengkaji potensi penerapan teknik *rain barrel*, *bioretention*, dan *permeable pavement* dalam konteks Indonesia.

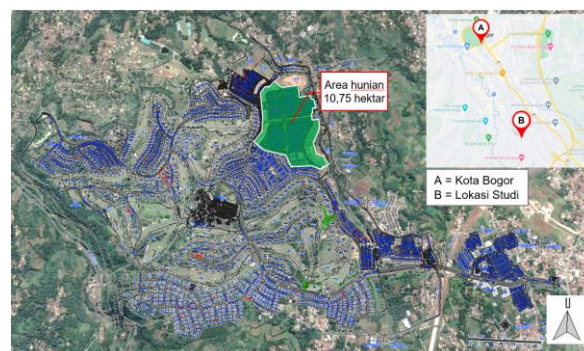
Salah satu bentuk implementasi LID adalah penggunaan *rain barrel*, yakni wadah penampungan air hujan dari atap bangunan (Aves, 2022). Dibandingkan dengan teknologi LID lainnya, *rain barrel* memiliki keunggulan tambahan karena memungkinkan pemanfaatan air yang ditampung untuk kebutuhan penghijauan seperti penyiraman taman (Jennings *et al.*, 2013). Meski demikian, efektivitas *rain barrel* dipengaruhi oleh beberapa aspek teknis, termasuk kapasitas talang, karakteristik aliran air dari atap, serta rugi-rugi akibat gesekan (Litofsky *et al.*, 2014). Hasil meta-analisis terkini mengonfirmasi bahwa implementasi *rain barrel* dapat mengurangi debit puncak antara 17% hingga 28% dengan efektivitas optimal pada

hujan intensitas rendah hingga menengah (Liu *et al.*, 2023).

Kota Bogor merupakan salah satu wilayah dengan laju pertumbuhan penduduk tinggi, yaitu 2,01% atau total jumlah penduduk sebanyak 1.064.000 orang pada tahun 2022 (Dinas Kependudukan dan Pencatatan Sipil, 2022). Pertumbuhan ini tentunya akan mendorong alih fungsi lahan menjadi kawasan permukiman, yang berpotensi meningkatkan limpasan permukaan dan debit puncak, sebagaimana telah dibuktikan dalam studi kasus di Kabupaten Gowa (Syaifuddin *et al.*, 2013). Salah satu kawasan perumahan yang terletak di Kelurahan Harjasari, Kecamatan Bogor Selatan, Kota Bogor (-6.671 LS, 106.829 BT) dan memiliki luas 400 hektar, berencana melakukan perluasan area hunian seluas 10,75 hektar di bagian utara dengan total hunian berjumlah 354 unit rumah sebagaimana disajikan pada Gambar 1.

Studi sebelumnya yang dilakukan oleh Yudianto *et al.* (2023) melaporkan bahwa pembangunan area hunian ini akan memberikan kontribusi peningkatan debit puncak Sungai Cileuwibangke sebesar 35–36% serta meningkatkan volume limpasan 22–28%. Temuan ini mengonfirmasi dampak hidrologis signifikan dari perubahan tata guna lahan di DAS Cileuwibangke. Namun, kajian mengenai upaya mitigasi dengan pendekatan LID di wilayah ini masih sangat terbatas. Sejauh ini belum ada studi yang mengkaji efektivitas alternatif LID lain khususnya di DAS Cileuwibangke.

Oleh karena itu, sebagai langkah awal dalam mengisi celah kajian tersebut, studi ini bertujuan mengevaluasi efektivitas penerapan LID melalui penggunaan *rain barrel* untuk mereduksi dampak yang terjadi.



(sumber: google earth)

Gambar 1 Rencana Induk Perumahan

METODOLOGI

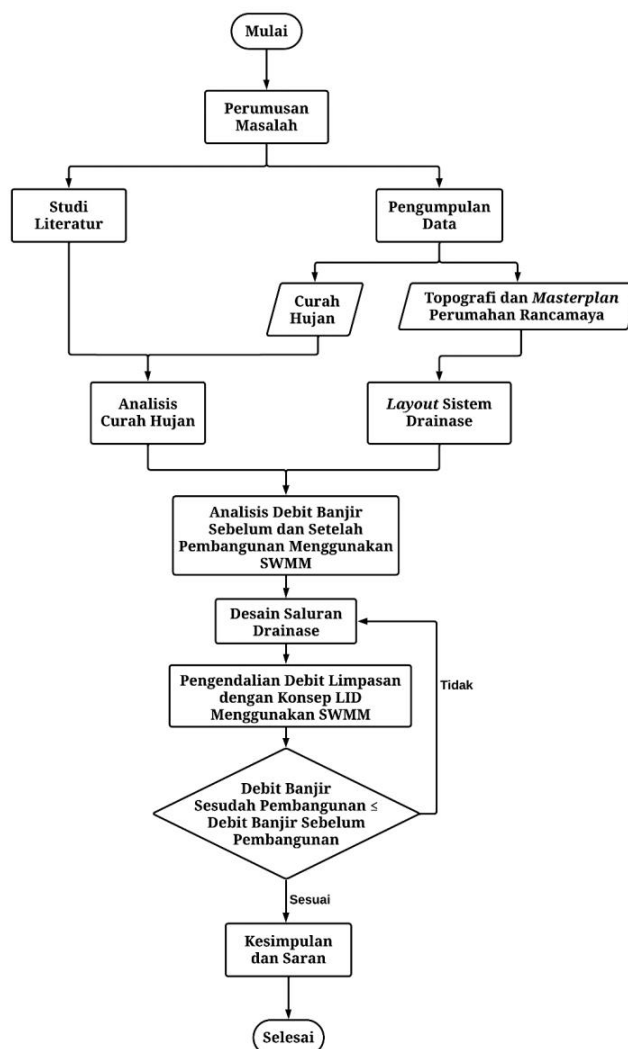
Secara umum, tahapan studi dimulai dengan perumusan masalah, kajian literatur, serta pengumpulan data yang meliputi curah hujan, topografi, rencana induk kawasan perumahan, dan

layout sistem drainase area hunian. Berdasarkan data hidrologi dan data fisik kawasan yang diperoleh, pemodelan area hunian dilakukan menggunakan perangkat lunak Storm Water Management Model (SWMM), yaitu model hidrologi-hidraulik yang dikembangkan oleh United States Environmental Protection Agency (US EPA) untuk mensimulasikan hujan, limpasan, serta penerapan berbagai elemen LID (Al Amin, 2020; Luan *et al.*, 2017; Arjenaki *et al.*, 2021). Dalam pemodelan ini, kondisi batas hulu ditetapkan bahwa seluruh aliran berasal dari sub-catchment tanpa adanya kontribusi aliran tambahan dari luar sistem, sehingga seluruh respon hidrologi merupakan representasi langsung dari karakteristik daerah tangkapan yang dimodelkan. Sementara itu, kondisi batas hilir diterapkan sebagai free outfall yang mengalirkan limpasan menuju Sungai Cileuwibangke, sesuai dengan konfigurasi drainase eksisting.

Parameter hidrologi penting seperti Curve Number (CN) ditentukan berdasarkan kondisi fisik

kawasan, terutama tutupan lahan dan jenis tanah, dengan merujuk pada standar yang dikembangkan oleh USDA Soil Conservation Service (1986) yang secara luas digunakan dalam penilaian karakteristik limpasan permukaan. Karena parameter model diturunkan langsung dari kondisi fisik dan tidak bergantung pada proses penyesuaian berbasis observasi historis, kalibrasi model tidak dilakukan.

Hasil pemodelan ini kemudian digunakan sebagai dasar untuk: (1) mensimulasikan kondisi hidrologi sebelum dan sesudah pembangunan; (2) merancang sistem drainase area hunian baik dengan maupun tanpa pemanfaatan rain barrel untuk berbagai variasi kapasitas; dan (3) mengevaluasi dampak pembangunan berupa peningkatan volume limpasan dan debit puncak akibat pembangunan area hunian di bagian utara kawasan perumahan. Pendekatan ini diterapkan guna menilai efektivitas rain barrel sebagai strategi LID yang dapat mereduksi dampak hidrologis pembangunan. Secara lengkap, alur tahapan analisis disajikan pada Gambar 2.

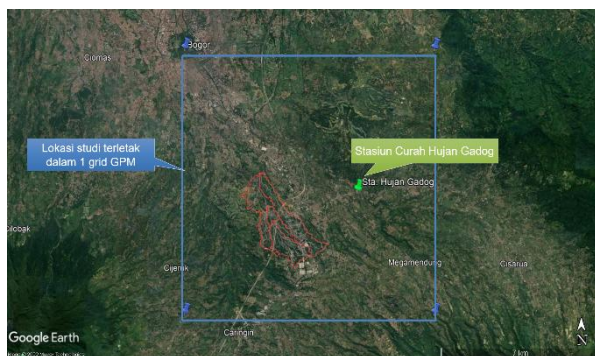


Gambar 2 Diagram alir studi

Data Curah Hujan dan Koreksi Data GPM

Data curah hujan umumnya diperoleh dari stasiun pengamatan. Namun, keterbatasan jumlah stasiun dan ketersediaan data, serta fakta bahwa setiap pengukuran hanya mewakili kondisi di lokasi tertentu, menyebabkan data hujan dari stasiun pengamatan kurang mencerminkan variabilitas spasial di lapangan (Kartika *et al.*, 2023). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, data hujan satelit Global Precipitation Measurement (GPM) yang merupakan produk open-source dari NASA dengan resolusi spasial grid sebesar $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (Harsanto *et al.*, 2022), seperti disajikan pada Gambar 3, sering kali digunakan untuk mengatasi kendala kekosongan data.

Meskipun memiliki cakupan spasial yang luas, namun data GPM juga memiliki keterbatasan akurasi akibat proses estimasi berbasis sensor satelit yang tidak secara spesifik menangkap variabilitas hujan lokal di sekitar stasiun pengamatan (Yudianto *et al.*, 2023). Karena itu, diperlukan proses koreksi sebelum data dapat digunakan dalam analisis hidrologi. Secara umum, koreksi data dilakukan dengan cara menyesuaikan lengkung durasi data GPM terhadap data curah hujan yang tercatat di Stasiun Hujan Gadog (6,653 LS dan 106,869 BT, sekitar 5,6 km dari lokasi area hunian). Untuk memperoleh lengkung durasi yang mendekati, data curah hujan dibagi ke dalam sejumlah rentang nilai hujan, dan setiap interval kemudian diberikan faktor koreksi tersendiri. Pendekatan ini sejalan dengan metode koreksi bias yang umum digunakan dalam pemrosesan data satelit, di mana intensitas hujan dikelompokkan berdasarkan kelas-kelas tertentu untuk memperbaiki distribusi hujan satelit agar lebih sesuai dengan pengamatan lapangan (Mekonnen *et al.*, 2021). Pendekatan berbasis interval ini efektif untuk meningkatkan akurasi estimasi limpasan terutama pada kejadian hujan ringan hingga sedang yang sering mengalami underestimation pada data GPM.



Gambar 3 Lokasi stasiun hujan dan grid GPM

Analisis Curah Hujan Rencana

Secara umum, analisis frekuensi dilakukan untuk mengestimasi curah hujan rencana berdasarkan data historis Hujan Harian Maksimum Tahunan (HHMT). Sebelum analisis frekuensi dilakukan, data Hujan Harian Maksimum Tahunan (HHMT) harus melalui serangkaian uji statistik guna memastikan kualitas dan konsistensinya, meliputi uji outlier, uji tren, uji stabilitas varians, uji stabilitas rata-rata, serta uji independensi (Hosseinzadehtaleei *et al.*, 2020; Hosseinzadehtaleei & Radtke, 2014). Kelayakan data dinilai berdasarkan kriteria statistik yang ketat dimana: (1) Uji outlier dinyatakan lolos apabila tidak terdapat nilai ekstrem yang signifikan secara statistik berdasarkan metode Grubbs dengan tingkat kepercayaan 95%; (2) Uji tren dinyatakan lolos apabila uji Mann-Kendall menunjukkan tidak adanya tren monotonik yang signifikan (nilai- $p > \alpha$ 0,05); (3) Uji stabilitas varians dan rata-rata dinyatakan lolos apabila uji F dan uji-t masing-masing menunjukkan homogenitas varians dan stabilitas rata-rata antar periode (nilai- $p > \alpha$ 0,05); serta (4) Uji independensi dinyatakan lolos apabila uji Ljung-Box menunjukkan tidak adanya autokorelasi dalam residual data (nilai- $p > \alpha$ 0,05). Apabila seluruh uji ini terpenuhi, maka seri data dinyatakan layak dan dapat digunakan dalam analisis frekuensi.

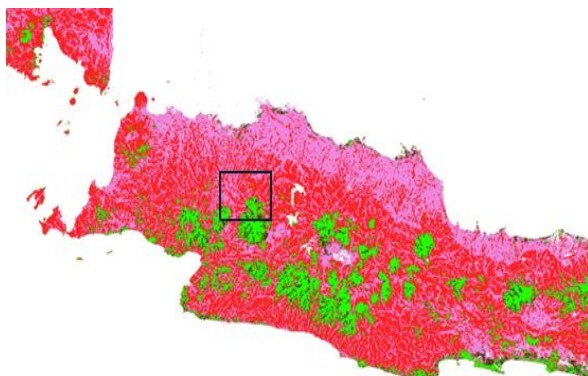
Distribusi probabilitas yang umum diterapkan dalam analisis frekuensi hidrologi meliputi Lognormal 2-parameter, Lognormal 3-parameter, Gumbel Tipe I, Pearson III, Log-Pearson III, dan Generalized Extreme Value (GEV) (Haberlandt & Radtke, 2014; Bhavyashree & Bhattacharyya, 2018). Di antara distribusi tersebut, GEV adalah distribusi yang saat ini paling banyak digunakan dalam analisis hidrologi karena fleksibilitasnya dalam menangkap perilaku ekor distribusi serta kemampuannya mengakomodasi berbagai magnitudo kejadian ekstrem (Musakkir *et al.*, 2023). Atas dasar itu, studi ini menetapkan distribusi probabilitas GEV sebagai metode untuk menghitung curah hujan rencana.

Merujuk pada peraturan tentang penyelenggaraan sistem drainase perkotaan (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2014), untuk daerah tangkapan seluas 10–100 ha dengan kategori kawasan sebagai kota metropolitan, analisis hidrologi pada lokasi studi ditetapkan menggunakan periode ulang 2 dan 5 tahun. Periode ulang 2 tahun digunakan sebagai dasar perancangan dimensi saluran dan periode ulang 5 tahun untuk menentukan besarnya tinggi jagaan.

Penentuan Jenis Tanah dan Parameter Curve Number (CN)

Dalam analisis hidrologi, jenis tanah merupakan faktor penting yang memengaruhi infiltrasi dan limpasan permukaan. Untuk lokasi studi, seperti disajikan pada Gambar 4, peta jenis tanah diperoleh dari Harmonized World Soil Database (HWSD) merupakan basis data global yang menggabungkan FAO-UNESCO Soil Map of the World dan berbagai data nasional menjadi peta tanah harmonis beresolusi 1 km × 1 km. Peta ini digunakan untuk menentukan kelompok tanah berdasarkan kapasitas infiltrasi sesuai klasifikasi Hydrologic Soil Group (HSG) (FAO *et al.*, 2012).

HSG terdiri atas empat kelompok: A (infiltrasi tinggi, limpasan rendah), B (infiltrasi sedang), C (infiltrasi rendah), dan D (infiltrasi sangat rendah, limpasan tinggi). Penentuan HSG di lokasi studi dilakukan dengan mengkorelasikan warna pada peta tanah dengan kategori HSG, seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Setelah HSG ditetapkan, parameter *Curve Number* (CN) ditentukan berdasarkan metode USDA Soil Conservation Service (1986), yang menghubungkan tutupan lahan dengan HSG.



Gambar 4 Peta Tanah Lokasi Studi
(Sumber:FAO *et al.*, 2012)

Tabel 1 Korelasi Warna Peta Tanah dan HSG (FAO *et al.*, 2012)

Warna	HSG	Jenis Tanah
Biru	A	Sand
Ungu	B	Sandy loam, loamy sand
Hijau	C	Clay loam, silty clay loam, sandy clay loam, loam, sily loam, silt
Merah	D	Clay, silty clay

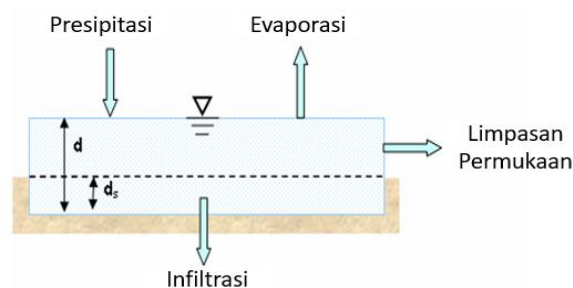
Adapun nilai parameter kemiringan lahan, persentase lahan kedap air, dan CN untuk kondisi sebelum dan sesudah pembangunan secara lengkap disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Parameter SWMM Kondisi Sebelum dan Sesudah Terbangun

Parameter	Sebelum Terbangun	Sesudah Terbangun
Kemiringan lahan	2%	2%
Lahan kedap air	5%	65%
Curve Number (CN)	80	84
Koefisien Manning	0,011	0,24
Tampungan lahan	2 mm	5 mm

Pemodelan SWMM

Secara umum, SWMM menerapkan prinsip konservasi massa dan momentum untuk menggambarkan proses limpasan permukaan. Limpasan dari hujan dimodelkan sebagai *non-linear reservoir* dengan kapasitas tampungan awal berupa *depression storage* atau cekungan, yang memperhitungkan volume hujan yang terperangkap sebelum terjadi limpasan (Barreiro *et al.*, 2023), seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Pemodelan Limpasan Reservoir Non-Linear
(US EPA, 2015)

Sedangkan untuk mensimulasikan aliran tidak langgeng dalam jaringan drainase, SWMM menggunakan pendekatan numerik untuk menyelesaikan persamaan Saint-Venant satu dimensi (Sañudo *et al.*, 2020). Dalam pemodelan SWMM, data hujan dimasukkan ke dalam simulasi melalui komponen *Rain Gauge*. Komponen ini berfungsi untuk mendefinisikan karakteristik hujan yang akan diterapkan pada satu atau beberapa *subcatchment*. Data hujan yang digunakan berupa data deret waktu dalam salah satu bentuk berikut: volume hujan, kedalaman hujan kumulatif, atau intensitas hujan. Pendekatan ini konsisten dengan metodologi yang diterapkan dalam pemodelan hidrologi-hidrolik terintegrasi untuk kawasan perkotaan tropis (Hasan *et al.*, 2019).

Sedangkan untuk memodelkan *rain barrel* atau tangki penyimpanan, modul *Storage Unit* digunakan untuk merepresentasikan volume air yang

ditampung sementara sebelum dialirkan ke jaringan drainase. Debit keluaran dari tangki ini ditentukan berdasarkan kurva *outflow* (Aad *et al.*, 2010). *Rain barrel* juga dapat dikonfigurasi untuk memperhitungkan *overflow*, sehingga jika kapasitas tangki terlampaui, kelebihan air dialirkan secara langsung menuju sistem drainase. Beberapa parameter dalam pemodelan *rain barrel* antara lain *flow coefficient*, *flow exponent*, *offset*, *drain delay*, *open level*, dan *closed level*. *Flow coefficient* adalah koefisien pengaliran karena adanya lubang pada *rain barrel* yang dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C = \frac{2D^{0,5}}{T} \dots\dots\dots(1)$$

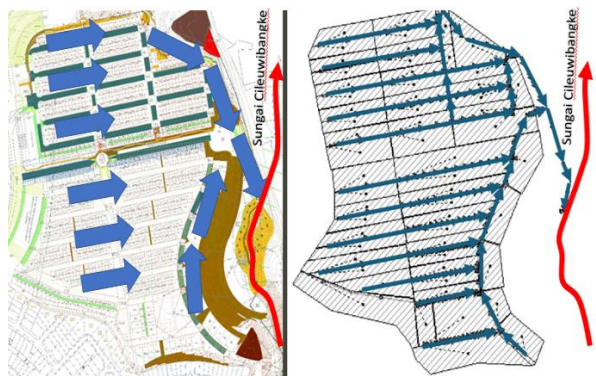
Dimana:

C : *flow coefficient*

D : ketinggian *rain barrel* (mm)

T : waktu pengurasan atau *drain* (jam)

Gambar 6 di bawah ini menyajikan skema model SWMM untuk area hunian seluas 10,75 hektar. Skema ini menampilkan 64 *subcatchment* lengkap dengan jaringan saluran drainase dan lokasi outlet limpasan yang terhubung ke Sungai Cileuwibangke. Visualisasi ini menggambarkan integrasi sistem drainase kawasan, mulai dari setiap *subcatchment* hingga pembuangan akhir ke sungai, yang menjadi dasar perancangan sistem drainase dan evaluasi efektivitas pengendalian limpasan di lokasi studi.



Gambar 6 Skematisasi Pemodelan SWMM

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Kelayakan Data Hujan

Hasil uji kelayakan data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa seluruh parameter statistik untuk data hujan Stasiun Gadog memenuhi kriteria sehingga dapat digunakan untuk analisis lanjutan. Sebaliknya, data hujan GPM teridentifikasi memiliki tren temporal yang perlu diperhatikan dalam tahapan koreksi maupun interpretasi. Meskipun

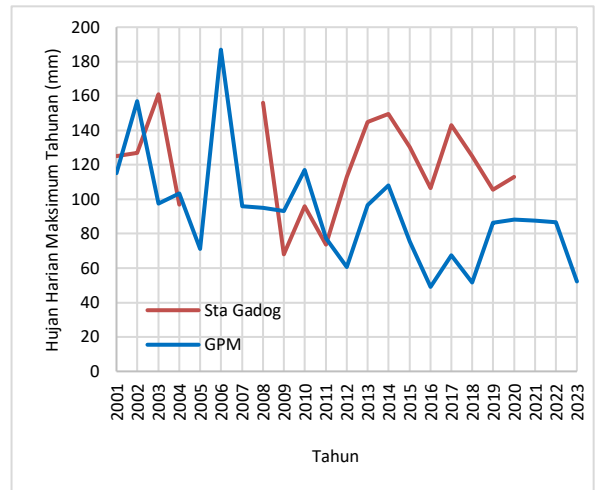
demikian, kedua sumber data tetap memberikan dasar informasi yang penting untuk proses analisis hidrologi selanjutnya.

Tabel 3 Hasil Uji Kelayakan Data Curah Hujan

Uji	Hasil	
	Stasiun Gadog	GPM
Uji <i>Outlier</i>	Lolos uji	Lolos uji
Uji <i>Trend</i>	Lolos uji	Ada <i>trend</i>
Uji Stabilitas <i>Variance</i>	Lolos uji	Lolos uji
Uji Stabilitas <i>Mean</i>	Lolos uji	Lolos uji
Uji <i>Independency</i>	Lolos uji	Lolos uji

Koreksi Data GPM dan Curah Hujan Rencana

Mempertimbangkan adanya kekosongan data pada seri data hujan yang dicatatkan di stasiun hujan Gadog, seperti disajikan pada Gambar 7, serta jumlah tahun data GPM yang lebih panjang, sebelum digunakan dalam analisis hidrologi selanjutnya seri data GPM dikoreksi dengan menggunakan faktor koreksi hujan pada berbagai interval curah hujan sebagaimana tercantum pada Tabel 4.



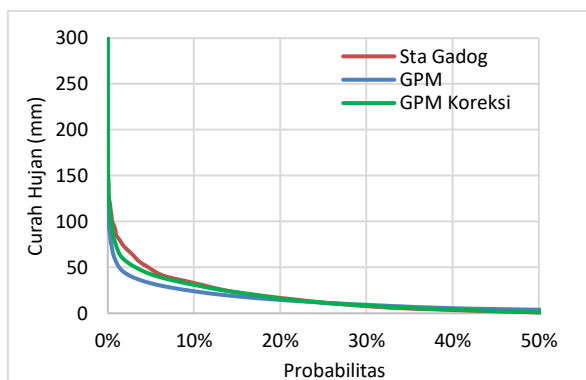
Gambar 7 Data Hujan Harian Maksimum Tahunan (HHMT) Stasiun Gadog dan GPM

Tabel 4 Faktor Koreksi Data Hujan GPM

Interval Curah Hujan (mm)	Faktor Koreksi
0 – 2,5	0,00
2,5 – 10	0,75
10 – 14	0,95
14 – 20	1,20
20 – 50	1,30
> 50	1,30

Gambar 8 menunjukkan bahwa lengkung durasi hujan dari data GPM terkoreksi memiliki kesesuaian yang jauh lebih baik terhadap lengkung durasi Stasiun Gadog dibandingkan data GPM asli. Kesesuaian ini terutama terlihat pada probabilitas 20–50%, yang berkaitan dengan periode ulang 2 dan 5 tahun. Konsistensi pola antara kedua lengkung tersebut mengindikasikan bahwa prosedur koreksi yang diterapkan mampu mengurangi bias temporal maupun intensitas pada data GPM.

Kelayakan ini juga diperkuat oleh hasil analisis frekuensi pada Tabel 5, di mana nilai curah hujan rencana dari ketiga sumber data menunjukkan konvergensi pada rentang periode ulang yang relevan. Dengan demikian, data GPM yang telah dikoreksi dapat dinyatakan cukup representatif untuk digunakan dalam mengisi kekosongan data hujan di stasiun darat serta mendukung analisis hidrologi lanjutan pada lokasi studi.



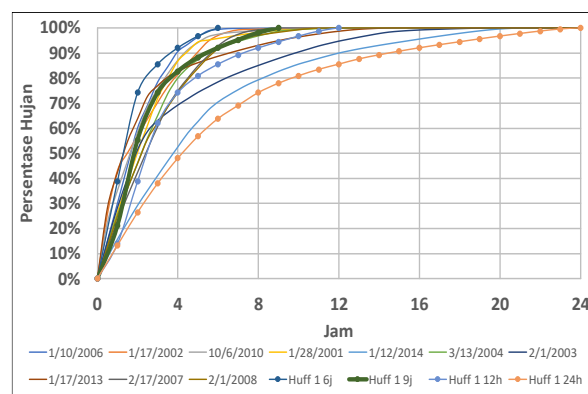
Gambar 8 Lengkung Durasi Hujan

Tabel 5 Curah Hujan Rencana

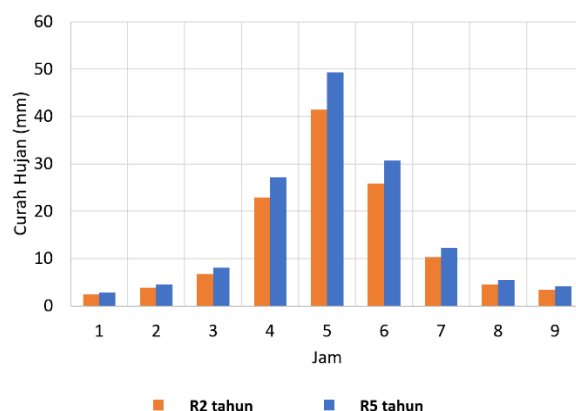
Periode Ulang (tahun)	Curah Hujan (mm)		
	Stasiun Gadog	GPM	GPM Terkoreksi
2	121,60	86,00	112,40
5	144,60	114,60	148,60

Selain pemanfaatan data GPM untuk perhitungan curah hujan rencana, karena ketidakterediaan data curah hujan jam-jaman pada Stasiun Gadog, studi ini juga memerlukan data GPM untuk memperoleh distribusi curah hujan ekstrem. Hasil analisis data GPM lebih lanjut menunjukkan bahwa durasi hujan ekstrem yang sering terjadi di lokasi studi adalah 9 jam dengan pola distribusi hujan jam-jaman yang paling mendekati adalah distribusi Huff Tipe I, seperti ditunjukkan pada

Gambar 9 di bawah ini. Atas dasar itu, *hyetograf* distribusi hujan tersebut digunakan sebagai data masukan dalam pemodelan hujan limpasan menggunakan SWMM sebagaimana disajikan pada Gambar 10.



Gambar 9 Plotting Distribusi Hujan Jam-Jaman



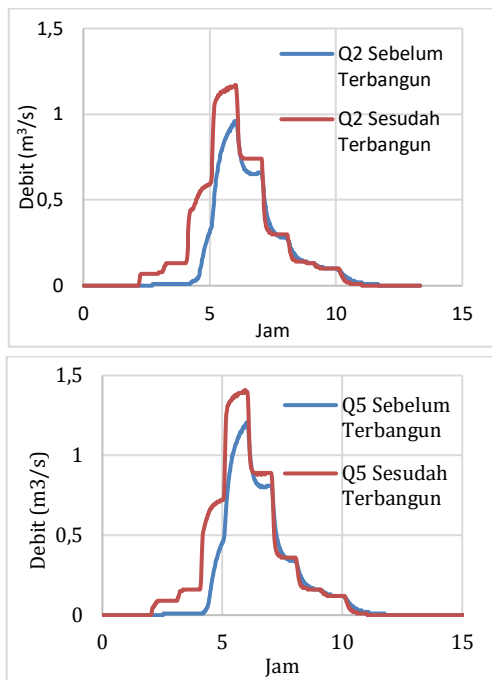
Gambar 10 *Hyetograf* Distribusi Curah Hujan

Debit Banjir Sebelum dan Sesudah Pembangunan

Seperti disajikan pada Gambar 11, hasil simulasi SWMM menunjukkan adanya peningkatan puncak debit banjir akibat pembangunan di lokasi studi. Debit puncak pada periode ulang 2 tahun dan 5 tahun meningkat sebesar 21,87% dan 16,67% secara berturut-turut. Sedangkan untuk volume limpasan, seperti ditunjukkan pada Tabel 6, diketahui adanya kenaikan volumen sebesar 39,47% khususnya pada periode ulang 2 tahun.

Tabel 6 Volume Limpasan Sebelum dan Setelah Pembangunan

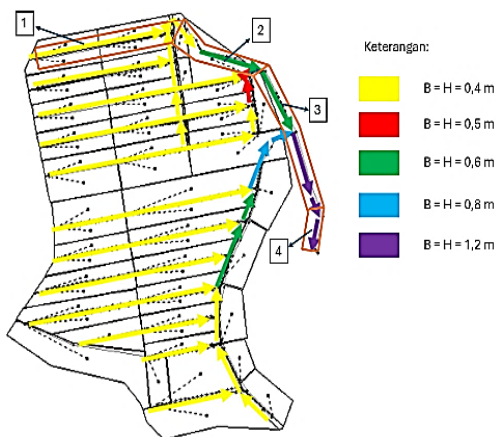
Volume Limpasan Sebelum Terbangun (m ³)	Volume Limpasan Terbangun (m ³)	Persentase Kenaikan (%)
380	530	39,47



Gambar 11 Debit Banjir Sebelum dan Setelah Pembangunan

Dimensi Saluran Drainase

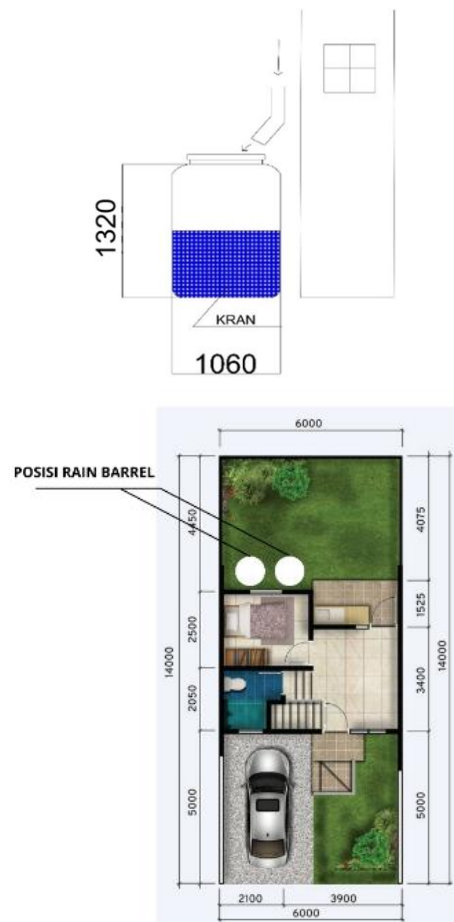
Sejalan ketentuan yang ditetapkan dalam analisis hidrologi, dimensi saluran drainase di lokasi studi direncanakan menggunakan periode ulang 2 tahun dan kemudian dievaluasi kembali terhadap ketersediaan tinggi jagaan pada periode ulang 5 tahun. Secara umum penentuan dimensi saluran ini dilakukan dengan menyertakan karakteristik hidraulik seperti bentuk penampang saluran, panjang dan kemiringan saluran, serta koefisien kekasaran saluran. Untuk memudahkan implementasi di lapangan, dimensi saluran ditetapkan dalam lima kategori ukuran, yaitu 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m, 0,8 m, dan 1,2 m. Secara lengkap, dimensi saluran yang diperoleh untuk area hunian terbangun disajikan pada Gambar 12.



Gambar 12 Dimensi Saluran Rencana

Pengendalian Limpasan Menggunakan Rain Barrel

Berdasarkan analisis data spasial dari HWSD, lokasi studi didominasi oleh tanah lempung (*Hydrologic Soil Group D*), yang secara hidrologis dicirikan oleh laju infiltrasi yang sangat rendah. Ditambah dengan keterbatasan ruang terbuka untuk membangun kolam parkir banjir, maka *rain barrel* dipilih sebagai alternatif sarana pengendalian limpasan berbasis LID yang paling layak untuk diimplementasikan di lokasi studi. Seperti ditunjukkan pada Gambar 13 di bawah ini, hujan yang jatuh di atap rumah, dialirkan melalui talang menuju *rain barrel*. Rain barrel ini dilengkapi dengan kran yang akan mengalirkan kelebihan hujan sekaligus berfungsi sebagai outlet untuk pengosongan.



Gambar 13 Ilustrasi Penerapan Rain Barrel

Di dalam studi ini, dimensi *rain barrel* yang digunakan disesuaikan dengan produk yang tersedia di pasar yaitu tangki air Roto tipe AL - 1100 VB dengan diameter 1.060 mm dan tinggi 1.320 mm serta tipe AL - 1600 dengan diameter 1410 mm dan tinggi 1190 mm. Spesifikasi rain barrel tersebut secara lengkap disajikan pada Tabel 7. Sedangkan untuk simulasi lebih lanjut, penggunaan rain barrel ini diatur dalam empat skenario dimana *rain barrel*

yang ditempatkan di setiap rumah bervariasi baik untuk jumlah dan dimensi seperti yang tercantum pada Tabel 8.

Tabel 7 Tipe Rain Barrel

Tipe	Kapasitas (liter)	Fitting (inch)	Diameter (mm)	Tinggi (mm)
AL - 1100 VB	1.050	1	1.060	1.320
AL - 1600	1.600	1	1.410	1.190

Tabel 8 Skenario Penggunaan Rain Barrel

Skenario	Jumlah Rain Barrel per Rumah	Diameter (mm)	Ketinggian (mm)
1	1	1.060	1.320
2	1	1.410	1.190
3	2	1.060	1.320
4	2	1.410	1.190

Untuk mensimulasikan kinerja *rain barrel* menggunakan SWMM dibutuhkan sejumlah parameter spesifik seperti disajikan pada Tabel 9. *Flow Coefficient* dan *Flow Exponent* menentukan hubungan antara tinggi air dan debit *outflow*, sementara *Offset* menunjukkan posisi barrel terhadap permukaan tanah. Sedangkan *Drain Delay* digunakan untuk mengontrol waktu pengosongan barrel, dan *Open/Closed Level* berfungsi untuk mengatur ketinggian pembukaan serta penutupan aliran. Parameter-parameter ini bersama-sama menentukan efektivitas *rain barrel* dalam menampung air hujan dan mengurangi puncak debit banjir.

Tabel 9 Parameter pemodelan *rain barrel*

Parameter	Tinggi 1320 mm	Tinggi 1190 mm	Keterangan
<i>Flow Coefficient</i>	6,06	5,75	-
<i>Flow Exponent</i>	0,5	0,5	Nilai default SWMM
<i>Offset</i>	0	0	Diletakkan di atas tanah
<i>Drain Delay</i>	12 jam	12 jam	-
<i>Open Level</i>	1.200 mm	1.000 mm	-
<i>Closed Level</i>	100 mm	100 mm	

Berdasarkan hasil simulasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 10 dan 11, dapat dijelaskan bahwa pemanfaatan *rain barrel* menunjukkan efektivitas yang berbeda-beda tergantung pada skenario yang diterapkan. Pada Skenario 1 dan 2, rain barrel belum mampu mengurangi debit puncak, namun berhasil menurunkan volume limpasan sebesar 5,66%. Skenario 3 menunjukkan perbaikan dengan penurunan debit puncak sebesar 5,99% dan penurunan volume limpasan sebesar 9,43%. Skenario 4 terbukti paling efektif dengan penurunan debit puncak sebesar 19,66% dan penurunan volume limpasan sebesar 15,09%. Hasil ini mengindikasikan bahwa dengan desain dan implementasi yang optimal, *rain barrel* dapat menjadi solusi efektif untuk mengendalikan kelebihan limpasan permukaan sekaligus mereduksi dampak pembangunan kawasan.

Tabel 10 Persentase Penurunan Debit Banjir dengan Rain Barrel

Kondisi	Nilai (m ³ /s)	Persentase Penurunan (%)
Debit puncak sebelum terbangun	0,96	
Debit puncak sesudah terbangun	1,17	
Debit puncak skenario 1	1,17	0
Debit puncak skenario 2	1,17	0
Debit puncak skenario 3	1,10	5,99
Debit puncak skenario 4	0,94	19,66

Tabel 11 Persentase Penurunan Volume Limpasan dengan Rain Barrel

Kondisi	Nilai (m ³)	Persentase Penurunan (%)
Volume limpasan sebelum terbangun	380	
Volume limpasan sesudah terbangun	530	
Volume limpasan skenario 1	500	5,66
Volume limpasan skenario 2	500	5,66
Volume limpasan skenario 3	480	9,43
Volume limpasan skenario 4	450	15,09

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, pembangunan kawasan perumahan seluas 10,75 hektar terbukti memberikan dampak hidrologis yang signifikan. Kondisi setelah pembangunan menunjukkan peningkatan debit puncak sebesar 21,87% dari 0,96 m³/s menjadi 1,17 m³/s untuk periode ulang 2 tahun. Tidak hanya itu, volume limpasan juga mengalami kenaikan yang cukup besar yaitu 39,47% dari 380 m³ menjadi 530 m³.

Penerapan rain barrel sebagai bagian dari strategi *Low Impact Development* (LID) menunjukkan tingkat efektivitas yang beragam. Simulasi mengungkapkan bahwa konfigurasi *rain barrel* memegang peranan krusial. Skenario dengan satu rain barrel per rumah ternyata tidak mampu mengurangi debit puncak, meski berhasil menurunkan volume limpasan sebesar 5,66%. Di sisi lain, Skenario 4 yang menggunakan dua rain barrel berukuran besar (diameter 1.410 mm dan tinggi 1.190 mm) per rumah terbukti paling optimal. Konfigurasi ini berhasil menurunkan debit puncak hingga 19,66% atau hampir mendekati kondisi sebelum pembangunan, sekaligus mengurangi volume limpasan sebesar 15,09%.

Beberapa hal yang perlu dilakukan untuk meningkatkan kualitas hasil studi ini antara lain: (1) validasi parameter tanah melalui uji infiltrasi langsung di lapangan diperlukan untuk memastikan akurasi nilai CN; (2) *rain barrel* perlu disimulasikan dalam kondisi hujan beruntun untuk mengevaluasi kinerja riil selama musim hujan; dan (3) diversifikasi pola hujan dengan berbagai durasi dan intensitas akan memberikan analisis respons sistem yang lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada Pusat Studi Sumber Daya Air, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan atas dukungannya dalam menyediakan dana untuk mendukung keberhasilan pelaksanaan kegiatan studi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aad, M. P. A., Suidan, M. T., & Shuster, W. D. (2010). Modeling techniques of best management practices: Rain barrels and rain gardens using EPA SWMM-5. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 434–443. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000207](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000207)
- Abduljaleel, Y., & Demissie, Y. (2022). Identifying cost-effective Low-Impact Development (LID) under climate change: a multi-objective optimization approach. *Water Resources Management*, 36(8), 2565–2582. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03158-5>
- Arjenaki, M. O., Sanayei, H. R. Z., Heidarzadeh, H., & Mahabadi, N. A. (2021). Modeling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City). *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(1). <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00870-2>
- Ashley, R., & Smith, B. (2024). Urban drainage. *ICE handbook of urban drainage practice* (pp. 1–20). <https://doi.org/10.1680/icehudp.41783.001>
- Aves, F. A. (2022). Rain barrel implementation for urban runoff mitigation. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 7(2), 255–260.
- Bai, Y., Zhao, N., Zhang, R., & Zeng, X. (2018). Storm water management of low impact development in urban areas based on SWMM. *Water (Switzerland)*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/w11010033>
- Barreiro, J., Santos, F., Ferreira, F., Neves, R., & Marques, J. S. (2023). Development of a 1D/2D urban flood model using the Storm Water Management Model (SWMM). *Sustainability*, 15(1), 707. <https://doi.org/10.3390/su15010707>
- Bhavyashree, S., & Bhattacharyya, B. (2018). Fitting probability distributions for rainfall analysis of Karnataka, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(03), 1498–1506. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.703.178>
- Dinas Kependudukan dan Pencatatan Sipil Kota Bogor. (2022). Data Jumlah Penduduk Kota Bogor Tahun 2022. Pemerintah Kota Bogor.
- FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, & JRC. (2012). Harmonized World Soil Database (version 1.2). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/>
- Harsanto, P., Prihatmanti, H. E., & Wisnulingga, B. K. (2022). Aplikasi metode Nash pada perhitungan limpasan langsung menggunakan data hujan GPM 3IMERGHH studi kasus SubDAS Winongo Hulu. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 1(2), 121–132. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v1i2.27>

- Hasan, H. H., Razali, S. F. M., Zaki, A. Z. I. A., & Hamzah, F. M. (2019). Integrated hydrological-hydraulic model for flood simulation in tropical urban catchment. *Sustainability (Switzerland)*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/su11236700>
- Hidayah, E., & Farid, M. (2023). Enhancing stormwater management with low impact development (LID): a review of the rain barrel, bioretention, and permeable pavement applicability in Indonesia. *Water Science and Technology*, 87(9), 2345–2361. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.095>
- Hosseinzadehtaleei, A., & Radtke, K. (2014). Homogeneity and trend analysis of extreme precipitation indices in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 118(3–4), 481–495.
- Hosseinzadehtaleei, A., Tabari, H., & Willems, P. (2020). Statistical quality control of extreme precipitation data: A review of methods and recommendations. *Journal of Hydrology*, 583, 124–145.
- Jennings, A. A., Adeel, A. A., Hopkins, A., Litofsky, A. L., & Wellstead, S. W. (2013). Rain barrel–urban garden stormwater management performance. *Journal of Environmental Engineering*, 139(5), 757–765. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000663](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000663)
- Kartika, D., Nomeritae, N., & Kamiana, I. M. (2023). Evaluasi data curah hujan satelit TRMM Dan GPM terhadap data curah hujan observasi di Kalimantan Tengah. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 11(1), 28–39. <https://doi.org/10.33084/mits.v11i1.4033>
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2014). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 12/PRT/M/2014 Tahun 2014 tentang Penyelenggaraan Sistem Drainase Perkotaan. Jakarta.
- Laksmi, G. S. (2020). Impact of land use change and rainfall on flooding in Pekalongan City, Central Java. *Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal ke-8 tahun 2020*, 382–391.
- Litofsky, A. L., & Jennings, A. A. (2014). Evaluating rain barrel storm water management effectiveness across climatology zones of the United States. *Journal of Environmental Engineering*, 140(2), 04013011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000815](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000815)
- Liu, Y., Zhang, K., & Li, Y. (2023). Performance assessment of rain barrels for urban stormwater management: a meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 347, 119128. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119128>
- Luan, Q., Fu, X., Song, C., Wang, H., Liu, J., & Wang, Y. (2017). Runoff effect evaluation of LID through SWMM in typical mountainous, low-lying urban areas: A case study in China. *Water (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/w9060439>
- Mekonnen, G., Melesse, A. M., & Zeleke, G. (2021). Bias correction of GPM IMERG precipitation products using ground-based observations. *Remote Sensing*, 13(3), 451. <https://doi.org/10.3390/rs1303045>
- Muliawati, D. N., & Mardiyanto, M. A. (2015). Perencanaan penerapan sistem drainase berwawasan lingkungan (eko-drainase) menggunakan sumur resapan di kawasan Rungkut. *Jurnal Teknik ITS*, 4(1), D16–D20. <http://ejournal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/8833>
- Musakkir, N. A., Sunusi, N., & Thamrin, S. A. (2023). Stochastic model of the annual maximum rainfall series using probability distributions. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 19(5), 2945. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v19n5.2945>
- Qin, H., Li, Z., & Fu, G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, 129, 577–585. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>
- Sañudo, E., Cea, L., & Puertas, J. (2020). Modelling pluvial flooding in urban areas coupling the models iber and SWMM. *Water (Switzerland)*, 12(9), 0–15. <https://doi.org/10.3390/w12092647>
- United States Environmental Protection Agency. (2015). *Storm Water Management Model user's manual version 5.1*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.
- USDA Soil Conservation Service. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds (Technical Release 55, TR-55)*. U.S. Department of Agriculture.

- Syaifuddin, Hamire, A., & Dahlan. (2013). Hubungan antara Jumlah penduduk dengan alih fungsi lahan di Kecamatan Somba Opu Kabupaten Gowa. *Jurnal Agrisistem*, 9(2), 169–179. <http://www.polbangtan-gowa.ac.id/repository/dahlan/Hubungan-Antara-Jumlah-Penduduk-Dengan-Alih-Fungsi-Lahan-Di-Kecamatan-Somba-Opu-Kabupaten-Gowa.pdf>
- Yudianto, D., Fitriana, F., Wicaksono, A., & Senjaya, T. (2023). Studi pengendalian banjir Sungai Cileuwibangke akibat pembangunan kawasan perumahan di Kota Bogor, Jawa Barat. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 14(2), 119–129. <https://doi.org/10.32679/jth.v14i2.741>