

Research Article

Simulasi Pengendalian Limpasan Permukaan dengan Penerapan *Low-Impact Development* di Kawasan Perumahan

Agus L. Yuono^{1,*}, Sakura Y. Iryani¹, Febrinasti Alia¹, dan Muhammad B. Al Amin¹

¹Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

Received: 20 September 2024, Accepted: 25 November 2024, Published: 28 November 2024

Abstract

Applying the Low-Impact Development (LID) approach in urban drainage systems can help control surface runoff, therefore mitigating the potential of flooding risk. However, its effectiveness varies widely, and various technical factors influence its performance. This study aims to determine the effectiveness and performance of LID units, namely bioretention and infiltration wells, in controlling surface runoff. The Center Park Housing area, covering an area of 11.53 hectares located in Palembang City, was chosen as the study area. The ability of the LID unit to reduce the volume and discharge of runoff, as well as the runoff coefficient, was simulated using the Storm Water Management Model (SWMM) program based on input from various design rainfall cases. There were four simulated design rainfalls, i.e. 108.76 mm (2-year return period), 133.20 mm (5-year), 149.38 mm (10-year), and 169.82 mm (25-year). The LID unit implementation scenarios were varied with the number of infiltration well units of 1 - 4 units per house plot. The number and area of bioretention units were considered constant for all scenarios. The simulation results show that the LID implementation can reduce runoff volume and peak discharge and help decrease the runoff coefficient in the study area effectively, especially in the case of lower design rainfall (2-year). The performance of the infiltration wells unit in producing runoff losses is better than the bioretention unit because its construction structure has a larger storage capacity for a similar unit area. Although the LID method is quite effective in reducing runoff, its combination with conventional methods may produce better performance, so further research that discusses this needs to be addressed.

© 2024 published by Sriwijaya University

Keywords: *flooding risk, hydrologic model, LID, rainfall-runoff, SWMM.*

1. PENDAHULUAN

Wilayah perkotaan merupakan kawasan yang kerap mengalami permasalahan genangan banjir. Keadaan banjir yang terjadi dapat menimbulkan kerugian yang sangat besar, diantaranya adalah kerusakan pemukiman (tempat tinggal), gangguan aktivitas, kerugian ekonomi, kerusakan lingkungan suatu wilayah, dan bahkan kehilangan jiwa manusia [1]. Saat ini tekanan dan risiko pada sistem air di wilayah perkotaan semakin meningkat akibat perubahan besar pada lingkungan alamnya [2]. Urbanisasi yang cepat menyebabkan area kedap air semakin luas dan berkurangnya infiltrasi ke dalam tanah, dengan konsekuensinya peningkatan volume limpasan dan risiko banjir yang semakin tinggi [3].

Konsep eko-drainase merupakan paradigma baru pengelolaan air di negara-negara berkembang khususnya Indonesia yang menekankan upaya konservasi dan penggunaan fitur alami untuk

melindungi kualitas air serta menjaga keseimbangan hidrologi suatu wilayah agar sama kondisinya saat sebelum dan sesudah pembangunan [4]. Praktik eko-drainase telah diadopsi di beberapa negara lain dan dikenal dengan terminologi yang berbeda-beda [5]. Terminologi *Low-Impact Development (LID)* dikenal dan dipakai di Kanada dan Amerika Serikat [6]. Disamping itu, dikenal juga istilah *Water Sensitive Urban Design (WSUD)* yang dipakai di Australia, dan istilah *Sustainable Urban Drainage System (SUDS)* yang dipakai di Inggris [5]. Paper ini selanjutnya akan menggunakan istilah *Low-Impact Development (LID)* untuk merujuk pada infrastruktur hijau yang diteliti.

Eckart dkk. [7] menyebutkan bahwa praktik LID ditujukan untuk menahan air di tempatnya (*onsite*) agar dapat diresapkan ke dalam tanah untuk melindungi kualitas air. Zhao dan Meng [8] juga menyebutkan hal yang serupa dimana penerapan LID memiliki potensi besar untuk mengurangi limpasan

dan meningkatkan kualitas air dari wilayah perkotaan sebagaimana kondisi lingkungan yang alami melalui berbagai infrastruktur hijau (*green infrastructures*). Sistem drainase yang menerapkan LID dapat menurunkan tingkat risiko banjir di wilayah perkotaan [9] dan menjadi efektif dalam proyek mitigasi banjir perkotaan [3]. Lebih jauh, konsep LID dapat meningkatkan ketahanan suatu kota yang menjadi bagian dari strategi adaptasi perubahan iklim [10]. Konsep LID merupakan sistem yang lebih efektif dibandingkan dengan sistem drainase konvensional [6]. Konsep ini sangat cocok untuk diaplikasikan pada wilayah perkotaan yang memiliki luasan lahan yang terbatas dengan memanfaatkan lahan sekitar sebanyak mungkin [11]. Oleh karena itu, sudah seharusnya praktik LID diadopsi untuk rencana pengembangan wilayah perkotaan dalam konteks apapun sehingga setiap komponennya akan mendukung keberlanjutan pembangunan bagi sistem secara keseluruhan [12].

Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai studi telah dilakukan untuk menginvestigasi kinerja infrastruktur LID dalam strategi pengendalian banjir di wilayah perkotaan. Penelitian yang dilakukan oleh Palermo dkk. [9] pada daerah tangkapan hujan San Domenico, Italia selatan menunjukkan bahwa penerapan LID dapat mereduksi volume limpasan sebesar 25,9% dan puncak limpasan sebesar 31,4% meskipun hanya diterapkan pada area yang terbatas seluas 30% dari total luasan wilayah studi. Performa yang hampir sama juga disebutkan dalam Li dkk. [3] dimana hasil investigasinya pada kawasan ekonomi Bandara Tianjin, China bagian utara menunjukkan bahwa penurunan volume limpasan dengan kisaran 4 – 23% dan debit puncak dengan kisaran 4 – 39% dapat dicapai dengan penerapan praktik ekodrainase. Persentase yang lebih tinggi disebutkan dalam Movahedinia dkk. [13] yang melakukan penelitian pada kawasan pemukiman di Distrik 13 Kota Tehran, Iran dimana penerapan LID dapat menurunkan volume limpasan sebesar 52%. Penelitian yang dilakukan oleh Guo dkk. [14] pada daerah tangkapan hujan di Distrik Licang, Tsingtao, Shandong memberikan hasil reduksi limpasan pada kisaran 20,7% sampai dengan 63,2%. Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Ghodsi dkk. [15] menyebutkan bahwa dengan penerapan komponen LID yang tepat maka dengan luasan yang kurang dari 1% dapat dihasilkan reduksi volume limpasan sebesar 14%. Meskipun demikian, penelitian-penelitian serupa yang dilakukan di wilayah Indonesia terbilang masih sangat minimal dan terbatas. Oleh karena itu, kinerja dari infrastruktur LID dalam mengendalikan limpasan permukaan belum dapat diketahui dengan jelas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui performa dan efektivitas unit LID berupa bioretensi dan sumur resapan dalam mengendalikan limpasan permukaan. Kemampuan unit LID dalam mereduksi volume dan debit limpasan, serta koefisien limpasan disimulasikan dengan program *Storm Water Management Model (SWMM)* berdasarkan input kasus hujan rancangan yang bervariasi. Kedua unit LID tersebut dipilih karena merupakan infrastruktur yang paling cocok dan mungkin untuk diterapkan di lokasi studi yang berupa kawasan perumahan. Disamping itu, bioretensi merupakan unit LID yang paling sering diteliti sehingga akan dengan mudah diperoleh gambaran perbandingannya dengan hasil penelitian ini. Adapun sumur resapan merupakan unit LID yang telah dikenal luas di Indonesia, namun pemodelannya dengan program SWMM belum pernah dilakukan. Penelitian ini juga memberikan gambaran bagaimana unit sumur resapan dapat dimodelkan di dalam program SWMM meskipun modul LID yang dikhususkan untuk unit tersebut belum tersedia di dalam SWMM [16].

2. METODE

Lokasi Penelitian

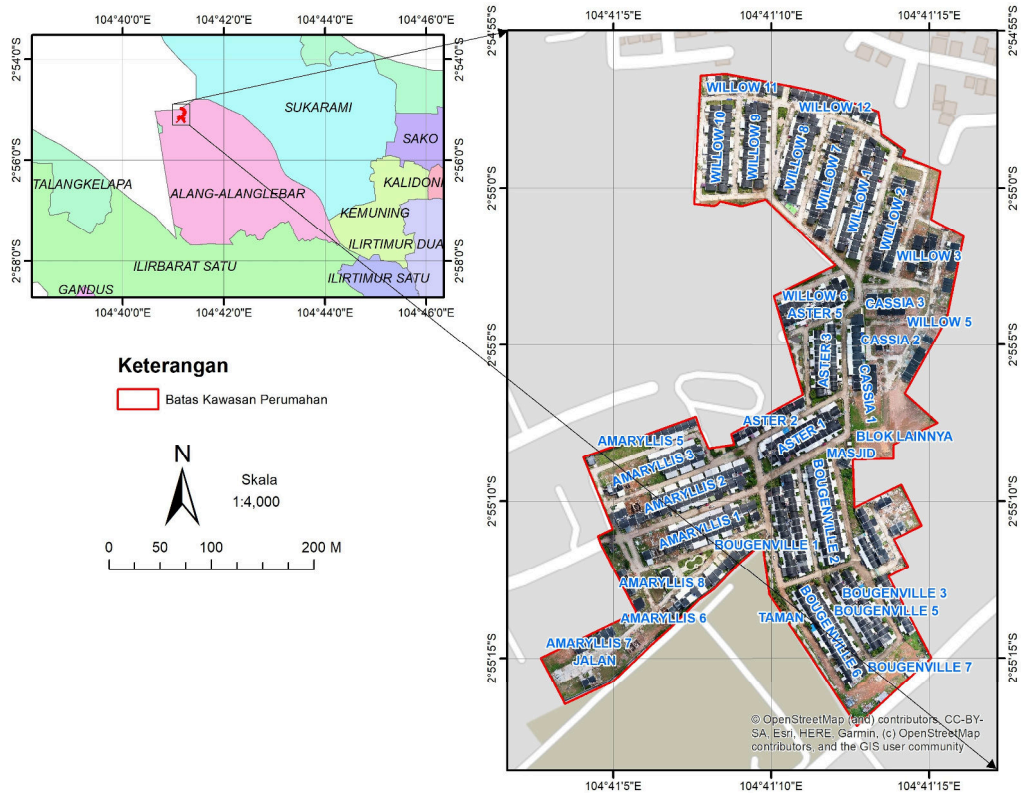
Kawasan perumahan yang menjadi lokasi penelitian ini adalah Perumahan *Center Park* seluas 11,53 hektar yang terletak di Kecamatan Alang-Alang Lebar, Kota Palembang, Sumatera Selatan. Kawasan ini telah dibangun sejak tahun 2015 dengan konsep *green residence* yang mana saat ini sudah terbangun hampir 100 persen. Perumahan ini bersebelahan dengan Rumah Sakit Ernaldi Bahar di sebelah selatan dan Jalan Bypass Alang-Alang Lebar di sebelah barat. Kondisi topografi di kawasan ini relatif landai dengan kemiringan lahan rata-rata sebesar 2,67%. Sebelum dibangun, kawasan ini berupa kebun pohon karet yang cukup luas. Gambar 1 memberikan peta lokasi penelitian ini.

Sistem Drainase

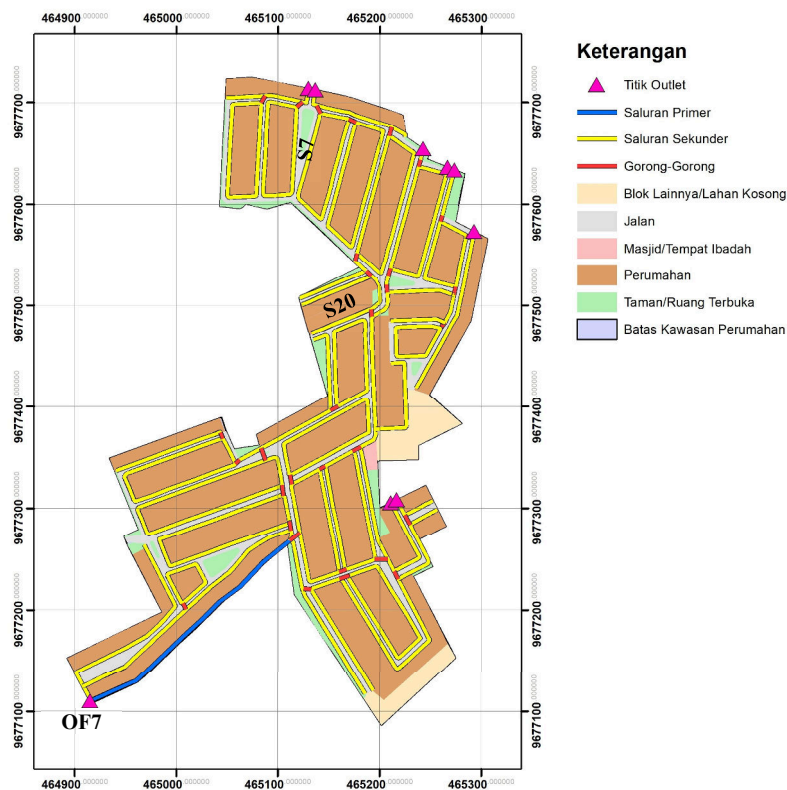
Sistem drainase di lokasi studi berupa saluran-saluran terbuka beton persegi empat yang berada di samping jalan-jalan perumahan. Khusus saluran yang melintang dan memotong jalan digunakan gorong-gorong yang terbuat dari buis beton. Air limpasan hujan dari setiap petak rumah dialirkan melalui saluran sekunder yang kemudian terkumpul dan mengalir ke saluran primer. Selanjutnya dari saluran primer air tersebut dialirkan dan dibuang keluar dari kawasan perumahan. Saluran sekunder memiliki variasi ukuran lebar 22 – 66 cm dan tinggi 22 – 85 cm, sedangkan saluran primer memiliki ukuran lebar dan tinggi masing-masing adalah 95 cm dan 145 cm. Adapun gorong-gorong yang digunakan terdapat dua

jenis, yaitu lingkaran dan persegi empat. Gorong-gorong lingkaran memiliki ukuran diameter bervariasi 52 – 56 cm, sedangkan gorong-gorong persegi empat memiliki ukuran lebar bervariasi 42 –

90 cm dan tinggi 30 – 60 cm. Gambar 2 menyajikan peta dari sistem drainase di lokasi penelitian berdasarkan hasil survei dan pengukuran di lapangan.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian [17]



Gambar 2. Peta sistem drainase dan tata guna lahan [17]

Tabel 1. Tata guna lahan dan parameter-parameter hidrologi di lokasi studi [17]

Penggunaan Lahan	Luasan (ha)	Persentase Luas (%)	HSG	CN	Imperv (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)
Perumahan	8,13	70,57	C	85	65	0,012	0,15	1,905	3,8
Taman/Ruang Terbuka	0,65	5,67	C	69	25	0,012	0,15	1,905	3,8
Jalan	2,22	19,28	C	98	95	0,011	0,15	1,27	3,8
Masjid/Tempat Ibadah	0,04	0,38	C	80	65	0,012	0,15	1,905	3,8
Blok Lainnya/Lahan Kosong	0,47	4,10	C	85	65	0,012	0,15	1,905	3,8
Total	11,53	100,00							

Keterangan:

- HSG = hydrologic soil group
- CN = curve number
- N-Imperv = Manning's roughness coefficient for impervious area
- N-Perv = Manning's roughness coefficient for pervious area
- Dstore Imperv = depression storage for impervious area
- Dstore Perv = depression storage for pervious area

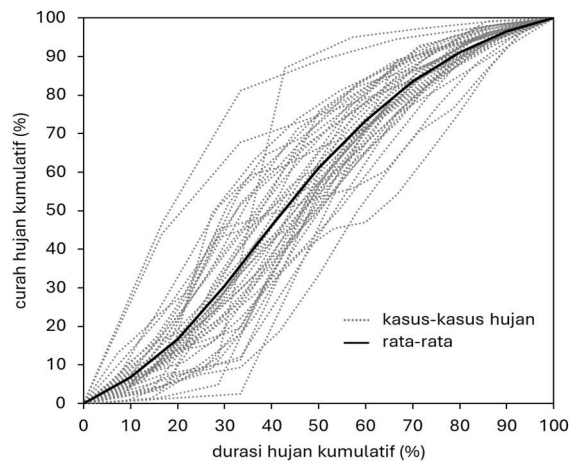
Tata Guna Lahan

Tata guna lahan di lokasi studi sebagian besar berupa blok perumahan (70,57%) seperti yang diberikan dalam Gambar 2. Terdapat lima blok perumahan (Gambar 1), yaitu blok Willow, Aster, Cassia, Bougenville, dan Amaryllis. Luas petak kavling rumah berkisar antara 100 – 200 m² dengan ukuran bangunan rumah bervariasi tipe 38 – 54. Disamping blok perumahan, penggunaan lahan lainnya adalah taman atau ruang terbuka (0,65%), jalan perkerasan beton (2,22%), masjid (0,04%), dan blok lainnya yang belum terbangun atau lahan kosong (0,47%). Jenis tanah asli di kawasan ini berupa tanah humus dengan kemampuan resapan yang rendah sampai sedang (HSG tipe C). Permeabilitas tanah di lokasi studi adalah sebesar 6,6 mm/jam. Tabel 1 menyajikan rincian tata guna lahan berikut parameter-parameter hidrologi yang digunakan dalam pemodelan daerah tangkapan hujan di lokasi studi. Parameter-parameter hidrologi tersebut diperkirakan dengan merujuk pada nilai-nilai yang direkomendasikan dalam SWMM [18].

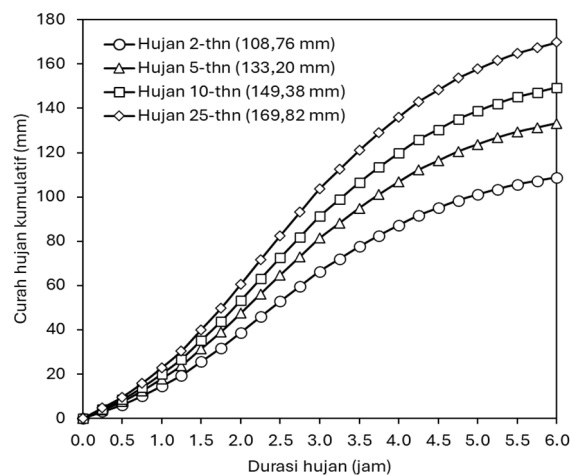
Hujan Rancangan

Curah hujan rancangan yang disimulasikan dalam penelitian ini terbagi menjadi empat periode ulang, yaitu 108,76 mm (2-tahun), 133,20 mm (5-tahun), 149,38 mm (10-tahun), dan 169,82 mm (25-tahun). Keempat periode ulang hujan tersebut dipilih berdasarkan standar perencanaan sistem drainase perkotaan [17], [19]. Setiap besaran hujan tersebut didistribusikan selama 6 jam durasi hujan. Durasi hujan ini adalah durasi hujan dominan dari kasus-kasus hujan deras yang diperoleh berdasarkan analisis hujan jam-jaman menggunakan data hujan satelit GSMaP selama sepuluh tahun terakhir. Gambar 3 dan 4 masing-masing menyajikan pola

agihan dan distribusi hujan untuk setiap besaran curah hujan rancangan yang disimulasikan. Kedua kurva massa hujan tersebut digambarkan sebagai hubungan antara persentase curah hujan kumulatif dan persentase durasi hujan kumulatif.



Gambar 3. Pola agihan hujan di lokasi studi



Gambar 4. Distribusi hujan rancangan yang disimulasikan

Intensitas hujan rancangan rata-rata dihitung sebagai hasil bagi antara curah hujan rancangan dan durasi hujan yang diekspresikan oleh Persamaan (1). Besaran kedalaman dan intensitas hujan tersebut dideskripsikan berdasarkan klasifikasi hujan BMKG [20] seperti yang disajikan dalam Tabel 2.

$$I_T = \frac{P_T}{t} \tag{1}$$

dimana:

I_T : intensitas hujan rancangan rata-rata (mm/jam)

P_T : curah hujan rancangan (mm)

t : curah hujan (jam)

T : periode ulang (tahun)

Tabel 2. Klasifikasi curah hujan rancangan

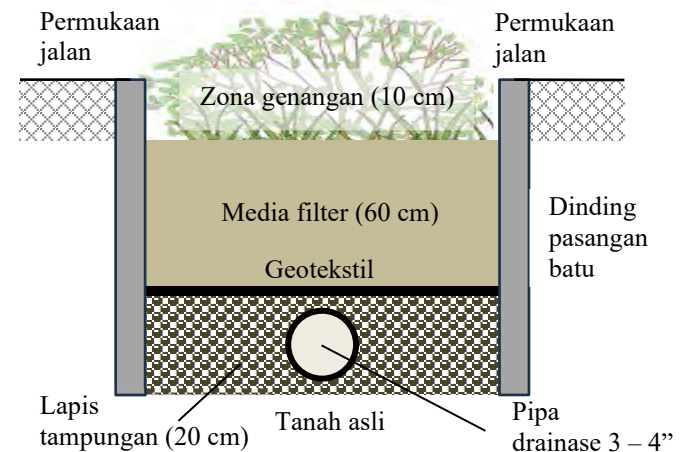
T (tahun)	P_T (mm)	t (jam)	I_T (mm/jam)	Klasifikasi Hujan
2	108,76	6	18,13	Sangat lebat dengan intensitas lebat
5	133,20	6	22,20	Sangat lebat dengan intensitas sangat lebat
10	149,38	6	24,90	Sangat lebat dengan intensitas sangat lebat
25	169,82	6	28,30	Ekstrem dengan intensitas sangat lebat

Desain dan Skenario Infrastruktur LID

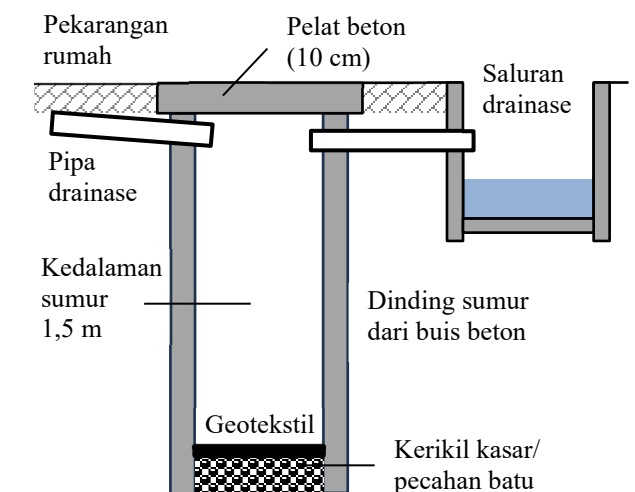
Terdapat dua jenis infrastruktur LID yang diterapkan di lokasi studi, yaitu bioretensi (*bioretention*) atau taman hujan (*rain garden*) dan sumur resapan (*infiltration/recharge well*). Konstruksi unit bioretensi terdiri dari lapisan media filter (campuran tanah-pasir) dan lapisan tampungan (kerikil halus) di bawahnya (Gambar 5). Antara keduanya dipasang lapisan geotekstil yang bersifat permeabel (lolos air). Pada permukaan media filter ditanami dengan vegetasi yang sekaligus menjadi zona genangan sementara. Dimensi dan karakteristik setiap lapisan bioretensi yang diaplikasikan dalam penelitian ini merujuk pada desain tipikal bioretensi dalam standar SUDS [21] dan ABC Waters [22]. Unit bioretensi diterapkan dengan mengganti taman-taman atau ruang terbuka hijau yang sudah ada di lokasi studi (Gambar 7). Oleh karena itu, luasan setiap unit bioretensi ini menyesuaikan dengan luasan taman dan ruang terbuka hijau eksisting. Adapun sumur resapan dipilih karena limpasan air hujan yang akan dikelola sebagian besar berasal dari blok perumahan (Gambar 7). Konstruksi sumur resapan berupa sumur dangkal yang dindingnya terbuat dari buis beton (Gambar 6). Luas penampang melintang setiap unit sumur resapan direncanakan sebesar 1,0 m² dengan kedalaman 1,5 m yang merujuk pada SNI 8456:2017. Unit bioretensi dimodelkan dalam SWMM menggunakan modul *bio-retention cell*, sedangkan unit sumur resapan dimodelkan dengan menggunakan modul *infiltration trench*. Hal ini disebabkan karena dalam SWMM belum tersedia modul khusus untuk memodelkan

sumur resapan [16]. Meskipun demikian, digunakannya modul ini karena yang paling mendekati dengan karakteristik sumur resapan. Tabel 3 menyajikan rincian parameter-parameter desain untuk pemodelan kedua unit LID tersebut.

Implementasi dari setiap infrastruktur LID divariasikan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap reduksi limpasan air hujan. Terdapat empat skenario yang disimulasikan yang mana jumlah sumur resapan divariasikan antara 1 – 4 unit per petak rumah (Tabel 4). Penentuan jumlah ini merujuk pada standar jumlah unit sumur resapan yang direkomendasikan berdasarkan luasan atap bangunan rumah oleh Kementerian Negara Lingkungan Hidup [23]. Sebagai contoh, misalnya dalam satu blok terdapat 10 petak rumah, maka jumlah unit sumur resapan yang disimulasikan berjumlah 10 – 40 unit. Adapun jumlah dan luasan dari unit bioretensi dianggap tetap untuk semua skenario simulasi. Persentase luas total unit LID yang diimplementasikan terhadap luas total wilayah studi adalah kurang dari 10% (6,61 – 8,34%) atau seluas 0,76 – 0,96 hektar.



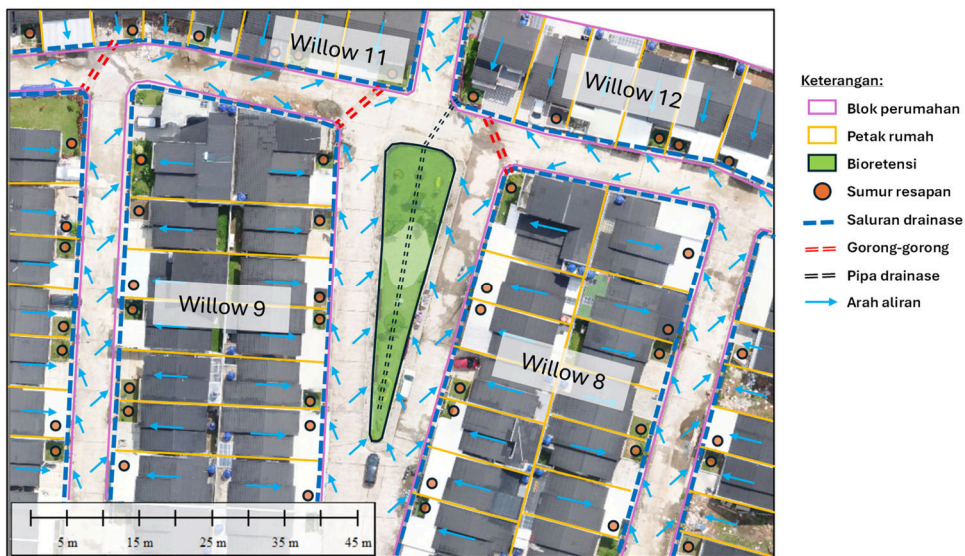
Gambar 5. Desain tipikal bioretensi atau taman hujan



Gambar 6. Desain tipikal sumur resapan

Tabel 3. Parameter-parameter desain bioretensi dan sumur resapan yang dimodelkan dalam SWMM

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan / Referensi
1. Bioretensi/Taman Hujan			
Modul <i>bio-retention cell</i>			
a. <i>Surface layer</i>			
- <i>berm height</i>	100	mm	[24]
- <i>vegetation volume fraction</i>	0,2	-	[24]
- <i>surface roughness</i>	0,41	-	[25]
- <i>surface slope</i>	1,0	%	[24]
b. <i>Soil layer</i>			
- <i>thickness</i>	600	mm	[21], [24]
- <i>porosity</i>	0,38	-	[24]
- <i>field capacity</i>	0,105	-	[24]
- <i>wilting point</i>	0,047	-	[24]
- <i>conductivity</i>	200	mm	[21], [22]
- <i>conductivity slope</i>	10,0	-	[24]
- <i>suction head</i>	19,63	mm	[24]
- <i>% initially saturated (moisture content)</i>	20,0	%	[24]
c. <i>Storage layer</i>			
- <i>thickness</i>	200	mm	[21], [22]
- <i>void ratio</i>	0,65	-	[24]
- <i>seepage rate</i>	6,6	mm/jam	[24]
- <i>clogging factor</i>	0	-	[24]
d. <i>Subsurface drainage</i>			
- <i>flow coefficient</i>	1,0	-	[24]
- <i>flow exponent</i>	0,5	-	[24]
- <i>offset</i>	100	mm	[21], [22]
2. Sumur Resapan			
Modul <i>infiltration trench</i>			
a. <i>Surface layer</i>			
- <i>berm height</i>	100	mm	[24]
- <i>vegetation volume</i>	0	-	[24]
- <i>surface roughness</i>	0,013	-	[25]
- <i>surface slope</i>	0	%	[24]
b. <i>Storage layer</i>			
- <i>thickness</i>	1500	mm	SNI 8456:2017
- <i>void ratio</i>	0,99	-	SNI 8456:2017
- <i>seepage rate</i>	6,6	mm/jam	[24]
- <i>clogging factor</i>	0	-	[24]
- <i>% initially saturated (depth/storage)</i>	0	%	[24]



Gambar 7. Skema sistem drainase dengan implementasi LID di lokasi studi. Dalam gambar ini diilustrasikan penempatan unit bioretensi yang menggantikan taman eksisting, sedangkan unit sumur resapan ditempatkan di pekarangan rumah. Luas pekarangan dapat dibangun 1 – 4 unit sumur resapan yang dipasang secara seri.

Tabel 4. Skenario implementasi infrastruktur LID

Skenario	Kode	%Luas (%)*	Keterangan
1	BRC+RW1	6,61	Bioretensi dan sumur resapan 1 unit/petak rumah
2	BRC+RW2	7,18	Bioretensi dan sumur resapan 2 unit/petak rumah
3	BRC+RW3	7,76	Bioretensi dan sumur resapan 3 unit/petak rumah
4	BRC+RW4	8,34	Bioretensi dan sumur resapan 4 unit/petak rumah

*) Persentase luas dihitung sebagai rasio antara luas total LID yang diimplementasikan terhadap luas total wilayah studi.

BRC = *bio-retention cell*

RW = *recharge well*

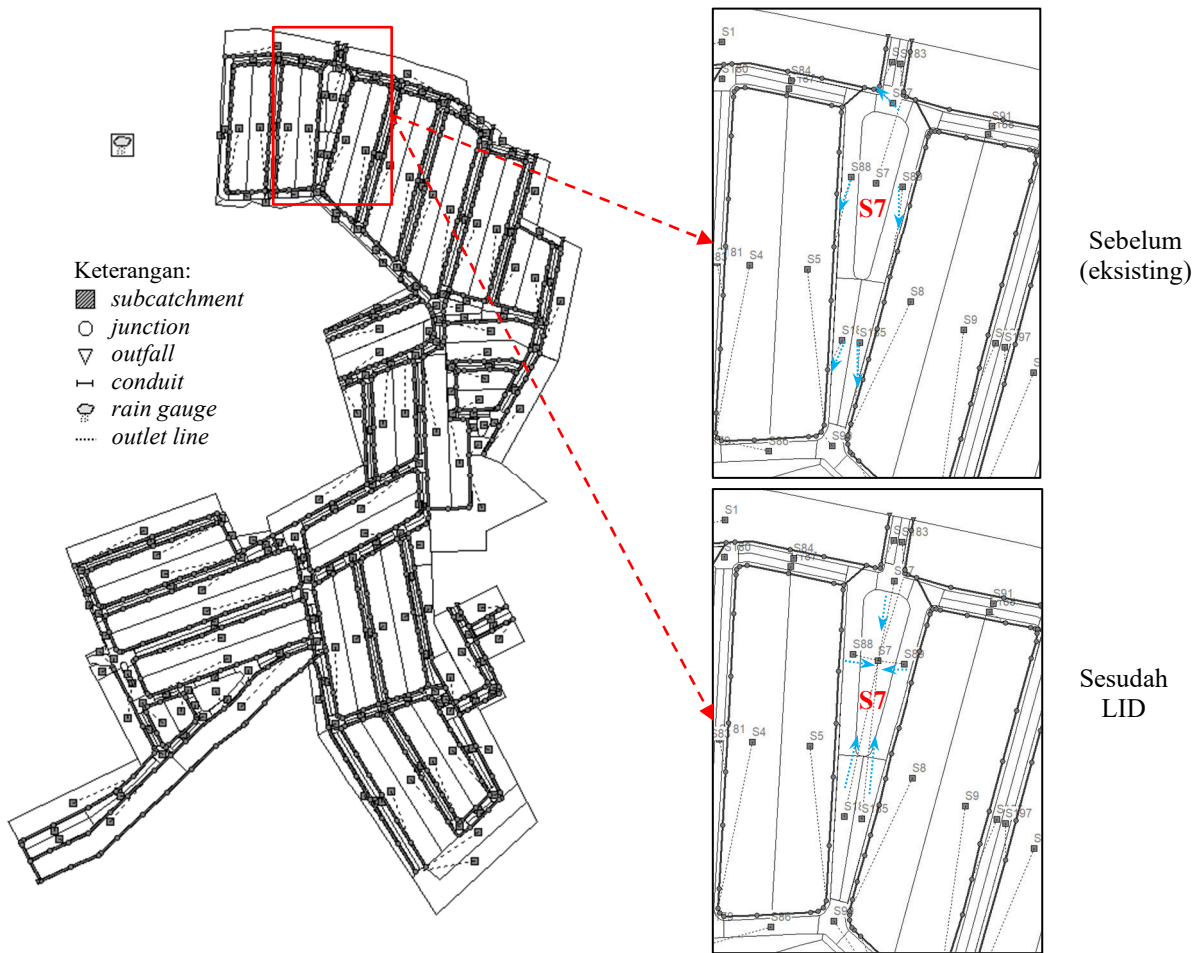
Model SWMM

Pemodelan dan simulasi sistem drainase di lokasi studi dilakukan menggunakan program *Storm Water Management Model (SWMM)* versi 5.2 yang dikembangkan oleh US EPA. Model ini dapat mensimulasikan proses hujan-aliran dari daerah tangkapan hujan dan saluran drainase secara dinamis [18]. Model SWMM merupakan model yang sudah dikenal dengan baik dan digunakan secara luas untuk pemodelan sistem drainase terutama pemodelan LID [16], [26].

Model SWMM merepresentasikan suatu daerah tangkapan hujan dengan komponen *subcatchment*, sedangkan saluran drainase direpresentasikan dengan jejaring *junction-conduit*. Adapun input hujan direpresentasikan dengan komponen *rain gage* [27]. Sistem drainase dari lokasi studi dimodelkan menjadi sebanyak 268 *subcatchments (S)*, 717 *junctions (J)*, 9 *outfalls (OF)*, dan 743 *conduits (C)*. Hal ini menunjukkan bahwa pemodelan sistem drainase di lokasi studi dilakukan dengan sangat detil pada skala mikro. Gambar 8 memberikan model sistem drainase yang disimulasikan menggunakan program SWMM. Pada kondisi eksisting (sebelum LID), setiap komponen dimodelkan mengikuti kondisi asli dari sistem drainase di lokasi studi, sedangkan pada kondisi sesudah LID dilakukan modifikasi komponen *subcatchment* dengan menambahkan unit-unit LID dan juga mengubah pola outlet aliran dari daerah tangkapan hujan di sekitar unit-unit LID tersebut. Desain unit LID baik bioretensi maupun sumur resapan diterapkan pada properti *subcatchment* yang bernama *LID Controls* [18]. Dalam properti ini, variasi jumlah dan luasan unit berikut kondisi awalnya dapat diatur berdasarkan

skenario simulasi implementasi LID (Tabel 4). Adapun skenario hujan rancangan yang disimulasikan (Gambar 4 dan Tabel 2) diterapkan pada properti *rain gage* yang bernama *Rainfall Time Series*. Dalam properti ini, seri data hujan rancangan diinputkan dengan interval waktu per 15 menit dengan total durasi hujan selama 6 jam. Untuk saluran drainase (*conduit*), semua saluran termasuk gorong-gorong dimodelkan menggunakan koefisien kekasaran Manning sebesar 0,013 yang mana merupakan nilai yang direkomendasikan untuk jenis saluran beton [28].

Proses hujan-aliran di komponen *subcatchment* menggunakan model kinematik (neraca air), dimana suatu daerah tangkapan hujan dimodelkan sebagai tampungan nonlinier [17], [25]. Adapun model kehilangan air akibat infiltrasi diatur menggunakan persamaan *Soil Conservation Service – Curve Number (SCS-CN)* [25], [29] yang mana kondisi awal dari kelembaban tanah relatif di setiap *subcatchment* dianggap dalam keadaan normal dengan tipe *antecedent moisture content II (AMC II)* [30]. Kondisi awal dari unit bioretensi direpresentasikan dengan nilai *%initially saturated* sebesar 20% (Tabel 3), yang mana dalam hal ini merupakan nilai lengas tanah awal dari media filter (lapisan tanah-pasir) yang ditentukan berdasarkan fungsi retensi air dalam tanah [31]. Berbeda dengan unit bioretensi, kondisi awal unit sumur resapan, yaitu *%initially saturated*, dianggap sama dengan nol (Tabel 3), yang berarti bahwa kondisi sumur di awal simulasi dalam keadaan kosong. Hal ini disebabkan karena elevasi muka air tanah di lokasi studi berada di bawah dari elevasi dasar sumur resapan yang direncanakan. Proses aliran di saluran drainase ditelusuri menggunakan model dinamik (*dynamic wave routing*), yang mana parameter-parameter aliran seperti kedalaman, kecepatan, dan debit aliran dihitung dengan menyelesaikan persamaan St. Venant sebagai fungsi ruang dan waktu [28]. Tahapan waktu simulasi untuk penelusuran hidrologi di *subcatchment* diatur sebesar 15 menit, sedangkan tahapan waktu penelusuran hidraulik di *junction-conduit* diatur sebesar 30 detik, sebagaimana penelusuran hidraulika aliran di saluran membutuhkan tahapan waktu yang lebih singkat. Panjang durasi simulasi adalah 12 jam yang mana dua kali dari durasi hujan yang disimulasikan (6 jam). Hal ini ditujukan untuk memperoleh luaran hidrograf limpasan di lokasi studi tidak hanya pada saat kejadian hujan, tapi juga setelah hujan berhenti (kondisi resesi).



Gambar 8. Model sistem drainase yang disimulasikan dengan program SWMM. Inzet: *subcatchment* S7 (taman) hanya mengelola air hujan yang ditangkap di unit tersebut saja (sebelum LID/kondisi eksisting), sedangkan pada skenario sesudah LID, *subcatchment* S7 ditambahkan unit bioretensi dan diatur agar menangkap dan mengelola limpasan air hujan dari *subcatchment* jalan di sekitarnya yang direpresentasikan oleh garis-garis outlet menuju unit tersebut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Reduksi Debit Puncak Limpasan

Besarnya penurunan debit puncak limpasan dihitung sebagai persentase dari rasio selisih penurunan debit setelah LID terhadap debit puncak eksisting yang diekspresikan sebagai:

$$RQ_p = \left(\frac{Q_{p0} - Q_{p1}}{Q_{p0}} \right) \times 100 \quad (2)$$

dimana:

- RQ_p : persentase reduksi debit puncak (%)
- Q_{p0} : debit puncak awal/eksisting (L/s)
- Q_{p1} : debit puncak setelah LID (L/s)

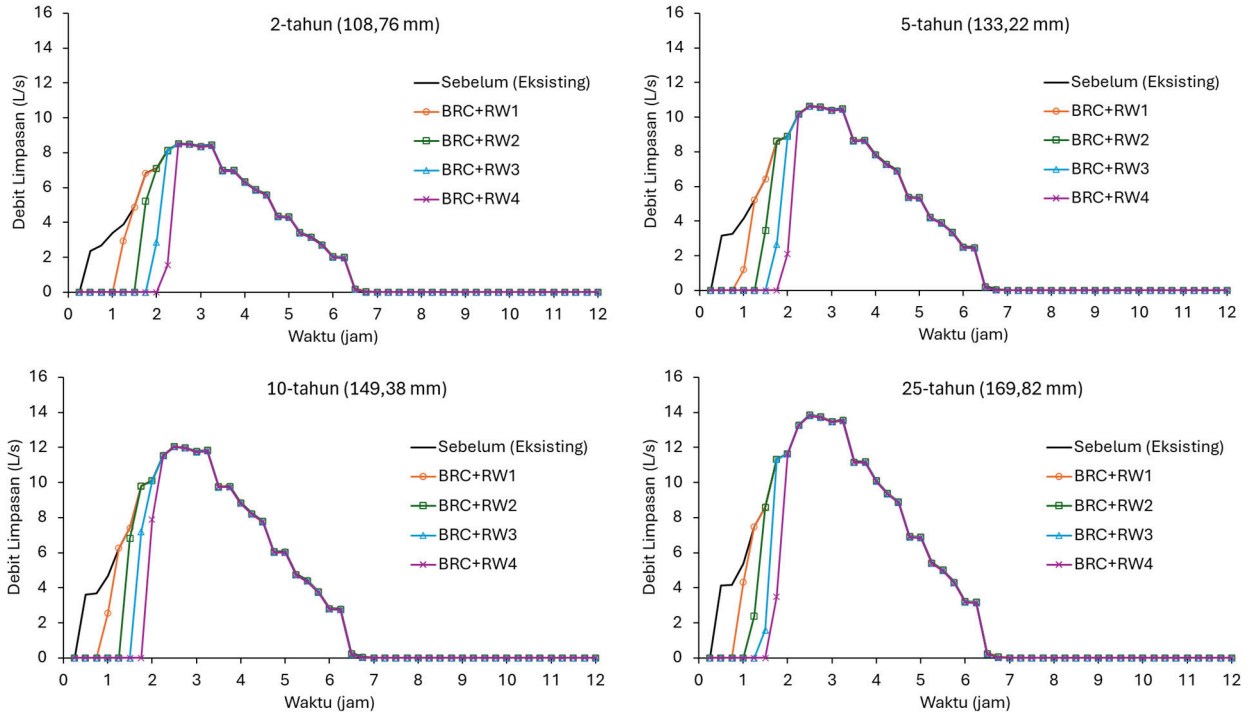
Pengaruh dari implementasi LID terhadap debit limpasan yang dihasilkan dianalisis terhadap salah satu *subcatchment*, yaitu S20 (lihat Gambar 2) yang memiliki luas sekitar 1,2 hektar (1.200 m²) dimana jumlah unit resapan yang disimulasikan berjumlah 10 – 40 unit (1 – 4 unit/petak) untuk 10 petak kavling

rumah. Gambar 9 memberikan hidrograf limpasan dari *subcatchment* S20 untuk berbagai skenario LID dan setiap kasus hujan yang disimulasikan. Dari setiap kasus hujan rancangan, terlihat bahwa semua skenario LID menghasilkan penundaan waktu terjadinya aliran limpasan. Hal ini menunjukkan bahwa skenario LID mampu menahan volume air hujan agar tidak langsung mengalir keluar dari setiap petak rumah. Lama penundaan terjadinya limpasan pada skenario BRC+RW1 adalah 45 – 60 menit, sedangkan pada skenario BRC+RW4 adalah 75 – 135 menit. Meskipun demikian, dengan skenario LID maksimal, yaitu BRC+RW4 belum menghasilkan penurunan debit puncak limpasan.

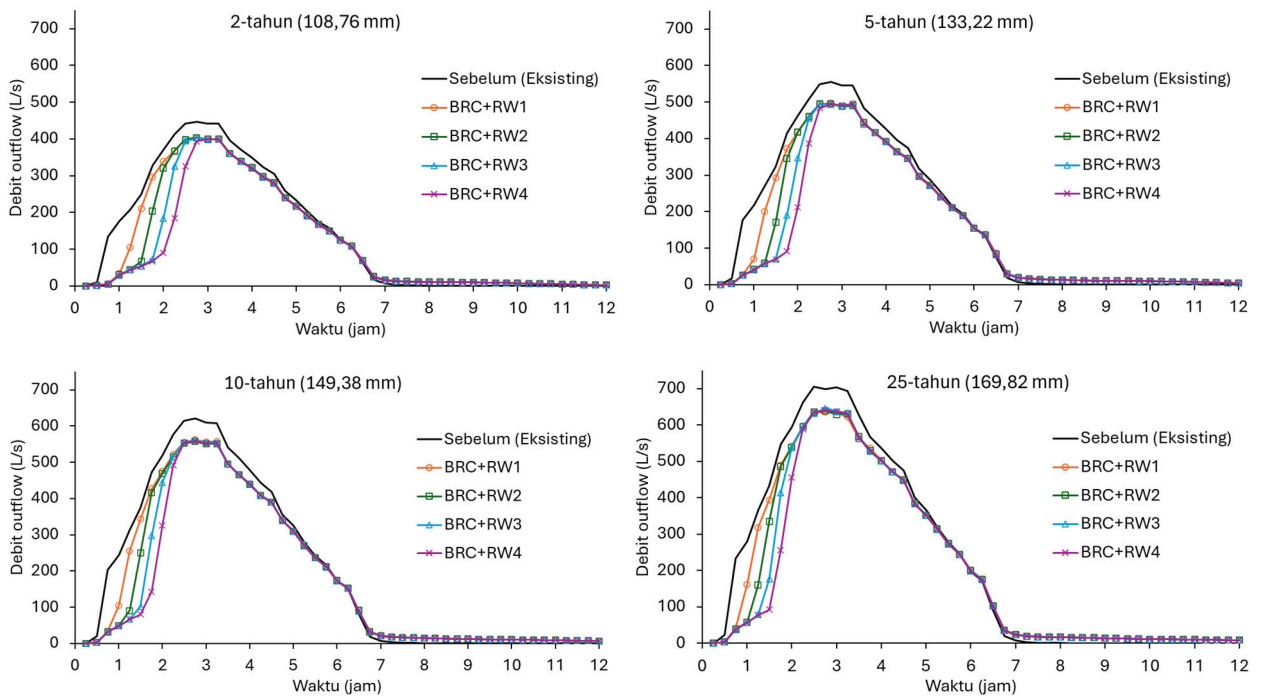
Gambar 10 memberikan hidrograf *outflow* di outlet saluran primer, yaitu *outfall* OF7 (lihat Gambar 2) untuk setiap kasus hujan rancangan. Debit puncak limpasan semakin meningkat seiring dengan kenaikan periode ulang. Hal ini disebabkan karena curah hujan lebih besar pada periode ulang yang lebih tinggi. Implementasi infrastruktur LID menghasilkan

penurunan debit puncak limpasan untuk setiap skenario yang disimulasikan. Meskipun demikian, tingkat penurunan debit puncak tersebut terlihat hampir sama untuk setiap skenario LID dari berbagai kasus hujan rancangan. Hal ini terjadi disebabkan karena kapasitas tampungan infrastruktur LID yang diterapkan belum cukup untuk menampung hujan

deras dan menurunkan debit puncak secara signifikan, bahkan pada skenario dengan 4 unit sumur resapan. Disamping itu, kemampuan permeabilitas tanah asli yang rendah menyebabkan efektivitas resapan yang rendah pula pada kasus hujan dengan durasi yang singkat.



Gambar 9. Hidrograf debit limpasan dari *subcatchment* S20 untuk setiap periode ulang dari skenario sebelum dan sesudah LID



Gambar 10. Hidrograf debit outflow di *outfall* OF7 untuk setiap periode ulang dari skenario sebelum dan sesudah LID

Tingkat reduksi debit puncak limpasan berkisar antara 9 – 11%. Reduksi debit puncak justru semakin

meningkat seiring dengan kenaikan periode ulang hujan. Hal ini dapat mungkin terjadi dikarenakan

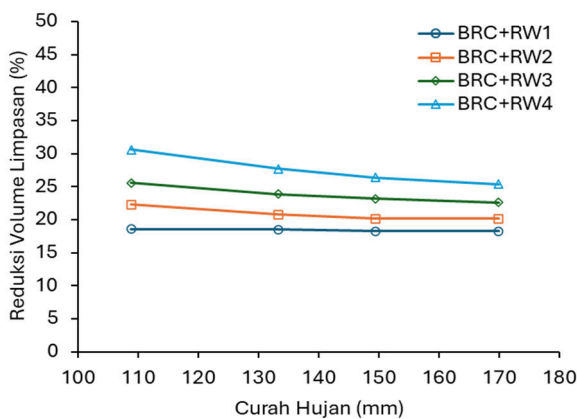
program SWMM memodelkan proses infiltrasi air ke dalam lapisan tanah menggunakan persamaan Green-Ampt [25], yang mana model ini telah memperhitungkan tinggi genangan di atas permukaan tanah. Semakin tinggi genangan, maka gradien tekanan air semakin besar sehingga laju penetrasi air ke dalam tanah akan semakin meningkat. Hal ini menyebabkan air akan lebih cepat terserap oleh tanah, yang mana dalam kasus ini membantu menurunkan debit puncak limpasan pada waktu puncak hujan. Meskipun demikian, skenario penambahan unit sumur resapan menghasilkan volume limpasan yang lebih rendah. Dengan kata lain, jumlah unit sumur resapan yang lebih banyak akan meningkatkan reduksi volume limpasan. Bahkan, pada kasus hujan 2-tahun, skenario 4 unit sumur resapan terlihat sedikit menunda terjadinya puncak limpasan.

Reduksi Volume Limpasan

Tingkat reduksi volume limpasan dihitung sebagai persentase dari rasio selisih penurunan volume setelah LID terhadap volume eksisting yang diekspresikan sebagai:

$$RV = \left(\frac{V_0 - V_1}{V_0} \right) \times 100 \quad (3)$$

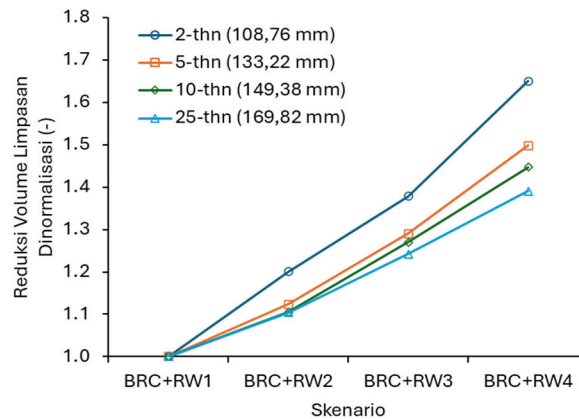
dimana:



- RV : persentase reduksi volume limpasan (%)
- V_0 : volume limpasan awal/eksisting (L/s)
- V_1 : volume limpasan setelah LID (L/s)

Gambar 11 menunjukkan tingkat reduksi volume limpasan dari berbagai skenario LID untuk setiap kasus hujan yang disimulasikan. Semakin banyak unit sumur resapan yang diimplementasikan maka semakin tinggi juga tingkat reduksi volume limpasan yang dihasilkan. Skenario minimal BRC+RW1 menghasilkan tingkat reduksi sebesar 18,56 – 18,23%, sedangkan skenario maksimal menghasilkan tingkat reduksi sebesar 30,63 – 25,35%. Tingkat reduksi ini menurun seiring dengan pertambahan curah hujan.

Pada kasus hujan periode ulang 2-tahun, terlihat bahwa skenario LID lebih berpengaruh signifikan dalam mereduksi volume limpasan dibandingkan dengan periode ulang lainnya yang lebih besar. Skenario BRC+RW4 memberikan kenaikan tingkat reduksi yang paling tinggi dibandingkan dengan skenario lainnya. Hal ini menjadi alasan mengapa skenario LID pada kasus hujan 2-tahun dapat sedikit menunda terjadinya puncak limpasan. Adapun pada kasus hujan 5 – 25 tahun terlihat bahwa pengaruh skenario LID menghasilkan tingkat reduksi yang cenderung mirip.



Gambar 11. Tingkat reduksi volume limpasan terhadap hujan rancangan untuk berbagai skenario LID (kiri) dan tingkat reduksi volume limpasan terhadap skenario LID untuk berbagai periode ulang (kanan). Normalisasi tingkat reduksi adalah dengan membagi setiap besaran reduksi dengan besaran reduksi periode ulang 2-tahun.

Reduksi Koefisien Limpasan

Koefisien limpasan didefinisikan sebagai rasio antara total limpasan terhadap total hujan yang ditangkap oleh suatu daerah tangkapan hujan. Nilai koefisien limpasan berkisar antara 0,0 (minimal) sampai dengan 1,0 (maksimal). Semakin tinggi nilai koefisien limpasan (mendekati 1,0), maka semakin besar pula porsi hujan yang menjadi limpasan [32]. Dengan kata lain, semakin kecil air yang terinfiltrasi

ke dalam tanah dari daerah tangkapan hujan tersebut. Nilai dari koefisien limpasan dapat dihitung sebagai:

$$C = \frac{RO}{P} \quad (4)$$

dimana:

- C : koefisien limpasan permukaan (-)
- RO : total volume limpasan permukaan per satuan luas *subcatchment* (mm)
- P : curah hujan total (mm)



Adapun koefisien limpasan rata-rata untuk seluruh daerah tangkapan hujan (*subcatchments*) dihitung sebagai rasio antara jumlah perkalian koefisien limpasan setiap daerah tangkapan hujan terhadap luas total daerah tangkapan hujan yang diekspresikan sebagai:

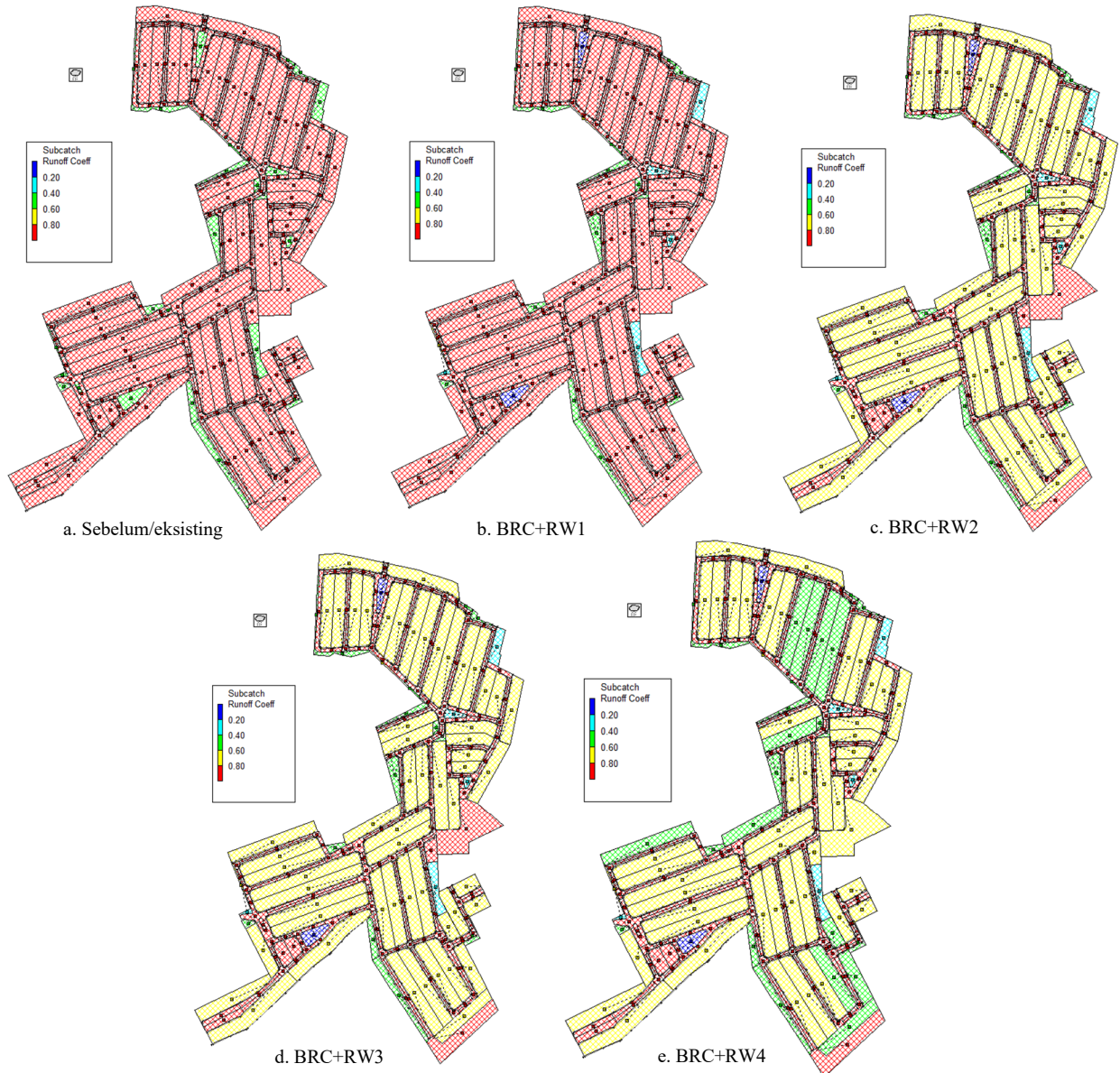
$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (5)$$

dimana:

\bar{C} : koefisien limpasan permukaan rata-rata (-)

C_i : koefisien limpasan setiap *subcatchment* (-)

A_i : luas setiap *subcatchment* (ha)



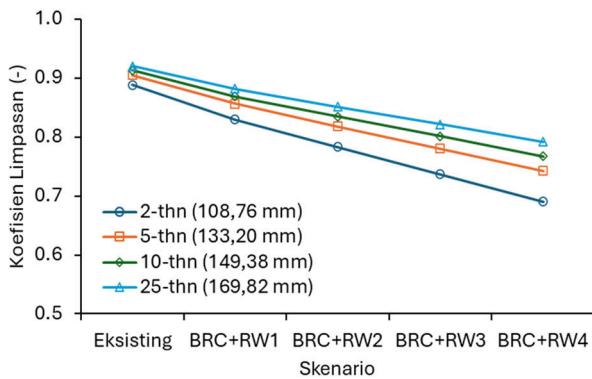
Gambar 12. Peta koefisien limpasan di seluruh *subcatchment* sebelum dan sesudah LID. Peta ini ditampilkan dari hasil simulasi kasus hujan rancangan 2-tahun menggunakan program SWMM. Rentang nilai koefisien limpasan dibagi menjadi lima, yaitu 0 – 0,20 (biru tua), 0,20 – 0,40 (biru muda), 0,40 – 0,60 (hijau), 0,60 – 0,80 (kuning), dan 0,80 – 1,00 (merah).

Gambar 12 menunjukkan peta koefisien limpasan dari setiap *subcatchment* untuk setiap skenario LID yang diterapkan. Nilai koefisien limpasan untuk *subcatchment* blok perumahan pada skenario BRC+RW1 hanya sedikit lebih rendah dibandingkan dengan kondisi sebelum LID (eksisting), yang mana

nilai koefisien limpasannya masih di atas nilai 0,8. Penurunan koefisien limpasan hanya terlihat signifikan pada *subcatchment* taman atau ruang terbuka hijau yang mana digantikan oleh unit bioretensi. Adapun pada skenario BRC+RW2 dan BRC+RW3 terlihat penurunan nilai koefisien

limpasan, yang mana nilainya sudah di bawah 0,8. Pada skenario BRC+RW4 terlihat penurunan nilai koefisien limpasan yang lebih besar, yang mana sebagian *subcatchment* blok perumahan memiliki nilai koefisien di bawah 0,6. Adapun *subcatchment* berupa blok jalan tetap memiliki nilai di atas 0,8 sebagaimana pada *subcatchment* tersebut tidak diberikan perlakuan LID.

Nilai koefisien limpasan rata-rata eksisting bervariasi antara 0,89 – 0,92 dapat diturunkan menjadi 0,83 – 0,88 pada skenario LID minimal (BRC+RW1) dan menjadi 0,69 – 0,79 pada skenario LID maksimal (BRC+RW4) (Gambar 13). Tren penurunan koefisien limpasan ini cenderung mirip dengan tren tingkat reduksi volume limpasan (Gambar 11) sebagaimana nilai koefisien limpasan tersebut juga dihitung sebagai fungsi dari total volume limpasan. Kasus hujan rancangan 2-tahun memberikan tingkat penurunan koefisien limpasan yang lebih signifikan dibandingkan dengan kasus hujan rancangan lainnya yang lebih besar.



Gambar 13. Hubungan antara skenario LID terhadap koefisien limpasan yang dihasilkan untuk setiap periode ulang

Kontribusi Unit LID

Kontribusi setiap unit LID diperkirakan dari hubungan antara rasio luasan setiap unit terhadap rasio kehilangan limpasan yang dihasilkan. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui performa dari unit bioretensi dan sumur resapan secara terpisah. Gambar 14 menyajikan grafik performa setiap unit LID yang disimulasikan dalam penelitian ini. Berdasarkan gambar tersebut diperoleh persamaan hubungan performa setiap unit LID dalam bentuk regresi power sebagai:

$$RL_{BRC} = 8,4389RA_{BRC}^{0,461} \quad (6)$$

$$RL_{RW} = 9,2606RA_{RW}^{0,9866} \quad (7)$$

dimana:

RL_{BRC} : persentase rasio kehilangan limpasan oleh unit bioretensi (%)

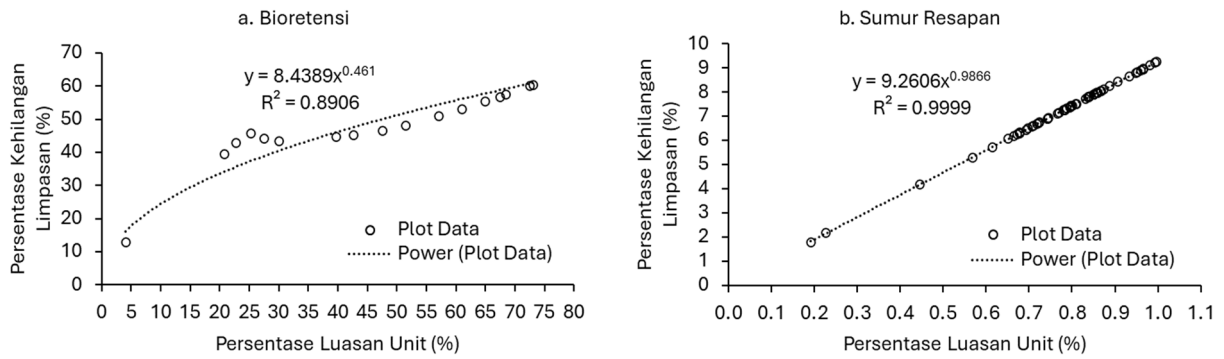
RL_{RW} : persentase rasio kehilangan limpasan oleh unit sumur resapan (%)

RA_{BRC} : persentase rasio luas unit bioretensi (%)

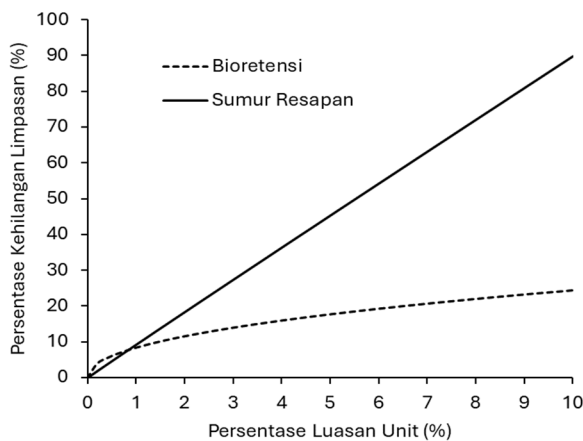
RA_{RW} : persentase rasio luas unit sumur resapan (%)

Sebaran plot data dari performa unit bioretensi lebih terlihat lebih acak dibandingkan dengan dengan sumur resapan (Gambar 14). Hal ini disebabkan karena pemodelan kedua unit tersebut di dalam SWMM dilakukan dengan cara yang berbeda. Unit sumur resapan secara langsung dimodelkan pada setiap *subcatchment* dari blok perumahan sehingga dianggap tidak ada penelusuran aliran (*flow routing*). Dengan kata lain, hujan yang ditangkap oleh setiap *subcatchment* tersebut secara langsung menjadi limpasan yang kemudian dikelola oleh unit resapan. Berbeda dengan sumur resapan, unit bioretensi dimodelkan sebagai suatu *subcatchment* utuh (blok taman) yang tidak hanya menangkap hujan, tetapi juga limpasan dari *subcatchment* blok jalan di sekitarnya. Oleh karena *subcatchment* blok jalan memiliki geometri dan karakteristik yang berbeda, maka dihasilkan hidrograf limpasan dari penelusuran aliran yang berbeda pula. Dengan demikian, debit limpasan yang dikelola oleh unit bioretensi menjadi cukup beragam meskipun dengan luasan *subcatchment* yang sama.

Garis tren performa dari unit sumur resapan menunjukkan hubungan yang lebih mirip linier (Gambar 14b), sedangkan unit bioretensi menunjukkan hubungan yang tak linier (Gambar 14a). Meskipun demikian, kedua garis tersebut dinyatakan dalam bentuk regresi power, yang mana jika unit LID tidak diimplementasikan ($RA = 0$), maka seharusnya tidak ada kontribusi reduksi limpasan yang dihasilkan ($RL = 0$). Hal ini memberikan hubungan performa setiap unit LID yang logis. Gambar 15 menyajikan kurva performa gabungan antara unit bioretensi dan sumur resapan yang menunjukkan bahwa dengan dengan persentase luasan unit yang sama, unit sumur resapan dapat menghasilkan reduksi limpasan yang lebih besar. Hal ini disebabkan karena struktur dari unit sumur resapan adalah berupa tampungan kosong, sedangkan unit bioretensi terdiri dari lapisan-lapisan media tanah-pasir dan kerikil. Oleh karena itu, untuk volume struktur yang sama, volume tampungan dari unit sumur resapan adalah lebih besar.



Gambar 14. Hubungan antara persentase luasan setiap unit LID terhadap persentase kehilangan limpasan yang dihasilkan. Persentase luasan dihitung sebagai rasio antara luas unit LID terhadap total luasan *subcatchment* yang dikelola (limpasan yang ditangkap). Adapun persentase kehilangan limpasan dihitung sebagai rasio antara total kehilangan terhadap total inflow yang dikelola setiap unit LID.



Gambar 15. Kurva performa atau kontribusi unit LID bioretensi dan sumur resapan

Pembahasan

Implementasi LID di kawasan Perumahan Center Park seluas 11,53 hektar dengan infrastruktur LID, yaitu unit bioretensi/taman hujan dan sumur resapan mampu mereduksi volume, debit puncak, dan koefisien limpasan. Semakin banyak jumlah unit resapan, maka tingkat reduksi volume limpasan yang dihasilkan semakin tinggi. Tingkat reduksi yang dihasilkan bervariasi antara 18,56% - 30,63%. Meskipun demikian, skenario LID maksimal dengan 4 unit sumur resapan per petak kavling rumah tidak dapat menghasilkan penurunan debit puncak yg lebih signifikan dibandingkan dengan skenario lainnya dengan jumlah unit yang lebih sedikit. Hal ini disebabkan karena kapasitas tampungan dari unit sumur resapan tersebut masih relatif kecil dibandingkan dengan debit limpasan yang terjadi dari setiap kasus hujan deras yang disimulasikan. Disamping itu, kemampuan resapan dari tanah asli di lokasi penelitian terbilang rendah (6,6 mm/jam) sehingga kapasitas unit sumur resapan sangat

tergantung pada volume tampungannya. Tingkat reduksi debit puncak limpasan yang dihasilkan berkisar antara 9 – 11%. Skenario LID di lokasi studi mampu menurunkan koefisien limpasan maksimal sebesar 0,69 – 0,79. Hal ini menunjukkan bahwa infrastruktur LID dapat meningkatkan kemampuan suatu daerah tangkapan hujan untuk menahan terjadinya limpasan permukaan [33], [34].

Kontribusi atau performa unit LID dapat dilihat dari hubungan antara luasan setiap unit LID terhadap kehilangan limpasan yang dihasilkan. Kurva performa unit sumur resapan menunjukkan kontribusi yang lebih besar dibandingkan dengan unit bioretensi dikarenakan struktur tampungan yang berbeda dari keduanya. Jika standar persentase luas unit bioretensi yang direkomendasikan sebesar 2 – 5% [21], maka estimasi kehilangan limpasan yang dihasilkan adalah sebesar 11,62 – 17,72%. Dengan persentase luas yang sama, maka unit sumur resapan mampu menghasilkan kehilangan limpasan sebesar 18,35 – 45,32%.

Hasil simulasi hujan-aliran dengan program SWMM juga menunjukkan bahwa pada kasus hujan rancangan yang lebih kecil (periode ulang 2-tahun), skenario LID menghasilkan performa yang paling tinggi dan lebih signifikan dibandingkan dengan kasus hujan rancangan lainnya yang lebih besar. Disamping itu, skenario LID maksimal dengan jumlah unit sumur resapan sebanyak 4 unit/petak mampu sedikit menunda terjadinya debit puncak limpasan pada kasus hujan rancangan 2-tahun. Performa unit LID akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya intensitas hujan dan periode ulang hujan sebagaimana lapisan tanah akan semakin cepat menjadi jenuh. Hal ini mengkonfirmasi bahwa implementasi LID lebih efektif untuk mengelola hujan dengan periode ulang yang lebih kecil dan intensitas yang ringan sampai lebat [35], [36]. Oleh

karena itu, agar performa sistem drainase menjadi lebih optimal dalam mengendalikan limpasan permukaan seperti implementasi LID juga harus diiringi dengan peningkatan kapasitas saluran drainase [37], [38]. Dengan kata lain, upaya mereduksi limpasan dan potensi genangan dilakukan dengan cara mengurangi limpasan permukaan (skenario LID) sekaligus memperbesar saluran drainase eksisting (skenario konvensional). Meskipun demikian, upaya-upaya pengendalian limpasan permukaan dengan cara struktural tersebut juga harus mempertimbangkan batasan-batasan lainnya seperti aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan [39], [40], [41], yang mana tidak dibahas dalam penelitian ini. Oleh karena itu, penelitian lanjutan menjadi diperlukan untuk membahas permasalahan ini.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan sebelumnya, maka dapat disimpulkan bahwa implementasi infrastruktur LID berupa bioretensi dan sumur resapan di kawasan perumahan dapat mereduksi volume dan debit limpasan, serta membantu menurunkan koefisien limpasan. Mekanisme kerja dari setiap unit LID adalah dengan cara menampung dan meresapkan air hujan dan limpasan yang ditangkap. Volume limpasan permukaan dapat direduksi sebesar 18 – 30%, sedangkan debit puncak limpasan dapat direduksi sebesar 9 – 11%. Adapun koefisien limpasan dapat diturunkan menjadi sebesar 0,69 – 0,79 dari kondisi eksisting sebesar 0,89 – 0,92. Performa unit sumur resapan dibandingkan dengan bioretensi adalah lebih baik untuk luasan unit yang sama. Hal ini disebabkan karena struktur konstruksi sumur resapan berupa tampungan kosong sehingga memiliki kapasitas tampungan yang lebih besar. Meskipun infrastruktur LID cukup efektif dalam mengendalikan limpasan permukaan, namun implementasinya perlu juga diiringi dengan peningkatan kapasitas saluran (metode konvensional). Hal ini dibutuhkan terutama pada kasus-kasus hujan deras dan ekstrem yang mana infrastruktur LID sendiri belum cukup untuk menurunkan debit puncak limpasan dan menunda waktu puncak limpasan secara signifikan. Kombinasi dari keduanya (metode LID dan konvensional) dapat menghasilkan efektivitas pengendalian limpasan dan risiko banjir yang lebih baik. Dengan demikian, penelitian lanjutan mengenai implementasi metode LID dan konvensional dengan mempertimbangkan berbagai faktor teknis, sosio-ekonomi, dan lingkungan menjadi penting untuk dilakukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Sriwijaya melalui Skema Penelitian Sains, Teknologi, dan Seni Tahun Anggaran 2024. Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak pengembang perumahan yang telah mengizinkan penelitian dan juga para mahasiswa yang membantu dalam kegiatan survei dan pengukuran di lapangan.

REFERENSI

- [1] J. Wang, L. Zhou, P. Han, and G. Li, "The Impact of Urbanization and LID Technology on Hydrological Effect," *Journal of Coastal Research*, vol. 104, no. sp1, Oct. 2020, doi: 10.2112/JCR-SI104-004.1.
- [2] Y. Chen, H. W. Samuelson, and Z. Tong, "Integrated design workflow and a new tool for urban rainwater management," *Journal of Environmental Management*, vol. 180, pp. 45–51, 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.04.059.
- [3] Y. Li, J. J. Huang, M. Hu, H. Yang, and K. Tanaka, "Design of low impact development in the urban context considering hydrological performance and life-cycle cost," *Journal of Flood Risk Management*, vol. 13, no. 3, pp. 1–15, 2020, doi: 10.1111/jfr3.12625.
- [4] Y. Hanastasia and A. Sudradjat, "Kajian Awal Penetapan Teknologi Low Impact Development/Green Infrastructure Pada Pengelolaan Limpasan Hujan Menggunakan Sistem Informasi Geografi (Studi Kasus : Das Citarum Hulu Bukan Kota)," *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 22, no. 2, pp. 92–103, 2016, doi: 10.5614/j.tl.2016.22.2.10.
- [5] T. D. Fletcher et al., "SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage," *Urban Water Journal*, vol. 12, no. 7, pp. 525–542, 2014, doi: 10.1080/1573062X.2014.916314.
- [6] I. Nowogoński, "Low Impact Development Modeling To Manage Urban Stormwater Runoff: Case Study of Gorzów Wielkopolsk," *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 28, no. 3, pp. 105–115, 2020, doi: 10.3846/jeelm.2020.12670.
- [7] K. Eckart, Z. McPhee, and T. Bolisetti, "Performance and implementation of low impact development – A review," *Science of the Total Environment*, vol. 607–608, pp. 413–432, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.254.
- [8] G. Zhao and D. Z. Meng, "Research Progress of Low Impact Development Technology," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 474, no. 5, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/474/5/052033.
- [9] S. A. Palermo, V. C. Talarico, and M. Turco, "On the LID systems effectiveness for urban stormwater management: Case study in Southern Italy," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 410, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/410/1/012012.
- [10] A. Arahuetes and J. O. Cantos, "The potential of sustainable urban drainage systems (SuDS) as an adaptive strategy to climate change in the Spanish Mediterranean," *International Journal of Environmental Studies*, vol. 76, no. 5, pp. 764–779, 2019, doi: 10.1080/00207233.2019.1634927.
- [11] L. Azkarini, E. Anggraheni, and D. Sutjningsih, "The influence of low impact development-best management practices implementation on surface runoff reduction: A case study in Universitas Indonesia catchment area," *MATEC Web of Conferences*, vol. 276, p. 04007, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201927604007.

- [12] M. Montazerolhodjah, "Urban environments sustainable development through low impact approaches," *Progress in Industrial Ecology*, vol. 13, no. 1, pp. 16–28, 2019, doi: 10.1504/PIE.2019.098763.
- [13] M. Movahedinia, J. M. V. Samani, F. Barakhasi, S. Taghvaeian, and R. Stepanian, "Simulating the effects of low impact development approaches on urban flooding: A case study from Tehran, Iran," *Water Science and Technology*, vol. 80, no. 8, pp. 1591–1600, 2019, doi: 10.2166/wst.2019.412.
- [14] X. Guo, P. Du, D. Zhao, and M. Li, "Modelling low impact development in watersheds using the storm water management model," *Urban Water Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 146–155, 2019, doi: 10.1080/1573062X.2019.1637440.
- [15] S. H. Ghodsi, Z. Zahmatkesh, E. Goharian, R. Kerachian, and Z. Zhu, "Optimal design of low impact development practices in response to climate change," *Journal of Hydrology*, vol. 580, 2020, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124266.
- [16] M. B. Al Amin, J. Sujono, and R. Triatmadja, "A Review of Recent Developments on Modeling Low Impact Development (LID) Technique," *Cantilever*, vol. 13, no. 1, pp. 31–44, May 2024, doi: 10.35139/cantilever.v13i1.320.
- [17] M. B. Al Amin, H. Haki, and F. Alia, "Tinjauan Kapasitas Sistem Drainase di Perumahan Center Park Palembang Menggunakan PCSWMM," *JRS-Unand*, vol. 18, no. 3, p. 178, Dec. 2022, doi: 10.25077/jrs.18.3.178-193.2022.
- [18] L. A. Rossman and M. Simon, *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2*, vol. EPA/600/R-22/030. United States Environmental Protection Agency, 2022. [Online]. Available: www.epa.gov/water-research
- [19] L. Bahunta and R. S. B. Waspodo, "Rancangan Sumur Resapan Air Hujan sebagai Upaya Pengurangan Limpasan di Kampung Babakan, Cibinong, Kabupaten Bogor," *JSIL*, vol. 4, no. 1, pp. 37–48, Apr. 2019, doi: 10.29244/jsil.4.1.37-48.
- [20] M. D. Anggoro and A. B. Ananti, "Kajian Intensitas Hujan Tahun 2002-2022 di Bandara Internasional Soekarno-Hatta," *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, vol. 3, no. 5, pp. 38–45, Oct. 2023.
- [21] B. W. Ballard et al., *The SuDS Manual*. in CIRIA, no. C753. London, UK: CIRIA, 2015.
- [22] ABC Waters, *Condensed Booklet on Engineering Procedures for ABC Waters Design Features*, 2018 Edition. Singapore: PUB Singapore's National Water Agency, 2018.
- [23] Anonim, "Cara Pembuatan Sumur Resapan Untuk Muka Air Tanah +/- 2 m," Kementerian Negara Lingkungan Hidup, 2007. [Online]. Available: <http://perpustakaan.menlhk.go.id/pustaka/images/docs/sumur%20resapan.lpdf.pdf>
- [24] L. A. Rossman and W. C. Huber, *Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality*, vol. EPA/600/R-16/093. United States Environmental Protection Agency, 2016. [Online]. Available: www.epa.gov/water-research
- [25] L. A. Rossman and W. C. Huber, *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology (Revised)*, vol. EPA/600/R-15/162A. United States Environmental Protection Agency, 2016. [Online]. Available: www2.epa.gov/water-research
- [26] Q. Liu, W. Cui, Z. Tian, Y. Tang, M. Tillotson, and J. Liu, "Stormwater Management Modeling in 'Sponge City' Construction: Current State and Future Directions," *Front. Environ. Sci.*, vol. 9, p. 816093, Jan. 2022, doi: 10.3389/fenvs.2021.816093.
- [27] Al Amin, M. Baitullah, *Pemodelan Sistem Drainase Perkotaan Menggunakan SWMM*. Yogyakarta: Deepublish, 2020.
- [28] L. A. Rossman, *Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics*, vol. EPA/600/R-17/111. United States Environmental Protection Agency, 2017. [Online]. Available: www.epa.gov/water-research
- [29] R. Cronshey, R. H. McCuen, N. Miller, W. Rawls, S. Robbins, and D. Woodward, *Urban Hydrology for Small Watersheds*, Second Edition. in TR-55. U. S. Department of Agriculture (USDA), 1986.
- [30] S. A. Shannak, F. H. Jaber, and B. J. Lesikar, "Modeling the Effect of Cistern Size, Soil Type, and Irrigation Scheduling on Rainwater Harvesting as a Stormwater Control Measure," *Water Resour Manage*, vol. 28, no. 12, pp. 4219–4235, Sep. 2014, doi: 10.1007/s11269-014-0740-x.
- [31] M. Tuller and D. Or, "WATER RETENTION AND CHARACTERISTIC CURVE," in *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier, 2005, pp. 278–289. doi: 10.1016/B0-12-348530-4/00376-3.
- [32] M. Ho, R. Nathan, C. Wasko, E. Vogel, and A. Sharma, "Projecting changes in flood event runoff coefficients under climate change," *Journal of Hydrology*, vol. 615, p. 128689, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128689.
- [33] C. Son, K. Hyun, D. Kim, J. Baek, and Y. Ban, "Development and Application of a Low Impact Development (LID)-Based District Unit Planning Model," *Sustainability*, vol. 9, no. 1, p. 145, Jan. 2017, doi: 10.3390/su9010145.
- [34] Z.-T. Miao, M. Han, and S. Hashemi, "The effect of successive low-impact development rainwater systems on peak flow reduction in residential areas of Shizhuang, China," *Environ Earth Sci*, vol. 78, no. 2, p. 51, Jan. 2019, doi: 10.1007/s12665-018-8016-z.
- [35] W. Sohn, J.-H. Kim, M.-H. Li, and R. Brown, "The influence of climate on the effectiveness of low impact development: A systematic review," *Journal of Environmental Management*, vol. 236, pp. 365–379, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.11.041.
- [36] B. Neupane, T. M. Vu, and A. K. Mishra, "Evaluation of land-use, climate change, and low-impact development practices on urban flooding," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 66, no. 12, pp. 1729–1742, Sep. 2021, doi: 10.1080/02626667.2021.1954650.
- [37] M. O. Arjenaki, H. R. Z. Sanayei, H. Heidarzadeh, and N. A. Mahabadi, "Modeling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City)," *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–16, Mar. 2021, doi: 10.1007/s40808-020-00870-2.
- [38] Z. Vojinovic et al., "Effectiveness of small- and large-scale Nature-Based Solutions for flood mitigation: The case of Ayutthaya, Thailand," *Science of The Total Environment*, vol. 789, p. 147725, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147725.
- [39] M. F. N. Dos Santos, A. P. Barbassa, and A. F. Vasconcelos, "Low impact development strategies for a low-income settlement: Balancing flood protection and life cycle costs in Brazil," *Sustainable Cities and Society*, vol. 65, p. 102650, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102650.
- [40] Q. Li, F. Wang, Y. Yu, Z. Huang, M. Li, and Y. Guan, "Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: A case study in Guangxi, China," *Journal of Environmental Management*, vol. 231, pp. 10–20, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.024.
- [41] K. Koc, Ö. Ekmekcioğlu, and M. Özger, "An integrated framework for the comprehensive evaluation of low impact development strategies," *Journal of Environmental Management*, vol. 294, p. 113023, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113023.

