

Kinerja *Low Impact Development* (LID) dalam Mereduksi Limpasan, Genangan, dan *Total Suspended Solids* (TSS) Menggunakan EPA SWMM 5.2 di Kota Magelang

A. Rahmawati^{1*}, N.N.N. Marleni¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: arirahmawati@mail.ugm.ac.id

INTISARI

Perkembangan kawasan perkotaan meningkatkan luas *impervious area* yang berdampak pada peningkatan limpasan permukaan, potensi genangan, serta penurunan kualitas air. Kota Magelang sebagai wilayah dengan curah hujan tinggi menghadapi permasalahan genangan akibat keterbatasan kapasitas sistem drainase, sehingga diperlukan pendekatan pengelolaan air hujan yang berkelanjutan melalui *Low Impact Development* (LID). Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem drainase serta efektivitas LID terhadap limpasan, genangan, dan kualitas air menggunakan parameter *Total Suspended Solids* (TSS). Analisis dilakukan menggunakan EPA SWMM 5.2 dengan skenario eksisting, *bioretention*, *permeable pavement*, sumur resapan, dan kombinasi LID sebesar 20% dari luas area keadap pada masing-masing *subcatchment*, dengan hujan kala ulang 2 dan 5 tahun. Hasil menunjukkan bahwa LID mampu mereduksi limpasan sebesar 20–86%, menurunkan genangan hingga mendekati 100%, dan mengurangi TSS sebesar 20–87%. *Bioretention* dan sumur resapan menunjukkan kinerja paling optimal dengan tingkat reduksi masing-masing 31–87% dan 31–83%, sedangkan *permeable pavement* memiliki efektivitas lebih rendah yaitu sekitar 20–50%. Kombinasi LID menunjukkan tingkat reduksi menengah, yaitu sekitar 29–71%. Variasi hasil dipengaruhi oleh karakteristik tata guna lahan dan intensitas hujan. Secara keseluruhan, penerapan LID pada sebagian area keadap berpotensi meningkatkan kinerja sistem drainase perkotaan secara berkelanjutan.

Kata kunci: EPA SWMM, genangan, limpasan permukaan, *Low Impact Development* (LID), *Total Suspended Solids* (TSS)

1 PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk serta perkembangan pusat-pusat ekonomi di Indonesia telah mendorong pembangunan infrastruktur secara pesat. Perkembangan tersebut menyebabkan perubahan penggunaan lahan secara signifikan terutama di wilayah perkotaan. Menurut Mawardi (2016), konversi lahan terbesar di Indonesia terjadi di Pulau Jawa sebesar 54%, dengan jenis alih fungsi terbesar berupa lahan permukiman sebesar 69% dan kawasan industri sebesar 20%. Perubahan penggunaan lahan tersebut secara hidrologis dapat meningkatkan volume limpasan permukaan akibat berkurangnya lahan resapan atau lahan yang bersifat permeabel. Peningkatan volume limpasan dan debit puncak aliran berpotensi meningkatkan risiko banjir serta menurunkan kualitas air limpasan.

Air limpasan di kawasan perkotaan tidak hanya mengalami peningkatan volume, tetapi juga membawa berbagai jenis polutan yang terakumulasi pada permukaan lahan selama periode tanpa hujan. Polutan tersebut berasal dari debu jalan, aktivitas konstruksi, erosi tanah, serta aktivitas manusia lainnya. Parameter yang umum digunakan untuk menggambarkan tingkat pencemaran air limpasan adalah *Total Suspended Solids* (TSS), yaitu partikel padatan tersuspensi yang terbawa oleh aliran air dan dapat menyebabkan sedimentasi serta menurunkan kualitas badan air penerima (Gobel et al., 2007).

Kota Magelang merupakan wilayah dengan iklim tropis basah yang ditandai oleh curah hujan tinggi sepanjang tahun. Data periode 2020–2024 menunjukkan bahwa curah hujan tahunan berkisar antara 1.940 mm/tahun hingga 3.256 mm/tahun (Pemerintah Kota Magelang, 2025). Kondisi ini berpotensi meningkatkan limpasan permukaan, terutama pada kawasan perkotaan, sehingga dapat mempengaruhi kinerja sistem drainase. Pada beberapa lokasi di wilayah studi, genangan masih sering terjadi, terutama pada ruas jalan dengan kapasitas drainase yang terbatas. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem drainase eksisting belum sepenuhnya mampu mengakomodasi debit limpasan yang terjadi.

Salah satu pendekatan yang diperkenalkan untuk mengatasi permasalahan limpasan air hujan di kawasan perkotaan adalah konsep *Low Impact Development* (LID). Konsep ini pertama kali diperkenalkan di Prince George's County, Maryland, Amerika Serikat pada akhir tahun 1990-an dan kemudian diterapkan di berbagai wilayah negara bagian tersebut (EPA, 2000). LID merupakan metode pengelolaan air hujan yang menekankan pada upaya

mempertahankan kondisi hidrologi alami melalui penerapan teknik rekayasa hidrologi skala mikro yang terintegrasi dengan elemen vegetasi dan lanskap alami (Dietz, 2007).

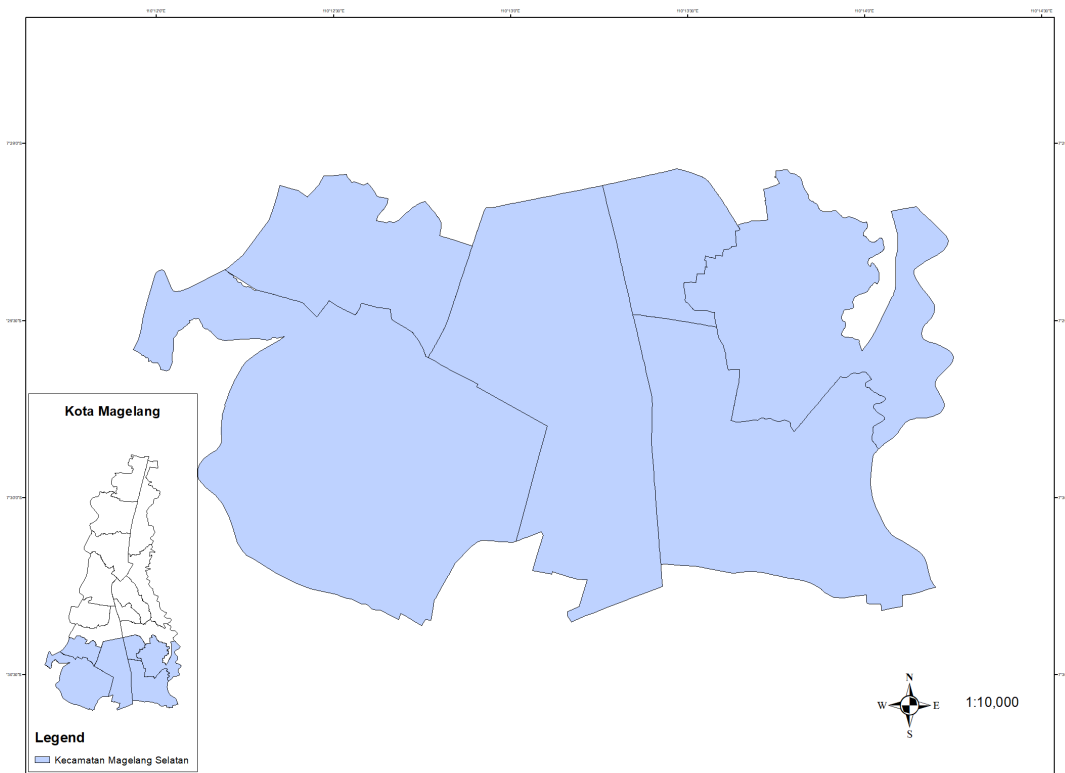
Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penerapan LID mampu mengurangi limpasan permukaan serta menurunkan konsentrasi polutan dalam air limpasan. Penelitian Taghizadeh et al. (2021) menunjukkan bahwa penerapan LID mampu mereduksi konsentrasi polutan seperti *Total Suspended Solids* (TSS), *Total Phosphorus* (TP), dan *Total Nitrogen* (TN). Selain itu, penelitian Savitri (2017) menunjukkan bahwa penerapan LID mampu mengurangi debit limpasan permukaan hingga 70%. Namun demikian, sebagian besar penelitian penerapan LID di Indonesia masih berfokus pada pengurangan volume limpasan air hujan, sementara kajian mengenai pengaruh penerapan LID terhadap kualitas air limpasan masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem drainase eksisting serta menganalisis potensi penerapan *Low Impact Development* (LID) menggunakan pemodelan *EPA Storm Water Management Model* (SWMM) 5.2 dalam mengurangi genangan serta meningkatkan kualitas air limpasan dengan menggunakan parameter *Total Suspended Solids* (TSS) pada kawasan perkotaan di Kota Magelang.

2 METODOLOGI PENELITIAN

Uraian metodologi yang digunakan pada penelitian ialah sebagai berikut.

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Kecamatan Magelang Selatan, Kota Magelang, Jawa Tengah. Berdasarkan data tata guna lahan dari DPUPR Kota Magelang, wilayah ini merupakan kawasan perkotaan yang didominasi oleh penggunaan lahan permukiman, area komersial, serta ruang terbuka. Secara geomorfologi wilayah Kota Magelang memiliki topografi yang relatif berbukit dengan kemiringan lahan yang bervariasi. Jenis tanah yang dominan di wilayah penelitian adalah tanah latosol (Pemerintah Kota Magelang, 2024). Berdasarkan penelitian Budiarti (2018) di DAS Samin, Semarang disebutkan karakteristik tanah latosol coklat kemerahan ialah memiliki tekstur liat dan liat berdebu dengan angka permeabilitas 0,53 cm/jam termasuk pada kategori agak lambat. Karakteristik untuk tanah latosol coklat dengan tekstur lempung berpasir dan lempung berliat dengan permeabilitas agak cepat yaitu 10,85 cm/jam. Kecamatan Magelang selatan sendiri di dominasi oleh jenis latosol coklat kemerahan. Peta lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

2.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data curah hujan, jaringan drainase, tata guna lahan, dan kualitas air. Seluruh data tersebut digunakan sebagai input utama dalam pengembangan model hidrologi dan kualitas air menggunakan EPA SWMM.

a. Data Curah Hujan

Data curah hujan digunakan sebagai dasar dalam menentukan hujan rancangan yang menjadi input utama dalam pemodelan limpasan. Data yang digunakan berupa data curah hujan harian maksimum yang diperoleh dari stasiun hujan di wilayah Kota Magelang antara lain stasiun hujan Poncol, Pleret, Kaliloro, Mendut, Mungkid, Muntilan, Salaman, Sawangan dan Seneng. Data tersebut diperoleh dari Badan Pengelolaan Sumber Daya Air Progo Bogowonto Luk Ulo (BPSDA Probolo). Analisis curah hujan dilakukan untuk memperoleh intensitas hujan pada berbagai kala ulang. Dalam penelitian ini digunakan kala ulang 2 tahun dan 5 tahun yang mengacu pada standar perencanaan drainase perkotaan. Perhitungan intensitas hujan dilakukan menggunakan metode Mononobe untuk mendapatkan hubungan intensitas–durasi–frekuensi (IDF). Hasil analisis menunjukkan bahwa curah hujan rancangan sebesar 98,17 mm untuk kala ulang 2 tahun dan 110 mm untuk kala ulang 5 tahun, yang termasuk dalam kategori hujan lebat hingga sangat lebat. Nilai intensitas hujan ini selanjutnya digunakan sebagai input dalam simulasi SWMM.

b. Data Jaringan Drainase

Data jaringan drainase digunakan untuk membangun model hidraulik dalam SWMM. Data ini meliputi dimensi saluran (lebar, tinggi, dan bentuk penampang), panjang saluran, kemiringan saluran, serta konektivitas antar saluran yang direpresentasikan dalam bentuk *node* dan *link* pada model. Data jaringan drainase diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang (DPUPR) Kota Magelang serta hasil pengukuran lapangan. Informasi ini digunakan untuk menggambarkan kondisi eksisting sistem drainase, sehingga simulasi yang dilakukan dapat merepresentasikan kondisi aliran yang sebenarnya di lapangan.

c. Data Tata Guna Lahan

Data tata guna lahan dalam penelitian ini menggunakan data spasial dari DPUPR Kota Magelang yang digunakan untuk menentukan karakteristik *subcatchment* dalam model SWMM. Informasi yang digunakan meliputi jenis penggunaan lahan seperti permukiman, komersial, ruang terbuka, dan area lainnya. Data ini digunakan untuk menentukan parameter hidrologi, terutama persentase permukaan kedap air (*impervious area*) dan parameter limpasan lainnya seperti koefisien aliran dan kapasitas infiltrasi. Selain itu, data tata guna lahan juga menjadi dasar dalam penentuan distribusi penerapan LID pada masing-masing *subcatchment*. Variasi tata guna lahan pada setiap *subcatchment* berpengaruh terhadap besarnya limpasan dan distribusi polutan, sehingga menjadi salah satu faktor utama yang mempengaruhi hasil simulasi.

d. Data Kualitas Air

Data kualitas air digunakan untuk merepresentasikan kondisi pencemaran pada sistem drainase serta sebagai input dalam pemodelan kualitas air pada EPA SWMM. Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini adalah *Total Suspended Solids* (TSS), yang menggambarkan kandungan partikel tersuspensi dalam limpasan permukaan. Pengambilan sampel air dilakukan pada saluran drainase di beberapa titik pengamatan saat kejadian hujan, sehingga dapat merepresentasikan kondisi aktual limpasan. Lokasi pengambilan sampel air dilakukan di titik C21, C80, dan C88 pada tanggal 31 Desember 2024, 8 Januari 2025 dan 15 Januari 2025. Detail titik lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 2. Data hasil pengukuran ini digunakan sebagai dasar dalam pemodelan kualitas air pada kondisi eksisting dengan menggunakan data hujan aktual. Selanjutnya, untuk keperluan simulasi skenario, nilai konsentrasi TSS disesuaikan menggunakan pendekatan *Event Mean Concentration* (EMC) yang diperoleh dari penelitian terdahulu yang relevan. Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan karakteristik kualitas air pada berbagai jenis tata guna lahan, serta untuk melengkapi keterbatasan data hasil pengukuran lapangan. Dengan demikian, kombinasi antara data pengukuran lapangan dan nilai EMC dari literatur digunakan untuk meningkatkan representativitas input kualitas air dalam model.

2.3 Pemodelan EPA SWMM

Pemodelan sistem drainase dalam penelitian ini dilakukan menggunakan EPA *Storm Water Management Model* (SWMM) 5.2 untuk mensimulasikan proses hidrologi, hidraulika, dan kualitas air pada wilayah penelitian. Model dikembangkan dengan membagi wilayah menjadi beberapa *subcatchment* berdasarkan kondisi topografi dan jaringan drainase, serta memasukkan parameter fisik seperti luas area, kemiringan, dan persentase permukaan kedap. Jaringan drainase dimodelkan dalam bentuk *node* (titik simpul) dan *conduit* (saluran) dengan mempertimbangkan dimensi saluran, kemiringan, dan kekasaran. Data hujan rancangan digunakan sebagai input

utama dalam bentuk distribusi intensitas hujan terhadap waktu. Pemodelan kualitas air dilakukan menggunakan pendekatan EMC dengan parameter *Total Suspended Solids* (TSS), yang diperoleh dari kombinasi data pengukuran lapangan dan parameter dari literatur. Simulasi dilakukan untuk kondisi eksisting dan skenario LID untuk menghasilkan *output* berupa limpasan, genangan, dan beban TSS.

2.4 Kalibrasi dan Validasi Model

Model yang dikembangkan diverifikasi dengan membandingkan hasil simulasi dengan kondisi eksisting di lapangan. Kalibrasi dilakukan secara terbatas dengan menyesuaikan parameter hidrologi dan kualitas air agar hasil model mendekati kondisi aktual. Dalam penelitian ini, keterbatasan data pengamatan menyebabkan proses kalibrasi dilakukan secara konseptual berdasarkan nilai parameter yang umum digunakan dalam literatur. Oleh karena itu, hasil model lebih difokuskan pada analisis komparatif antar skenario.

2.5 Skenario *Low Impact Development* (LID)

Penelitian ini menggunakan beberapa skenario untuk mengevaluasi efektivitas penerapan *Low Impact Development* (LID) terhadap kinerja sistem drainase. Skenario yang dianalisis meliputi kondisi eksisting tanpa penerapan LID, serta skenario penerapan masing-masing jenis LID, yaitu *bioretention* (BR), *permeable pavement* (PP), dan sumur resapan (SR). Selain itu, juga dilakukan simulasi skenario kombinasi LID untuk mengetahui pengaruh integrasi beberapa jenis LID terhadap kinerja sistem drainase. Penelitian Garbanzos, et.al (2022) di Filipina menerapkan skenario LID tunggal dan kombinasi dengan tipe LID antara lain *bioretention*, *permeable pavement* dan *infiltration trench* dengan proporsi penggunaan lahan masing-masing 28%, 21%, dan 27%. Penerapan LID dalam penelitian ini diasumsikan sebesar 20% dari luas area kedap (*impervious area*) pada masing-masing *subcatchment*. Pemilihan proporsi tersebut didasarkan pada pertimbangan keterbatasan lahan pada kawasan perkotaan serta kondisi eksisting tata guna lahan, sehingga skenario yang digunakan dapat merepresentasikan kondisi yang lebih realistis di lapangan. Pada skenario kombinasi, distribusi LID dilakukan dengan membagi proporsi penerapan ke dalam beberapa jenis LID berdasarkan karakteristik tata guna lahan pada masing-masing *subcatchment*. Pendekatan ini bertujuan untuk menyesuaikan jenis LID dengan kondisi fisik dan fungsi lahan, sehingga penerapannya lebih sesuai dengan kondisi aktual wilayah penelitian.

Parameter desain *Low Impact Development* (LID) dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan pedoman EPA SWMM 5.2 dan disesuaikan dengan kondisi wilayah studi. Parameter tersebut dikelompokkan berdasarkan komponen lapisan utama, yaitu *surface layer*, *soil layer*, dan *storage layer* untuk LID tipe *bioretention*, *permeable pavement*, dan sumur resapan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Sumur resapan di asumsikan dengan pendekatan LID tipe *infiltration trench* di EPA SWMM 5.2.

Tabel 1. Parameter Desain *Low Impact Development* (LID)

Komponen	Parameter	<i>Bioretention Permeable Pavement Infiltration Trench</i>		
		(BR)	(PP)	(IT)
<i>Surface Layer</i>	<i>Surface Void Fraction</i> (ϕ_1)	0.8 – 1.0	1.0	1.0
	<i>Surface Storage Depth</i> (in)	—	0 – 0.1	—
<i>Soil Layer</i>	<i>Thickness</i> (in)	24 – 48	—	—
	<i>Porosity</i> (ϕ_2)	0.45 – 0.60	—	—
	<i>Field Capacity</i> (θ_{FC})	0.15 – 0.25	—	—
	<i>Wilting Point</i> (θ_{WP})	0.05 – 0.15	—	—
	<i>Hydraulic Conductivity</i> (in/hr)	2.0 – 5.5	—	—
<i>Pavement Layer</i>	<i>Thickness</i> (in)	—	3 – 8	—
	<i>Porosity</i> (ϕ_4)	—	0.10 – 0.40	—
	<i>Permeability</i> (in/hr)	—	5 – 150	—
<i>Storage Layer</i>	<i>Thickness</i> (in)	6 – 36	6 – 36	36 – 144
	<i>Storage Void Fraction</i> (ϕ_3)	0.2 – 0.4	0.2 – 0.4	0.2 – 0.4

Sumber: Rossman dan Huber (2016)

2.6 Indikator Evaluasi Kinerja *Low Impact Development* (LID)

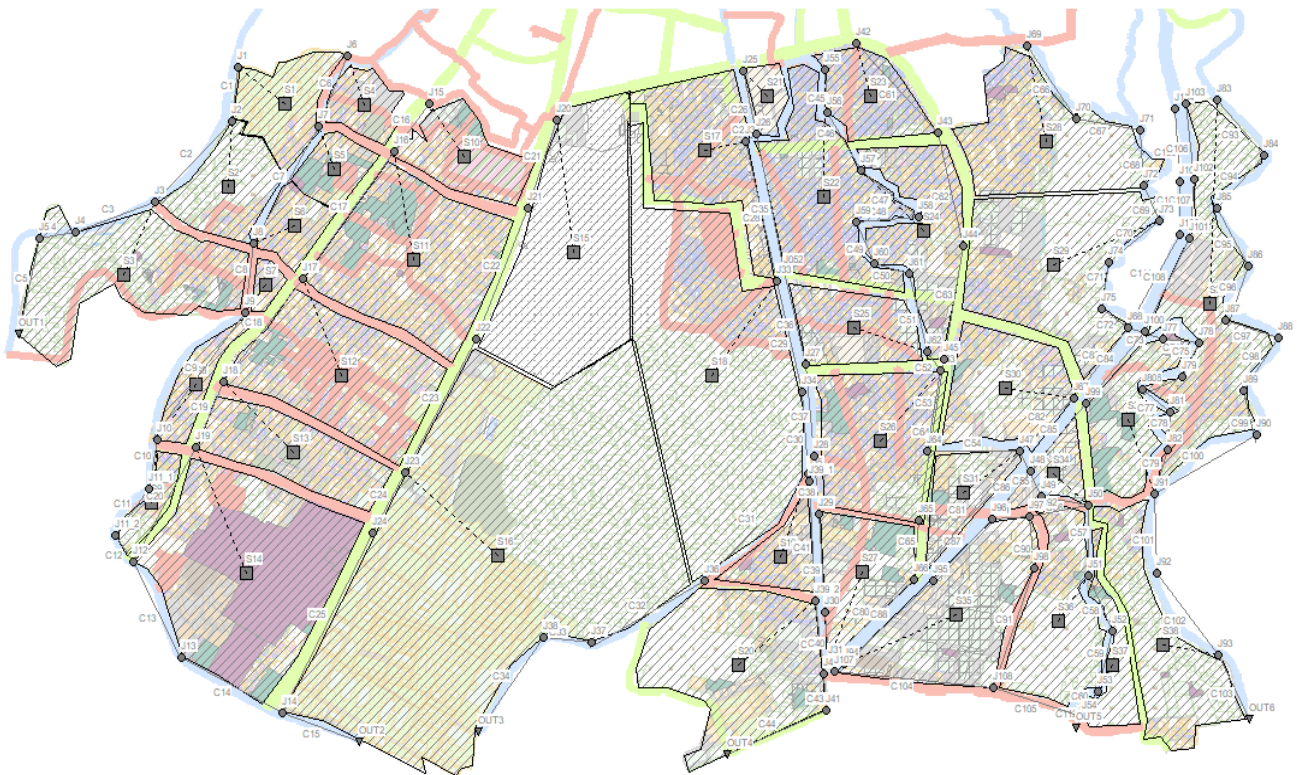
Evaluasi kinerja sistem drainase dilakukan dengan mempertimbangkan tiga aspek utama, yaitu aspek hidrologi, genangan, dan kualitas air. Aspek hidrologi dianalisis melalui parameter volume limpasan (*runoff volume*) yang

menggambarkan besarnya respon aliran terhadap kejadian hujan. Aspek genangan dievaluasi berdasarkan volume genangan pada *node*, yang menunjukkan kemampuan sistem drainase dalam menampung dan mengalirkan limpasan. Selain itu, aspek kualitas air dianalisis menggunakan parameter *Total Suspended Solids* (TSS) yang meninjau dari *subcatchment washoff* setelah penerapan LID. Ketiga aspek tersebut digunakan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai kinerja sistem drainase serta efektivitas masing-masing skenario LID dalam mengendalikan limpasan, genangan, dan pencemaran air.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kondisi Drainase Eksisting

Sistem drainase eksisting di Kecamatan Magelang Selatan disajikan pada Gambar 2. Peta tersebut menggambarkan jaringan saluran drainase yang direpresentasikan dalam bentuk *node* dan *conduit*, serta deliniasi *subcatchment* sebagai daerah tangkapan air pada masing-masing bagian wilayah studi yang berjumlah 38 *subcatchment*. Setiap *subcatchment* memiliki karakteristik yang berbeda, baik dari segi luas area, tata guna lahan, maupun persentase permukaan kedap air (*impervious area*), yang berpengaruh terhadap besarnya limpasan yang dihasilkan. Selain itu, keterhubungan antar saluran (*conduit*) dalam jaringan drainase juga menentukan distribusi aliran serta potensi terjadinya genangan pada titik-titik tertentu. Secara umum, terlihat bahwa sistem drainase pada wilayah penelitian memiliki pola jaringan yang cukup kompleks dengan distribusi *subcatchment* yang bervariasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa respon hidrologi tidak merata pada seluruh wilayah, sehingga analisis diperlukan untuk mengidentifikasi lokasi-lokasi yang berpotensi mengalami genangan pada kondisi eksisting. Peta ini selanjutnya menjadi dasar dalam analisis kinerja sistem drainase, khususnya dalam mengevaluasi limpasan, genangan, dan kualitas air pada masing-masing *subcatchment*.

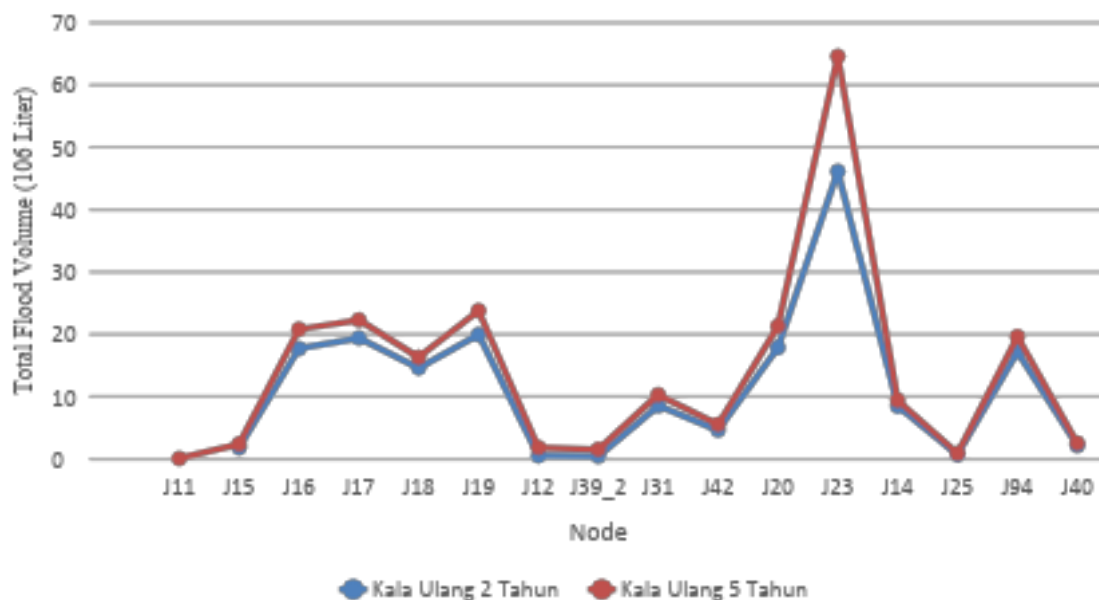


Gambar 2. Peta Saluran Drainase dan *Subcatchment* Kecamatan Magelang Selatan

Berdasarkan hasil simulasi kondisi eksisting yang disajikan pada Gambar 3, diketahui bahwa sistem drainase di wilayah penelitian masih mengalami genangan pada beberapa *node*, baik pada hujan kala ulang 2 tahun maupun 5 tahun. Secara umum, volume genangan pada kala ulang 5 tahun menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan kala ulang 2 tahun, yang mengindikasikan bahwa kapasitas sistem drainase belum mampu mengakomodasi peningkatan intensitas hujan.

Pada kala ulang 2 tahun, genangan relatif rendah hingga sedang dengan nilai maksimum terjadi pada *node* J23 sebesar sekitar 46×10^6 liter, diikuti oleh *node* J20 dan J17 yang masing-masing mencapai kisaran $\pm 17-20 \times 10^6$ liter. Sementara itu, beberapa *node* seperti J11 dan J15 tidak menunjukkan genangan, yang mengindikasikan bahwa kapasitas saluran pada lokasi tersebut masih mencukupi. Pada kala ulang 5 tahun, peningkatan volume genangan terjadi secara signifikan. *Node* J23 menjadi titik dengan genangan tertinggi, yaitu mencapai sekitar $64,6 \times 10^6$ liter, jauh lebih tinggi dibandingkan kala ulang 2 tahun. Selain itu, *node* J19, J17, dan J20 juga menunjukkan peningkatan genangan dengan kisaran $\pm 21-23 \times 10^6$ liter. Hal ini menunjukkan bahwa titik-titik tersebut merupakan lokasi kritis yang memiliki keterbatasan kapasitas drainase.

Distribusi genangan yang tidak merata antar *node* menunjukkan bahwa faktor lokal, seperti kondisi tata guna lahan, persentase area kedap air, serta kapasitas saluran, sangat mempengaruhi terjadinya genangan. *Node* dengan dominasi area kedap air yang tinggi cenderung menghasilkan limpasan yang lebih besar, sehingga meningkatkan potensi genangan. Secara keseluruhan, kondisi ini menunjukkan bahwa sistem drainase eksisting masih belum optimal, terutama dalam menghadapi hujan dengan intensitas lebih tinggi. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengelolaan limpasan, seperti penerapan *Low Impact Development* (LID), untuk mengurangi beban aliran dan meningkatkan kapasitas sistem drainase. LID diterapkan pada *subcatchment* yang berada di area *node flooding* atau *node* yang mengalami genangan.

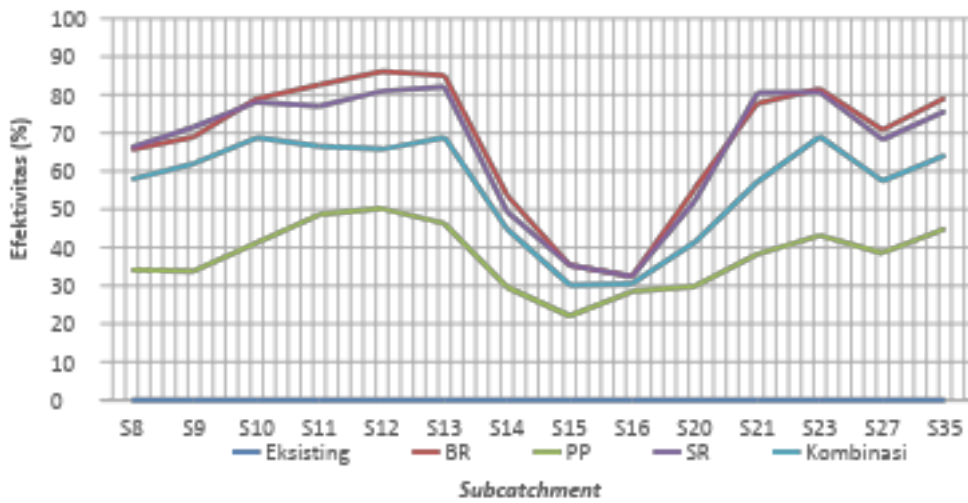


Gambar 3. Hasil Simulasi *Total Flood Volume* pada Hujan Rencana Kala Ulang 2 Tahun dan 5 Tahun

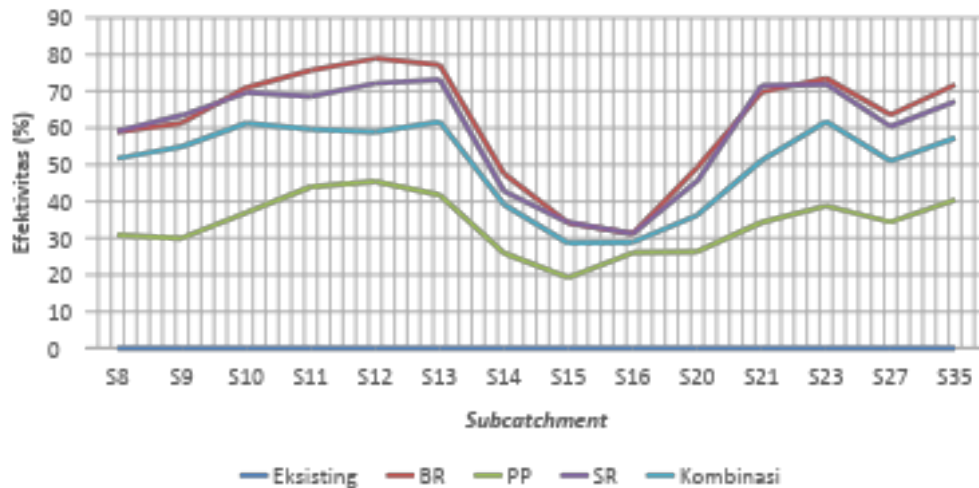
3.2 Pengaruh LID terhadap Limpasan Permukaan (*Runoff*)

Pola perubahan limpasan pada masing-masing *subcatchment* untuk kala ulang hujan 2 tahun dan 5 tahun disajikan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Secara umum, penerapan LID menghasilkan penurunan limpasan yang konsisten pada seluruh lokasi dibandingkan kondisi eksisting. *Bioretention* (BR) dan sumur resapan (SR) memberikan kontribusi paling signifikan, dengan tingkat reduksi masing-masing berkisar antara 31–86% dan 31–82%. Hal ini menunjukkan bahwa kedua sistem tersebut efektif dalam meningkatkan infiltrasi serta menahan aliran permukaan. Sebaliknya, *permeable pavement* (PP) menghasilkan reduksi yang lebih terbatas, yaitu sekitar 20% hingga 50%, yang mengindikasikan bahwa kapasitas infiltrasi permukaan berpori kurang optimal dalam menangani limpasan dengan volume besar. Sementara itu, kombinasi LID menghasilkan reduksi pada tingkat menengah, yaitu sekitar 29% hingga 69%, yang mencerminkan kontribusi gabungan dari masing-masing jenis LID. Perbandingan hasil reduksi *runoff* antar kala ulang menunjukkan bahwa efektivitas pada hujan 2 tahun cenderung lebih tinggi dibandingkan hujan 5 tahun, dengan selisih sekitar 5–10%. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan intensitas hujan dapat menurunkan efisiensi sistem dalam mereduksi limpasan. Fenomena tersebut sejalan dengan hasil penelitian Cai dan Lin (2024), yang menunjukkan tingkat reduksi sebesar 70% pada hujan intensitas rendah dan menurun hingga di bawah 50% pada intensitas yang lebih tinggi. Kondisi tersebut disebabkan oleh kemampuan infiltrasi media LID yang masih mencukupi untuk menangani hujan intensitas rendah. Namun, pada intensitas

tinggi, terjadi penurunan efektivitas karena laju infiltrasi media lebih kecil dibandingkan dengan intensitas hujan, yang mengakibatkan sistem menjadi lebih cepat jenuh.



Gambar 4. Reduksi *Runoff* pada Skenario LID Hujan Rencana Kala Ulang 2 Tahun



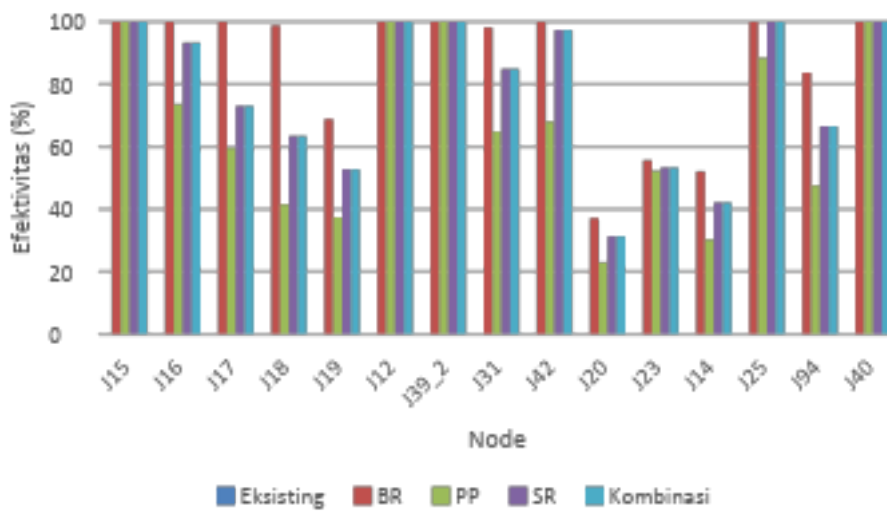
Gambar 5. Reduksi *Runoff* pada Skenario LID Hujan Rencana Kala Ulang 5 Tahun

Hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa studi terdahulu yang menunjukkan bahwa efektivitas LID dipengaruhi oleh jenis dan proporsi penerapannya. Penelitian oleh Garbanzos et al. (2022) menunjukkan bahwa penerapan *bioretention*, *permeable pavement*, dan *infiltration trench* masing-masing mampu mereduksi limpasan sebesar 43,1%, 31,2%, dan 16,7%, sedangkan kombinasi LID dapat mencapai hingga 91,8%. Sementara itu, penelitian oleh Naeini et al. (2024) dengan proporsi penerapan LID yang lebih kecil ($\pm 9\%$) menunjukkan tingkat reduksi yang lebih rendah, yaitu 15,8% untuk *bioretention*, 9,12% untuk *permeable pavement*, dan 18,1% untuk kombinasi LID. Studi lain oleh Winston et al. (2013) menunjukkan bahwa penerapan LID kombinasi dengan proporsi yang lebih besar (52–69%) dapat menghasilkan reduksi limpasan hingga 51%. Perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa efektivitas LID sangat dipengaruhi oleh proporsi penerapan serta karakteristik tata guna lahan pada wilayah studi.

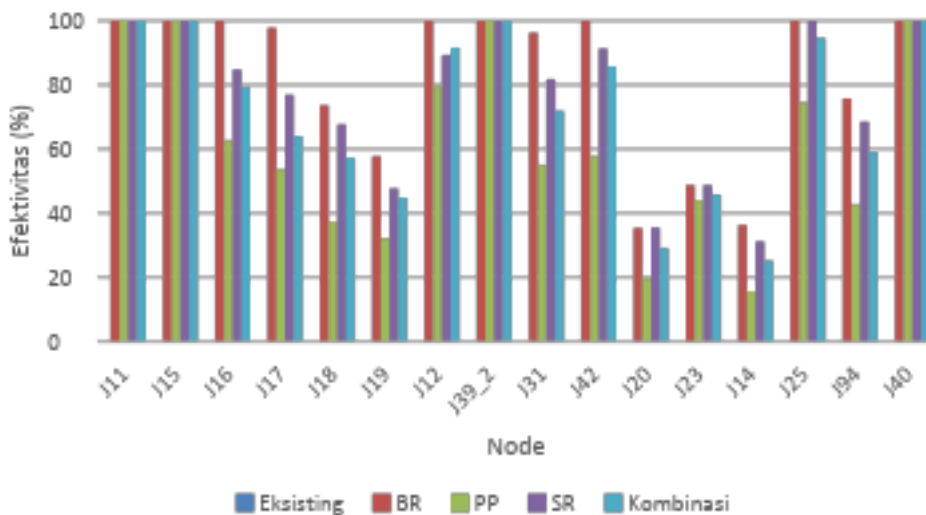
3.3 Pengaruh LID terhadap Genangan

Perubahan volume genangan pada setiap *node* akibat penerapan LID disajikan pada Gambar 6 dan Gambar 7 yang menunjukkan perubahan volume genangan pada setiap *node* akibat penerapan LID. Dibandingkan kondisi eksisting, seluruh skenario LID mampu menurunkan genangan secara signifikan pada sebagian besar *node*. *Bioretention* (BR) menjadi skenario yang paling dominan dalam mengurangi genangan, dengan tingkat reduksi yang pada banyak *node* mencapai hingga 100%, sehingga menghasilkan kondisi mendekati bebas genangan. Sumur resapan (SR) juga menunjukkan kinerja yang tinggi dengan kisaran reduksi antara 80% hingga 100%, terutama

pada *node* dengan kapasitas infiltrasi yang baik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem berbasis infiltrasi memiliki peran penting dalam mengurangi akumulasi air pada jaringan drainase. Sebaliknya, *permeable pavement* (PP) menunjukkan variasi kinerja yang cukup besar, yaitu sekitar 20% hingga 70%. Variasi ini mengindikasikan bahwa efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh kondisi lokal, seperti besarnya limpasan dan karakteristik permukaan. Sementara itu, kombinasi LID memberikan hasil yang lebih merata dengan kisaran reduksi sekitar 50% hingga 90%, meskipun tidak selalu menghasilkan nilai maksimum. Hasil penelitian ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa efektivitas LID dalam mengurangi genangan sangat dipengaruhi oleh jenis dan proporsi penerapannya. Penelitian oleh Al Amin et al. (2024) menunjukkan bahwa penerapan lima jenis LID, yaitu *bioretention cell*, *rain garden*, *permeable pavement*, *rain barrel*, dan *recharge well* dengan proporsi sekitar 9,81% mampu mereduksi genangan sebesar 30%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan proporsi dan pemilihan jenis LID yang tepat dapat memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap pengurangan genangan. Pada kondisi hujan dengan kala ulang 5 tahun, efektivitas reduksi genangan cenderung menurun dibandingkan kala ulang 2 tahun. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan debit limpasan menyebabkan sebagian sistem LID mencapai kapasitas maksimum, sehingga tidak mampu menampung aliran secara optimal.



Gambar 6. Reduksi Flooding pada Skenario Low Impact Development pada Hujan Rencana Kala Ulang 2 Tahun



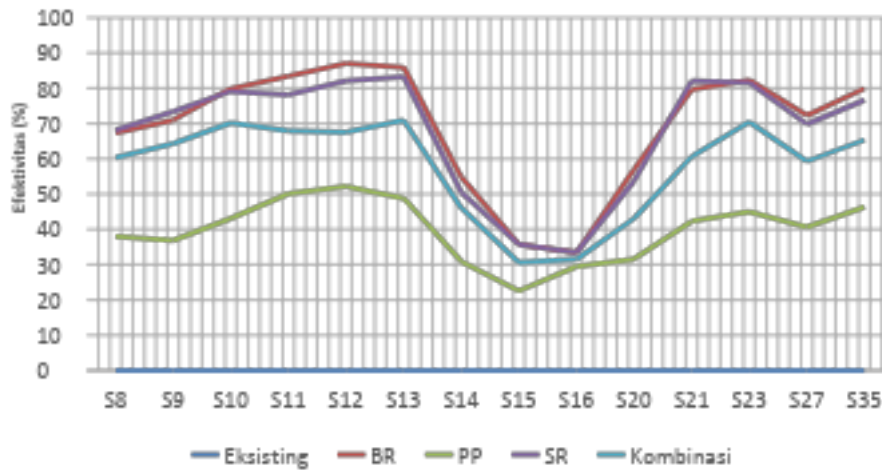
Gambar 7. Reduksi Flooding pada Skenario Low Impact Development pada Hujan Rencana Kala Ulang 5 Tahun

3.4 Pengaruh LID terhadap Kualitas Air (TSS)

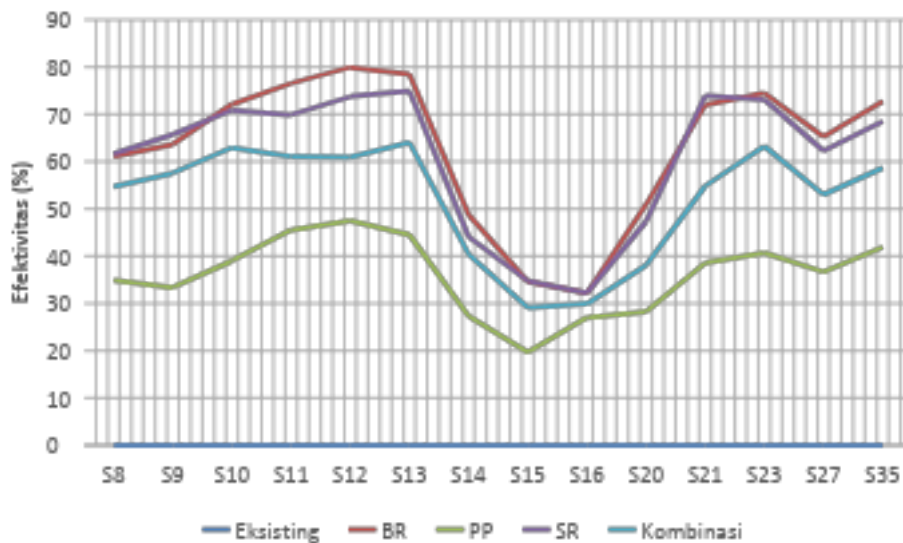
Dampak penerapan LID terhadap beban *Total Suspended Solids* (TSS) pada masing-masing *subcatchment* setelah penerapan LID ditampilkan pada Gambar 8 dan Gambar 9. Secara umum, seluruh skenario mampu meningkatkan kualitas air limpasan dibandingkan kondisi eksisting. *Bioretention* (BR) dan sumur resapan (SR) kembali

menunjukkan kinerja terbaik dengan tingkat reduksi masing-masing antara 32–87% dan 32–83%. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan media tanah dan lapisan filtrasi berperan penting dalam menyaring partikel tersuspensi. Sebaliknya, *permeable pavement* (PP) menunjukkan kemampuan yang lebih terbatas dengan kisaran reduksi sekitar 20% hingga 52%, yang menunjukkan bahwa mekanisme filtrasi pada sistem ini tidak seefektif media tanah pada *bioretention*. Sementara itu, kombinasi LID menghasilkan reduksi pada tingkat menengah, yaitu sekitar 29% hingga 71%, yang mencerminkan kontribusi gabungan dari berbagai mekanisme pengendalian polutan. Perbandingan antar kala ulang menunjukkan bahwa efisiensi penurunan TSS pada hujan 2 tahun lebih tinggi dibandingkan hujan 5 tahun, dengan selisih sekitar 5–15%. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan intensitas hujan dapat memperkuat proses pencucian polutan (*washoff*), sehingga mengurangi efektivitas sistem LID dalam menahan partikel tersuspensi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa efektivitas LID dalam mereduksi TSS sangat dipengaruhi oleh jenis dan proporsi penerapannya. Penelitian oleh Naeini et al. (2024) dengan proporsi LID yang relatif kecil ($\pm 9\%$) menunjukkan reduksi TSS sebesar 20,92% untuk *bioretention*, 12,85% untuk *permeable pavement*, dan 23,6% untuk kombinasi LID. Sementara itu, penelitian oleh Winston et al. (2013) menunjukkan bahwa penerapan kombinasi *bioretention* dan *permeable pavement* dengan proporsi yang lebih besar (52–69%) mampu mereduksi TSS hingga 91%. Perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan luas penerapan LID serta pemilihan jenis yang tepat dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap efektivitas pengurangan beban polutan.



Gambar 8. Reduksi TSS pada Skenario *Low Impact Development* pada Hujan Rencana Kala Ulang 2 Tahun



Gambar 9. Reduksi TSS pada Skenario *Low Impact Development* pada Hujan Rencana Kala Ulang 5 Tahun

3.5 Analisis Kinerja *Low Impact Development* (LID)

Hasil simulasi secara keseluruhan menunjukkan bahwa penerapan LID memberikan dampak positif terhadap kinerja sistem drainase, baik dari aspek kuantitas maupun kualitas air. Penurunan limpasan yang terjadi berkontribusi langsung terhadap berkurangnya volume genangan, sekaligus menurunkan beban polutan yang terbawa aliran. *Bioretention* dan sumur resapan dapat dikategorikan sebagai jenis LID yang paling efektif karena mampu mengombinasikan proses infiltrasi dan filtrasi secara optimal. Di sisi lain, *permeable pavement* memiliki keterbatasan dalam kapasitas infiltrasi, sehingga kinerjanya cenderung lebih rendah terutama pada kondisi hujan intensitas tinggi. Skenario kombinasi LID menunjukkan performa yang cukup stabil pada seluruh parameter, meskipun tidak menghasilkan nilai maksimum. Hal ini mengindikasikan bahwa integrasi beberapa jenis LID lebih mencerminkan kondisi implementasi di lapangan yang bersifat kompromi antara efektivitas dan keterbatasan ruang. Selain itu, terdapat keterkaitan yang jelas antara reduksi limpasan, genangan, dan TSS. Penurunan volume limpasan tidak hanya mengurangi beban sistem drainase, tetapi juga membatasi transportasi polutan. Namun demikian, peningkatan intensitas hujan pada kala ulang yang lebih besar tetap menjadi faktor pembatas utama dalam kinerja LID.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan menggunakan EPA SWMM, penerapan *Low Impact Development* (LID) terbukti mampu meningkatkan kinerja sistem drainase perkotaan baik dari aspek kapasitas jaringan maupun kualitas air. Penerapan LID menghasilkan penurunan limpasan permukaan sebesar 20–86%, reduksi genangan hingga mendekati 100% pada sebagian besar *node*, serta penurunan beban *Total Suspended Solids* (TSS) sebesar 20–87%. *Bioretention* dan sumur resapan menunjukkan kinerja paling optimal dalam mengurangi limpasan, genangan, dan TSS, yang dipengaruhi oleh kemampuan infiltrasi dan filtrasi yang lebih tinggi. Angka efektivitas reduksi pada *bioretention* dan sumu resapan masing-masing sebesar 31–87% dan 31–83%. Sebaliknya, *permeable pavement* memiliki efektivitas yang lebih rendah dengan kisaran reduksi sekitar 20–50%, terutama pada kondisi hujan dengan intensitas tinggi. Skenario kombinasi LID menghasilkan tingkat reduksi menengah, yaitu sekitar 29–71%, dan tidak selalu memberikan hasil terbaik dibandingkan skenario tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas LID dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing jenis serta distribusi penerapannya pada tiap *subcatchment*. Selain itu, hasil menunjukkan bahwa peningkatan intensitas hujan menyebabkan penurunan efektivitas LID, yang ditunjukkan oleh perbedaan kinerja antara kala ulang 2 tahun dan 5 tahun. Meskipun demikian, penerapan LID sebesar 20% dari luas area keadap pada masing-masing *subcatchment* tetap mampu memberikan peningkatan yang signifikan terhadap kinerja sistem drainase.

REFERENSI

- Al Amin, M.B., Sujono, J., dan Triatmadja, R. (2024). “Urban flood mitigation by implementing LIDs (Case study: Bendung watershed in Palembang city).” *Journal of the Civil Engineering Forum*, 10(1), 53–64.
- Budiarti, W., Gravitiani, E. dan Mujiyo (2018). “Analisis Aspek Biofisik dalam Penilaian Kerawanan Banjir di Sub DAS Samin Provinsi Jawa Tengah”. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 8(1), pp. 96–108.
- Cai, Q., dan Lin, J. (2024). “Analysis of Runoff Reduction Effects Under Different Rainfall Intensities.” Dalam *Hydraulic and Civil Engineering Technology IX*, Z. Wang et al. (Eds.). IOS Press. <https://doi.org/10.3233/ATDE241061>
- Dietz, M.E. (2007). “Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions.” *Water, Air, & Soil Pollution*, 186(1–4), 351–363.
- EPA, U., dan Center, L. (2000). “Low impact development (LID): A literature review.” Washington, DC, Environmental Protection Agency, Office of Water and Low Impact Development Center
- Gobel, P., Dierkes, C., dan Coldewey, W.G. (2007). “Storm water runoff concentration matrix for urban areas.” *Journal of Contaminant Hydrology*, 91(1–2), 26–42.
- Garbanzos, S., dan Maniquiz-Redillas, M. (2022). “Assessing the flow reduction of low impact development controls in a residential setting.” *Journal of Appropriate Technology*, 8(3), 144–152. <https://doi.org/10.37675/jat.2022.00213>
- Mawardi, I. (2016). *Kajian Pembentukan Kelembagaan Untuk Pengendalian Konversi dan Pengembangan Lahan, Peran dan Fungsinya*. *Jurnal Teknik*.
- Naeini, A.M., Tabesh, M., dan Soltaninia, S. (2024). “Modeling the effect of land use change to design a suitable low impact development (LID) system to control surface water pollutants.” *Journal of Cleaner Production*, 258, 120658.

- Pemerintah Kota Magelang. (2025). “Peraturan Daerah Kota Magelang Nomor 2 Tahun 2025 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Tahun 2025–2029.” Sekretariat Daerah Kota Magelang, Magelang.
- Pemerintah Provinsi Jawa Tengah. (2024). “Dataset Jenis Tanah Provinsi Jawa Tengah.” Portal Data Terbuka Provinsi Jawa Tengah. <https://data.jatengprov.go.id/>
- Rossmann, L.A., dan Huber, W.C. (2016). “Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality.” U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-16/093.
- Savitri, Y. R. (2017). “Penerapan Low Impact Development (LID) untuk meminimalisir genangan.” *Jurnal Hidroteknik*, 2(1), 35–42. <https://doi.org/10.12962/jh.v2i1.4400>
- Taghizadeh, S., Khani, S., dan Rajaei, T. (2021). “Hybrid SWMM and particle swarm optimization model for urban runoff water quality control by using green infrastructures (LID-BMPs).” *Urban Forestry & Urban Greening*, 60, 127032.
- Winston, R.J., Page, J.L., dan Hunt, W.F. (2013). “Catchment Scale Hydrologic and Water Quality Impacts of Residential Stormwater Street Retrofits in Wilmington, North Carolina.” *Low Impact Development 2011: Innovative Designs for Sustainable Stormwater Management*, 375–384.